



变截面门式刚架稳定及地震反应研究进展

高轩能, 黄文欢, 李 琨, 徐小波

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 262021)

摘要:变截面轻钢门式刚架为我国单层大跨度工业和仓储建筑的主要结构形式。本文简要回顾了国内外变截面轻钢门式刚架稳定和地震反应研究的概况,介绍了其稳定分析及稳定设计方法的新进展以及地震反应理论分析、实验研究和分析方法的新进展,指出了目前在稳定和动反应研究及工程应用中存在的问题。针对我国相关现行规范在变截面门式刚架稳定和抗震设计方面规定的不足和存在的缺陷,提出了在稳定、地震反应及极限承载能力的判定方法等方面的研究建议。

关键词:变截面门式刚架; 稳定分析; 地震反应; 设计方法; 极限承载力

中图分类号: TU392.5; TU311; U211.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)02-0193-08

Progress in Research on Stability and Seismic Response of the Steel Portal Frames with Tapered Members

GAO Xuan-neng, HUANG Wen-huan, LI Kun, XU Xiao-bo

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Fujian Quanzhou 362021, China)

Abstract: The light steel portal frames with tapered members have been the main structure form of single-story long-span industry and warehouse building in China. In this paper, the development of research on stability and seismic response of portal frame with tapered members at home and abroad is reviewed briefly, the progress in the research on theoretical analysis, experimental investigation, and design method for the stability and seismic response of the frame is introduced. Meanwhile the problems in these two aspects and its practical application are pointed out also. In allusion to the insufficiencies of stability and seismic design items in some specifications for these structures in China, some suggestions for the stability, the seismic response, and the ultimate bearing capacity judging method of this type of structure are presented.

Key words: Portal frames with tapered members; Stability analysis; Seismic response; Designing method; Ultimate bearing capacity

0 引言

变截面门式刚架建筑造型美观,结构轻巧,自重轻,受力合理,空间广阔,布置灵活,施工速度快和经济性好,在大跨度工业建筑、民用商业建筑和仓储建筑中应用广泛,已成为此类建筑的主要结构形式。

在地震作用下,钢结构房屋由于钢材的材质均匀,强度易于保证,结构的可靠性大。轻质高强的特点使钢结构房屋的自重轻,从而结构所受的地震作用减小,而良好的延性性能使钢结构具有很大的变形能

收稿日期:2007-10-29

基金项目:福建省科技计划重点项目(2006H0030);厦门市科技计划项目(3502Z20073036);福建省建设科技计划项目(闽建科05-22-17)

作者简介:高轩能(1962-),男,江西吉安人,博士,教授,主要从事钢结构及工程结构防灾研究。

力,即使在很大的变形下仍不致倒塌,从而可保证结构的抗震安全性。然而近年来变截面门式刚架的跨度和高度不断增大,同时刚架梁、柱构件的截面往往又做得薄而开展,以充分利用腹板的屈曲后承载能力,这必然对其整体承载性能造成不利影响。如果变截面门式刚架设计与制造安装不当,则其优良的材性将得不到充分的发挥,可能发生结构的失稳和材料的脆性破坏或连接破坏。但国内外对变截面门式刚架考虑结构整体与局部屈曲相关作用的稳定承载能力研究以及地震反应及其极限承载能力的研究不多,因此有必要对其稳定和地震反应研究在国内外的概况和新进展进行回顾与总结,探寻稳定和动反应研究及工程应用中存在的问题,并针对我国相关现行规范在变截面门式刚架稳定和抗震设计方面规定的不足和存在的缺陷提出建议和措施。

1 变截面门式刚架稳定研究进展

1.1 变截面结构的稳定性研究及分析方法

楔形变截面构件承载性能的理论研究始于欧拉和拉格朗日。欧拉从理论上研究了楔形柱,拉格朗日对变截面构件的研究主要侧重于结构形式的优化,但他们的研究主要在于数学和力学上的推导,无法直接应用于实际工程^[1]。最先从工程角度对楔形变截面构件进行研究的是 Timoshenko 和 Gere^[2],他们采用贝塞尔函数作为挠曲微分方程,求解得出了弹性屈曲临界荷载的计算公式。Föggel 和 Ketter^[3]对腹板高度呈线性变化的工字形和箱形截面的楔形构件的弹性屈曲强度问题进行了研究,给出了这两种变截面构件的弹性屈曲方程。Butler 和 Anderson^[4]进行了变截面悬臂构件的试验研究,发现变截面压弯构件的相关关系与翼缘和腹板的变化程度无关,同时还发现这种相关关系不受构件端部约束条件的影响,而是独立于构件的边界约束情况。Culver 和 Preg^[5]等先应用薄壁杆件理论建立两端受弯矩和轴力作用的变截面压弯构件的平衡微分方程,得出弯矩与轴力联合作用下的相关公式,然后用差分法求得楔形梁柱的弹性极限荷载。Prawel^[6]等对7种不同的工字形变截面构件进行了试验,这些构件与水平方向呈一小角度倾斜放置,大端固定,小端自由且承受一竖向荷载,从而形成压弯构件。由于轴向分力效应相对弯矩效应小很多,因此构件的破坏主要由弯矩引起。Boley^[7]讨论了解析法中试函数对于变截面梁求解结果的影响,提出了改进方法。Just^[8]则通过建立微元体的平衡方程,通过数

学推导得到组成总刚度矩阵的弯曲刚度矩阵和轴力刚度矩阵,使每根构件只取为一个单元就可以得到较为精确的解。对于楔形构件在阶梯轴向压力作用下的屈曲问题,John^[9]在 Gere 和 Carter^[10]的基础上分别研究了一端自由,一端固定;一端铰接,一端固定和两端铰接等3种情况的轴压荷载临界值,给出了每种情况下的特征方程和临界荷载曲线图,通过曲线图即可以判断出临界荷载的大小,从而可以方便地选定是采用变截面构件还是等截面构件,为结构的优化设计提供了一个途径。Salter^[11]等人则进行了8组试验,包括有侧向支撑和无侧向支撑,构件单独受弯或受压,试验结果分别与英国设计规范进行了比较,提出了设计建议。

国外学者对于变截面构件进行的广泛研究,为变截面结构在实际工程中应用提供了理论基础和实验依据,并一直持续不断^[12-14]。相比之下,我国对变截面构件及变截面门式刚架的研究比国外起步较晚,但近年的研究很活跃。我国对轻钢门式刚架结构承载性能的研究主要集中在以下几个方面:结构的整体工作性能;构件的稳定性能分析;腹板屈曲后强度的利用;结构的蒙皮效应;结构节点的连接性能和结构体系的研究等。

1954年蔡方荫^[15]对变截面构件进行了较深入的研究,利用力法方程通过积分得到变截面构件的载常数与形常数。1983年刘安清^[16]将解析法与有限元法相结合,取每一根杆为单元,利用导出的考虑轴向力的单元刚度矩阵,形成结构总体刚度矩阵,求出结构的临界荷载和各压杆的计算长度。1987年梁启智和曾令付^[17]分析了在任意荷载作用下不同类型的山形门式刚架的梁柱临界轴力及计算长度系数,得到了柱脚铰接和柱脚固定两种支座形式的山形门式刚架梁柱的计算长度系数随不同参数变化的一系列曲线。进入20世纪90年代后,我国在变截面构件及变截面门式刚架的静力承载性能方面的研究日趋活跃,内容涉及到变截面构件和结构弹、塑性稳定承载力计算的各个方面,包括分析方法、理论与试验研究、结构优化设计以及商业CAD程序开发等^[18-21]。例如,徐小波^[22]对楔形变截面轴压和压弯构件的平面内稳定承载力进行了全过程的参数分析,研究了楔率、腹板宽厚比等参数变化对变截面门式刚架相关屈曲性能和平面内稳定承载力的影响,研究结果与我国现行的《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:2003)^[23](下称“门刚规程”)进行了比较分析,指出我国规程设计结果在弹性状

态下偏保守而在弹塑性状态下偏不安全。王培军^[24]等采用有限元方法,对190个工字形截面构件的稳定临界荷载进行了分析,给出了稳定临界荷载随楔率的变化规律,同时还对门式刚架梁等阶梯形变截面构件的平面稳定问题进行了分析。杨娜^[25]应用改进后的有效宽度法,进行了变截面门式刚架结构考虑构件局部屈曲影响的极限承载力分析,探讨了腹板平均宽厚比、腹板楔率对结构极限承载力的影响。

在变截面构件和变截面门式刚架结构稳定性分析的方法方面,早期的研究通常从求解变系数微分方程出发,通过变量变换得到数值方法解。由于稳定方程 $EI(x)y'' - P_y = 0$ 为变系数微分方程,其解很复杂甚至不存在,一般只能通过数值方法得到其近似解。通常是通过变量代换将变系数微分方程转化为常系数微分方程后,再采用差分法、加权残值法或均值法等数值方法进行求解,但此方法求解的问题和适用性有限。此后数值法和解析法结合的能量法^[26-27]在求解变截面构件和变截面门式刚架结构的弹性稳定性方面发挥了独特作用,能量法解在屈曲特性分析及影响参数分析方面具有其他方法不可替代的意义,至今仍在应用。随着计算机和非线性技术的发展,有限元法已成为解决此类问题的通用数值方法^[28-29],为复杂问题的求解和多参数运算提供了强有力的手段。

在变截面构件和变截面门式刚架结构的极限承载力分析和设计方法方面,除采用传统的计算长度系数法外,考虑刚架二阶效应的整体稳定承载力分析方法也有应用。然而,尽管考虑刚架效应后可保证刚架的整体稳定性,但是逐一验算单根构件承载力的设计方法可能因个别最不利构件的稳定性或截面的强度要求就决定了整个刚架的承载力,显然其结果并不能真实地反映刚架的极限承载力,特别是考虑材料或结构变形的非线性时更是如此。迄今已发展了许多评判刚架极限承载力的方法,常用的分析方法主要有:塑性区法(Plastic - Zone Method)^[30]、准塑性铰法(quasi plastic hinge method)^[31]、塑性铰法(plastic hinge method)^[32]、精细化的弹塑性铰法(Refined Elastic - Plastic Hinge Method)^[33]、等效假想荷载塑性铰法(Equivalent Notional Load Plastic Hinge Method)^[34]和再折减切线模量法(Further - Reduced Tangent Modulus Method)^[35]等。

1.2 变截面门式刚架稳定研究及工程应用中存在的问题

(1) 对于变截面门式刚架结构来说,它是由各个构件组成的一个整体,结构的稳定性分析应当考虑其它构件的相互作用,这种相互作用在结构的稳定分析中体现为整体性问题。然而在目前的结构设计中,通常是将构件的局部稳定和整体稳定分开来考虑,即在控制构件的板件宽厚比的条件下,分别验算构件的局部稳定、整体稳定和结构的整体稳定。由于构件的截面是变化的,在利用腹板的屈曲后承载潜力达到节约钢材的目的时,却没有考虑局部屈曲对于结构平面内外整体承载能力的不利影响。

(2) 在计算刚架平面内的整体稳定时,无侧移变截面柱的计算长度系数无法用具有显式的解析解表达。但在当前的设计规程中又没有给出无侧移刚架的计算长度系数。这样在实际工程中遇到无侧移刚架时就无法进行设计。文献[36]的研究表明,柱的实际计算长度不仅与结构的约束条件有关,还与荷载条件有关。荷载作用方式不同刚架的稳定状况也就不同。

(3) 在实际工程中,作用在变截面门式刚架上的荷载往往并不是对称荷载,但在进行刚架的整体稳定计算中一般均按所有柱同时失稳考虑,这实际上是将荷载当作对称荷载来处理,这与刚架的实际受力不同。对于变截面门式刚架来说,非对称荷载作用下的整体稳定承载能力被低估。

(4) 实际工程中的刚架的受力形式是很复杂的,在这些复杂的荷载的共同作用下,将导致刚架在屈曲前已经产生弯曲变形,刚架梁、柱已存在弯矩,即刚架的平面内整体稳定是具有主弯矩作用的稳定问题。在一般刚架稳定分析中,认为主弯矩的影响可以忽略。而对于门式刚架,屋面横梁往往具有一定坡度,这使得横梁内轴力效应比一般刚架要大。当屋面的坡度以及梁柱的长细比较大时,主弯矩的影响不能忽略。

(5) 在变截面门式刚架的稳定设计计算方法中均未涉及刚架的弯扭屈曲。除非设置了为防止弯扭位移的支撑体系,否则在整体刚架的设计中需计算弯扭屈曲,要将解决二维平面刚架的稳定问题扩展到解决具有双向弯曲和扭转并互为藕联的更为复杂的三维空间刚架的弹塑性稳定问题。

(6) 在强度起控制作用时,可能导致刚架出现多处塑性铰截面,使结构的安全储备大为降低,特别是在利用腹板的屈曲后承载力的情况下更有高估结构极限承载力的危险。

2 变截面门式刚架地震反应研究进展

2.1 轻型门式刚架地震反应的研究现状

2.1.1 理论研究

进行结构的地震反应分析需要先设定材料的本构关系,建立结构刚度矩阵,并转化为柔度矩阵,再选择如底部剪力法、振型分解法或时程分析法等方法对结构进行地震反应分析。国内外对门式刚架结构在地震反应的理论分析中采用的材料模型、分析方法及研究对象都有所不同。本构关系模型能否较好地反映材料的真实性状关系到能否得到合理的解答。一般来说,定义 $E^* = E^*(x, y, z)$ 为材料的弹塑性切线模量,杆件截面上任意点的应力增量 $\Delta\sigma(x, y, z)$ 与应变增量 $\Delta\varepsilon(x, y, z)$ 之间的关系表达式则可表示为 $\Delta\sigma = E^* \Delta\varepsilon$ 。根据不同的应力-应变关系模型可以得出 E^* 的数学表达式。目前工程材料本构模型大体上可以分为:弹性模型、弹塑性模型、粘弹塑性模型和损伤模型等。变截面门式刚架地震反应分析通常采用理想塑性模型、理想刚塑性模型和双线性模型等。

结构对地震的动力响应特性的研究常用确定性的方法^[37]。由于地震实际上是随机变化的不确定作用,不少研究者也采用随机动力响应方法^[38]。在变截面门式刚架结构的动力响应特性研究方面,Karamanos^[39]对承受竖向荷载的单跨、双跨门式刚架在1981年 Alkyonides 地震波荷载作用下进行了分析,并与 Eurocode 8 进行了对比。兰东^[40]利用有限元方法直接对平面刚架结构进行离散后,假定地震的输入为平稳过渡白噪声,讨论其在水平和竖向地震作用下的随机动力响应问题,还分析了空间刚架结构的地震荷载随机动力响应,以及空间刚架对地震的响应,并通过算例分析研究地震作用组合工况对几种型式门式刚架轻型房屋钢结构的影响。章军^[41]按抗震规范^[42]的方法,用底部剪力法,通过算例分析,分别讨论了地震作用组合工况对单层门式刚架工业厂房、带吊车单层门式刚架工业厂房、带夹层的门式刚架工业厂房、四周为砖墙围护的单层门式刚架工业厂房等4种型式门式刚架轻型房屋钢结构变形的影响,探讨了门式刚架设计过程中地震作用的计算和抗震措施等问题。于洪^[43]利用计算机在求解变截面框架常数的基础上,用有限元的直接刚度法形成变截面框架结构刚度矩阵,再利用静力凝聚技术得到动力矩阵,由广义 Jacobi 法和规范振型分解反应谱法分别求解频率、振型和地震力。

徐贵章^[44]用有限元直接刚度法形成变截面刚架结构的刚度矩阵,并经静力缩聚得到结构的动力柔度矩阵,利用规范地震反应谱完成加腋梁柱门式刚架的振型、频率和变形计算。KWON 和 PARK^[45]根据已有平行阶形悬臂梁建立的数学模型和推导出的函数模拟简谐振动运动方程,利用 Hamilton 变分法则,采用符合实际情况的运动方程、连接边界条件和连续条件进行分析,将得到的包括各质点的振动模态、频率的确定解与通过有限元工具分析得到的解进行了分析比较。

对于楔形门式刚架构件非线性刚度矩阵的建立与求解,主要发展了以下方法:将变截面梁分成数段的等截面构件法^[8];改变变截面构件微分方程系数得到封闭解的解析法^[46];采用3次多项式函数建立变截面刚度方程法^[47];直接积分法^[26,48];有限微分替代法^[49];贝塞尔函数法^[7,50];边界积分法^[51];多项式组法^[52-53];虚位移法^[54];弯曲刚度转换法^[55];改进的拉格朗日法^[56]等。Li GQ^[57]推导了同时考虑轴力和剪切变形影响的变截面 Timoshenko-Euler 梁的弹性单元刚度矩阵,采用 Chebychev 多项式对变截面钢刚架的承载力、稳定和振动性能进行了分析。Kim SE 和 Kim NI^[58]等则用三维稳定函数考虑轴向和剪切变形的刚度矩阵法来分析刚架弹塑性几何非线性性能。

2.1.2 试验研究

Hwang^[59]对柱脚铰接的等截面门式刚架(两榀刚架用纵向支撑连接)采用1985年智利、1987年 Edgumbe 地震波和平稳过渡白噪声输入,进行不同地震强度的振动台模拟地震反应分析。试验表明过大的柱顶位移是引起门式刚架破坏的主要原因。此后 Hwang^[60]对斜梁坡度为1/3的柱脚铰接,1:5缩模尺寸变截面门式刚架模型进行了不同强度的 El-Centro 地震波振动台模拟试验,分析了结构的动力特性、应力分布,得出梁的侧向屈曲是导致结构的破坏的主要原因的结论。

2.2 我国相关规范的抗震设计规定

按照我国现行建筑抗震设计规范^[42]的规定,我国钢结构的抗震设计采用两阶段设计法。第1阶段为多遇地震作用下的弹性分析,验算构件的承载力和稳定以及结构的层间位移,可根据不同条件采用以下方法:高度不超过60m的建筑,且平面和竖向布置较规则的结构,可采用底部剪力法;高度超过60m的建筑,应采用振型分解反应谱法;竖向特别不规则的建筑以及甲类和乙类建筑,宜采用时程分

析法作补充计算。第2阶段为罕遇地震作用下的弹塑性分析,验算结构的层间侧移和层间侧移延性比。

对于门式钢刚架的抗震设计,文献[23]中相关基本设计规定为(为方便查阅引用原规程编号):

第3.1.4条:在抗震设防地区,门式刚架轻型房屋钢结构应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011进行抗震验算,并符合下列要求: $S_E \leq R/\gamma_{RE}$, S_E 为考虑多遇地震作用时,荷载和地震作用效应组合的设计值; R 为结构构件承载力的设计值; γ_{RE} 为承载力抗震调整系数,应按下表1采用。当地震作用效应组合控制设计时,尚应针对轻型钢结构的特点采取相应的抗震构造措施。

表1 承载力抗震调整系数

构件或连接	梁、柱	支撑	节点板件	螺栓	焊缝
γ_{RE}	0.75	0.80	0.85	0.85	0.90

第3.1.6条:门式刚架轻型房屋钢结构的地震作用效应可采用底部剪力法分析确定。抗震验算时,结构的阻尼比可取0.05。

相应的条文说明为:

3.1.4条说明:由于单层门式刚架轻型房屋钢结构的自重较小,设计经验表明,当抗震设防烈度为7度时,一般不需做抗震验算;当为8度及以上时,横向刚架和纵向框架均需做抗震验算。当设有多于一层并与门式刚架相连接的附属建筑时,应进行抗震验算。3.1.6条说明:门式刚架轻型房屋钢结构符合高度不大于40 m、以剪切变形为主和近似于单质点结构等条件,根据《建筑抗震设计规范》第5.1.2条,可以采用底部剪力法计算。根据该规范第8.2.2条的条文说明,单层钢结构房屋的阻尼比取0.05。

2.3 存在的主要问题

2.3.1 试验研究开展不够

现有的试验研究对象不具有代表性:(1)试验的模型跨度很小,坡度是1/3。而目前门式刚架的跨度一般为30 m以上,坡度为1/10左右。(2)试验模型门式刚架的斜梁高度只改变1次,与实际工程不符。为充分利用材料,符合结构受力特点,工程中变截面门式刚架的斜梁一般为两次变截面。(3)所进行的试验研究结论不一致。等截面门式刚架试验的破坏是由于柱顶横向位移过大引起的,而变截面门式刚架试验得出的结论是,破坏是由于侧向屈曲引起的。在实际工程中难以借鉴现有试验结果。

2.3.2 理论研究需要深化

(1)材料本构关系模型不能真实反映结构在强

震作用下的变形。已进行的门式刚架地震反应研究都是采用弹性模型,这只能分析较小地震时结构在弹性范围内的变形。而门式刚架在强震下的变形、屈曲和破坏与合理的本构关系有直接关系。钢结构研究中应力-应变关系模型应采用具有屈服平台的三线型模型,它考虑了材料的强化和包辛格效应,能够真实反应门式刚架地震反应中的结构反应。

(2)研究内容和对象不够全面。结构地震作用的整体性能主要表现在两个方面:一是结构的变形特点、自振周期和地震反应;二是结构中的内力分布、屈曲模式和破坏机理。目前的研究大多集中在门式刚架在多遇或设防烈度地震下结构处于弹性范围内的自振周期、频率和层间位移等地震反应方面。而在罕遇地震作用下,地面运动加速度峰值一般是多遇地震的6~10倍左右。所以在多遇地震烈度下处于弹性阶段的结构在罕遇地震烈度下可能进入弹塑性阶段,即结构材料达到屈服,此时结构已无强度储备。为了抵抗持续的地震作用,要求结构具有较好的延性,使结构能够通过反复塑性变形来消耗地震输入的能量。若结构的变形能力不足,势必会由于薄弱部位弹塑性变形过大(或屈曲)而致结构失效甚至坍塌。目前所进行的研究均未考虑门式刚架在荷载组合作用下的地震反应,与结构实际工作情况不符,也还没有对变截面门式刚架在不同地震烈度下,从弹性变形、塑性变形到屈曲的整个过程的地震反应分析。

(3)需考虑影响结构地震反应的主要因素。结构抵抗强烈地震,主要取决于其吸能和耗能能力,这种能力依靠结构或构件在预定部位产生塑性铰,即结构可承受反复塑性变形不倒塌,仍具有一定承载能力。除强度、刚度要求外,地震区结构要有良好的抵抗塑性变形的能力;即延性要求。这样通过结构的塑性变形来吸收和消耗地震输入能量,有利于抗御倒塌破坏,提高抗震潜力。截面宽厚比(高宽比)会直接影响门刚的延性、地震反应及破坏模式。地震的往复循环作用会使 $P-\Delta$ 力矩的倾覆效应加剧,翼缘局部屈曲行为对构件的整体性能影响程度差别很大。因此,循环拉压的轴力构件板件宽厚比限值应比塑性设计的框架构件更为严格,因为宽厚比小者出现局部屈曲较晚,承载力维持在较高的水平。另外,结构的高跨比、构件的长细比等因素也会产生影响。

(4)刚度矩阵未能考虑轴向和剪切变形的影响。目前采用的变截面梁单元非线性刚度矩阵,对

门式刚架的非线性性能分析都是静力荷载的情况。而在门式刚架的地震反应分析中仅仅采用直接刚度法进行分析。由于变截面门式刚架构件在地震和静力荷载组合作用下的轴向、剪切变形对结构的整体承载性能、屈曲模态、破坏模式的影响不容忽视。故宜采用考虑轴向、剪切变形的变截面非线性刚度矩阵进行分析。

2.3.3 我国设计规范条文中存在的问题

“门刚规程”^[23]关于门式刚架的抗震设计在第3.2.4条中明确规定:“地震作用应按现行国家标准《抗震设计规范》GB 50011—2001^[42]的规定计算”。而“抗震规范”考虑到轻型房屋钢结构的特点,在第9.2.1条中指出,一般单层厂房钢结构的抗震规定“不适用于单层轻型钢结构厂房”。对轻型房屋钢结构,当由地震作用效应组合控制设计时,尚应针对轻型钢结构的特点采取相应的抗震构造措施。

“抗震规范”和“门刚规程”对在地震作用下轻型门式刚架的计算要点、抗震构造措施等都无规定,对较大跨度门式刚架结构设计的抗震要求,柱的长细比等未作说明。这给实际工程设计带来了很大的不便,使工程设计人员在设计中无法具体考虑地震作用。

综上所述,已有的研究中,或是采用的材料本构关系为简单的弹性模型,或分析的对象是低、多层刚架而非门式刚架,或只分析在地震设防烈度时门式刚架的频率、振型和层间侧移等地震反应。尚未有采用较符合实际的三线性弹塑性本构模型和能反映结构地震响应随时间变化的全过程的时程分析法,来对变截面门式刚架在多遇、设防烈度下的地震反应及罕遇地震作用时的破坏机理进行研究。此外,门式刚架的跨度、高度、高跨比、构件的长细比以及不同荷载组合等因素,对变截面门式刚架抗震性能都有直接的影响,但各因素的影响程度及何者起控制作用,都尚有待进行深入研究。

3 结语

轻钢变截面门式刚架的应用愈来愈广,结构的跨度愈来愈大。如上所述,尽管已对其稳定承载能力和地震动力响应做了不少研究,但因影响变截面门式刚架力学行为的因素很多,现有研究已不能适应工程需要,设计方法尚待完善。因此在变截面门式刚架的稳定性能、地震响应特性和极限承载力的评判等诸方面尚有许多课题需要研究。

综合考虑构件的初始缺陷、弹塑性变形能力、局

部屈曲、屈曲后强度、空间结构的蒙皮效应等,对变截面门式刚架进行极限承载能力分析和试验研究,提出评判刚架结构极限承载力的简单而实用的公式,使之能指导设计,将具有很好的理论与实用意义。例如,将数值分析方法和简化公式的近似方法结合起来,进行变截面门式刚架结构考虑局部屈曲影响的极限承载力分析,将比以变截面构件折算成等截面构件的简化方法前进一大步。

在门式刚架地震反应现有研究中,尚未有采用符合实际的三线性弹塑性模型,能反映结构地震响应随时间变化的全过程的时程分析法,对变截面门式刚架在多遇、设防作用下的地震反应及罕遇地震作用时的破坏机理的研究。有关各种影响因素对刚架的抗震性能的影响程度及控制性因素等均尚待进一步的工作。

[参考文献]

- [1] Todhunter I, Pearson K. A history of the theory of elasticity and of the strength of materials[M]. London: Cambridge Press, 1886.
- [2] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of elastic stability (2nd ed.) [M]. New York: McGraw - Hill, 1961.
- [3] Föggel C M, Keter R L. Elastic strength of tapered columns[J]. Journal of the Structure Division, ASCE, 1962, 88(5): 301-308.
- [4] Butler D J, Anderson G B. The elastic buckling of tapered beam-columns[J]. Welding Journal, 1963, 42(1): 29-36.
- [5] Culver C G, Preg S M. Elastic stability of tapered beam-columns [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1968, 94(2): 455-470.
- [6] Prawel S P, Morrell M L, Lee G C. Bending and buckling strength of tapered structural members[J]. Welding Journal, 1974, 53(2): 75-84.
- [7] Boley B A. On the accuracy of the Bernoulli - Euler theory of beams of variable section [J]. Journal of Applied Mechanics 1963, (30): 373-378.
- [8] Just D J. Plane frameworks of tapering box and l-section [J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1977, 103(1): 71-86.
- [9] John C E. Buckling of tapered bars under stepped axial loads[J]. Structural Engineering, ASCE, 1986, 112(6): 77-81.
- [10] Gere J m, Carter W O. Critical buckling loads of tapered bars under stepped axial loads[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1962, 88(1): 98-102.
- [11] Salter J B, Anderson D, May L M. Tests on tapered steel columns [J]. Structural Engineering, ASCE, 1980, 58(6): 189-193.
- [12] Al - Sadder S Z. Exact expressions for stability functions of a general non - prismatic beam-column member [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004(60): 1561-1584.
- [13] Li J J, Li G Q, Chan S L. A second-order inelastic model for steel frames of tapered members with slender web[J]. Engineering Structures, 2003, 25(8): 1033-1043.

- [14] Rahai A R, Kazemi S. Buckling analysis of non-prismatic columns based on modified vibration modes[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2008, 13 (8): 1721-1735.
- [15] 蔡方荫. 变截面刚构分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1954.
- [16] 刘安清. 直线楔形杆件框架稳定性计算[J]. 建筑结构学报, 1983, 4(2): 43-46.
- [17] 梁启智, 曾令付. 山形门式刚架的梁柱计算长度[J]. 土木工程学报, 1987, 20(1): 49-54.
- [18] 赵毅强. 楔形杆件结构的弹性稳定分析[J]. 建筑结构学报, 1990, 11(6): 58-68.
- [19] 王文明, 郭彦林. 变截面门式钢刚架结构体系平面内稳定研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(4): 25-33.
- [20] 陈跃, 高轩能. 门式刚架优化设计方法研究. 南昌大学学报(工科版), 2003, 25(2): 78-81.
- [21] 童根树, 陈婷, 符刚. 楔形变截面压弯构件的平面内弹塑性稳定[J]. 钢结构, 2003, 18(5): 8-10.
- [22] 徐小波. 楔形变截面柱平面内稳定承载力研究[D]. 南昌大学, 2005.
- [23] CECS102:2002, 门式刚架轻型房屋钢结构设计规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [24] 王培军, 王来, 苏晓方. 楔率对变截面构件稳定临界荷载影响的分析[J]. 钢结构, 2003, 18(2): 42-45.
- [25] 杨娜. 变截面门式刚架结构极限承载力分析[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(8): 94-97.
- [26] 张淑霞, 顾强. 楔形变截面柱平面内稳定及平面内等效弯矩系数[J]. 工业建筑, 2002, 32(1): 58-60.
- [27] 吴亚平. 变截面压杆稳定计算的等效刚度法[J]. 力学与实践, 1994, 16(1): 58-60.
- [28] 张其林, 罗晓群, 龚铭. 门式钢刚架中楔形单元的力学计算模型[J]. 同济大学学报, 2001, 29(2): 134-139.
- [29] 郭彦林, 潘涌, 刘涛, 等. 变截面门式钢刚架结构稳定承载力的试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 9-14.
- [30] Chen W F, Toma S E. Advanced analysis of steel frames[M]. Florida: Boca, Raton, CRC Press Inc., 1994.
- [31] Deierlein G G. Steel-framed structures[J]. Progress in structural engineering and materials, 1997, 1(1): 10-17.
- [32] White D W. Plastic-hinge methods for advanced analysis of steel frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1993, 24(2): 121-152.
- [33] Chen W F. Structural stability, from theory to practice[J]. Engineering Structures, 2000, 22(2): 116-122.
- [34] 陈骥. 刚架平面稳定的整体设计法[J]. 钢结构, 2003, 18(4): 46-50.
- [35] Kim S E, Chen W F. Practical advanced analysis for unbraced steel frame design[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 122(11): 1259-1265.
- [36] 李天, 张哲, 刘朝宏. 门式刚架轻钢结构平面内整体稳定分析中的几个问题[J]. 郑州大学学报, 2003, 24(1): 16-19.
- [37] Clough R W. Earthquake response of structures[A]// R L Wiegel Ed. Earthquake Engineering[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice - Hall, 1970: 307-334.
- [38] 李桂青. 地震作用及结构反应的概率分析方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [39] Karamanos S, Karamanos S A. Earthquake effects on low-rise steel buildings in high seismicity areas: a designer's view[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997, 44(1,2): 115-128.
- [40] 兰冬. 平面刚架结构对地震荷载动力响应的几个特点[J]. 淮南矿业学院学报, 1989, 9(1): 94-102.
- [41] 章军, 王元清, 陈宏, 等. 地震作用下门式刚架轻型房屋钢结构的设计与分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(2): 74-77.
- [42] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [43] 于洪, 魏东. 变截面框架结构动力分析与抗震计算[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2003, 11(4): 1-5.
- [44] 徐贵章. 变截面刚架结构抗震设计的分析与计算[J]. 工程抗震, 1997, 19(2): 6-10, 5.
- [45] Kwon H D, Park Y P. Dynamic characteristics of stepped cantilever beams connected with a rigid body[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 255(4): 701-717.
- [46] Rao H V S G, Spyarakos C C. Closed form series solutions of boundary value problems with variable properties [J]. Computers & Structures, 1986, 23(2): 211-215.
- [47] Bradford M A, Cuk P E. Elastic buckling of tapered mono-symmetric I-beams[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(5): 977-996.
- [48] Karabalis D L. Static, dynamic and stability analysis of structures composed of tapered beams[J]. Computers & Structures, 1983, 16(6): 731-748.
- [49] Girijavallabhan V C. Buckling loads of non-uniform columns[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1969, 95(11): 2419-2431.
- [50] Bazeos N, Karabalis D L. Efficient computation of buckling loads for plane steel frames with tapered members[J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 771-775.
- [51] Al - Kahtani H J. Exact stiffness for tapered members[J]. Journal of Structure Engineering, 1996, 122(10): 1234-1239.
- [52] Cleghorn W L, Tabarrok B. Finite element formulation of a tapered Timoshenko beam for free vibration analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 152(3): 461-470.
- [53] Dube G P, Dumir P C. Tapered thin open section beams on elastic foundation-vibration analysis[J]. Computers and Structures, 1996, 61(5): 858-869.
- [54] Lee G C, Szabo B A. Torsional response of tapered I - girders [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(5): 233-252.
- [55] Frieman Z, Kosmatka J B. Exact stiffness matrix of a non - uniform beam - extension, torsion and bending of a Bernoulli - Euler beam[J]. Computers and Structures, 1992, 42(5): 671-682.
- [56] Rajasekaran S. Equations for tapered thin-walled beams of generic open section[J]. Journal of Engineering Mechanical, 1994,

120(8):1607-1629.

- [57] Li G Q, Li J J. A tapered Timoshenko - Euler beam element for analysis of steel portal frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(12):1531-1544.
- [58] Kim N I, Kim M Y. Exact dynamic/static stiffness matrices of non-symmetric thin-walled beams considering coupled shear deformation effects[J]. Thin-walled Structures, 2005, 43(5):701-734.
- [59] Hwang J S, Chang K C, Lee G C, et al. Shaking table tests of pinned-base steel gable frame[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(12):3031-3043.
- [60] Hwang J S, Chang K C, Lee G C. Seismic behavior of gable frame consisting of tapered members[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(3):808-821.

(上接 192 页)

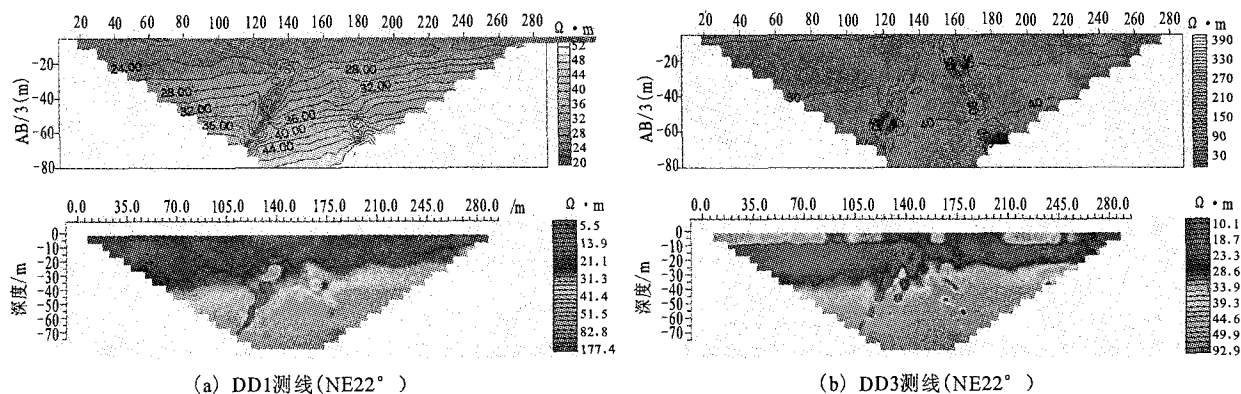


图6 地电测线反演结果及视电阻率等值线图

Fig. 6 The inversion models and resistivity isograms of the surveying lines in a dock of Ma'an Shan city.

(2) 相对于围岩介质的电阻率,断层可表现为低阻断层或高阻断层,决定于断层的性质、破碎带宽度、胶结程度、含水特征、岩脉侵入等特性及围岩电阻率特性。一般来说,新活动断层电阻率值较低,断层越老,胶结程度越强、电阻率值越高;断层破碎带越宽,越破碎,电阻率相对较小;地下和地表水越丰富,电阻率越小;压性断层少水,则为高阻,张性断层富水,则为低阻;有岩脉断层侵入,多为高阻^[4]。

(3) 本文仅对高密度电法视电阻率的反演图例进行了鉴别和分析,对异常的判别提供了直观定性的分析对比。如果工作做的足够细致,再辅以浅层人工地震勘探反射法,不但有利于利用多次覆盖技术提高异常体的分辨率,而且探测结果对地下构造更有直观形象的描述^[5],还可以对断层的性质和特征进行定量的解释。而且根据工作区地质、地貌环境,还可判断造成视电阻率高低差异的可能物质及其形成年代^[6]。

从上述实例可以看出,高密度电法在隐伏断层的探测方面有其独特的优点。通过对硬件设备的改

进,可以加大探测深度;结合地质方面的工作,不但可以对隐伏断层进行探测,还可以对断层性质做一些定量的解释。总之,随着研究的不断深入,高密度电阻率法在隐伏断层探测方面的应用会越来越广泛。

[参考文献]

- [1] 王爱国,王大雁,柳煜,等. 电法联合探测在地震安全性评价中的应用[J]. 勘察科学技术, 2006, (1): 61-64.
- [2] 邓启东,徐锡伟,张先康,等. 城市活断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 93-104.
- [3] 吴子泉,谭捍东,王成虎. 电阻率横向剖面探测走滑断层的数值模拟研究[J]. 西北地震学报, 2005, 27(2): 146-249.
- [4] 王爱国,马魏,张向红,等. 隐伏断层电性特征及浅层电法探测[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 242-247.
- [5] 连玉平,张锦福,林松建,等. 高分辨率浅层人工地震勘探探测隐伏断裂实例[J]. 西北地震学报, 2007, 29(3): 260-263.
- [6] 李志科,毛先进,韩明,等. 高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J]. 地震研究, 2003, 26(3): 275-278.