

冷弯中厚壁轴压方矩形钢管柱抗震可靠度分析

李功文¹, 李元齐^{1, 2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 收集了 Q235 和 Q345 冷弯厚壁方矩管的材料不定性、几何不定性、稳定设计计算模式不定性以及短柱的承载力数据. 在此基础上运用一次二阶矩法进行了抗震及非抗震设计可靠度分析. 最终给出 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢构件强度和稳定设计抗力分项系数以及承载力抗震调整系数建议值, 为相关技术标准的修编提供了依据.

关键词: 冷弯厚壁型钢; 抗震设计; 设计可靠度分析; 抗力分项系数; 承载力抗震调整系数

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

Seismic Reliability Analysis of Axially Compressed Cold-Formed Medium Thick-Walled Square and Rectangular Steel Tube Columns

LI Gongwen¹, LI Yuanqi^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Data of material property uncertainty, geometrical uncertainty, calculation model uncertainty for overall stability design and load bearing capacity of short columns for Q235, Q345 cold-formed thick-walled square and rectangular steel tubes were collected and on this basis, seismic and non-seismic design reliability analysis was conducted through the first-order second-moment method. Finally, the resistance partial factor and seismic adjustment coefficient of bearing capacity under strength and overall stability design for Q235 and Q345 cold-formed thick-walled steel members were proposed for the reference in current revising of related design codes.

Key words: cold-formed thick-walled steel; seismic design; design reliability analysis; resistance partial factor; seismic adjustment coefficient of bearing capacity

近年来,随着冷弯型钢生产状况的改善及设备生产能力的日益发展,我国已能生产壁厚 20 mm 的冷弯型钢. 受冷弯效应的影响,冷弯厚壁型钢表现出与冷弯薄壁型钢及普通热轧、焊接型钢不同的特性,主要体现在材料特性、残余应力、承载力特性以及抗震性能等较大的差异. 因此,不少学者^[1-9]针对冷弯厚壁型钢的材料特性、残余应力、承载力特性以及抗震性能等进行了理论及试验研究,得到了冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的强度计算公式、残余应力分布模型、强度及稳定承载力特性、滞回曲线及恢复力模型等一系列成果. 在此基础上,在编的《冷弯型钢结构技术规范》GB50018-201X 引入了冷弯厚壁型钢的相关内容,将适用厚度调整为 0.6~20 mm. 这对推动冷弯厚壁型钢在我国的应用与发展具有重要意义.

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[10]规定了普通钢结构的强度及稳定设计承载力抗震调整系数,但是缺少冷弯厚壁型钢的相应内容. 因此,对冷弯厚壁型钢轴压构件进行抗震可靠度分析从而得到其承载力抗震调整系数具有重要意义. 文献[3-4]对 Q235 和 Q345 冷弯厚壁方矩管进行了材性及短柱试验研究,得到了各短柱的极限承载力数据. 文献[9]总结了 Q235 和 Q345 冷弯厚壁方矩管的材性不定性、几何不定性及稳定设计计算模式不定性,并在此基础上进行设计可靠度分析,提出了冷弯厚壁方矩管稳定设计抗力分项系数. 本文将在此基础上对 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴压构件进行抗震及非抗震设计可靠度分析,最终给出 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢构件强度和稳定设计抗力分项系数以及承载力抗震调整系数建议值.

收稿日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51538002)

第一作者: 李功文(1989—),男,博士生,主要研究方向为建筑钢结构设计、冷弯型钢结构设计理论等. E-mail: 1610186@tongji.edu.cn

通讯作者: 李元齐(1971—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为大跨度空间结构非线性分析和抗风设计理论、冷弯型钢结构设计理论、钢结构检测与评定技术等. E-mail: liyq@tongji.edu.cn

1 抗力不定性分析

结构构件抗力 R 可表示为

$$R = R_K K_M K_A K_P \quad (1)$$

式中: R_K 为结构构件抗力标准值; K_M 为结构构件材料性能不定性系数; K_A 为结构构件几何特性不定性系数; K_P 为结构构件计算模式不定性系数.

考虑 K_M 、 K_A 和 K_P 相互独立, 由概率理论可以确定结构抗力的平均值和标准差, 即

$$\mu_R = R_K \mu_{K_M} \mu_{K_A} \mu_{K_P} \quad (2)$$

$$V_R = \sqrt{V_{K_M}^2 + V_{K_A}^2 + V_{K_P}^2} \quad (3)$$

结构构件的抗力不定性系数 K_R 为构件抗力 R 与抗力标准值 R_K 之比, 即

$$K_R = R/R_K \quad (4)$$

则 K_R 的平均值可表示为

$$\mu_{K_R} = \mu_R/R_K = \mu_{K_M} \mu_{K_A} \mu_{K_P} \quad (5)$$

1.1 强度设计抗力不定性

1.1.1 材料性能不定性

《钢结构设计标准》^[11] 编制组于 2012 年对国内主要钢构件生产厂家的钢材进行统计分析, 得到 Q235 和 Q345 钢材材料性能不定性相关参数见表 1. 这一统计结果与 1985 年陈国兴等^[12] 得到数据 (Q235 和 Q345 钢材材料性能不定性的均值和变异系数分别为 1.140、0.073, 1.040、0.066) 相比, 均值和变异系数均有所提高.

表 1 材料性能不定性统计结果

Tab.1 Statistical results of material property uncertainty

| 钢号 | 平均值 μ_{K_M} | 变异系数 δ_{K_M} |
|------|-----------------|---------------------|
| Q235 | 1.285 | 0.095 |
| Q345 | 1.127 | 0.073 |

1.1.2 几何不定性

文献[9]以从武钢、宝钢等钢结构加工厂家收集到的冷弯厚壁方、矩形钢管的实测截面数据为样本进行统计分析, 并运用 Kolmogorov-Smirnov 检验法进行正态分布性检验. 结果表明, 在 95% 的置信水平下, 样本服从正态分布. 文献[9]得到的几何参数不定性统计参数见表 2.

表 2 几何参数不定性统计结果

Tab.2 Statistical results of geometrical uncertainty

| 钢号 | 平均值 μ_{K_A} | 变异系数 δ_{K_A} |
|-----------|-----------------|---------------------|
| Q235/Q345 | 1.0018 | 0.0192 |

1.1.3 计算模式不定性

文献[3-4]对截面宽度为 108~350 mm、厚度为

8~16 mm 的 Q235 和 Q345 冷弯厚壁方、矩形钢管短柱进行了轴压试验研究, 得到各短柱的极限承载力. 表 3 列出了各短柱的实测截面尺寸及极限承载力 (F_u)^[3-4], 表中 S 代表方形管, R 代表矩形管, D 、 W 、 r 、 t 的定义见图 1.

表 3 短柱实测截面尺寸和极限承载力

Tab.3 Measured sectional size and ultimate loads of stub columns

| 钢牌号 | 截面/mm | D /mm | W /mm | r /mm | t /mm | F_u /kN |
|------|--------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Q235 | R 320×200×8 | 319.2 | 202.1 | 18.3 | 8.0 | 2 415 |
| Q235 | R 320×200×8 | 319.8 | 201.5 | 18.1 | 8.2 | 2 452 |
| Q235 | R 320×200×8 | 319.5 | 201.5 | 17.9 | 8.4 | 2 418 |
| Q235 | R 320×200×10 | 319.3 | 201.3 | 22.0 | 10.0 | 3 533 |
| Q235 | R 320×200×10 | 319.3 | 200.6 | 22.2 | 10.1 | 3 618 |
| Q235 | R 320×200×10 | 319.4 | 200.4 | 22.3 | 10.0 | 3 572 |
| Q235 | R 320×200×12 | 320.7 | 200.3 | 26.0 | 12.7 | 4 149 |
| Q235 | R 320×200×12 | 321.1 | 201.0 | 26.1 | 12.1 | 4 198 |
| Q235 | R 320×200×12 | 321.0 | 200.0 | 26.0 | 12.3 | 4 219 |
| Q235 | R 200×180×8 | 199.0 | 179.5 | 20.0 | 7.9 | 1 899 |
| Q235 | R 200×180×8 | 199.0 | 180.0 | 19.7 | 7.8 | 1 616 |
| Q235 | R 200×180×8 | 199.2 | 179.2 | 19.5 | 7.9 | 1 685 |
| Q235 | S 300×300×10 | 301.0 | 299.4 | 25.5 | 9.5 | 3 310 |
| Q235 | S 300×300×10 | 300.5 | 301.2 | 25.0 | 9.7 | 3 325 |
| Q235 | S 300×300×10 | 301.2 | 301.0 | 24.8 | 9.6 | 3 310 |
| Q235 | S 300×300×10 | 299.0 | 299.5 | 24.5 | 9.9 | 3 250 |
| Q235 | S 300×300×12 | 300.0 | 298.0 | 32.5 | 11.9 | 3 920 |
| Q235 | S 300×300×12 | 300.0 | 299.0 | 32.5 | 11.9 | 4 080 |
| Q235 | S 108×108×10 | 108.1 | 107.4 | 25.0 | 10.0 | 2 001 |
| Q235 | S 108×108×10 | 107.7 | 108.3 | 25.0 | 10.0 | 2 000 |
| Q235 | S 220×220×10 | 220.5 | 219.1 | 30.0 | 10.2 | 3 278 |
| Q235 | S 350×350×14 | 349.6 | 347.6 | 40.0 | 13.5 | 6 712 |
| Q235 | S 250×250×16 | 250.6 | 250.8 | 39.0 | 15.6 | 7 494 |
| Q345 | S 108×108×10 | 107.9 | 108.9 | 24.0 | 10.1 | 2 344 |
| Q345 | S 108×108×10 | 107.7 | 108.7 | 24.0 | 10.4 | 2 329 |
| Q345 | S 120×120×10 | 119.9 | 120.0 | 24.0 | 10.3 | 2 485 |
| Q345 | S 120×120×10 | 120.2 | 120.0 | 24.0 | 10.2 | 2 484 |
| Q345 | S 135×135×10 | 135.6 | 135.4 | 23.0 | 10.0 | 2 822 |
| Q345 | S 220×220×10 | 219.6 | 220.5 | 28.0 | 9.9 | 4 012 |
| Q345 | R 350×250×12 | 348.6 | 249.8 | 31.0 | 12.2 | 6 053 |

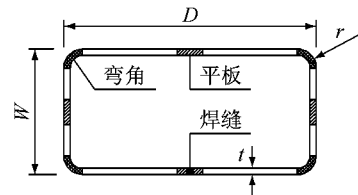


图 1 截面尺寸定义

Fig.1 Definition of sectional dimensions

我国《钢结构设计规范》(GB50017—2003)^[13] 定义轴心受压构件的强度计算公式为

$$F = f A_n \quad (6)$$

式中: F 为轴心压力; A_n 为净截面面积; f 为构件抗压强度设计值. 本文在计算时, A_n 取构件全截面面

面积 A , f 取试件的全截面屈服强度加权平均值 f_a . f_a 计算如下:

$$f_a = \frac{f_{yf}A_f + f_{yc}A_c}{A_f + A_c} \quad (7)$$

式中: f_{yf} 、 f_{yc} 分别为平板、弯角部位的实测屈服强度; A_f 、 A_c 分别为平板、弯角部位的截面面积. 则计算模式不定性的计算公式为

$$K_P = \frac{F_u}{F} = \frac{F_u}{f_a A} \quad (8)$$

表 4 和表 5 分别列出了 Q235 和 Q345 构件的计算模式不定性计算结果, 相应的计算模式不定性统计参数见表 6.

表 4 Q235 构件计算模式不定性

Tab.4 Calculation model uncertainty of Q235 specimens

| 截面/mm | f_{yf}/MPa | f_{yc}/MPa | f_a/MPa | F_u/kN | K_P |
|--------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|-------|
| R 320×200×8 | 269 | 372 | 278 | 2 415 | 1.096 |
| R 320×200×8 | 269 | 372 | 278 | 2 452 | 1.085 |
| R 320×200×8 | 269 | 372 | 278 | 2 418 | 1.056 |
| R 320×200×10 | 273 | 389 | 286 | 3 533 | 1.271 |
| R 320×200×10 | 273 | 389 | 286 | 3 618 | 1.295 |
| R 320×200×10 | 273 | 389 | 286 | 3 572 | 1.293 |
| R 320×200×12 | 266 | 358 | 278 | 4 149 | 1.232 |
| R 320×200×12 | 266 | 358 | 278 | 4 198 | 1.294 |
| R 320×200×12 | 266 | 358 | 278 | 4 219 | 1.290 |
| R 200×180×8 | 272 | 343 | 282 | 1 899 | 1.226 |
| R 200×180×8 | 272 | 343 | 282 | 1 616 | 1.044 |
| R 200×180×8 | 272 | 343 | 282 | 1 685 | 1.083 |
| S 300×300×10 | 268 | 386 | 281 | 3 310 | 1.098 |
| S 300×300×10 | 268 | 386 | 281 | 3 325 | 1.079 |
| S 300×300×10 | 268 | 386 | 281 | 3 310 | 1.085 |
| S 300×300×10 | 268 | 386 | 281 | 3 250 | 1.037 |
| S 300×300×12 | 269 | 369 | 284 | 3 920 | 1.051 |
| S 300×300×12 | 269 | 369 | 284 | 4 080 | 1.090 |
| S 108×108×10 | 405 | 497 | 437 | 2 001 | 1.285 |
| S 108×108×10 | 405 | 497 | 437 | 2 000 | 1.284 |
| S 220×220×10 | 286 | 441 | 316 | 3 278 | 1.275 |
| S 350×350×14 | 297 | 441 | 320 | 6 712 | 1.210 |
| S 250×250×16 | 376 | 478 | 399 | 7 494 | 1.358 |

表 5 Q345 构件计算模式不定性

Tab.5 Calculation model uncertainty of Q345 specimens

| 截面/mm | f_{yf}/MPa | f_{yc}/MPa | f_a/MPa | F_u/kN | K_P |
|--------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------|-------|
| S 108×108×10 | 469 | 523 | 487 | 2 344 | 1.317 |
| S 108×108×10 | 469 | 523 | 487 | 2 329 | 1.287 |
| S 120×120×10 | 434 | 534 | 463 | 2 485 | 1.286 |
| S 120×120×10 | 434 | 534 | 463 | 2 484 | 1.296 |
| S 135×135×10 | 421 | 544 | 451 | 2 822 | 1.330 |
| S 220×220×10 | 387 | 540 | 415 | 4 012 | 1.215 |
| R 350×250×12 | 334 | 493 | 356 | 6 053 | 1.256 |

表 6 计算模式不定性统计参数

Tab.6 Statistical results of calculation model uncertainty

| 钢号 | 平均值 μ_{K_P} | 变异系数 δ_{K_P} |
|------|-----------------|---------------------|
| Q235 | 1.179 0 | 0.108 3 |
| Q345 | 1.283 9 | 0.030 0 |

假定计算模式不定性服从正态分布, 则抗力 R 是若干正态随机变量的乘积. 根据概率论中心极限定理, 可以近似认为抗力 R 服从对数正态分布. 按式 (3) 和式 (5) 计算 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴压构件的强度设计抗力不定性的平均值和变异系数, 计算结果如表 7 所示.

1.2 稳定设计抗力不定性

文献[9]根据陈国兴等^[13]提出的材料不定性统计结果给出了冷弯厚壁型钢稳定设计抗力不定性的统计结果. 这里根据表 1 所列最新材料不定性统计结果对文献[9]中的抗力不定性统计结果进行更新, 更新后的统计结果见表 8.

2 荷载不定性及荷载组合

2.1 荷载不定性

工程中常见荷载的不定性基本统计参数如表 9 所示^[14]. 文献[15]指出 50 年设计基准期内随机地震作用的概率分布符合极值 I 型分布, 在此基础上文

表 7 强度设计抗力不定性分析结果

Tab.7 Statistical results of resistance uncertainty for strength design

| 钢号 | 数量 | 材料性能不定性系数 | | 几何特性不定性系数 | | 计算模式不定性系数 | | 抗力不定性系数 | |
|------|----|-----------|-------|-----------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| | | 均值 | 变异系数 | 均值 | 变异系数 | 均值 | 变异系数 | 均值 | 变异系数 |
| Q235 | 23 | 1.285 | 0.095 | 1.001 8 | 0.019 2 | 1.179 0 | 0.108 3 | 1.517 7 | 0.145 3 |
| Q345 | 7 | 1.127 | 0.073 | 1.001 8 | 0.019 2 | 1.283 9 | 0.030 0 | 1.449 6 | 0.081 2 |

表 8 稳定设计抗力不定性分析结果

Tab.8 Statistical results of resistance uncertainty for stability design

| 钢号 | 抗力不定性系数 | |
|------|---------|---------|
| | 平均值 | 变异系数 |
| Q235 | 1.337 4 | 0.162 2 |
| Q345 | 1.172 9 | 0.150 4 |

均值与变异系数, 见表 9.

2.2 荷载组合

2.2.1 非抗震设计荷载组合

工程中最为常见的可变荷载为活荷载(包括住宅活荷载和办公楼活荷载)和风荷载. 根据上述规定, 在确定非抗震抗力分项系数 γ_R 时, 选取 G+L(住宅)、G+L(办公楼)、G+W 和 G+L(住宅)+W

献[16]给出了 50 年设计基准期内随机地震作用的

表 9 荷载及荷载效应的统计参数和分布类型

Tab.9 Statistical results of loads

| 荷载种类 | 分布类型 | 荷载不定性 | |
|-----------|--------|-------|-------|
| | | 平均值 | 变异系数 |
| 恒荷载 G | 正态 | 1.060 | 0.070 |
| 活荷载(办公楼)L | 极值 I 型 | 0.524 | 0.288 |
| 活荷载(住宅)L | 极值 I 型 | 0.644 | 0.230 |
| 风荷载 W | 极值 I 型 | 0.908 | 0.193 |
| 地震荷载 E | 极值 I 型 | 0.330 | 2.170 |

4 种荷载组合情况进行计算. 由于住宅活荷载比办公楼活荷载更为不利, 因此不考虑办公楼活荷载和

表 10 研究选用的荷载组合

Tab.10 Load combination used in this paper

| 组合号 | ρ | 永久荷载控制 | 可变荷载控制 |
|------|--------|-------------------------------|--------------------------|
| 组合 1 | | 1.35×恒+1.4×0.7×活(宅) | 1.2×恒+1.4×活(宅) |
| 组合 2 | | 1.35×恒+1.4×0.7×活(办) | 1.2×恒+1.4×活(办) |
| 组合 3 | | 1.35×恒+1.4×0.6×风 | 1.2×恒+1.4×风 |
| 组合 4 | 0.25 | 1.35×恒+1.4×0.6×风+1.4×0.7×活(宅) | 1.2×恒+1.4×0.6×风+1.4×活(宅) |
| 组合 5 | 0.50 | 1.35×恒+1.4×0.6×风+1.4×0.7×活(宅) | 1.2×恒+1.4×0.6×风+1.4×活(宅) |
| 组合 6 | 1.00 | 1.35×恒+1.4×0.6×风+1.4×0.7×活(宅) | 1.2×恒+1.4×风+1.4×0.7×活(宅) |
| 组合 7 | 2.00 | 1.35×恒+1.4×0.6×风+1.4×0.7×活(宅) | 1.2×恒+1.4×风+1.4×0.7×活(宅) |

2.2.2 抗震设计荷载组合

《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[10] 规定了结构构件的地震效应和其他荷载效应的基本组合, 即

$$S = \gamma_G S_{GE} + \gamma_E S_{Ek} + \psi_w \gamma_w S_{wk} \quad (10)$$

式中: S 为结构构件内力组合设计值; γ_G 为重力荷载分项系数, 一般情况采用 1.2; γ_E 为地震作用分项系数, 取 1.3; S_{GE} 为重力荷载代表值的效应; S_{wk} 为风荷载标准值的效应; ψ_w 为风荷载组合值系数, 一般结构取 0, 风荷载起控制作用的建筑应采用 0.2. 因此, 将抗震设计荷载组合分为不考虑风荷载及考虑风荷载两组, 分别见表 11 和表 12. 同样, 由于住宅活荷载比办公楼活荷载更为不利, 因此没有考虑办公楼活荷载和风荷载同时参与的组合. 文献[16]指出, 对于钢结构轴心受压构件, 常用的地震作用标准值与恒荷载标准值的比值(ρ_E)可取为 0.75 和 1.50. 对于考虑风荷载效应的荷载组合, 定义 ρ_{wE} 为风荷载标准值与地震作用标准值的比值, 分别取 ρ_{wE} 为 0.75、1.00 和 1.25 以考虑不同大小的风荷载对可靠度指标的影响. 同样, 考虑到恒载在荷载组合中所占的比例对结构可

表 11 不考虑风荷载的抗震设计荷载组合选用

Tab.11 Seismic design load combination without wind load

| 组合号 | ρ_E | 荷载组合 |
|-------|----------|---------------------------|
| 组合 1E | 0.75 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+1.3 地震 |
| 组合 2E | 0.75 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(办)+1.3 地震 |
| 组合 3E | 1.50 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+1.3 地震 |
| 组合 4E | 1.50 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(办)+1.3 地震 |

风荷载同时参与的组合. 本文选取的荷载组合如表 10 所示.

考虑到恒载在荷载组合中所占的比例对结构可靠指标的影响, 引入参数如下:

$$\rho = \text{最大可变荷载标准值} / \text{恒载标准值} \quad (9)$$

由于 ρ 值的变化对结构可靠指标的影响很大, 因此在确定最优抗力分项系数时, 分别考虑了 $\rho = 0.25$ 、0.50、1.0 和 2.0 这 4 种情况.

表 12 考虑风荷载的抗震设计荷载组合选用

Tab.12 Seismic design load combination with wind load

| 组合号 | ρ_E | ρ_{wE} | 荷载组合 |
|---------|----------|-------------|-------------------------------------|
| 组合 1Ew | 0.75 | 0.75 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+0.2×1.4 风+1.3 地震 |
| 组合 2 Ew | 0.75 | 1.00 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+0.2×1.4 风+1.3 地震 |
| 组合 3 Ew | 0.75 | 1.25 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+0.2×1.4 风+1.3 地震 |
| 组合 4 Ew | 1.50 | 0.75 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+0.2×1.4 风+1.3 地震 |
| 组合 5 Ew | 1.50 | 1.00 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+0.2×1.4 风+1.3 地震 |
| 组合 6 Ew | 1.50 | 1.25 | 1.2×恒+1.2×0.5×活(宅)+0.2×1.4 风+1.3 地震 |

靠指标的影响, 引入参数 ρ , 即

$$\rho = \text{活荷载标准值} / \text{恒载标准值} \quad (11)$$

分别考虑 $\rho = 0.25$ 、0.50、1.0 和 2.0 这 4 种情况.

3 可靠指标选取

我国工程建设国家标准 GB 50068-2001《建筑结构可靠度设计统一标准》^[17] 中规定了我国现行结构设计规范规定的结构构件承载力极限状态设计采用的可靠指标值, 见表 13. 文献[16]给出了结构构件众值烈度下承载力极限状态设计时采用的可靠指标值, 见表 14.

冷弯厚壁型钢结构构件的破坏大多属于延性破坏, 故可以按照安全等级为二级的延性结构将冷弯

厚壁型钢结构构件的抗震及非抗震可靠指标分别取为 1.5 和 3.2。

表 13 结构构件承载力极限状态设计时采用的可靠指标值
Tab.13 Reliability index for structural members based on ultimate limited state design

| 破坏类型 | 可靠指标 | | |
|------|------|-----|-----|
| | 一级 | 二级 | 三级 |
| 延性破坏 | 3.7 | 3.2 | 2.7 |
| 脆性破坏 | 4.2 | 3.7 | 3.2 |

表 14 结构构件众值烈度下承载力极限状态设计时采用的可靠指标值

Tab.14 Reliability index for structural members under frequent intensity based on ultimate limited state design

| 破坏类型 | 可靠指标 | | |
|------|------|-----|-----|
| | 一级 | 二级 | 三级 |
| 延性破坏 | 2.0 | 1.5 | 1.0 |
| 脆性破坏 | 2.5 | 2.0 | 1.5 |

4 设计可靠度分析

运用一次二阶矩法,可以得到最优的抗力分项系数.具体方法如下:首先假定某一抗力分项系数,采用一次二阶矩法求得根据该抗力分项系数所对应的可靠度;然后和目标可靠度对比,不断调整抗力分项系数,直到所求得的可靠度等于目标可靠度为止。

4.1 非抗震设计可靠度分析

4.1.1 强度设计可靠度分析

根据表 7 确定的抗力不定性统计结果,采用表 10 所列的荷载组合,运用一次二阶矩法得到 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴心受力构件的强度设计最优抗力分项系数 γ_R 分别为:0.915、0.859.表 15 和表 16 分别列出了 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢在该最优抗力分项系数下各荷载组合所对应的可靠指标。

表 15 Q235 钢可靠指标 ($\gamma_R=0.915$)

Tab.15 Reliability index for Q235 steel when $\gamma_R=0.915$

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1 | 3.720 7 | 3.913 5 | 4.028 8 | 3.975 5 | 3.909 6 |
| 组合 2 | 3.860 6 | 4.114 3 | 4.231 3 | 4.178 8 | 4.096 2 |
| 组合 3 | 3.255 9 | 3.361 5 | 3.323 7 | 3.202 9 | 3.286 0 |
| 组合 4 | 3.666 9 | 3.830 8 | 3.962 4 | 3.931 8 | 3.848 0 |
| 组合 5 | 3.607 6 | 3.728 0 | 3.856 0 | 3.841 8 | 3.758 4 |
| 组合 6 | 3.474 4 | 3.649 0 | 3.710 6 | 3.686 5 | 3.630 1 |
| 组合 7 | 3.383 1 | 3.549 5 | 3.586 0 | 3.527 4 | 3.511 5 |

4.1.2 稳定设计可靠度分析

根据表 8 确定的抗力不定性统计结果,运用一

次二阶矩法得到 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴心受力构件的稳定设计最优抗力分项系数 γ_R 分别为:1.084、1.196.表 17 和表 18 分别列出了 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢在该最优抗力分项系数下各荷载组合所对应的可靠指标。

表 16 Q345 钢可靠指标 ($\gamma_R=0.859$)

Tab.16 Reliability index for Q345 steel when $\gamma_R=0.859$

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1 | 4.680 9 | 4.482 4 | 4.258 3 | 4.053 0 | 4.368 7 |
| 组合 2 | 4.854 2 | 4.661 6 | 4.443 7 | 4.247 6 | 4.551 8 |
| 组合 3 | 3.960 0 | 3.756 3 | 3.446 4 | 3.201 2 | 3.591 0 |
| 组合 4 | 4.632 7 | 4.454 9 | 4.251 6 | 4.059 8 | 4.349 8 |
| 组合 5 | 4.560 6 | 4.389 7 | 4.203 3 | 4.022 7 | 4.294 0 |
| 组合 6 | 4.312 3 | 4.234 2 | 4.042 1 | 3.881 8 | 4.117 6 |
| 组合 7 | 4.180 5 | 4.061 6 | 3.822 3 | 3.628 0 | 3.923 1 |

表 17 Q235 钢可靠指标 ($\gamma_R=1.084$)

Tab.17 Reliability index for Q235 steel when $\gamma_R=1.084$

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1 | 3.625 9 | 3.830 1 | 3.999 3 | 3.979 6 | 3.858 7 |
| 组合 2 | 3.755 4 | 4.026 4 | 4.203 6 | 4.183 5 | 4.042 2 |
| 组合 3 | 3.202 5 | 3.321 1 | 3.325 1 | 3.231 0 | 3.269 9 |
| 组合 4 | 3.574 8 | 3.745 2 | 3.921 4 | 3.924 9 | 3.791 6 |
| 组合 5 | 3.519 9 | 3.645 9 | 3.806 9 | 3.824 9 | 3.699 4 |
| 组合 6 | 3.400 2 | 3.579 7 | 3.669 9 | 3.670 1 | 3.580 0 |
| 组合 7 | 3.316 5 | 3.488 3 | 3.561 6 | 3.530 6 | 3.474 2 |

表 18 Q345 钢可靠指标 ($\gamma_R=1.196$)

Tab.18 Reliability index for Q345 steel when $\gamma_R=1.196$

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1 | 3.673 1 | 3.872 0 | 4.007 9 | 3.966 7 | 3.879 9 |
| 组合 2 | 3.809 8 | 4.072 2 | 4.211 6 | 4.170 8 | 4.066 1 |
| 组合 3 | 3.222 0 | 3.333 4 | 3.311 6 | 3.200 7 | 3.266 9 |
| 组合 4 | 3.620 0 | 3.787 9 | 3.937 1 | 3.918 8 | 3.816 0 |
| 组合 5 | 3.562 1 | 3.685 7 | 3.827 2 | 3.824 8 | 3.725 0 |
| 组合 6 | 3.433 4 | 3.611 2 | 3.684 2 | 3.669 1 | 3.599 5 |
| 组合 7 | 3.344 7 | 3.514 4 | 3.565 3 | 3.516 8 | 3.485 3 |

4.2 抗震设计可靠度分析

4.2.1 强度设计可靠度分析

根据表 7 确定的抗力不定性统计结果,分别采用表 11 和表 12 所列的荷载组合,运用一次二阶矩法分别得到 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴心受力构件在考虑和不考虑风荷载作用下的强度设计最优抗力分项系数 γ_E 分别为:0.887、0.734 和 0.886、0.740.表 19 和表 20 分别列出了 Q235 冷弯厚壁型钢在最优抗力分项系数下各荷载组合所对应的可靠指标,表 21 和表 22 分别列出了 Q345 冷弯厚壁型钢在最优抗力分项系数下各荷载组合所对应的可靠指标。

表 19 Q235 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 0.887$) (考虑风荷载)Tab.19 Seismic reliability index for Q235 steel when $\gamma_E = 0.887$ (with wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|--------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1Ew | 2.115 0 | 2.123 6 | 2.118 1 | 2.036 0 | 2.098 2 |
| 组合 2Ew | 1.939 3 | 1.951 8 | 1.956 5 | 1.901 7 | 1.937 3 |
| 组合 3Ew | 1.765 7 | 1.782 1 | 1.796 7 | 1.767 3 | 1.777 9 |
| 组合 4Ew | 1.872 1 | 1.886 1 | 1.907 2 | 1.922 8 | 1.897 0 |
| 组合 5Ew | 1.685 7 | 1.701 3 | 1.726 2 | 1.752 4 | 1.716 4 |
| 组合 6Ew | 1.502 0 | 1.519 1 | 1.547 7 | 1.584 0 | 1.538 2 |

表 20 Q235 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 0.734$) (不考虑风荷载)Tab.20 Seismic reliability index for Q235 steel when $\gamma_E = 0.734$ (without wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|-------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1E | 1.620 8 | 1.613 3 | 1.589 0 | 1.504 0 | 1.581 8 |
| 组合 2E | 1.653 7 | 1.678 5 | 1.716 9 | 1.747 8 | 1.699 2 |
| 组合 3E | 1.532 7 | 1.531 9 | 1.527 9 | 1.509 9 | 1.525 6 |
| 组合 4E | 1.550 0 | 1.566 3 | 1.596 0 | 1.643 3 | 1.588 9 |

表 21 Q345 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 0.886$) (考虑风荷载)Tab.21 Seismic reliability index for Q345 steel when $\gamma_E = 0.886$ (with wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|--------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1Ew | 2.247 1 | 2.273 9 | 2.293 7 | 2.202 7 | 2.254 4 |
| 组合 2Ew | 2.048 5 | 2.078 1 | 2.107 6 | 2.052 5 | 2.071 7 |
| 组合 3Ew | 1.850 0 | 1.882 1 | 1.920 9 | 1.899 1 | 1.888 0 |
| 组合 4Ew | 1.902 7 | 1.924 8 | 1.961 6 | 2.002 6 | 1.947 9 |
| 组合 5Ew | 1.700 9 | 1.723 7 | 1.762 9 | 1.813 0 | 1.750 1 |
| 组合 6Ew | 1.500 3 | 1.523 7 | 1.565 0 | 1.623 6 | 1.553 1 |

表 22 Q345 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 0.740$) (不考虑风荷载)Tab.22 Seismic reliability index for Q345 steel when $\gamma_E = 0.740$ (without wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|-------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1E | 1.621 1 | 1.618 4 | 1.604 3 | 1.538 2 | 1.595 5 |
| 组合 2E | 1.654 8 | 1.685 1 | 1.735 4 | 1.790 6 | 1.716 5 |
| 组合 3E | 1.515 1 | 1.515 5 | 1.514 2 | 1.502 7 | 1.511 9 |
| 组合 4E | 1.532 8 | 1.550 6 | 1.583 7 | 1.639 2 | 1.576 6 |

4.2.2 稳定设计可靠度分析

根据表 8 确定的抗力不定性统计结果,分别采用表 11 和表 12 所列的荷载组合,运用一次二阶矩法分别得到 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴心受力构件在考虑和不考虑风荷载作用下的稳定设计最优抗力分项系数 γ_E 分别为:1.024、0.840 和 1.155、0.950. 表 23 和表 24 分别列出了 Q235 冷弯厚壁型钢在最优抗力分项系数下各荷载组合所对应的可靠指标,表 25 和表 26 分别列出了 Q345 冷弯厚壁型钢在最优抗力分项系数下各荷载组合所对应的可靠指标.

表 23 Q235 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 1.024$) (考虑风荷载)Tab.23 Seismic reliability index for Q235 steel when $\gamma_E = 1.024$ (with wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|--------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1Ew | 2.076 7 | 2.081 1 | 2.070 0 | 1.988 9 | 2.054 2 |
| 组合 2Ew | 1.907 5 | 1.916 0 | 1.915 3 | 1.859 6 | 1.899 6 |
| 组合 3Ew | 1.740 9 | 1.753 6 | 1.762 7 | 1.731 2 | 1.747 1 |
| 组合 4Ew | 1.860 5 | 1.872 1 | 1.888 9 | 1.898 0 | 1.879 9 |
| 组合 5Ew | 1.678 9 | 1.692 3 | 1.713 3 | 1.733 3 | 1.704 5 |
| 组合 6Ew | 1.500 5 | 1.515 6 | 1.540 7 | 1.571 1 | 1.532 0 |

表 24 Q235 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 0.840$) (不考虑风荷载)Tab.24 Seismic reliability index for Q235 steel when $\gamma_E = 0.840$ (without wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|-------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1E | 1.609 0 | 1.599 4 | 1.570 9 | 1.478 9 | 1.564 5 |
| 组合 2E | 1.641 8 | 1.664 4 | 1.698 2 | 1.720 5 | 1.681 2 |
| 组合 3E | 1.529 3 | 1.527 8 | 1.522 2 | 1.500 7 | 1.520 0 |
| 组合 4E | 1.546 6 | 1.562 1 | 1.590 1 | 1.633 6 | 1.583 1 |

表 25 Q345 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 1.155$) (考虑风荷载)Tab.25 Seismic reliability index for Q345 steel when $\gamma_E = 1.155$ (with wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|--------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1Ew | 2.101 1 | 2.108 1 | 2.100 4 | 2.018 7 | 2.082 1 |
| 组合 2Ew | 1.927 8 | 1.938 8 | 1.941 4 | 1.886 2 | 1.923 6 |
| 组合 3Ew | 1.756 9 | 1.771 8 | 1.784 3 | 1.754 1 | 1.766 8 |
| 组合 4Ew | 1.868 2 | 1.881 4 | 1.900 8 | 1.914 0 | 1.891 1 |
| 组合 5Ew | 1.683 7 | 1.698 4 | 1.721 8 | 1.745 7 | 1.712 4 |
| 组合 6Ew | 1.501 9 | 1.518 3 | 1.545 5 | 1.579 6 | 1.536 3 |

表 26 Q345 钢抗震可靠指标 ($\gamma_E = 0.950$) (不考虑风荷载)Tab.26 Seismic reliability index for Q345 steel when $\gamma_E = 0.950$ (without wind load)

| 组合号 | 可靠指标 | | | | 均值 |
|-------|-------------|------------|------------|------------|---------|
| | $\rho=0.25$ | $\rho=0.5$ | $\rho=1.0$ | $\rho=2.0$ | |
| 组合 1E | 1.611 6 | 1.603 2 | 1.576 9 | 1.488 7 | 1.570 1 |
| 组合 2E | 1.644 6 | 1.668 4 | 1.705 0 | 1.732 4 | 1.687 6 |
| 组合 3E | 1.527 4 | 1.526 2 | 1.521 3 | 1.501 6 | 1.519 1 |
| 组合 4E | 1.544 7 | 1.560 6 | 1.589 5 | 1.635 1 | 1.582 5 |

5 承载力抗震调整系数

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[10]指出,现阶段大部分结构构件截面抗震验算时采用了各有关规范的承载力设计值 R_d ,因此,抗震设计的抗力分项系数就相应地变为非抗震设计的构件承载力设计值的抗震调整系数 γ_{RE} ,即 $\gamma_{RE} = R_d/R_{dE}$ 或 $R_{dE} = R_d/\gamma_{RE}$, R_{dE} 为抗震承载力设计值. 因此, $\gamma_{RE} = R_d/R_{dE} = \gamma_E/\gamma_R$.

根据前文的分析结果, Q235 冷弯厚壁型钢不考

虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.734/0.915 = 0.80$, 考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.887/0.915 = 0.97$; Q345 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.740/0.859 = 0.86$, 考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.886/0.859 = 1.03$; Q235 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.840/1.084 = 0.77$, 考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 1.024/1.084 = 0.94$; Q345 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.950/1.196 = 0.79$, 考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 1.155/1.196 = 0.97$. 可见, Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的强度和稳定设计承载力抗震调整系数在 0.77~0.86 之间; Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢考虑风荷载的强度和稳定设计承载力抗震调整系数均在 1.00 附近.

考虑到我国规范^[13,18]中强度和稳定设计的抗力分项系数均取为稳定设计的抗力分项系数, 这里偏保守地将 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢强度和稳定设计的抗力分项系数统一取为 1.190, 则 Q235 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.734/1.190 = 0.62$, 考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.887/1.190 = 0.75$; Q345 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.74/1.190 = 0.62$, 考虑风荷载的强度设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.886/1.190 = 0.74$; Q235 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.840/1.190 = 0.71$, 考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 1.024/1.190 = 0.86$; Q345 冷弯厚壁型钢不考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 0.950/1.190 = 0.80$, 考虑风荷载的稳定设计承载力抗震调整系数 $\gamma_{RE} = 1.155/1.190 = 0.97$.

值得注意的是, 冷弯厚壁型钢多用在低多层建筑, 即规范^[10]规定的一般结构, 可以不考虑风荷载. 因此, 建议 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢的强度设计承载力抗震调整系数取 0.65, 稳定设计承载力抗震调整系数取 0.80. 对于风荷载起控制作用的情况, 本文只考虑了 $\rho_{wE} = 0.75, 1.00, 1.25$ 这 3 种情况. 从表 19、表 21、表 23、表 25 可以看到, 随着 ρ_{wE} 的增大可靠度指标逐渐减小. 因此, 当 ρ_{wE} 不大于 1.25 时可取强度设计承载力抗震调整系数为 0.75, 稳定设计承载力抗震调整系数为 1.00; 当 ρ_{wE} 大于 1.25 时应做

进一步分析.

6 结论

对 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢轴压构件进行抗震及非抗震设计可靠度分析, 最终给出了 Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢构件的强度和稳定设计抗力分项系数及承载力抗震调整系数建议值:

(1) Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢的强度和稳定设计抗力分项系数建议取为 1.190, 相应的屈服强度设计值分别为 195 MPa 和 290 MPa;

(2) 对于一般结构, Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢的强度和稳定设计承载力抗震调整系数建议分别取为 0.65 和 0.80;

(3) 对于风荷载起控制的结构, Q235 和 Q345 冷弯厚壁型钢的强度和稳定设计承载力抗震调整系数建议分别取为 0.75 和 1.00, 当风荷载作用标准值与地震作用标准值的比值大于 1.25 时应做进一步分析.

参考文献:

- [1] 李元齐, 李功文, 沈祖炎, 等. 冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的屈服强度计算方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5): 1.
LI Yuanqi, LI Gongwen, SHEN Zuyan, et al. Modification method for yield strength of cold-formed thick-walled steel sections considering cold-forming effect [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5): 1.
- [2] 温东辉, 沈祖炎, 李元齐. 冷弯厚壁型钢冷弯效应及残余应力研究进展 [J]. 结构工程师, 2010, 26(1): 156.
WEN Donghui, SHEN Zuyan, LI Yuanqi. Research advances on effect of cold-forming and residual stresses in cold-formed thick-walled steel [J]. Structural Engineers, 2010, 26(1): 156.
- [3] 朱爱珠. 冷弯厚壁型钢冷弯效应试验研究及冷弯残余应力场分析 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
ZHU Aizhu. Experimental investigation of cold-formed effect on thick-walled steel members and analysis of the cold-formed residual stress field [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [4] 王莉萍. 厚壁冷弯型钢冷弯效应研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
WANG Liping. Experimental investigation on cold-forming effect of thick-walled steel sections [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [5] 胡盛德, 李立新, 周家林, 等. 厚壁方矩形管冷弯效应对比分析 [J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(1): 76.
HU Shengde, LI Lixin, ZHOU Jialin, et al. Comparative analysis on strain hardening of thick-wall cold formed steel tube with square and rectangular hollow section [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28(1): 76.

- [6] 韩军科, 杨风利, 杨靖波, 等. 厚壁冷弯型钢冷弯效应试验研究和分析 [J]. 建筑结构, 2010, 40(增刊): 200.
HAN Junke, YANG Fengli, YANG Jingbo, *et al.* Experimental study and analysis on effect of cold-formed procedures to cold-formed thick-walled steel members [J]. Building Structure, 2010, 40(S): 200.
- [7] 郭耀杰, 朱爱珠. 冷弯厚壁型钢冷弯效应试验研究 [J]. 钢结构, 2004, 5(增刊): 205.
GUO Yaojie, ZHU Aizhu. Experimental investigation on cold-forming effect of thick-walled steel [J]. Steel Construction, 2004, 5(S): 205.
- [8] 侯刚. 冷弯非薄壁方管柱轴压性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
HOU Gang. Experimental research and numerical analysis on axial compression performance of cold-formed non-thin-walled square hollow sections [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [9] 李元齐, 李功文, 沈祖炎, 等. 冷弯厚壁型钢轴压构件设计可靠度分析 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5): 8.
LI Yuanqi, LI Gongwen, SHEN Zuyan, *et al.* Design reliability analysis of cold-formed thick-walled steel members under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5): 8.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [12] 陈国兴, 李继华. 钢构件材料强度及截面几何特性的统计参数 [J]. 重庆建筑工程学院学报, 1985, 1985(1): 1.
CHEN Guoxing, LI Jihua. Statistical parameters of material strength and geometric properties of shapes for steel members [J]. Journal of Chongqing Civil Engineering Institute, 1985, 1985(1): 1.
- [13] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of steel structures: GB 50017—2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [14] 中华人民共和国国家计划委员会. 建筑结构设计统一标准: GBJ 68—84 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
State Planning Commission of the People's Republic of China. Unified standard for design of building structure: GBJ 68—84 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [15] 高小旺, 鲍霭斌. 地震作用的概率模型及其统计参数 [J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 13.
GAO Xiaowang, BAO Aibin. Probabilistic model and its statistical parameters for seismic load [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1985, 5(1): 13.
- [16] 欧进萍, 段宇博. 高层建筑的抗震可靠度分析与优化设计 [J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(1): 1.
OU Jinping, DUAN Yubo. Seismic reliability analysis and optimum design of tall buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(1): 1.
- [17] 中华人民共和国建设部. 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures: GB50068—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [18] 中华人民共和国建设部. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB50018—2002 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code of cold-formed thin-wall steel structures: GB50018—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.