

钢货架结构研究现状与关键技术

赵宪忠¹, 戴柳丝^{1,2}, 黄兆祺¹, 任 重^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘 要: 随着物流和电商行业的飞速发展, 钢货架结构从单纯提供货物存储功能的简单机械类产品逐步向高位立体库、库架合一式建筑发展, 这对货架结构的安全性提出更高要求。与传统钢框架结构相比, 钢货架结构的托盘荷载远大于结构自重, 竖向荷载活恒比值可达 10:1 量级; 主要竖向承重构件多采用连续开孔薄壁截面, 其性能受到局部屈曲、畸变屈曲、整体屈曲以及各屈曲模式间相互作用的影响; 梁柱节点和柱脚节点多为半刚性挂齿式机械连接, 表现出强非线性和捏拢滑移滞回特征; 竖向支撑体系对整体结构稳定性的影响机制和有效性。另外, 在地震作用下, 货架结构的破坏模式除了主要承重构件的破坏和整体结构的垮塌外, 还存在托盘荷载跌落导致的货物、结构破坏和人员伤害。在钢货架结构抗震分析中, 托盘货物的滑动和跌落应属于一种极限状态加以考虑, 托盘与横梁间的动力摩擦系数将成为评估结构性能的一个重要参数。结合国内外已有研究成果, 该文基于钢货架结构的特点, 评述了现有的研究方法, 综述了各基本结构要素的力学行为、整体结构的稳定性态及抗震性能, 探讨了研究中的关键问题。

关键词: 钢货架结构; 开孔薄壁截面; 直接强度法; 机械式连接节点; 稳定性; 结构抗震性能

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.ST12

REVIEW OF THE RESEARCH ON STEEL STORAGE RACK STRUCTURES

ZHAO Xian-zhong¹, DAI Liu-si^{1,2}, HUANG Zhao-qi¹, REN Chong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: With the rapid growth of logistics industry, steel storage racks are not just industrial products. They are commonly used in high-rise warehouses and clad racks. Therefore, the structural safety of storage racks is of vital importance. Steel storage racks are distinct from traditional moment resisting frames in the following aspects. Firstly, storage racks may carry extremely high live loads with comparatively light weight and reach up to 40 meters in height. Secondly, the uprights have open singly- or non-symmetric cross-sections and are continuously perforated along the length, the behavior of which is significantly influenced by local, distortional, global buckling and their interactions. Thirdly, the mechanical beam-to-upright connections and column bases are commonly utilized for their convenience in assembly and adjustment. Their nonlinear moment-rotation behavior and severely pinching characterization requires comprehensive investigations. Fourthly, the influences of the asymmetry configuration of the bracing system on the stability of the overall rack structure need to be carefully studied. Moreover, as for the aseismic behavior of rack structures, further investigations are required for the hysteretic behavior of beam-to-upright connections, the collapse mechanisms of the overall rack structures, and

收稿日期: 2018-10-12; 修改日期: 2019-05-05

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0701603)

通讯作者: 赵宪忠(1972—), 男, 吉林桦甸人, 教授, 博士, 土木工程学院院长, 主要从事钢结构教学与研究(E-mail: x.zhao@tongji.edu.cn)

作者简介: 戴柳丝(1989—), 女, 山西太原人, 讲师, 博士, 主要从事钢结构教学与研究(E-mail: liusidai@shu.edu.cn);

黄兆祺(1992—), 男, 山西太原人, 博士生, 主要从事钢结构研究(E-mail: huangzhaoqi@tongji.edu.cn);

任 重(1983—), 男, 浙江宁波人, 讲师, 博士, 主要从事钢结构教学与研究(E-mail: chongren@shu.edu.cn).

the sliding behavior between pallets and beams. It should be noted that besides usual local and global collapse mechanisms, the falling of pallets should also be considered as an additional serviceability limit state of rack structures. This paper reviews researches on the behavior of steel storage racks. A brief introduction of rack structures is provided, as well as the main research methodologies. The main research results on the static and dynamic behavior are then presented respectively. Finally, the key issues in studies of steel storage racks and the related research topics are proposed.

Key words: steel storage racks; cold-formed steel members with continuous perforations; direct strength method; mechanical connections; structural stability; seismic behavior

钢货架结构是冷弯薄壁型钢结构的重要应用之一,多用于仓库和短期或长期仓储系统中。近年来,随着物流和电商行业的迅猛发展,钢货架结构以每年 30% 的增速快速发展、且从单纯提供货物存储功能的简单机械类产品逐步向高位立体库、库架合一式建筑发展,这对货架结构的强度和稳定性提出了更高要求。为追求经济性、灵活性和实用性,钢货架结构形式变化多样,其构件主要由冷弯薄壁型钢制成,梁柱节点和柱脚节点多采用半刚性机械式连接。鉴于此,钢货架结构在可靠度目标、构件节点设计方法、整体性能分析等方面与一般钢框架结构不尽相同,其复杂的结构性能受到工程界和研究者的高度关注。

本文结合近十年来国内外针对钢货架结构的研究成果,对钢货架结构的特点和研究方法作了评述和总结,详述了各结构部件力学性能、整体结构稳定性和抗震性能的研究现状,讨论了货架结构研究中亟待解决的关键技术问题。

1 钢货架结构特点与分类

1.1 钢货架结构特点

现代化仓储要求钢货架结构能够快速拼装和拆卸,且在仓储过程中结构层高可随着货物种类及外部尺寸的改变而进行适当调整,以在有限高度范围内提高仓储密度。为满足上述仓储需求,在构造方面,钢货架结构主要有以下三个特点^[1-3]: 1) 立柱多采用开口冷弯薄壁复杂截面,并沿构件长度方向有连续开孔,立柱性能受到局部屈曲、畸变屈曲、整体屈曲以及各屈曲模式间相互作用的影响; 2) 梁柱节点和柱脚节点多采用半刚性机械式连接,表现出强非线性和捏拢滑移的滞回特征; 3) 支撑系统偏心非对称设置,使得结构易发生整体扭转。典型钢货架结构形式如图 1~图 5 所示。在受力特征和破坏模式方面,与传统钢框架结构相比,钢货架结构的

荷载远远大于结构自重,其活恒比值可达 10:1 量级;此外,钢货架结构构件、节点等各个结构要素非线性行为发生时序、发展程度及非同步变化对结构整体行为影响复杂;在地震作用下,货架结构的破坏模式除主要承重构件的破坏和整体结构的垮塌外,还存在托盘荷载跌落导致货物损失、人员伤害和结构的一系列破坏。另外,在工程应用中,因结构设计不合理而导致的钢货架结构垮塌事故也时有发生^[4-6]。

综上所述,钢货架结构由于其在荷载、构件、连接、体系等方面的独特性与复杂性,其结构稳定性与在地震作用或偶然冲击作用下的动力响应值得重点关注。

1.2 钢货架结构形式

钢货架结构可以分为组装式钢货架结构、整体式钢货架结构及库架合一式钢货架结构。我国钢货架结构设计规程 CECS23: 90^[7]中定义: 组装式钢货架是指组成货架的横梁与立柱间采用机械锁紧装置连接且与建筑物分离的可拆装货架; 整体式钢货架是指组成货架的结构构件均采用焊接或螺栓连接且与建筑物分离的固定式货架; 库架合一式货架是指货架兼作建筑物承重结构的货架。由于整体式钢货架结构作为传统钢结构设计,本节主要介绍五类常用的钢货架结构构造特征和受力特点,其中包括托盘式、驶入式、穿梭车式、悬臂式等组装式货架结构和库架合一式货架结构。

1.2.1 托盘式货架

托盘式货架结构主要由立柱、横梁、梁柱节点、柱脚节点和支撑组成。按照有无竖向支撑系统,又可将托盘式货架分为无支撑托盘式货架结构和带支撑托盘式货架结构,分别如图 1(a)和图 1(b)所示。在实际工程中,无支撑托盘式货架结构通常用于高度低于 12 m 的平库;带支撑托盘货架可用在高于 12 m 的货架结构中,并多用于高度大于 20 m 的自

动化立体库中。一般而言,托盘式货架结构分为沿巷道和垂直于巷道两个方向。无支撑托盘式货架结构属于半刚性钢框架结构,垂直于巷道方向的抗侧力主要由立柱组承担,立柱组由两根立柱和若干斜撑组成;沿巷道方向的抗侧刚度主要钢框架结构承担,因而梁柱节点和柱脚节点的转动刚度是无支撑托盘式货架结构稳定性的关键。对于带支撑托盘式货架结构,沿巷道方向的结构抗侧刚度主要由支撑系统提供,因而竖向支撑系统的有效性是分析结构整体稳定性态和抗震性能的关键。

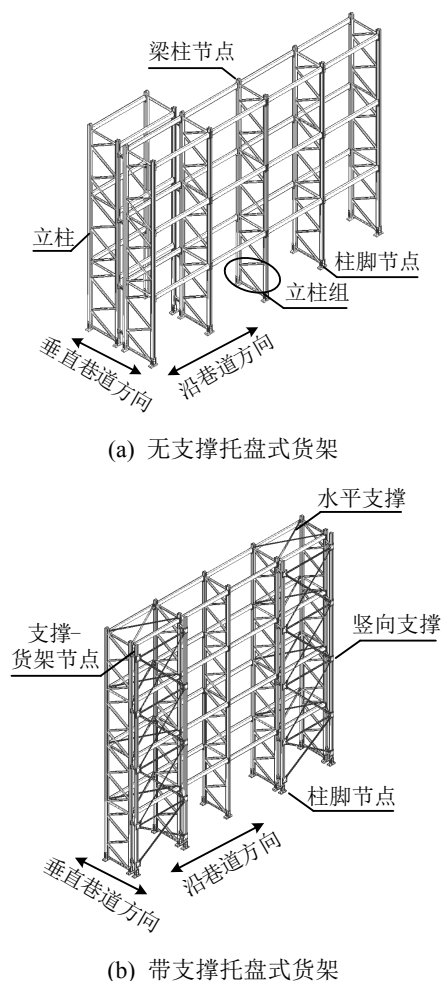


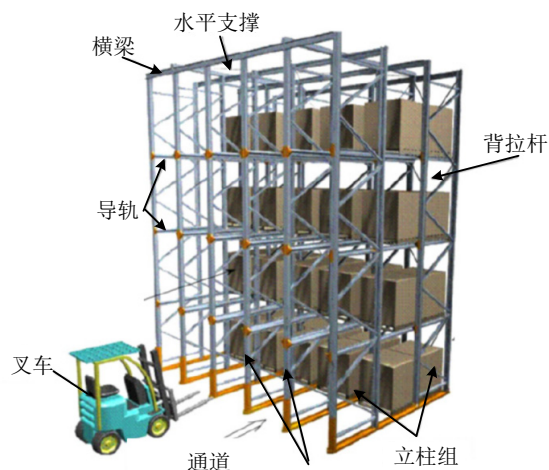
图1 托盘式货架

Fig.1 Steel storage pallet rack

1.2.2 驶入式货架

与托盘式货架相比,驶入式货架常用于存储单一货物,存储密度大,空间利用率高。图2是典型的驶入式货架结构。如图2所示,托盘货物通过叉车放置于导轨上,导轨与立柱牛腿相连;货物存取遵循“先进后出”的原则。驶入式货架结构主要由立柱、横梁、导轨、支撑和背拉杆组成,其沿巷道方向的稳定性由立柱组提供,垂直于巷道方向的稳

定性由结构顶部的水平支撑、结构后部的背拉杆、导轨梁与立柱连接节点及柱脚节点组成的抗侧力体系提后部的背拉杆、导轨梁与立柱连接节点及柱脚节点组成的抗侧力体系提供^[8]。

图2 驶入式货架^[8]Fig.2 Drive-in steel storage rack^[8]

1.2.3 穿梭车式货架

穿梭车式货架结构形式和传力机制与驶入式货架基本相同。但为了保证穿梭车可以在货架前后自由进出(如图3所示),满足“先进先出”和“先进后出”两种操作模式,提供垂直于巷道方向结构抗侧刚度的支撑一般只能设置在结构顶部,垂直于巷道方向的结构抗侧刚度主要由导轨梁与立柱连接节点提供。因此,此类货架结构的抗侧刚度较低,在实际设计和研究中应重点关注其稳定性。



图3 穿梭式货架

Fig.3 Drive-through steel storage rack

1.2.4 悬臂式货架

悬臂式货架结构主要由立柱、悬臂横梁、交叉支撑和柱脚节点组成,如图4所示。其中货物放置在悬臂横梁上,横梁一端自由,一端通过挂齿或者螺栓与立柱相连。悬臂式货架在沿巷道方向稳定性由交叉支撑提供,在垂直巷道方向稳定性主要由悬

臂柱提供。



图4 悬臂式货架

Fig.4 Cantilever steel storage rack

1.2.5 库架合一式货架

典型库架合一式货架结构如图5所示。库架合一式货架的主体结构与托盘式货架相似；不同之处在于仓库范围内全部钢货架结构顶部均与屋面桁架或屋面梁相连，钢货架兼作屋面围护体系的支承结构；位于仓库两端的钢货架兼作墙面围护体系的支承结构。因此，库架合一式货架结构应同时满足货架结构和房屋结构的设计要求。此时，货架结构将承担风荷载等水平荷载的作用。

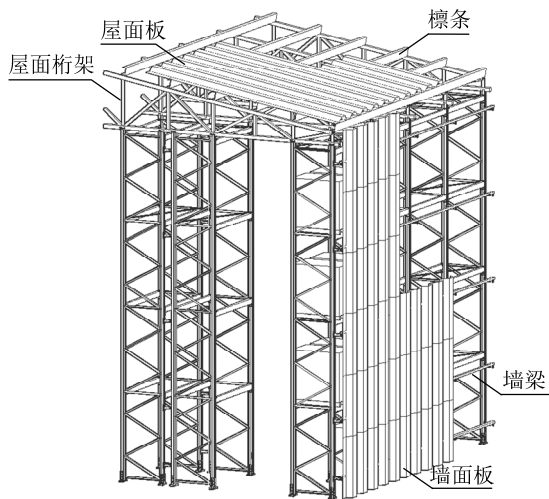


图5 库架合一式货架

Fig.5 Clad steel storage rack

2 钢货架结构研究方法

2.1 试验研究

钢货架结构由于其构造形式复杂多变，且具有连续开孔宽翼缘立柱、半刚性机械式连接节点和偏心支撑系统等特点，难以提出适用于货架结构设计的通用理论和数值分析方法。因此，现阶段各国主要的货架结构设计规范^[9-11](例如：澳大利亚货架设

计规范 AS 4084、美国货架设计规范 RMI 与欧洲货架设计规范 EN 15512 等)均建议采用试验方法获取立柱承载力、节点刚度和抗弯承载力等构件和节点的基本力学性能参数。同样，试验研究也是货架结构性能分析的重要手段之一。

以挂齿式节点性能研究为例，试验研究可获得最准确可靠的梁柱节点力学行为，包括节点变形特征和破坏模式、以及相关节点性能参数等。但是，试验成本昂贵且耗费大量时间，且其结果仅适用于构造形式、约束特性、边界条件与试验试件相匹配的节点设计。对于冷弯薄壁钢结构连接节点，试验结果还与试件安装的密合度、试验过程、数据采集和数据处理手段等因素密切相关。此外，很难通过试验来确定各变形组件对节点整体性能的影响。因此，试验对于研究节点性能是必要的，但为了简化货架结构设计流程、节约设计成本，应基于有限的试验结果建立适用于货架梁柱连接节点的简化数值分析方法和理论分析模型。

2.2 数值模拟

随着现代计算技术的发展，逐渐采用数值方法分析货架结构性能。目前数值模拟主要应用在构件、节点和整体结构分析中。在构件方面，采用有限元和有限条法分析连续开孔立柱的屈曲性能和构件承载力；在节点方面，将韧性金属材料断裂模型引入钢货架梁柱节点的数值模型中，辅以关键部件间接触关系设置，模拟节点全过程力学行为和可能发生的断裂破坏机制；在结构整体性能方面，多采用静力弹性分析来计算构件内力和结构变形，并可综合考虑各结构部件的性能尝试应用有限元软件进行整体结构非线性动力时程分析以准确模拟结构的地震响应。

2.3 理论分析

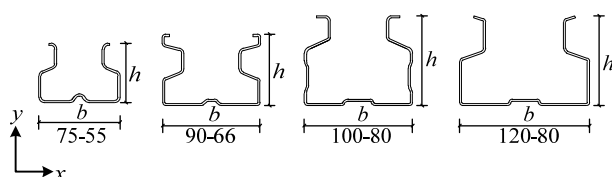
目前对货架结构的理论分析主要集中于：1) 立柱组剪切刚度理论分析；2) 挂齿式梁柱节点刚度、承载力和全过程性能分析；3) 整体结构的稳定性分析。基于立柱剪切刚度和压杆稳定理论，提出了立柱组理论设计公式。在构件方面，采用屈曲分析理论和基于经验的直接强度设计方法，提出连续开孔薄壁异型立柱的承载力计算公式；在节点方面，采用“组件法”思想，构建了钢货架结构挂齿式和锁螺栓梁柱连接节点的初始刚度理论模型并用于整体结构分析，从而确定节点的初始转动刚度。特别地，针对钢货架节点的特有组件“挂齿弯曲”，初

步提出了力-位移全过程关系曲线,奠定了将挂齿式梁柱节点的初始刚度理论模型拓延至模拟节点弯矩-转角全过程性能的基础。在整体结构方面,无支撑组装式钢货架结构与钢框架结构类似,通常可简化为沿巷道和垂直于巷道两个方向进行结构分析。沿巷道方向可看作一个半刚性钢框架结构,二阶效应的影响非常显著,基于此考虑结构整体初始缺陷、安装偏差、荷载偏心等因素,提出了精细程度不同的货架结构沿巷道方向的理论分析模型和相应的计算方法。

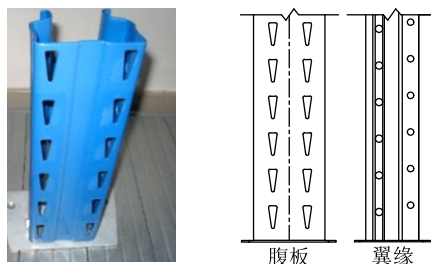
3 钢货架结构静力性能

3.1 立柱

货架立柱通常由冷弯薄壁型钢制成,大多为单轴对称、卷边及多加劲肋的复杂异型截面,且沿构件长度方向有均匀连续的开孔以便与其余构件相连,典型的立柱形式如图6所示。稳定性是冷弯薄壁型钢构件研究最重要的课题之一。对于图6所示的钢货架结构立柱而言,由于其截面多加劲,因此不易发生局部屈曲,但腹板对翼缘转动的约束能力有限,畸变屈曲多发生于此类构件中,且通常是分析单柱稳定的关键^[12-16]。货架立柱腹板和翼缘沿构件长度方向均匀连续的开孔对构件整体稳定性和承载能力均有显著影响,但目前尚未给出明确的影响机制^[17-18]。基于此,现阶段针对货架立柱性能研究主要集中于其稳定性(即局部屈曲、畸变屈曲、整体屈曲以及各屈曲间的相互作用)和连续开孔对立柱承载性能的影响机制。



(a) 典型截面形式



(b) 立柱典型开孔形式

图6 典型立柱形式

Fig.6 Typical configuration of uprights

由于货架立柱截面复杂多变,试验研究是获取立柱承载性能的主要方法。Kwon 和 Hancock^[13]通过无孔立柱轴压试验研究得出,立柱畸变屈曲后仍具有可观的屈曲后强度。Zhang 和 Alam^[14]采用数值模拟和试验研究了连续开孔钢货架短柱的轴压性能,提出了考虑构件初始缺陷的数值模拟方法以准确模拟立柱的承载性能。秦如^[15]和 Zhao 等^[16]对有孔和无孔货架立柱进行轴压试验研究,结果表明钢货架立柱的失稳模式多表现为畸变与整体屈曲的相互作用,并且连续开孔会一定程度上改变立柱的屈曲模态,进而影响其极限承载力。Kumar 和 Jayachandran^[19]、Talebian 等^[20]对钢货架立柱双向压弯性能进行了试验研究。

基于数值模拟的构件承载性能研究是冷弯薄壁型钢构件性能研究的必要手段。Moen 和 Schafer^[18,21]采用试验和有限条法研究开孔冷弯薄壁型钢构件的屈曲性能,获得构件屈曲半波长与临界荷载的关系曲线。然而,有限条法仅适用于弹性分析,多用于计算无孔冷弯薄壁型钢构件的屈曲临界荷载;若要计算构件的极限承载力或者分析孔洞对构件性能的影响,则需采用有限元方法进行弹塑性分析以综合考虑构件初始缺陷、材料和几何非线性等因素。Ren 等^[22]采用通用有限元方法研究了开孔钢货架立柱畸变与整体屈曲相互作用的失稳模式。

目前,针对冷弯薄壁型钢构件的设计方法主要为有效宽度法^[23-26]与直接强度法^[23-24,27]。其中,有效宽度法仅适用于局部开孔构件,而不适用于货架立柱这类截面形式复杂、有连续开孔构件的承载力计算^[28]。目前,将直接强度法拓延应用于货架立柱的设计中已成为各国学者的共识^[13,15-24,29-30],通用的直接强度法设计公式^[27]高估了开孔货架立柱在畸变屈曲、畸变-整体屈曲相互作用及整体屈曲下的承载力。秦如^[15]、Zhao 等^[16]和 Ren 等^[22]基于大量的立柱轴压试验及数值模拟结果,考虑连续开孔以及畸变和整体屈曲相互作用对立柱承载力的影响,对已有直接强度法畸变屈曲设计公式进行修正,提出了适用于连续开孔货架立柱稳定承载力的设计曲线,如图7所示。

3.2 立柱组

如图1所示,货架立柱组由两根单柱和若干支撑杆件构成,其平面外抗弯性能取决于货架单柱的稳定性(本文3.1节)和沿巷道方向的支撑情况,其平面内性能为托盘式货架结构垂直于巷道方向稳定性

的关键。虽然货架立柱组在形式上如同缀条式格构柱,但因支撑与立柱间特殊的连接方式、多种偏心的存在及螺栓松动等因素的影响(图 8),其平面内剪切刚度与几何缺陷等均与传统格构柱存在较大差异。因此,货架立柱组平面内剪切刚度与立柱组平面内整体稳定承载力受到国内外学者的广泛关注^[31]。

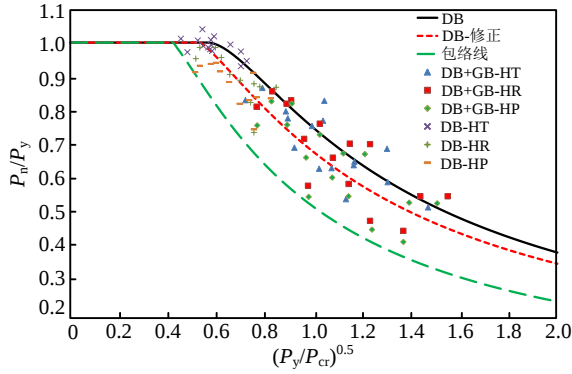


图 7 修正后的开孔钢货架立柱直接强度法设计曲线^[22]

Fig.7 Modified DSM distortional curve for rack column with continuous perforations^[22]

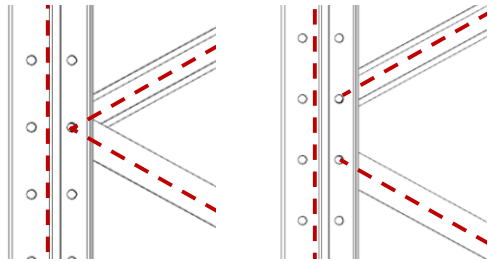
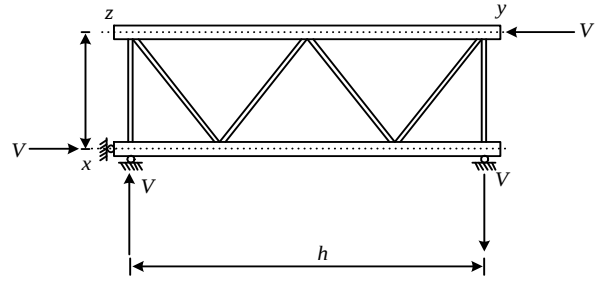


图 8 立柱组支撑杆件与立柱连接节点偏心构造

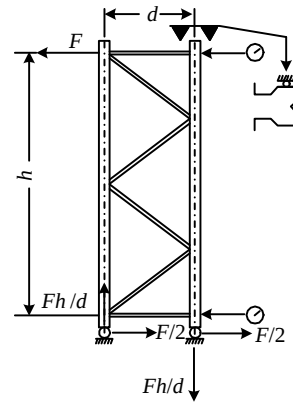
Fig.8 Eccentricity of diagonal bracing-to-upright connections of upright frames

现行的货架结构设计规范^[10-11],采用单肢验算法计算立柱组的面内整体稳定承载力,其中立柱组面内剪切刚度公式沿用了经典的 Timoshenko 剪切刚度理论公式,但同时又规定当剪切刚度无法准确把握时,应通过规范推荐的剪切试验方法予以确定。目前常用的货架立柱组剪切试验方法主要有纵向剪切试验法^[10-11]和横向剪切试验法^[11],如图 9 所示。其中,横向剪切试验法因更接近立柱组真实受力状态而被广泛采纳,但横向剪切试验法获得的立柱组刚度为剪切刚度与弯曲刚度的耦合^[32]。特别地,在立柱组剪切试验中应约束立柱平面外变形。货架立柱组面内剪切破坏通常表现为支撑杆件的失效,例如:受压杆件发生整体屈曲或受拉杆件两端螺栓节点破坏(螺栓剪断、螺栓孔壁撕裂等)^[31]。

通过一系列的试验研究和数值分析^[31-35]得出,影响货架立柱组剪切刚度的关键因素为立柱截面特征、支撑杆件截面特性^[34]、支撑杆件设置形式^[31]、



(a) 纵向剪切试验方案^[10]



(b) 横向剪切试验方案^[11]

图 9 立柱组剪切刚度试验方案

Fig.9 Test arrangements for measuring the shear stiffness of upright frames

支撑杆件连接节点性能^[32]。特别地,立柱组支撑杆件与立柱连接节点的偏心^[31,34]、螺栓本身弯曲变形^[34,36]、螺栓孔壁承压变形^[36]以及螺栓与螺孔间隙^[35]均会削弱立柱组剪切刚度。由于未考虑到货架立柱组的节点构造特征等因素,采用缀条式格构柱剪切刚度计算公式^[33]($S_D = EA_d \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \theta$ ^[33], S_D 为缀条式格构柱剪切刚度, E 为缀条弹性模量, A_d 为缀条横截面积, θ 为斜缀条与柱肢间夹角)得到的货架立柱组剪切刚度理论值远远大于试验值^[31-32,34-35]。鉴于此, Far 等^[36]将螺栓弯曲变形及孔壁承压变形作为立柱组支撑杆件轴向变形的一部分,建立螺栓弯曲变形及螺栓孔壁承压变形的刚度计算公式并在此基础上对斜缀条的轴向刚度进行折减,并用折减后的等效支撑杆件轴向刚度替代 Timoshenko 剪切刚度公式^[33]中的支撑轴向刚度(EA_d)。然而,如何从理论上将支撑杆件与立柱连接节点处的偏心、螺栓与螺孔间隙对立柱组剪切刚度的削弱作用合理引入到立柱组剪切刚度计算公式中仍有待进一步研究。

3.3 梁柱节点

货架梁柱节点多采用挂齿式机械连接^[37-38]

(图 10(a)), 横梁通过挂片端板上的挂齿卡入立柱开孔内, 为防止横梁因偶然向上作用而松脱, 在挂片端板上设置防松插销。近年来, 由于钢货架结构高度不断提升, 对结构稳定性提出了更高的要求, 实际钢货架结构中逐步采用新型梁柱节点, 例如锁螺栓梁柱节点^[39](图 10(b))。然而, 与普通钢结构的焊接和螺栓连接节点相比, 挂齿式连接节点在横梁和立柱间存在一定偏心、节点存在明显的初始松动、节点测试结果存在很大的离散性, 且不同的节点构造形式导致节点受力特性不对称。因此, 钢货架梁柱节点与普通钢结构节点有很大差异, 需要加以深入研究。

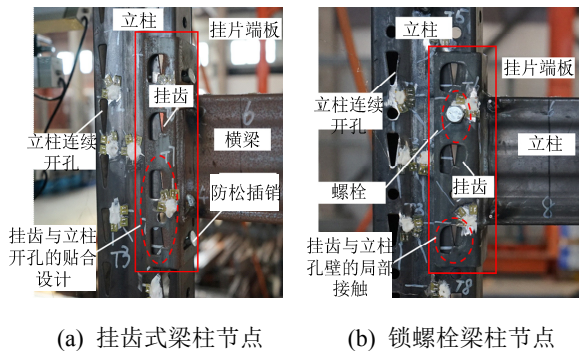


图 10 货架梁柱节点形式

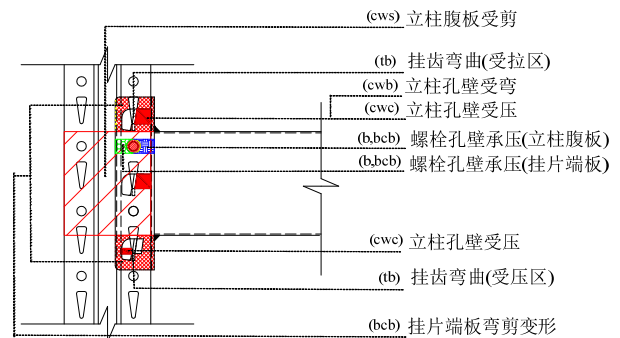
Fig.10 Steel storage rack beam-to-upright connections

由于钢货架梁柱节点构造形式复杂多变, 各国主要钢货架结构设计规范^[9-11]均建议采用试验方法获取节点刚度和弯矩承载力等基本力学性能参数, 试验方法主要有悬臂梁试验法和门架试验法。各国学者针对钢货架梁柱节点刚度、强度、延性和滞回特性等展开了一系列的试验研究^[40-55]。例如: Krawinkler 等^[43]采用悬臂试验法研究两种典型钢货架梁柱节点的非线性变形特征; Bajoria 和 Talikoti^[44]首次采用双悬臂试验法评估钢货架梁柱节点的抗弯性能; Markazi 等^[40]和 Prabha 等^[46]对钢货架梁柱节点进行了单调加载试验, 确定影响节点抗弯性能的关键几何参数; 赵宪忠、王拓和戴柳丝等^[50-55]采用悬臂试验法对具有不同几何尺寸的货架挂齿式和锁螺栓梁柱节点进行了一系列静力加载试验研究, 结果表明货架梁柱节点均属于半刚性部分强度节点, 具有较好的延性。

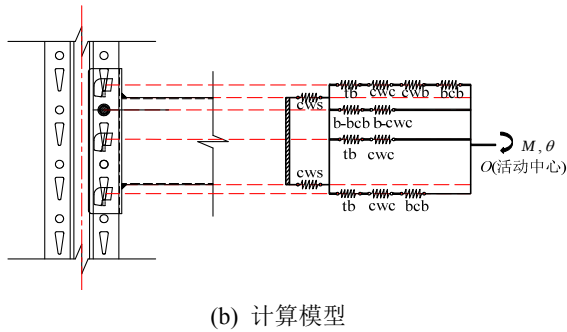
随着现代计算技术的发展, 逐渐采用数值方法来分析钢货架梁柱节点的连接性能^[45-46,49-52,56]。在数值模型中, 挂齿通常等效为非线性弹簧, 其特征参数通过节点试验数据校核后用于模型分析, 因而这种数值分析方法的适用性和准确性很大程度上

取决于校准试验。此外, 建模时还需考虑节点各组件之间复杂的接触关系。目前的数值模型能够较好地模拟节点极限荷载前非线性的变形特征, 但往往过高地估计了节点的抗弯承载力和延性^[56], 这主要是由于挂齿式梁柱节点多表现为挂齿开裂或立柱孔壁撕裂等与材料断裂相关的破坏模式, 而已建立的节点数值模型没有考虑材料的断裂特征。

针对钢货架梁柱节点的受力特性, 尚未建立系统的理论分析模型。组件法^[57]是最常用的节点性能分析方法, 用于计算节点的转动刚度、弯矩承载力和转动能力等。组件法将节点等效成多个变形组件的组合, 其分析步骤为: 首先, 依据节点的受力特征和传力机制, 确定对节点性能有贡献的基本组件, 建立理论模型(组件拆分); 然后, 分析各组件的变形特征, 建立计算公式(组件特性分析); 最后, 基于组件特性和节点模型, 计算节点性能参数(组件组装)。Ślęczka 和 Kozłowski^[58-59]首先尝试将组件法引入钢货架梁柱节点的分析中, 针对五种几何尺寸不同的梁柱节点, 建立理论模型, 确定其基本变形组件、提出各组件的性能计算公式、计算节点刚度和抗弯承载力。然而, 此力学模型过于复杂, 工程实用性不强, 且仅采用五组挂齿式梁柱节点的试验结果进行验证, 模型的适用性还有待商榷。戴柳丝、赵宪忠等^[53,60]基于“组件法”的思想, 建立货架梁柱节点初始刚度理论模型(图 11), 明确影响节点初始刚度的 6 个基本组件, 依次为: 挂齿弯曲、立柱孔壁受压、立柱孔壁受弯、挂片端板弯剪变形、立柱腹板受剪、螺栓孔壁承压(锁螺栓梁柱节点), 并给出各基本组件初始刚度计算方法。通过与节点试验结果对比来验证所提出的节点刚度理论模型的可靠性, 并基于该理论模型探究各基本组件对节点初始转动刚度的影响。然而, 货架梁柱节点各关键变形组件的本构关系还有待进一步研究, 以构建评估节点弯矩-转角全过程变形特性的理论分析模型。



(a) 基本变形组件

图 11 货架梁柱节点初始刚度理论模型^[53]Fig.11 Mechanical model for steel storage rack beam-to-upright connections^[53]

3.4 柱脚节点

常用的钢货架柱脚节点如图 12 所示, 立柱底部通过柱套(并用螺栓紧固)与基础相连, 其底部弯矩与剪力由柱套传递至基础; 货架柱脚锚栓布置灵活多变, 多取决于现场安装条件。依据锚栓的偏心程度可将柱脚节点分为锚栓偏心节点及锚栓无偏心节点(图 12)。货架柱脚节点研究重点在于确定其变形特征、转动刚度及其对整体结构抗侧刚度及稳定承载力的影响^[61-65]。

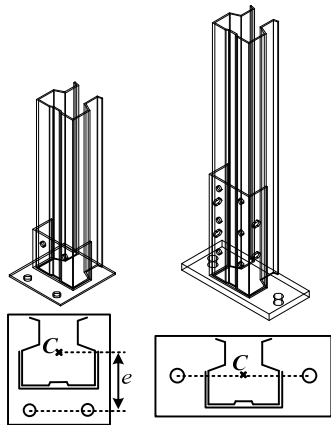
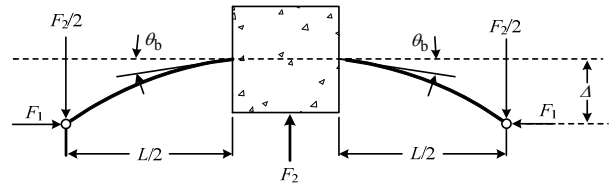
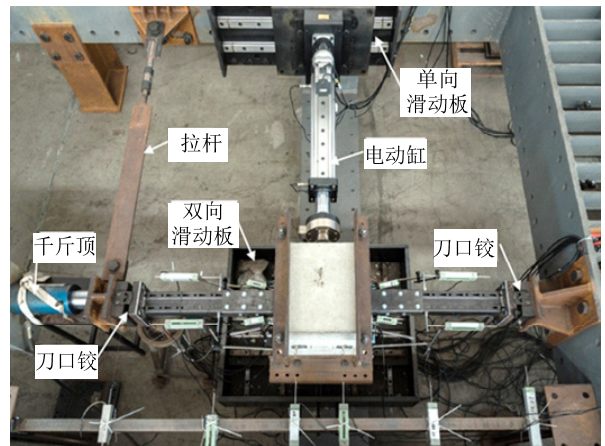


图 12 柱脚节点构造及底板锚栓位置

Fig.12 Base-plate connection and associated anchor bolt layout

货架结构设计规范 EN15512^[10]和 AS/NZS 4084^[11]提出两柱脚节点对称加载的加载方式(图 13(a))。此种加载方式的优点是可避免为保证轴力跟动而设计复杂试验装置, 缺点是加载后期通常因一侧节点破坏而导致混凝土块发生转动无法继续加载, 无法获得柱脚节点自弹性至破坏的全程力学性能。王越^[66]开发了适用于货架柱脚节点试验的三平面耦合滑动控制加载系统, 如图 13(b)所示, 用于测试货架柱脚节点全程力学行为, 包括变形特征、破坏模式和全过程弯矩-转角曲线。

货架柱脚节点的破坏模式多表现为底板弯曲破坏或锚栓拔出破坏, 且其受力机制与破坏模式与锚栓位置密切相关^[67]。对于锚栓偏心柱脚节点, 锚栓分布在立柱两翼缘之间, 锚栓距离立柱转动中心较近, 同时由于锚栓仅分布在立柱腹板一侧, 节点同时绕立柱强轴、弱轴发生转动, 易发生空间转动变形。对于锚栓无偏心柱脚节点, 锚栓分布在立柱两翼缘外侧, 锚栓距离立柱转动中心较远, 其抗弯机制与建筑钢结构中刚接柱脚类似; 节点在弯矩作用下仅围绕立柱发生转动、不易发生空间转动变形。

(a) 加载装置示意图^[10]

(b) 三平面耦合滑动控制加载系统

图 13 柱脚节点试验装置

Fig.13 Test arrangement of base-plate upright connection

货架柱脚节点弯矩-转角变形曲线呈高度非线性^[66-72], 试验和数值分析得出影响柱脚节点力学行为的关键因素为锚栓位置、锚栓规格、底板厚度、立柱厚度、柱套高度以及立柱轴力。其中, 锚栓位置与底板厚度是影响钢货架柱脚初始转动刚度及承载力的最重要因素^[67]。典型的锚栓无偏心柱脚节点的初始转动刚度和承载力远高于锚栓偏心柱脚^[67]; 货架柱脚节点抗弯性能(包括初始刚度和抗弯承载力)随着底板厚度和立柱轴力的增加而显著提高^[67-69], 但节点变形能力随着立柱轴力增大而降低^[70]。

组件法是对机械式货架柱脚连接节点初始转动刚度与承载力预测的有效途径^[61,71]。对于柱脚节

点初始刚度理论分析模型,基于试验结果和数值分析确定对柱脚节点转动变形具有贡献的组件包括立柱弯曲、柱套弯曲、底板弯曲及混凝土表面承压变形^[69]。其中,立柱弯曲变形^[69]与底板弯曲变形^[67]对钢货架柱脚节点初始转动刚度具有显著影响,而混凝土表面承压变形对节点初始转动刚度的影响与其他组件相比可忽略不计^[69];建立底板弯曲变形组件模型应重点考虑不同柱脚锚栓位置下底板不同的受力机制与变形特点^[67]。柱脚节点承载力理论分析模型的关键在于底板弯曲变形组件的受力特征。

3.5 结构整体稳定性态

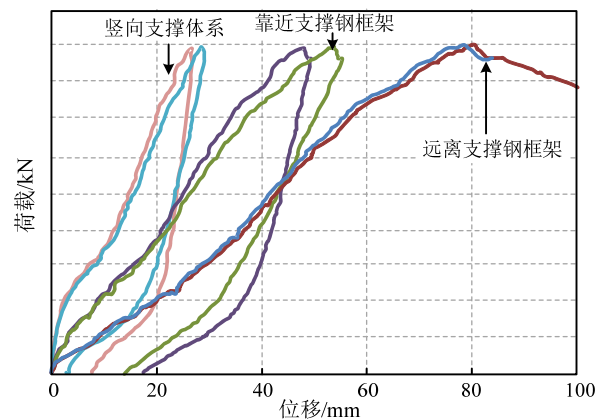
组装式钢货架结构的力学行为与钢框架结构大体相似,通常可以简化为沿巷道方向和垂直于巷道方向的平面结构进行整体分析,但其由连续开孔薄壁截面构件、半刚性机械连接式节点、偏心支撑系统组成,且承受超高活恒比,使得钢货架结构整体稳定性与传统框架结构存在显著不同。

托盘式货架结构垂直于巷道方向的稳定性主要取决于本文 3.2 节叙述的立柱组结构,沿巷道方向的稳定性主要取决于梁柱节点和柱脚节点的抗弯性能、以及支撑系统的有效性,由于货架节点均属于半刚性部分强度节点、且支撑系统存在显著偏心,因而整体结构沿巷道方向对二阶效应非常敏感。目前,针对货架结构整体稳定性已开展了一系列研究^[73-84],提出了货架结构沿巷道方向稳定性的简化设计方法^[9-11]。例如,Feng 等^[80]提出了考虑梁柱节点半刚性与立柱弯曲刚度的单柱模型用于托盘横梁式货架结构的屈曲分析;Godley 等^[74]、Beale 等^[76]将其扩展应用于无支撑托盘横梁式货架在水平和竖向荷载作用下的分析与计算,求解等效自由侧移柱的弯曲微分方程,同时考虑了梁柱节点特性、拼接立柱节点特性、二阶效应与框架初始缺陷等。基于上述研究,各国货架结构设计规范提出了适用于货架结构整体稳定性分析的两阶段设计方法(包括“有限长度法”和“假想荷载法”),即第一阶段进行结构的整体分析以确定内力及位移的分布;第二阶段进行单独构件设计保证其具有足够抗力,且在正常使用状态下不产生过大变形。近年来,Rasmussen 等^[85-87]、Cardoso 等^[88]证明了将直接设计法(Direct Design Method-DDM)用于货架结构设计而不用校核截面或构件承载力的可行性,即综合考虑货架结构存在的材料非线性、几何非线性、节点全程形态、构件缺陷、整体框架缺陷、残余应力等因素的货架结构整体性能的一阶段设计法,并将此方法引入澳洲货架结构设计规范 AS/NZS 4084^[11]中。

然而,目前针对有支撑托盘式货架结构沿巷道方向整体稳定性分析研究十分有限。如图 1(b)所示,带支撑货架虽然在结构体系上属于有支撑框架结构,但其竖向支撑体系单侧布置于梁柱平面外、且与被支撑货架之间存在偏心,使得带支撑钢货架结构在水平面内刚度分布不规则^[89]、结构易发生整体扭转。文献[90]对如图 14(a)所示的单层单跨、带水平交叉支撑及面外竖向支撑及的钢货架进行推覆试验得出,带支撑钢货架结构在受到沿巷道方向水平力作用时,其竖向支撑体系、靠近竖向支撑的钢框架、远离竖向支撑的钢框架的抗侧刚度依次降低,偏心竖向支撑体系的有效性有待商榷。此外,带支撑钢货架结构稳定性态除了与支撑体系本身抗侧刚度有关外,还与支撑-货架连接节点构造及其实际力学性态密切相关。因此,准确把握带支撑钢货架结构整体稳定性态的关键点之一是明确支撑体系连接节点的实际力学行为。



(a) 单层单跨带支撑钢货架结构试件^[50]



(b) 典型柱顶荷载-位移曲线

图 14 带支撑钢货架结构抗侧性态^[90]

Fig.14 Sway behavior of a braced rack^[90]

4 钢货架结构抗震性能

相较钢货架结构整体稳定性研究,结构动力性能研究相对较少,针对组装式钢货架结构的抗震设计方法尚不成熟。然而,由于设计或使用不当,结构在冲击或地震作用下可能发生倒塌破坏等严重安全事故,造成生命和财产重大损失。因此,自20世纪70年代以来,各国学者采用试验研究、理论分析和数值模拟等手段对钢货架结构整体动力性能进行分析研究。

4.1 试验研究

为了研究结构动力性能并为抗震设计提供试验依据,各国学者针对组装式钢货架结构进行了原位试验和足尺振动台试验。John等^[91]和Krawinkler等^[92]针对常用的组装式钢货架结构进行了原位试验,即在微小扰动或者环境振动下测试钢货架结构的自振频率、振型和阻尼等基本动力特性,试验结果表明,规范中给出的计算结构基本周期的经验公式不适用于钢货架结构;另外,罕遇地震下,考虑到“挂齿和立柱开孔处的摩擦”以及“托盘货物碰撞和滑移”等消耗大量能量,钢货架结构的阻尼比建议取为0.05^[91]。Chen等^[93]针对4种组装式钢货架结构进行了足尺振动台试验,分别为标准和背靠背托盘横梁式货架、驶入式和堆垛架,试验得出,除了驶入式货架在沿巷道方向第一层的斜腹杆发生了严重屈曲,其余钢货架结构在设计地震作用下都表现出良好的抗震性能。对于标准托盘横梁式货架,试验中虽未观察到明显的结构破坏,但由于地震作用下梁柱节点抗弯性能的退化,结构在沿巷道方向呈现较大的非弹性变形。Filiatrault等^[94-95]采用足尺振动台试验研究了具有4种螺栓梁柱节点和2种无螺栓梁柱节点的两跨三层组装式钢货架结构沿巷道方向的抗震性能,试验结果验证了梁柱节点转动刚度对结构沿巷道方向抗震性能的显著影响。近年来,欧洲开展了针对组装式钢货架结构抗震设计的研究项目SEISRACK^[90],其中包括对满载组装式钢货架结构的足尺振动台试验研究,结果表明,结构沿巷道方向的延性和耗能能力远好于垂直于巷道方向,试验所得的结构沿巷道方向性能系数 q 取值为2.8~3.7。Gilbert和Rasmussen^[96]采用足尺试验研究了驶入式货架结构在水平冲击荷载作用下的受力特征,给出了简化的极限状态设计方法。

近年来,基于静力推覆试验的组装式钢货架结构延性和耗能能力等抗震性能的研究逐步开

展^[90,97-99]。静力推覆试验中,首先在横梁上施加竖向荷载,再逐级施加水平荷载直至整体结构破坏,用以衡量结构在侧向荷载作用下的弹塑性变形特征,进而评估其抗震能力。基于现有的静力推覆试验结果,Kanyilmaz等^[97]将无支撑托盘横梁式钢货架结构的破坏机制分为整体延性破坏和薄弱层破坏等两类,并给出了柱脚节点设计准则以保证结构在地震作用下表现为延性破坏机制。另外,关于减小钢货架结构地震响应的隔震减震措施的研究也逐步开展^[90,100-101],足尺振动台试验研究结果验证了设置基底隔震或将货架倾斜放置可以有效防止货物滑落,减小结构在地震作用下的破坏。

4.2 理论分析和数值模拟

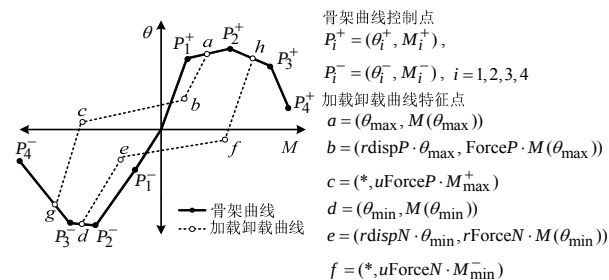
钢货架结构整体抗震分析可分解为沿巷道方向和垂直于巷道方向,其中沿巷道方向,货架结构的抗震性能主要受到梁柱连接节点和柱脚节点的影响;垂直于巷道方向,货架结构抗震性能主要与支撑的连接和布置相关。基于设计和研究水平的要求,建立精细化程度不同的数值和理论模型以研究钢货架结构整体动力性能。

第一类为“线弹性分析模型”,假定结构构件和节点均呈现线弹性变形特征。在结构动力特征计算方面,John等^[91]和Chen等^[93]建立钢货架结构弹性分析模型用以计算结构自振频率,其中将梁柱节点简化为线性转动弹簧;Bajoria等^[102]考虑梁柱节点半刚性特征建立了计算结构自振周期的理论分析模型。在结构地震响应计算方面,依据结构抗震设计规范^[103-105]采用振型分解反应谱法(Response Spectrum Analysis)计算钢货架结构的地震响应^[93,106-107],其主要难点在于结构性能系数(q)、阻尼比和满载率的确定。特别地,由于货架结构活载远远大于结构自重,在地震作用下货架结构承受的惯性力主要来源于托盘货物而非货架结构本身,因此托盘货物与货架结构相互作用关系(即托盘货物在钢货架上发生相对滑动,致使其惯性力仅部分通过摩擦力传递到钢货架结构)是货架结构抗震性能分析的关键点之一^[90,101]。

第二类为“非线性分析模型”,此类模型考虑不同程度的几何和材料非线性、节点和构件的非线性变形特征等。国内外学者采用非线性模型进行了静力推覆分析(例如:文献[90,108])和非线性时程分析(例如:文献[90,109])。Chen等^[93]对四种类型二维组装式钢货架结构进行非线性动力时程分析,其

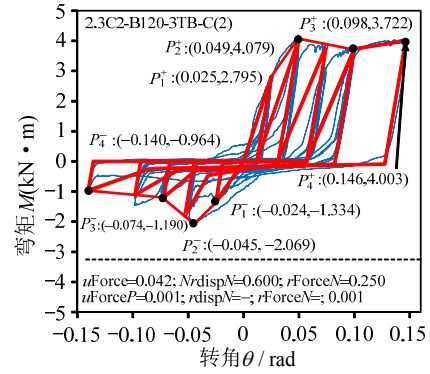
中考虑了几何非线性和梁柱节点的非线性变形特征。Filiatrault 和 Bachman^[110]提出了基于性能的钢货架结构抗震设计方法,性能指标依据现行的美国钢结构抗震规范,旨在防止钢货架结构在最大设计地震作用下沿巷道方向的倒塌,建立了考虑节点非线性的简化计算模型,并与振动台试验结果对比,证明了模型的准确性。然而,上述分析中均未考虑在往复荷载作用下节点的滞回特征。Castiglioni 等^[90]和 Degée 等^[109]采用有限元分析软件对典型钢货架结构进行了地震作用下的时程分析,其按照难度和复杂程度可分为三个层次,依次为: 1) 线性动力分析; 2) 几何非线性+节点线性转动弹簧+动力分析; 3) 材料非线性+几何非线性+节点滞回模型+动力分析(非线性弹塑性时程分析)。数值分析结果表明,线性动力分析可以准确地模拟地震作用下处于弹性状态的货架结构的地震响应;罕遇地震作用下,结构进入非弹性变形阶段,需进行非线性弹塑性时程分析。特别指出,准确的节点滞回模型和托盘滑动分析模型是货架结构地震响应分析的关键。Bernuzzi 和 Simoncelli^[111-112]提出了适用于组装式钢货架结构抗震设计的高等分析方法,并通过对比不同节点滞回模型结果得出,节点滞回性能显著影响结构的地震响应和抗震性能分析结果。基于 Pinching4 单轴滞回模型、梁柱节点滞回试验结果和初始刚度理论模型,戴柳丝、赵宪忠和 Rasmussen 等^[54-55]建立了适用于托盘式货架结构整体非线性分析的挂齿式和锁螺栓梁柱节点滞回模型,考虑了节点再加载刚度退化及滞回环严重捏拢滑移特征(图 15),并将其用于货架整体结构非线性动力时程分析中。

现阶段,基于足尺振动台试验研究成果,借助先进的有限元分析软件(例如: ABAQUS、ANSYS、OpenSees 等),逐步发展基于数值模拟的结构直接设计法(DDM-Direct Design Method)。由于组装式钢



注意: 此模型取自OpenSees中Pinching4单轴滞回模型,其中“*”的取值由卸载刚度和相对应的弯矩所确定。

(a) Pinching4 单轴滞回模型



(b) 典型货架节点滞回模型(粗线)与试验弯矩-转角曲线(细线)对比

图 15 货架梁柱节点滞回模型^[54-55]

Fig. 15 Hysteretic model for steel storage rack beam-to-upright connections^[54-55]

货架具有结构形式复杂多样、半刚性机械式连接节点、托盘滑动等特性,在进行非线性动力时程分析时需考虑材料非线性、几何非线性、节点全过程和滞回性能、托盘与货物相互作用等关键技术问题。

5 结论

(1) 钢货架结构可以看作一类由半刚性机械式节点连接的冷弯薄壁框架结构,但由于其连续开孔宽翼缘立柱、挂齿式连接节点、超大活恒载比值等特点导致整体结构的力学行为与传统钢框架结构显著不同,有必要进行系统深入的研究。

(2) 由于货架结构形式复杂多变,试验研究和理论分析是现阶段对货架结构构件、节点和结构单元性能研究的最主要手段;但随着数值分析技术发展,直接设计法(DDM)可以很大程度上简化货架结构设计,将是未来货架结构设计的发展方向。

(3) 本文指出了进行货架结构静力设计的关键技术,包括立柱屈曲性能和承载力计算、立柱组剪切刚度和面内整体稳定承载力计算、梁柱节点和柱脚节点自弹性至破坏的全程力学性能、整体结构稳定性态及相应的设计方法。

(4) 货架结构抗震性能研究从试验、理论和数值三个方面同时展开,应注意货架机械式连接节点捏拢滑移滞回性能和货物货架相互作用关系等关键问题。

(5) 综合考虑钢货架结构在构件、节点、受力状态和破坏模式等特点,建立准确模拟整体结构静动力性能的数值模型和简化分析方法,对把握货架结构本质特点和建立货架结构简化设计方法具有重要指导意义,亟待深入系统的研究。

参考文献:

- [1] Winter G, Peköz T. Cold-formed steel rack structures [C]// Proceedings of Second International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures. United States: University of Missouri-Rolla, 1973.
- [2] Yu W W. Cold-formed steel design [M]. John Wiley & Sons, Inc.; 2000.
- [3] Davies J M. Recent research advances in cold-formed steel structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 55(1): 267—288.
- [4] FEMA 460. Seismic considerations for steel storage racks located in areas accessible to the public [S]. Washington, D. C.: National Institute of Building Science, 2005.
- [5] Castiglioni C A. Seismic behavior of steel storage pallet racking systems [M]. First ed. Berlin, Germany, Springer International Publishing, 2016.
- [6] Affolter C, Piskoty G, Wulschleger L, et al. Collapse of a high storage rack [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(6): 1846—1855.
- [7] CECS 23:90, 钢货架结构设计规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1990.
CECS 23:90, The specification for design of steel storage racks [S]. Beijing: China Planning Press, 1990. (in Chinese)
- [8] Gilbert B P, Rasmussen K J R. Impact tests and parametric impact studies on drive-in steel storage racks [J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 1410—1422.
- [9] RMI, Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks [S]. Charlotte, U.S.A: Rack Manufacturers Institute, 2012.
- [10] EN 15512, Steel static storage systems-adjustable pallet racking systems—principles for structural design [S], European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2009.
- [11] AS/NZS 4084, Steel storage racking [S]. Standards Australia/Standards New Zealand, Sydney, Australia, 2012.
- [12] Hancock G J. Distortional buckling of steel storage rack columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1984, 111(12): 2770—2783.
- [13] Kwon Y B, Hancock G J. Tests of cold-formed channels with local and distortional buckling [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 118(7): 1786—1803.
- [14] Zhang P, Alam M S. Experimental investigation and numerical simulation of pallet-rack stub columns under compression load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 282—299.
- [15] 秦如. 钢货架结构开孔立柱承载力计算[D]. 上海: 同济大学, 2012.
Qin Ru. Method of calculating the ultimate load bearing capacity of perforated uprights used in steel storage racks [D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese)
- [16] Zhao X, Ren C, Qin R. An experimental investigation into perforated and non-perforated steel storage rack uprights [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 112: 159—172.
- [17] Pu Y, Godley M H R, Beale R G, et al. Prediction of ultimate capacity of perforated lipped channels [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(5): 510—514.
- [18] Moen C D, Schafer B W. Experiments on cold-formed steel columns with holes [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46: 1164—1182.
- [19] Kumar V V, Jayachandran S A. Experimental investigation and evaluation of Direct Strength Method on beam-column behavior of uprights [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 102: 165—179.
- [20] Talebian N, Gilbert B P, Cao H P, et al, Karampour H. Local and distortional biaxial bending capacities of cold-formed steel storage rack uprights [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2018, 144(6): 04018062.
- [21] Moen C D, Schafer B W. Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes [J]. Engineering Structures, 2009, 31(12): 2812—2824.
- [22] Ren C, Wang B, Zhao X. Numerical predictions of distortional-global buckling interaction of perforated rack uprights in compression [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 136: 292—301.
- [23] AISI S100. North American specification for the design of cold-formed steel structural members [S]. American Iron and Steel Institute, AISI S100-2007, AISI Standard; 2007.
- [24] AS/NZS4600, Cold-formed steel structures [S]. Australian/New Zealand Standard, AS/NZS 4600: 2005, Sydney, Australia, Standards Australia, 2005.
- [25] EN1993-1-3, Eurocode 3-design of steel structures-art 1-3: general rules supplementary rules for cold-formed members and sheeting [S]. Brussels: European Committee for Standardization, EN1993-1-3: 2006.
- [26] GB 50018—2002, 冷弯薄壁型钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
GB 50018—2002, Technical code of cold-formed thin-wall steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)
- [27] Schafer B W. Review: The direct strength method of cold-formed steel member design [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(7): 766—778.
- [28] Peköz T. Development of a unified approach to the design of cold formed steel members [R]. Rep. No. CF 87-1, American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 1986.
- [29] Elias G C, Henrique D A N L, Sarmanho A M C, et al. Ultimate load of steel storage systems uprights [J].

- Engineering Structures, 2018, 170: 53—62.
- [30] Almeida N L H D, Cunha S A M, Faria V O, et al. Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 176—193.
- [31] 吴晓风. 组装式货架立柱组平面内整体稳定承载力的研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- Wu Xiaofeng. Research on the in-plane stability of upright frames [D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese)
- [32] Gilbert B P, Rasmussen K J R, Baldassino N, et al. Determining the transverse shear stiffness of steel storage rack upright frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 107—116.
- [33] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of elastic stability [M]. Second Edition. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1961.
- [34] Sajja S R, Beale R G, Godley M H R. Shear stiffness of pallet rack upright frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(7): 867—874.
- [35] Godley M H R, Beale R G. Investigation of the effects of looseness of bracing components in the cross-aisle direction on the ultimate load-carrying capacity of pallet rack frames [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(7): 848—854.
- [36] Far H, Saleh A, Firouzianhaji A. A simplified method to determine shear stiffness of thin walled cold formed steel storage rack frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 799—805.
- [37] Shah S N R, Sulong N H R, Jumaat M Z, et al. State-of-the-art review on the design and performance of steel pallet rack connections [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 240—258.
- [38] 邢巍巍, 冯波, 阮杨捷, 等. 钢货架梁柱节点性能研究综述[J]. 江苏建筑, 2013(2): 48—52.
- Xing Weiwei, Feng Bo, Ruan Yangjie, et al. Research review of beam to column connections' performance in storage racks [J]. Jiangsu Construction, 2013(2): 48—52. (in Chinese)
- [39] 成博, 武振宇. 组装式钢货架螺栓连接梁柱节点试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 71—77.
- Cheng Bo, Wu Zhenyu. Experiment on bolted beam-to-column connections in assembled steel storage racks [J]. Journal of Architectural and Civil Engineering, 2013, 30(3): 71—77. (in Chinese)
- [40] Markazi F D, Beale R G, Godley M H R. Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors [J]. Thin-Walled Structures, 1997, 28(1): 57—87.
- [41] Harris E. Sway behaviour of high rise steel storage racks [D]. Sydney: University of Sydney, 2006.
- [42] Abdel-Jaber M, Beale R G, Godley M H R. A theoretical and experimental investigation of pallet rack structures under sway [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(1): 68—80.
- [43] Krawinkler H, Cofie N G, Astiz M A, et al. Experimental study on the seismic behavior of industrial storage racks [R]. Report No.41. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California, 1979.
- [44] Bajoria K M, Talikoti R S. Determination of flexibility of beam-to-column connectors used in thin walled cold-formed steel pallet racking systems [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(3): 372—380.
- [45] Sarawit A T, Pekoz T. Cold-formed steel frame and beam-column design [R]. Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute, Washington DC, USA, 2003.
- [46] Prabha P, Marimuthu V, Saravanan M, et al. Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(7): 863—872.
- [47] Baldassino N, Zandonini R. Design by testing of industrial racks [J]. Advanced Steel Construction, 2011, 7(1): 27—47.
- [48] Gilbert B P, Rasmussen K J R. Experimental test on steel storage rack components [J]. Research Report R-899, University of Sydney, Australia, 2009.
- [49] Shah S N R, Sulong N H R, Khan R, et al. Behaviour of industrial steel rack connections [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016: 70—71, 725—740.
- [50] Zhao X, Wang T, Chen Y, et al. Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99: 161—75.
- [51] 王拓. 钢货架结构挂齿式梁柱节点静力性能研究与敏感性分析[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- Wang Tuo. Static study and sensitivity analysis on tab-connected beam-to-upright connections of steel storage racks [D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)
- [52] 戴柳丝. 钢货架结构梁柱节点滞回性能研究及其对整体结构动力性能的影响[D]. 上海: 同济大学, 2018.
- Dai Liusi. The hysteretic behaviour of beam-to-upright connections and their role in predicting the structural response of steel storage racks under seismic action [D]. Shanghai: Tongji University, 2018. (in Chinese)
- [53] Dai L, Zhao X, Rasmussen K J R. Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 124: 202—217.
- [54] Zhao X, Dai L, Rasmussen K J R. Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 144: 81—105.
- [55] Dai L, Zhao X, Rasmussen K J R. Cyclic performance of steel storage rack beam-to-upright bolted connections [J].

- Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 28—48.
- [56] Markazi F D, Beale R G, Godley M H R. Numerical modelling of semi-rigid boltless connector [J]. Computers & Structures, 2001, 79(26/27/28): 2391—2402.
- [57] EN 1993-1-8. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-8: design of joints. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2005.
- [58] Ślęczka L, Kozłowski A. Experimental and theoretical investigations of pallet racks connections [J]. Advanced Steel Construction, 2007, 3(2): 607—627.
- [59] Ślęczka L, Kozłowski A. Design of beam-to-column joints in steel storage pallet racks by testing and by component method [J]. Archives of Civil Engineering, 2008, 54(1): 263—291.
- [60] Zhao X, Dai L, Wang T, et al. A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 269—281.
- [61] Godley M H R. The Behavior of storage racking baseplates [C]// Proceedings of Sixth International Conference on Steel & Aluminium Structures. United Kingdom: Oxford Brookes University, 2007.
- [62] Beale R G, Godley M H R. Problems arising with pallet rack semi-rigid baseplates [C]// Proceedings of First International Conference on Steel and Composite Structures. South Korea: Pusan, 2001.
- [63] Gilbert B P, Rasmussen K J R. Finite element modeling of steel drive-in rack structures [R]. Report No. R901. School of Civil Engineering, University of Sydney, Australia, 2009.
- [64] Petrone F, Higgins P S, Bissonnette N P, et al. The cross-aisle seismic performance of storage rack base connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 520—531.
- [65] Lau H H, Beale R G, Godley M H R. The influence of the column base connectivity on the stability of columns and frames [C]// Proceedings of Sixth International Conference on Steel & Aluminium Structures. United Kingdom: Oxford Brookes University, 2007.
- [66] 王越. 钢货架结构柱脚节点静力性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- Wang Yue. Research on static behaviour of base plates of steel storage racks [D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese)
- [67] Huang Z, Zhao X, Wang Y. Experimental investigations into base-plate upright connections of steel storage racks [C]// Proceedings of Eighth International Conference on Thin-Walled structures. Portugal: Lisbon, 2018.
- [68] Baldassino N, Zandonini R. Performance of base-plate connections of steel storage pallet racks [C]// Proceedings of Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures (CIMS2008), Gregory J. Hancock Symposium, Sydney, Australia, 2008.
- [69] Gilbert B P, Rasmussen K J R. Determination of the base plate stiffness and strength of steel storage racks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6): 1031—1041.
- [70] Godley M H R, Beale R G, Feng X. Rotational stiffnesses of semi-rigid baseplates [C]// Proceedings of Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, United States: University of Missouri-Rolla, 1998.
- [71] 武振宇, 成博. 组装式钢货架柱脚节点的受力性能研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(5): 513—520.
- Wu Zhenyu, Cheng Bo. Behaviors of column base connections in assembled steel storage racks [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2014, 31(5): 513—520. (in Chinese)
- [72] Firouziyanhaji A, Saleh A, Samali B. Non-linear finite element analysis of base plate connections used in industrial pallet racking structures [C]. Australasian Structural Engineering Conference(ASEC), Auckland, New Zealand, 2014.
- [73] Teh L H, Hancock G J, Clarke M J. Analysis and design of double-sided high-rise steel pallet rack frames. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7): 1011—1021.
- [74] Godley M H R, Beale R G, Feng X. Analysis and design of down-aisle pallet rack structures [J]. Computers & Structures, 2000, 77(4): 391—401.
- [75] Baldassino N, Bernuzzi C. Analysis and behaviour of steel storage pallet racks [J]. Thin-Walled Structures, 2000, 37(4): 277—304.
- [76] Beale R G, Godley M H R. Sway analysis of spliced pallet rack structures [J]. Computers & Structures, 2004, 82(23/24/25/26): 2145—2156.
- [77] Abdel-Jaber M S, Beale R G, Godley M H R. Numerical study on semi-rigid racking frames under sway [J]. Computers & Structures, 2005, 83(28/29/30): 2463—2475.
- [78] Lewis G M. Stability of rack structures [J]. Thin-walled Structures, 1991, 12(2): 163—174.
- [79] Lewis G M. Imperfection sensitivity of structures with semi-rigid joints [J]. Thin-walled Structures, 1997, 27(2): 187—201.
- [80] Feng X. The influence of semi-rigid connections on the behaviour of slender structures. PhD thesis [D]. Oxford: Oxford Brookes University, UK, 1994.
- [81] Sarawit A T, Pekoz T. Notional load method for industrial steel storage racks [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(12): 1280—1286.
- [82] Al Qarud F, Shatnawi A, Abdel-Jaber M S, et al. Influence of partial loading on the behavior of pallet rack structures [J]. Advanced Steel Construction, 2010, 6(1): 619—634.
- [83] Freitas A M S, Souza F T, Freitas M S R. Analysis and behavior of steel storage drive-in racks [J]. Thin-walled Structures, 2010, 48(2): 110—117.

- [84] Sangle K K, Bajoria K M, Talicotti R S. Elastic stability analysis of cold-formed pallet rack structures with semi-rigid connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 71: 245—262.
- [85] Rasmussen K J R, Gilbert B P. Analysis-based 2D design of steel storage racks [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2011, 11(5): 929—947.
- [86] Rasmussen K J R, Gilbert B P. Analysis-based design provisions for steel storage racks [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 139(5): 849—859.
- [87] Rasmussen K J R, Zhang H, Cardoso F S. On the next generation of design specifications for steel structures [C]// *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, 2016.
- [88] Cardoso F S, Rasmussen K J R. Finite element (FE) modelling of storage rack frames [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 126: 1—14.
- [89] EN 16681, Steel static storage systems-Adjustable pallet racking systems-Principles for seismic design [S]. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2016.
- [90] Castiglioni C A, Kanyilmaz A, Bernuzzi C, et al. Seisracks 2: Seismic behaviour of steel storage pallet racking systems [R]. European Commission Technical report, Directorate-General for Research EUR 27583 EN, 2014.
- [91] John A, Blume & Associates. Seismic investigation of steel industrial storage racks [R]. San Francisco, CA: Report prepared for the Rack Manufacturer's Institute, 1973.
- [92] Krawinkler H, Cofie N G, Astiz M A, et al. Experimental study on the seismic behavior of industrial storage racks [R]. Report No.41. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, California, 1979.
- [93] Chen C K. Seismic study on industrial steel storage racks [R]. National Science Foundation, URS/John A. Blume and Associate Engineers, 1980.
- [94] Filiatrault A, Higgins P S, Wanitkorkul A. Experimental stiffness and seismic response of pallet-type steel storage rack connectors [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2006, 11(3), 161—170.
- [95] Filiatrault A, Higgins P S, Wanitkorkul A, et al. Experimental stiffness of pallet-type steel storage rack teardrop connectors [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2007, 12(4): 210—215.
- [96] Gilbert B P, Rasmussen K J. Recent research on the design and behaviour of drive-in steel storage racking systems [J]. *Steel Construction*, 2011, 4(4): 232—241.
- [97] Kanyilmaz A, Brambilla G, Chiarelli G P, et al. Assessment of the seismic behaviour of braced steel storage racking systems by means of full scale push over tests [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 107: 138—155.
- [98] Kanyilmaz A, Castiglioni C A, Brambilla G, et al. Experimental assessment of the seismic behavior of unbraced steel storage pallet racks [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108: 391—405.
- [99] Bernuzzi C, Di Gioia A, Gabbianelli G, et al. Pushover analyses of hand-loaded steel storage shelving racks [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2017, 21(8): 1256—1282.
- [100] Filiatrault A, Higgins P S, Wanitkorkul A, et al. Experimental seismic response of base isolated pallet-type steel storage racks [J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(3): 617—639.
- [101] Sideris P, Filiatrault A, Leclerc M, et al. Experimental investigation on the seismic behavior of palletized merchandise in steel storage racks [J]. *Earthquake Spectra*, 2010, 26(1): 209—233.
- [102] Bajoria K M, Sangle K K, Talicotti R S. Modal analysis of cold-formed pallet rack structures with semi-rigid connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(3): 428—441.
- [103] EN 1998-1: 2004, Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance—part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings [S]. European Committee for Standardization, 2005.
- [104] ATC. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings [S]. ATC-3-06. Applied Technology Council, Redwood City, California, 1978: 45—53.
- [105] Code U B. UBC. 1997: Uniform building code [S]. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code, Whittier, California, 1997.
- [106] Yee R K, Chan D H. Structural behavior of storage rack under seismic ground motion [C]// *Proceedings of the 3rd Annual Disaster Resistant California Conference*. California, USA, 2003.
- [107] Bajoria K M, Sangle K K. Capacity based design of cold formed storage rack structures under seismic load for rigid and semi rigid connections [C]. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008: 12—17.
- [108] 李秋云. 钢货架结构整体抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.
- Li Qiuyun. Research on the seismic performance of steel storage rack structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)
- [109] Hervé Degée and Barbara Rossi. Geometrically nonlinear analysis of steel storage racks submitted to earthquake loading [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2011, 11(5): 949—967.
- [110] Filiatrault A, Bachman R E, Mahoney M G. Performance-based seismic design of pallet-type steel storage racks [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(1): 47—64.
- [111] Bernuzzi C, Simoncelli M. An advanced design procedure for the safe use of steel storage pallet racks in seismic zones [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 109: 73—87.
- [112] Bernuzzi C, Simoncelli M. Steel storage pallet racks in seismic zones: Advanced vs. standard design strategies [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 116: 291—306.

注: 该论文在第 27 届结构工程学术会议(2018 西安)应邀作特邀报告