

雪灾下轻钢结构大面积破坏的概率成因

蒋友宝

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410004)

摘要:现行可靠度设计统一标准在分析轻钢结构构件可靠度时,对荷载效应比值的取值范围考虑不够充分。针对此不足,提出了1种基于应力的荷载效应比值计算方法,解决了在构件失效是由多种形式内力引发的情形下选择何种荷载效应来计算荷载效应比值的问题。以多个轻钢结构构件为例,采用该方法分析了轻钢结构中荷载效应比值的取值范围。揭示了雪荷载不利布置下,轻钢结构的荷载效应比值将会非常高的现象。接着对按现行分项系数设计的轻钢结构进行了可靠度校核,表明轻钢结构的可靠性处于较低的水平。最后分析了雪荷载超过设计标准时轻钢结构可靠度随不同荷载效应比值的规律。结果表明当雪荷载超载较大时,荷载效应比值越大的结构可靠性越低。这从可靠性的角度为近年雪灾中轻钢结构大面积破坏的现象提供了补充解释。

关键词:轻钢结构;雪荷载;可靠度;分项系数;荷载效应比值

中图分类号:TU391 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)03-0065-05

Probability Analysis of Failure Cause for Light-Weight Steel Structure under Snow Disaster

JIANG Youbao

(College of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In the current unified standard for reliability design, it lacks full considerations of the range of load effect ratio for reliability analysis of light-weight steel structures. Firstly, a computational method based on stress was proposed to calculate load effect ratio, which solves the problem that which kind of load effects can be chosen to calculate load effect ratio when the member fails with actions of several kinds of internal forces. Then, the range of load effect ratio was studied for light-weight steel structures after some analyses of several members with this method. It is found that the load effect ratio of light-weight steel structures can adopt large values under the disadvantage distributions of snow load. The reliability was also calculated for light-weight steel structures designed with current partial factors. Its result shows that the reliability of light-weight steel structure is low. Finally, the reliability was analyzed for light-weight steel structures with different load effect ratios when snow load exceeded the design standard level. It indicates that the reliability is low for light-weight steel structures with large load effect ratio. This provides some complementary explanations for the phenomena that the light steel structures are more likely to fail under snow disaster.

Key words: light-weight steel structure; snow load; reliability; partial factor; load effect ratio

收稿日期:2011-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(11102029);长沙理工大学结构工程重点学科基金资助(jg2010-05)

作者简介:蒋友宝(1982-),男,副教授,博士,从事复杂结构分析与结构可靠度研究,(E-mail)jiangybsu@163.com。

轻钢结构具有自重轻、施工速度快、综合造价低等优点,在建筑结构领域已得到了较广泛应用^[1],针对该类结构的优化设计也有较多研究^[2-3]。然而这种结构的抗超载性能较差,在大雪灾害中较容易破坏,如图1所示。

针对轻钢结构的这种不足,目前已有较多对该结构进行事故分析与反思的研究^[4-5],并提出了一些改进的措施来提升其抗超载性能,如加强支撑的布置、不宜过分优化设计等,这些改进措施在一定程度上能获得较好的效果。但需指出的是,由于目前对轻钢结构的可靠度分析并非详尽,使得如何把握优化设计的“度”存在一定困难,因此提升轻钢结构抗超载性能仍不够完善,需进一步研究。

针对多个轻钢结构典型实例分析了其荷载效应比值的特性,校核了轻钢结构的设计可靠度,在此基础上研究了不同荷载效应比值下轻钢结构的抗超载性能。

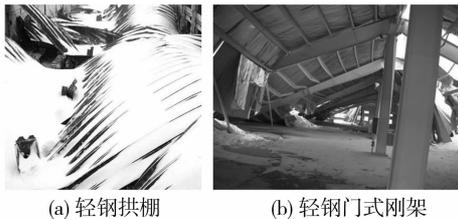


图1 雪灾下倒塌的轻钢结构

1 轻钢结构荷载效应比值分析

关于轻钢结构中荷载效应比值的取值范围,现行可靠度设计统一标准^[6]考虑不够充分,为此本文作如下说明。

1.1 基于应力的荷载效应比值计算模型

荷载效应比值 ρ_s 的计算式一般为式(1),

$$\rho_s = S_{q_k} / S_{g_k} \quad (1)$$

式中 q_k 和 g_k 分别表示雪荷载和永久恒载标准值, S 表示某种形式的荷载效应。对于构件失效是由单一形式内力引发的情形,只需取该种形式的内力即可,如对于钢梁, S 只需取为弯矩效应即可。但若构件的失效是由多种形式的内力引发的,此时显然不能取单一形式的内力来计算荷载效应比值。在设计钢结构时,一般采用应力来验算承载能力极限状态,因此采用应力来计算荷载效应比值将具有较好的适用性。这样可将式(1)转换为式(2)。

$$\sigma_s = \sigma_{q_k} / \sigma_{g_k} \quad (2)$$

在轻钢结构中压弯构件占据较大的比重,如钢拱屋架等;且从受力角度看,轴压、受弯构件均只是

它的一种特例,因而分析压弯构件的荷载效应比值将具有较好的代表性。在线弹性分析时,该类构件的弯矩和轴压力一般可表达如式(3)。

$$\begin{cases} M = a_1 g + b_1 q \\ N = a_2 g + b_2 q \end{cases} \quad (3)$$

其中 a_1 、 b_1 、 a_2 和 b_2 分别为对应的荷载效应系数。

压弯构件的破坏形式多表现为失稳,因而在截面设计时多以稳定验算来控制。由于稳定验算式较复杂,为简化分析,设有一稳定应力系数 φ_σ , 该系数表示当构件达到失稳状态时其某代表截面的强度应力恰为 $\varphi_\sigma f$, 其中 f 为钢材强度。由于 φ_σ 一般主要与长细比、截面形式等参数有关,因而暂不考虑其与荷载的相关性。这样便可将稳定验算转化为强度应力验算,而强度应力的验算式为式(4)。

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq \varphi_\sigma f \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)左边,有

$$\sigma = \left(\frac{a_2}{A} + \frac{a_1}{W} \right) g + \left(\frac{b_2}{A} + \frac{b_1}{W} \right) q \quad (5)$$

由此得到以应力形式表达的荷载效应比值 ρ_σ 计算式为式(6)。

$$\rho_\sigma = \lambda q_k / g_k \quad (6)$$

式中 λ 按式(7)计算,

$$\lambda = \left(\frac{b_2}{A} + \frac{b_1}{W} \right) / \left(\frac{a_2}{A} + \frac{a_1}{W} \right) \quad (7)$$

可见,采用应力形式计算的荷载效应比值等于对应荷载比值的 λ 倍,因而这使荷载效应比值的计算较为简单。

在进行结构设计时,往往需考虑雪荷载的不利布置。若实际工程中雪荷载的不利布置形式与自重荷载的分布形式较为接近,则 b_1 和 a_1 近似相等, b_2 和 a_2 也近似相等,这样由式(7)可知, λ 近似取值为 1.0。

若雪荷载的不利布置形式与自重荷载的分布形式差异较大,则 λ 值一般大于 1.0 较多。后文 1.3 中的实例分析将会证明这点。

1.2 刚架梁、柱分析

对于刚架结构,屋面上的雪荷载一般按全跨均布时较为不利,这与自重荷载的分布形式较为接近,因此荷载效应比值的取值范围近似为荷载比值的取值范围。

按现行荷载规范^[7],中国最大的雪压值出现在新疆北部的阿尔泰山区,其 50 年一遇的雪压值高达 1.25 kN/m²;此外东北地区的雪压值也较高,最大值为 0.9 kN/m²。而轻钢结构的自重一般在 0.35 kN/m² 左右。这样可估算出 ρ_σ 的可能最大值约为 2.6~

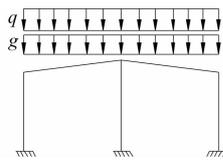


图2 刚架结构计算模型

3.6。这已经超出我国现行可靠度设计统一标准^[6]考虑的荷载效应比值的取值范围0.25~2.00。

1.3 钢拱结构分析

对于钢拱结构,由于雪荷载的半跨布置较为不利,因而对应的计算模型如图3所示。

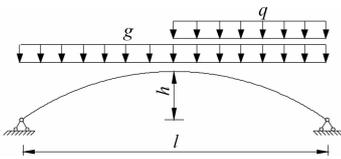


图3 拱结构计算模型

轻钢拱形屋盖一般采用实腹式工字形截面、格构式截面和拱形波纹板截面3种。假定拱轴线为圆弧曲线,弯矩和轴压力均按1/4截面处考虑,则在3种典型截面形式下, λ 值的计算结果如表1所示。

表1 不同拱结构的分析结果

跨度/m	拱高/m	截面类型	截面尺寸/mm	实例来源	λ
22.6	4.6	工字形	360×170×6×6	文献[8]	4.12
30	7.5	YT6118	610×180×1.3	文献[9]	6.82
22	3	格构式	3Φ50×3.5	文献[10]	3.19

从1中可以看出 λ 的取值范围在3.19~6.82之间。这说明考虑雪荷载的半跨不利布置后,荷载效应比值会在1.2节分析结果的基础上继续增大。若按式(6)简单相乘,则荷载效应比值的最大值可高达24.6,但鉴于分析实例偏少且雪荷载半跨布置毕竟是极端情形,因此暂考虑荷载效应比值的最大值为16.0,这已经大为超出现行可靠度设计统一标准考虑的荷载效应比值的取值范围0.25~2.00。

2 轻钢结构的设计可靠度分析

由于轻钢结构总荷载效应中雪荷载效应占有较高的比重,因而其设计可靠度将处于较低的水平,现分析如下。

2.1 总荷载效应的概率特性分析

线弹性分析时,压弯构件的总荷载效应是由雪荷载和永久荷载下的效应进行叠加而得到。由于两种荷载均具有随机变异性,因而总荷载效应的随机

特性会随二者所占比例的不同而变化。按文献[11],两种荷载的统计参数如表2所示。

表2 各荷载随机变量的统计参数

随机变量	分布类型	K_1	变异系数
g	正态	1.06	0.07
q	极值I型	1.14	0.256

注: K_1 =均值/标准值。

中国现行可靠度设计统一标准中永久荷载的分项系数值为1.2,可变荷载的分项系数值为1.4,因而对于压弯构件,当其荷载效应按式(5)考虑时,对应的总荷载效应设计值应为式(8),

$$\sigma_d = \left(\frac{a_2}{A} + \frac{a_1}{W} \right) g_K (1.2 + 1.4\rho_s) \quad (8)$$

式(8)表示的设计值所具有的保证概率设为 P_s ,则有式(9)。

$$P_s = P(\sigma/\sigma_d < 1.0) \quad (9)$$

将式(5)、式(8)代入,整理化简得到式(10),

$$P_s = P\left(\frac{g/g_K + \rho_s q/q_K}{1.2 + 1.4\rho_s} < 1.0 \right) \quad (10)$$

从表2可求得 g/g_K 和 q/q_K 的概率分布类型。这样在 ρ_s 已知的情形下可采用Monte Carlo方法来计算 P_s 。具体的计算结果如表3所示。

表3 不同荷载效应比值下荷载效应设计值的保证概率

ρ_s	0.5	1	2	4	8	16
P_s	0.944	0.898	0.876	0.853	0.843	0.842

从表3中,可知随着荷载效应比值的增大,总荷载效应设计值所具有的保证概率逐步降低,最低仅为0.842。原因主要是雪荷载概率模型较恒载概率模型不利一些,例如雪荷载分项系数取1.4所对应的设计值的保证概率仅为0.836,而恒荷载分项系数取1.2所对应的设计值的保证概率高达0.970。

2.2 设计可靠度校核结果

对于压弯构件,当其荷载效应按式(8)设计时,对应抗力的设计表达式可写为式(11),

$$f_d = \varphi_o f_K / \gamma_R \quad (11)$$

式中 γ_R 为抗力分项系数, f_K 为强度标准值。由于是按式(5)以弹性状态来计算失效的,而实际钢结构失效时一般会进入塑性,因而抗力分项系数需计入此项影响,暂取塑性发展系数为1.1。另外对于Q235钢材,材料强度分项系数可取为1.087,这样最终的抗力分项系数 γ_R 可取值为1.20。而钢材强度 f 一般服从正态分布,其统计参数为 $\mu_f = 1.08f_K, \delta_f = 0.08$ ^[11]。

若直接按式(8)、式(11)来建立极限状态验算

式,有可能忽略了结构分析中的某些不确定因素,因而需引入计算模式的不确定性参数 Ω_P ,按一般压弯构件考虑,则有 $\mu_{\Omega_P} = 1.12, \delta_{\Omega_P} = 0.10$ [11]。

根据这些概率统计参数,计算得到的轻钢结构可靠指标如表4所示。可见,可靠指标随荷载效应比值的增大迅速降低,各种情形下平均值为2.472。

表4 不同荷载效应比值下的可靠指标

ρ_s	0.5	1	2	4	8	16
β	3.056	2.717	2.453	2.280	2.191	2.132

2.3 不同分项系数的比较

在美国LRFD设计规范[12]中永久荷载的分项系数值为1.2,可变荷载的分项系数值为1.6;英国BS5950设计规范[13]中永久荷载的分项系数值为1.4,可变荷载的分项系数值为1.6。可见,美英两国规范中荷载分项系数值均高于我国规范,这样按美英两国规范中荷载分项系数值计算得到的可靠指标如表5所示。

表5 不同分项系数取值下的可靠指标

ρ_s	0.5	1	2	4	8	16
LRFD(1993)	3.274	3.014	2.801	2.650	2.591	2.533
BS5950	3.775	3.333	2.993	2.727	2.637	2.581

从表5可知,按美英两国规范中荷载分项系数值计算得到的可靠指标平均值分别为2.810和3.010。可见,它们要比按我国现行可靠度设计统一标准中荷载分项系数值计算的结果高出0.3和0.5,但仍不满足目标可靠指标3.2的要求。

这些计算结果表明,我国现行可靠度设计统一标准中荷载分项系数值1.2和1.4,对于轻钢结构是偏低较多的,这与文献[14]的分析结论一致。

进一步计算知,若要满足目标可靠指标3.2的要求,雪荷载的分项系数需提高至1.8。此时不同荷载效应比值下,总荷载效应将会比原来增大10.5%~27.1%,平均约为20%。因此若仍按现行荷载分项系数来进行设计,则应留有约20%的余量。

3 抗超载能力的概率分析

在雪灾中,轻钢结构往往承受了超出设计标准的雪荷载,此时其可靠性的求解是一个给定雪荷载值下的概率问题。

3.1 不同参数下的概率分析结果

定义一超载系数,其计算式为式(12),

$$r_1 = q_a / q_k, \quad (12)$$

其中 q_a 表示量测到的实际雪压值。例如某地的设计雪压标准值为0.3 kN/m²,而在雪灾中实际量测的雪压值为0.45 kN/m²,则超载系数为1.5。

采用前述的各种概率模型,不同荷载效应比值和超载系数下,轻钢结构可靠指标的计算结果如表6所示。

表6 不同荷载效应比值和超载系数下的可靠指标

r_1	ρ_s					
	0.5	1	2	4	8	16
1.2	3.583	3.648	3.712	3.748	3.788	3.801
1.4	3.264	3.067	3.031	2.938	2.857	2.834
1.6	2.841	2.580	2.350	2.137	2.002	1.921
2.0	2.160	1.587	1.067	0.665	0.409	0.266

可见,随着超载系数增大,可靠指标均下降较为明显。对于正常设计、正常施工的轻钢结构,当超载程度不大于40%(即实际雪压不超过设计值)时,各种荷载效应比值下的可靠指标平均值不低于3.0。但当超载程度进一步增加时,可靠指标会下降很多;此时可靠指标也随着荷载效应比值的增大而迅速减少。例如当超载系数为2.0且 $\rho_s = 16$ 时,可靠指标仅为0.266,对应失效概率为39.5%。

目前轻钢结构的市場较为混乱,存在着一些非正常设计、非正常施工的实际工程。对于这一类轻钢结构工程,当雪压超载时显然其可靠指标将会比表6中相应结果更低,这更加增大了轻钢结构在雪灾中的破坏比例。

3.2 分析结果说明与验证

表6分析结果表明,当雪压超载较大时,荷载效应比值越大的结构可靠性越低。

2008年初,中国发生了严重的冰雪灾害。在这次灾害中倒塌的大部分均为轻钢结构,而混凝土结构却很少破坏。原因在于混凝土结构中永久荷载效应一般占据较大的比重,对应荷载效应比值要小一些;而轻钢结构的荷载效应比值却是较大的,根据可靠指标随荷载效应比值的变化规律可判定雪灾下轻钢结构的可靠性是低于混凝土结构的,这与两类结构在雪灾中的实际表现较为吻合。

4 结论

分析了轻钢结构荷载效应比值的特性,在此基础上校核了轻钢结构的设计可靠度。主要研究结论如下:

1)考虑雪荷载的不利布置后,轻钢结构中荷载

效应比值的最大值将会大大超出可靠度设计统一标准考虑的 0.25—2 的取值范围。

2) 根据文中可靠度分析结果,轻钢结构若要满足目标可靠指标 3.2 的要求,雪荷载分项系数值应提高至 1.8。

3) 当雪压超载较大时,荷载效应比值越大的结构可靠性越低。

参考文献:

- [1] Milan V, Bernt J. Light steel framing for residential buildings [J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44(12): 1272-1279.
- [2] Sherief S S. Sakla, Emad E. Design of steel roofs subjected to drifted snow using genetic optimization [J]. *Computers & Structures*, 2003, 81(6):339-348.
- [3] Saka M P. Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(1):36-43.
- [4] 王元清,胡宗文,石永久,等. 门式刚架轻型房屋钢结构雪灾事故分析与反思[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(3): 65-70.
WANG Yuanqing, HU Zongwen, SHI Yongjiu, et al. Analysis and reflection on snow disaster accidents of steel structures of light-weight buildings with portal frames [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(3):65-70.
- [5] 蓝声宁,钟新谷. 湘潭轻型钢结构厂房雪灾受损分析与思考[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(3):71-75.
LAN Shengning, ZHONG Xingu. Damage diagnoses and lessons learnt from the failure of light steel structure by heavy snow in Xiangtan [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(3):71-75.
- [6] GB 50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [7] GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [8] 周庆荣,付小超,熊进刚. 拱形钢棚在冰雪荷载作用下倒塌事故分析[J]. *建筑科学*, 2009, 25(5):81-84.
ZHOU Qingrong, FU Xiaochao, XIONG Jingang. Analysis of arched steel-canopy collapsed under the snow and ice load accident [J]. *Building Science*, 2009, 25(5):81-84.
- [9] 彭砥如. 钢拱顶在雪凌冻气候条件下的受力分析[J]. *施工技术*, 2008, 37(Sup):437-439.
PENG Diru. Structural analysis of steel arch roof under snow and frozen climates calamity [J]. *Construction Technology*, 2008, 37(Sup):437-439.
- [10] 程文良. 某格构式双铰拱屋架的计算[J]. *钢结构*, 2006, 21(6):72-74.
CHENG Wenliang. Calculation of built-up two-hinged arch steel roof frame [J]. *Steel Structures*, 2006, 21(6):72-74.
- [11] 张新培. 建筑结构可靠度分析与设计[M]. 北京:科学出版社, 2001.
ZHANG Xinpei. Reliability analysis and design for building structures [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [12] Loads and Resistance Factor Design Specification [S]. American Institute of Steel Construction, Chicago, 1993.
- [13] BS5950, Structural use of steelwork in building, Part 1: code of practice for design rolled and welded sections [M]. London:British Standards Institution, 2000.
- [14] 蒋友宝,杨伟军. 不对称荷载下大跨空间结构体系可靠性设计研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(7):105-110.
JIANG Youbao, YANG Weijun. Research of system reliability design for long-span spatial structure under asymmetric loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(7): 105-110.

(编辑 胡玲)