

基于性能的钢网格墙抗震设计方法研究

闫翔宇^{1,2}, 于越¹, 张莫凡³, 李振宇¹, 陈志华^{1*}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津理工大学 海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384;
3. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司, 河北 雄安新区 071700)

摘要: 钢网格墙具有良好的刚度、延性和抗侧承载力, 现行钢板剪力墙设计规范并不适用于钢网格墙。为完善钢网格墙的抗震设计方法, 本文提出基于性能的钢网格墙抗震设计方法(PBSD法)。该方法基于钢网格墙的性能特点确定了钢网格墙结构的抗震性能目标、失效模式和屈服位移; 基于能量守恒原理计算出结构在给定地震作用下的设计基底剪力; 基于结构在地震作用下的侧向力分布模式计算得出地震水平力的分布; 推导了钢网格构件的塑性设计公式及边缘梁、柱的弹性设计公式。为验证方法的可行性, 对某钢框架-钢板剪力墙结构按照钢框架-钢网格墙结构重新设计, 并采用该方法对重新设计的结构进行弹性分析和动力弹塑性分析, 为钢网格墙结构抗震设计提供了参考依据。

关键词: 钢网格墙; 基于性能的抗震设计; 失效模式; 目标位移; 塑性设计

中图分类号: TU394

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0085-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240125001

Research on Performance-Based Seismic Design Method of Steel Grid Walls

YAN Xiangyu^{1,2}, YU Yue¹, ZHANG Mofan³, LI Zhenyu¹, CHEN Zhihua^{1*}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of Marine Energy and Intelligent Construction, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Xiong'an New Area Power Supply Company, Xiong'an New Area 071700, China)

*Corresponding author: zhchen@tju.edu.cn

Abstract: The existing specifications are more perfect for the design method of steel plate shear wall, but there is a lack of research on the design method of steel grid wall, which has enough stiffness, ductility and lateral bearing capacity. In order to improve the seismic design of steel grid wall system, this paper proposes a performance-based seismic design (PBSD) method of steel grid wall. Based on the performance characteristics of steel grid wall structure, the seismic performance target, failure mode and yield displacement of steel grid wall structure are determined. Based on the principle of energy conservation, the design base shear force of the structure under a given seismic level is calculated. The distribution of seismic horizontal force is obtained based on the lateral force distribution mode of the structure under earthquake. The plastic design formulas of steel grid members and the elastic design formulas of edge beams and columns are derived. In order to verify the feasibility of the proposed method, the method is used to redesign the

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1101005), 天津市科技计划(24JCYBJC00400)

作者简介:

闫翔宇(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事预应力结构和空间结构方面的研究。E-mail: yanxy@tju.edu.cn。

于越(2000—), 女, 硕士, 主要从事结构工程方面的研究。

通信作者:

陈志华(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事组合结构和空间结构方面的研究。E-mail: zhchen@tju.edu.cn。

actual steel frame-steel plate shear wall structure into steel frame-grid wall structure, and the elastic analysis and dynamic elastic-plastic analysis of the redesigned structure are carried out to provide reference for the seismic design of steel grid wall structure.

Keywords: steel grid wall; performance-based seismic design; failure mode; target displacement; plastic design

钢网格墙是闫翔宇等^[1]基于“空间结构网格化思想”,在钢板剪力墙结构基础上提出的一种新型抗侧力体系,其特点是将整个钢板换成双向布置的钢网格构件,钢网格构件通过焊接或螺栓连接在边缘梁、柱的鱼尾板上,钢网格构件交叉点处通过焊接或栓接进行连接,或者不进行连接。与普通钢板墙相比,钢网格墙具有如下优势:(1)钢网格墙采用成品型钢,只有型钢端部和鱼尾板焊接,避免大面积加劲肋的焊接,显著减少了焊接工作量;(2)钢网格墙的构件以型钢为主,占用面积相对较小,方便运输;(3)钢网格墙构件的加工和制作均在工厂进行,现场仅需吊装和焊接连接,且单根钢构件重量较小,吊装方便,可有效提高钢网格墙的安装速度和精度,具有一定的经济优势。

张天柱^[2]通过数值模拟和拟静力试验研究,验证了钢网格墙抗震性能良好,但针对该结构的抗震设计方法研究尚不完善。现行规范主要针对钢板剪力墙的设计做出了规定,如美国的AISC-341 2005规范^[3]、中国的《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99-2015)^[4]、《钢板剪力墙技术规程》(JGJ/T 380-2015)^[5]等。上述规范均是基于钢板剪力墙结构的弹性承载力进行设计,未考虑结构非弹性的影响,基于此设计的结构在罕遇地震下会进入塑性阶段,产生较大的非弹性变形。为了满足建筑结构对于安全性与经济性所提出的更高要求,基于性能的抗震设计方法亟待提出。

20世纪90年代,美国学者MOEHLE^[6]提出的基于性能的抗震设计思想引起了广泛的关注,并在欧美、日本等地区迅速发展。美国先后发布了规范ATC-40^[7]、FEMA 273^[8]、ASCE 41^[9],将基于性能的抗震设计思想应用于法规性规范中。日本于1996年将基于性能的设计方法纳入到《建筑标准法》的修订中^[10]。

我国学者基于此也开展了相关研究。钱稼如等^[11]介绍了国外基于位移的抗震设计研究现状和方法,并讨论了仍需解决的若干问题;谢礼立等^[12]编写了我国第一部基于性能的抗震设计方法标准《建筑工程抗震性态设计导则》。随后学者们对不同结构基于性能的抗震设计方法开展研究。罗永峰等^[13]总结了空间网格结构性能化抗震设计采取的不同分析方法的现状和不足;袁昌鲁^[14]和郝际平等^[15]研究了钢框架—密肋网格复合钢板剪力墙的滞回性能和破坏模式,并提出了钢板剪力墙基于性能的塑性设计方法;崔瑶等^[16]针对滑动节点板支撑钢框架提出了基于位移的抗震设计方法;门进杰等^[17]针

对带耗能框架的框排架混合结构提出了基于性能的两阶段抗震设计方法。基于以上研究成果,本文将对钢网格墙结构基于性能的抗震设计方法(PBSD法)开展研究。

1 基于性能的抗震设计方法

1.1 目标位移和破坏模式

目标位移能够反映结构的延性性能,抗震设计时应保证结构破坏出现在目标位移之后,同时结构应具有合理的破坏模式,以形成多道抗震防线,保证结构具有充分的耗能能力。根据钢网格墙模型试验数据,绝大多数试件的极限层间位移角大于 $1/50$ ^[18-19],为了充分发挥钢网格墙的抗侧能力,同时保证结构的安全性,建议将目标位移角取为2%。

模型试验表明,在侧向加载过程中,钢网格构件率先进入屈服阶段,起到主要的耗能作用,而柱脚的破坏往往会导致结构破坏^[18-19]。基于模型试验现象,设定钢网格墙结构的破坏模式如图1所示,即钢网格构件最先进入屈服阶段,塑性充分发展,框架梁端出现塑性铰,最终柱脚出现塑性铰,结构破坏,并且层间位移沿高度方向均匀分布。

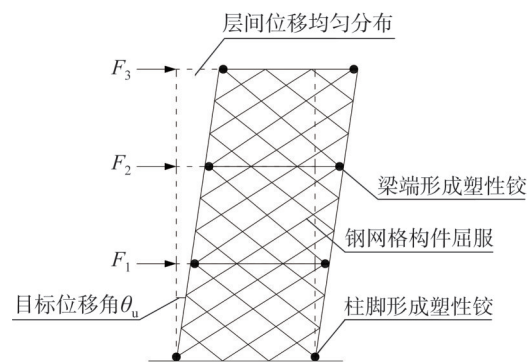


图1 破坏模式

Fig. 1 Mode of failure

1.2 屈服位移

结构层间屈服位移角的取值能够影响到结构延性性能参数和设计基底剪力的结果。钢网格墙的层间位移可以分解为剪切变形和弯曲变形两部分,如图2所示。

1.2.1 钢网格墙的剪切变形

研究钢网格墙剪切变形时,忽略边缘梁、柱变形及钢网格构件屈曲的影响,假定变形前后钢网格构件保持直线,结构的剪切变形由钢网格构件的轴向变形引起。基

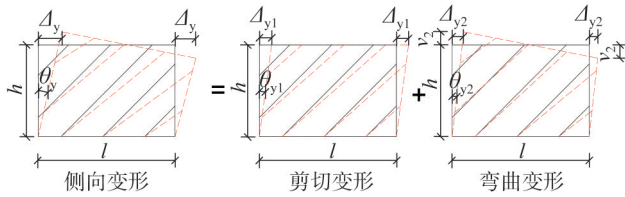


图2 钢网格墙的层间位移

Fig. 2 Inter-story displacement of steel grid wall

于以上假定,受压、受拉钢网格构件变形是对称的,故以受拉钢网格构件为例分为三类(图3):(1)顶端连接顶梁,底端连接框架柱的钢网格构件;(2)顶端连接顶梁,底端连接底梁的钢网格构件;(3)顶端连接框架柱,底端连接底梁的钢网格构件。

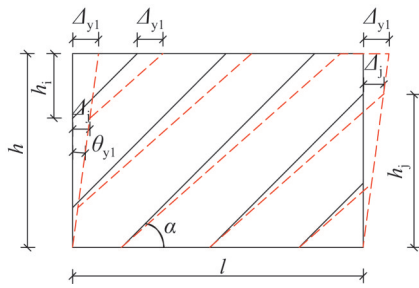


图3 钢网格墙的剪切变形

Fig. 3 Shear deformation of steel grid wall

推导三类钢网格构件的应变与结构剪切变形之间的关系,发现在相同的剪切侧移下三类构件的应变相同:

$$\epsilon = \frac{h_i}{h} \frac{\Delta_{y1} \cos \alpha}{h_i / \sin \alpha} = \frac{\Delta_{y1} \cos \alpha}{h / \sin \alpha} = \frac{h_j}{h} \frac{\Delta_{y1} \cos \alpha}{h_j / \sin \alpha} = \frac{\Delta_{y1} \sin \alpha \cos \alpha}{2h} = \frac{\Delta_{y1} \sin(2\alpha)}{2h} \quad (1)$$

因此可以用钢网格构件的应变表示由结构剪切变形产生的层间位移角:

$$\theta_{y1} = \frac{\Delta_{y1}}{h} = \frac{2\epsilon_{yt}}{\sin(2\alpha)} = \frac{2f_{yt}}{E \sin(2\alpha)} \quad (2)$$

式中: ϵ_{yt} 为钢网格构件的屈服应变, f_{yt} 为钢网格构件所采用钢材的屈服强度, E 为钢材弹性模量。

1.2.2 钢网格墙的弯曲变形

研究钢网格墙的弯曲变形时,将钢网格墙整体视为一纯受弯的悬臂梁,在弯矩作用下,两侧框架柱出现轴向伸缩变形,如图4所示。

由弯曲变形引起的层间位移角为:

$$\theta_{y2} = \frac{\sigma}{E} \cdot \frac{h}{l} = \frac{f_{yc}}{2E\gamma_R} \cdot \frac{h}{l} \quad (3)$$

式中: f_{yc} 为框架柱的屈服强度, γ_R 为钢材的抗力分项

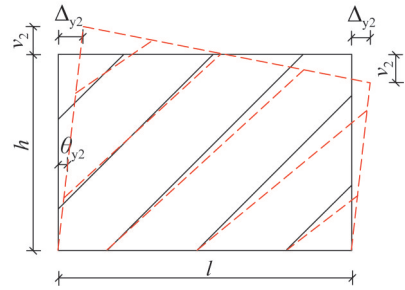


图4 钢网格墙的弯曲变形

Fig. 4 Bending deformation of steel grid wall

系数。

将剪切变形和弯曲变形引起的层间位移角叠加,可得到结构的屈服层间位移角:

$$\theta_y = \theta_{y1} + \theta_{y2} = \frac{2f_{yt}}{E \sin(2\alpha)} + \frac{f_{yc}}{2E\gamma_R} \cdot \frac{h}{l} \quad (4)$$

1.3 设计基底剪力与侧向力分布

设计基底剪力的求解是得到结构在目标位移下各层等效侧向力的前提,根据能量守恒原理,结构单向推覆至目标位移所输入的能量等于等效弹性单自由度体系达到目标位移时所需的应变能,而弹塑性体系的总输入能量可用弹性设计谱中获得的弹性输入能量进行计算^[20],如图5所示。

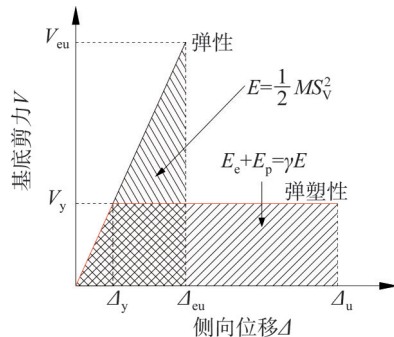


图5 能量守恒原理

Fig. 5 Principle of conservation of energy

根据 AKIYAMA^[21]提出的弹性应变能计算公式和塑性能量等于等效侧向力所做的塑性功,可得基底剪力系数:

$$\lambda = \frac{V_1}{G} = \frac{-\xi + \sqrt{\xi^2 + 4\gamma S_a^2}}{2} \quad (5)$$

$$\xi = H^* \cdot \frac{8\theta_p \pi^2}{T^2 g} = \sum \eta_i H_i \cdot \frac{8\theta_p \pi^2}{T^2 g} \quad (6)$$

式中: V_1 为设计基底剪力, G 为结构总重力荷载代表值, γ 为能量修正系数, S_a 为谱加速度, θ_p 为塑性位移角, $\theta_p = \theta_u - \theta_y$, θ_u 为目标位移角, θ_y 为屈服位移角, T 为结构自振

周期, g 为重力加速度, H_i 为结构第 i 层的高度, η_i 为楼层侧向力分布系数。

LEELATAVIWAT^[22] 提出了钢网格墙结构在弹塑性状态下的层剪力分布模式, 它能够准确地反映结构进入弹塑性后受力状态以及高阶振型的影响。引入楼层剪力分布系数 β_i , 为第 i 层剪力与顶层剪力的比值, 即:

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \frac{\left(\sum_{j=i}^n (G_j H_j) / \sum_{j=1}^n (G_j H_j) \right)^{0.75T^{-0.2}} \times V_1}{\left(G_n H_n / \sum_{j=1}^n (G_j H_j) \right)^{0.75T^{-0.2}} \times V_1} = \frac{\left(\sum_{j=i}^n (G_j H_j) / (G_n H_n) \right)^{0.75T^{-0.2}}}{1} \quad (7)$$

式中: G_j 、 G_n 分别为结构 j 层、顶层的重力荷载代表值, H_j 、 H_n 分别为结构 j 层、顶层的计算高度。

根据相邻两层剪力差计算层等效侧向力, 可得楼层侧向力分布系数 η_i 与 β_i 之间的关系:

$$\eta_i = \frac{F_i}{V_1} = \frac{(\beta_i - \beta_{i+1}) V_n}{\beta_1 V_n} = \frac{\beta_i - \beta_{i+1}}{\beta_1} \quad (8)$$

式中: F_i 为第 i 层等效侧向力。

1.4 构件设计

1.4.1 钢网格构件的塑性设计

罕遇地震下, 钢网格墙结构按照理想失效模式发生破坏, 主要依靠受拉钢网格构件屈服伸长和梁端、柱脚塑性铰的转动耗散能量。采用能量法设计钢网格构件, 结构达到预定的目标位移和破坏模式时, 外力功等于内力功, 即:

$$\sum_{i=1}^n (F_i H_i \theta_p) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (f_{yt} A_{ij} \delta_{ij}) + \sum_{i=1}^n (2M_{pbi} \theta_p) + 2M_{pc} \theta_p \quad (9)$$

式中: A_{ij} 为第 i 层 T 型钢截面面积, δ_{ij} 为第 i 层第 j 根 T 型钢的屈服伸长量, M_{pbi} 为梁端塑性弯矩, M_{pc} 为柱脚塑性弯矩, θ_p 为塑性层间位移角。

假定 T 型钢的屈服伸长量为结构塑性转动时的伸长量, 忽略框架梁、柱的轴向变形, 钢网格构件保持直线, 分别推导三种钢网格构件的屈服伸长量, 可以统一表示为:

$$\delta_{ij} = \frac{h^*}{h} \Delta_p \cos \alpha \quad (10)$$

式中: h^* 为钢网格构件两端沿高度方向的间距, Δ_p 为塑性层间位移, $\Delta_p = \theta_p h$ 。

1.4.2 边框梁设计

地震作用下, 钢网格墙结构达到预设的破坏模式时, 其塑性铰主要出现在钢网格构件、边缘梁端和底层柱脚处, 假定受拉钢网格构件全截面进入屈服, 受压钢网格构件受压屈曲, 按照 1.4.1 节中的公式确定钢网格构件的截面面积, 此时, 边框梁的受力情况如图 6 所示。对边框梁

采用《钢结构设计标准》(GB50017-2017)^[23] 中规定的弹性设计法, 按受弯构件进行设计, 并对其梁端抗弯承载力和梁腹板抗剪承载力进行验算。

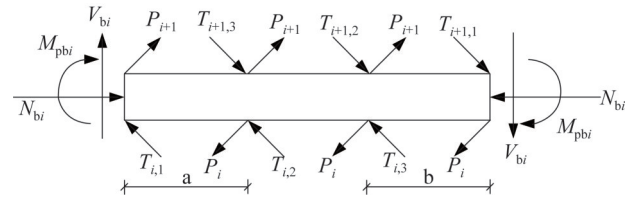


图 6 框架梁受力图

Fig. 6 Force diagram of frame beam

为使公式形式简便, 将钢网格构件轴力作用点处的所有轴力进行合并, 并分解成水平、竖向分力, 如图 7 所示。

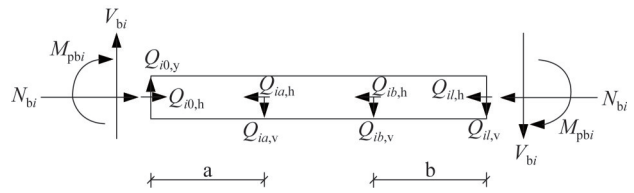


图 7 框架梁受力简图

Fig. 7 Simplified force diagram of frame beam

为保证仅在梁端形成塑性铰, 钢网格构件作用点处以及梁跨中的弯矩应小于梁端塑性铰弯矩, 需满足:

$$\frac{l-2a}{l} M_{pbi} + \frac{Q_{ia,v} a(l-a) + Q_{ib,v} ab}{l} + \frac{1}{2} q_{Gi} a(l-a) \leq M_{pbi} \quad (11)$$

$$\left| \frac{l-2b}{l} M_{pai} + \frac{Q_{ib,v} b(l-b) + Q_{ia,v} ab}{l} + \frac{1}{2} q_{Gi} b(l-b) \right| \leq M_{pbi} \quad (12)$$

$$\frac{1}{8} q_{Gi} l^2 + \frac{Q_{ia,v} a + Q_{ib,v} b}{2} \leq M_{pbi} \quad (13)$$

$$M_{pbi} = W_{pbi} f_{by} \quad (14)$$

式中: $Q_{ia,v} = (P_i - P_{i+1} + T_{i+1,3} - T_{i,2}) \sin \alpha$, $Q_{ib,v} = (P_i - P_{i+1} + T_{i+1,2} - T_{i,3}) \sin \alpha$, q_{Gi} 为第 i 层重力荷载代表值作用在梁上的线荷载, f_{by} 为钢梁材料的屈服强度, W_{pbi} 为边框梁的塑性截面模量。

同时, 梁腹板不发生剪切屈服, 需要根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017)^[23] 对梁腹板的抗剪承载力进行验算:

$$\frac{Q_{ia,v}(l-a) + Q_{ib,v}b - Q_{i0,v}l}{l} + \frac{q_{Gi}l}{2} - \frac{2M_{pbi}}{l} \leq V_{bu} \quad (15)$$

$$\frac{Q_{ib,v}(l-b) + Q_{ia,v}a + Q_{il,v}l}{l} + \frac{q_{Gi}l}{2} + \frac{2M_{pbi}}{l} \leq V_{bu} \quad (16)$$

式中： V_{bu} 为梁截面的抗剪承载力。

1.4.3 边框柱设计

边框柱采用《钢结构设计标准》(GB50017—2017)^[23]规定的弹性设计法,按压弯构件进行设计,且对其抗剪承载力进行验算。设计中,钢网格构件截面均采用1.4.1节计算得到的截面,边框梁截面采用1.4.2节计算得到的截面,且受拉钢网格构件全截面进入屈服,受压钢网格构件受压屈曲,边框梁端全部出现塑性铰,此时,边框柱的计算简图如图8所示。

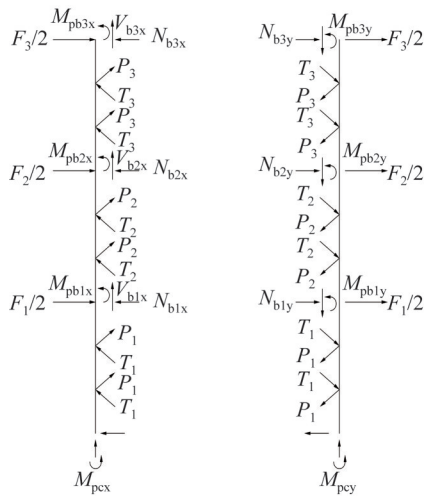


图8 框架柱受力简图

Fig. 8 Simplified force diagram of frame column

根据框架柱的受力简图,验算其抗剪承载力:

$$\left| \frac{\sum F_i}{2} + \left(\sum (P_i - T_i) \cos \alpha \right) - \sum_{i=1}^n N_{bix} \right| \leq V_{cu} \quad (17)$$

$$\left| \frac{\sum F_i}{2} - \left(\sum (P_i - T_i) \cos \alpha \right) + \sum_{i=1}^n N_{biy} \right| \leq V_{cu} \quad (18)$$

式中： V_{cu} 为柱腹板的抗剪承载力； N_{bix} 、 N_{biy} 分别为第*i*层框架梁端传递给两侧框架柱的轴力,计算时假定钢网格墙产生的附加轴力平均分配到框架梁两端,根据图7,其计算公式为:

$$N_{bix} = \frac{1}{2} (Q_{ia,h} + Q_{ib,h} + Q_{il,h} - Q_{i0,h}) \quad (19)$$

$$N_{biy} = -\frac{1}{2} (Q_{ia,h} + Q_{ib,h} + Q_{il,h} - Q_{i0,h}) \quad (20)$$

2 钢网格墙 PBSD 法设计步骤

针对上文提出的钢网格墙基于性能的抗震设计方法,钢网格墙 PBSD 法具体设计步骤如下:

1) 根据经验方法和相关规范,初步设计框架梁、框架柱以及钢网格构件的截面尺寸,建立结构计算模型,计

算弹性结构的基本周期。

2) 选定结构的目标位移角,利用式(4)计算结构的屈服位移角,进而确定结构的塑性位移角、延性系数、延性折减系数以及能量修正系数。

3) 根据加速度反应谱计算地震影响系数 α 和谱加速度。

4) 根据前面几步得到的设计参数,利用式(5)计算结构失效时的设计基底剪力,根据式(8)确定各层的侧向水平力。

5) 根据式(9)计算各层的钢网格构件截面面积,并选定截面形式。

6) 确定边框梁、边框柱的受力,按现行钢结构标准以及式(11)~(20)设计其截面。

3 算例分析

为检验 PBSD 法在实际工程设计中的可行性,本文以兰州新区保障性住房建设项目(二期)9#楼的钢框架-钢板剪力墙结构为研究背景,将其中的钢板剪力墙替换为钢网格墙,应用 PBSD 法对结构进行设计。

3.1 工程概况

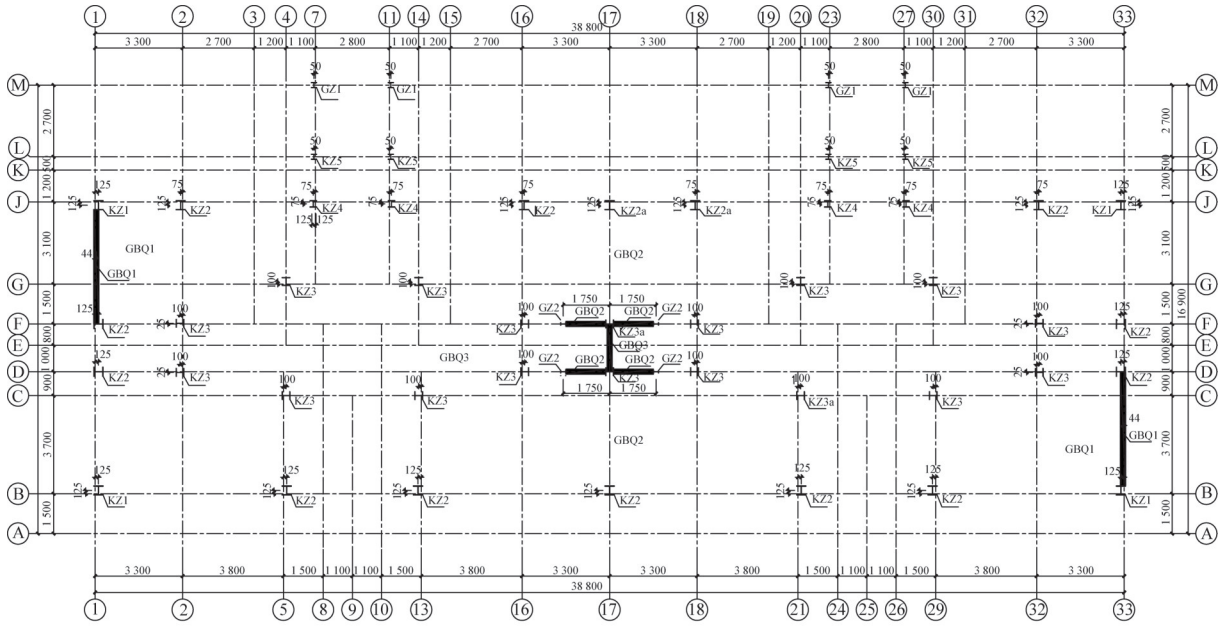
该工程的平面尺寸为 38.8 m × 16.9 m,地上 11 层,层高 2.9 m,地下 1 层,房屋高度为 31.9 m。原结构采用 H 型钢框架-钢板剪力墙结构体系,典型的结构平面布置如图 9 所示,所有钢材选用 Q355B,材料本构为理想弹塑性模型。该建筑的设计使用年限为 50 年,设防烈度为 7 度 (0.15 g),场地类别为 II 类,设计地震分组为三组,抗震等级为四级,地面粗糙度为 B 级,基本风压为 0.3 kN · m⁻²,迎风面体型系数为 0.8,背风面体型系数为 -0.5,风荷载计算用阻尼比为 2%。楼面、屋面荷载取值参考《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)^[24]。

3.2 PBSD 法算例设计

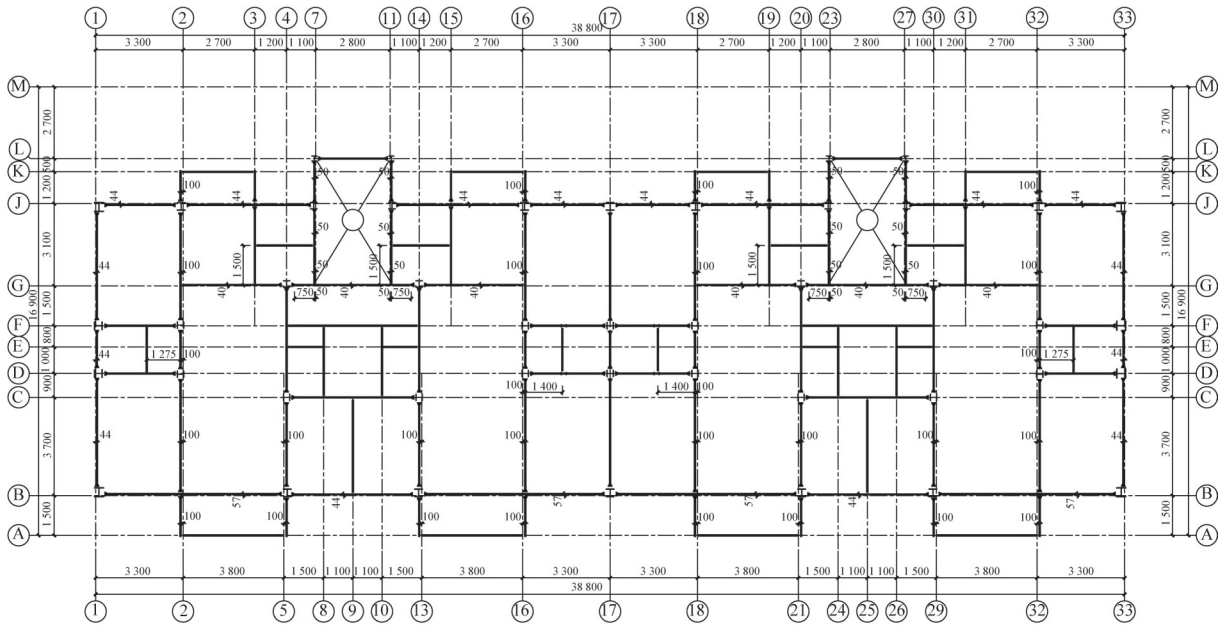
基于原钢框架-钢板剪力墙结构对钢框架-钢网格墙结构进行初步设计,其中框架梁、柱的尺寸与原结构一致,钢板墙(GBQ1)对应的钢网格墙(GWG1)每侧设置 5 条 T 型钢并平行等间距布置,钢板墙(GBQ2、GBQ3)对应的钢网格墙(GWG2、GWG3)每侧设置 4 条 T 型钢并平行等间距布置,如图 10 所示。根据墙厚限制以及与钢板用钢量相当的原则选取 T 型钢尺寸为 T62.5 mm × 60 mm × 6 mm × 8 mm 和 T50 mm × 50 mm × 5 mm × 7 mm。

特征周期 T_g 为 0.45 s,基本周期介于 T_g 、 $5T_g$ 之间,水平地震影响系数计算公式为:

$$\alpha = \left(\frac{T_g}{T} \right)^{0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.3 + 6\zeta}} \left(1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.08 + 1.6\zeta} \right) \alpha_{\max} \quad (21)$$



a) 柱、墙平面布置图



b) 梁平面布置图

图9 结构构件平面布置图

Fig. 9 Layout plan of structural components

式中： α_{max} 为水平地震影响系数最大值，7度(0.15g)罕遇地震下取为0.72； ζ 为阻尼比，罕遇地震下取为0.05。

根据式(1)~(8)和式(21)得到结构设计参数见表1。

按照式(9)~(20)计算各层钢网格构件的截面面积和边框梁、柱的受力，选定钢网格构件的截面形式，并按照《钢结构设计标准》(GB50017—2017)^[23]中的弹性设计方法对边框梁、柱进行设计，得到构件设计结果见表2。

3.3 弹性分析

采用Midas/Gen对结构进行弹性分析，得到结构整

体指标见表3。从表中可以看出各项指标都在《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)和《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB50011—2010)要求范围以内，说明结构抗侧力构件的平面布置合理有效。

3.4 动力弹塑性分析

采用YJK-EP软件进行罕遇地震下结构动力弹塑性分析，根据结构场地特征，在地震波列表中选择两条天然波 TH4TG055、TH3TG055 和一条人工波 RH3TG055，通过对比各地震波的反应谱、平均谱与规范谱可以发现，各主要周期上平均反应谱与规范谱差值最大值均小于

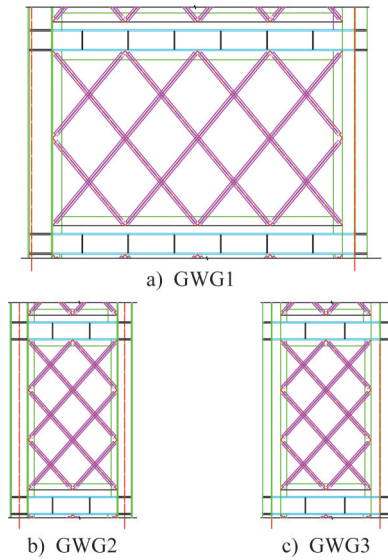


图 10 钢网格墙构件布置图

Fig. 10 Layout diagram of steel grid wall components

表 1 钢网格墙 PBSD 法设计参数

Table 1 PBSD design parameters of steel grid walls

设计参数	纵向	横向
基本周期 T/s	2.161	1.953
水平地震影响系数最大值 α	0.175	0.192
谱加速度 S_a	0.419 g	0.459 g
目标位移角 θ_u	0.02	0.02
屈服位移角 θ_y	0.004 6	0.003 9
塑性位移角 θ_p	0.015 4	0.016 1
延性系数 μ_s	4.33	5.16
延性折减系数 R_μ	4.33	5.16
能量修正系数 γ	0.41	0.35
ξ	0.641	0.818
设计基底剪力 V_1/kN	9 569	9 484

表 2 钢网格墙及其边缘构件截面形式

Table2 Section form of steel grid wall and its edge components

mm

钢网格墙	楼层	钢网格构件	边框架梁	边框架柱
GWG1	8~11	TN50×50×5×7	H250×125×8×8	HW350×350×12×19、HW250×250×9×14
	4~7	TN62.5×60×6×8	H300×150×10×10	HW350×350×12×19、HW300×300×10×15
	1~3	TN75×75×5×7	H350×175×10×10	HW350×350×12×19
GWG2	8~11	TN50×50×5×7	H250×125×8×8	HW200×200×8×12
	4~7	TN62.5×60×6×8	H300×150×10×10	HW250×250×9×14、HW200×200×8×12
	1~3	TN75×75×5×7	H350×175×10×10	HW300×300×10×15、HW250×250×9×14
GWG3	8~11	TN50×50×5×7	H250×125×8×8	HW200×200×8×12
	4~7	TN62.5×60×6×8	H300×150×10×10	HW250×250×9×14
	1~3	TN75×75×5×7	H350×175×10×10	HW300×300×10×15

表 3 结构整体指标

Table 3 Overall structural indexes

结构类型(软件)	钢框架-网格墙(MIDAS)	
结构总质量/t	5 026.99	
结构自振周期/s	t_1	2.156(x向平动)
	t_2	1.979(y向平动)
	t_3	1.488(扭转)
周期比(t_3/t_1)	0.69	
基底总剪力/kN(剪重比)	x向	1 479.86(2.95%)
	y向	1 601.35(3.19%)
倾覆力矩/(kN·m)	x向	32 079.47
	y向	34 666.44
地震最大层间位移角	x向	1/427
	y向	1/466
位移比	x向	1.02
	y向	1.12
刚重比	x向	2.233
	y向	2.621

20%，满足地震波的选取要求。结构在地震波下的弹塑性层间位移角如图 11 所示，从图中可以看出，结构各层层间位移角沿竖向分布较为均匀，呈现出先增大后减小的趋势。大震下 x 向的最大层间位移角为 $1/60$ ， y 向最大层间位移角为 $1/76$ ，均小于 $1/50$ 的限值，说明结构延性较好，满足“大震不倒”的要求。

图 12 为结构在两种天然波和一种人工波下的破损等级包络图，由图可知，罕遇地震作用下，塑性铰主要出现在钢网格构件和框架梁端，框架柱的塑性铰仅出现在底层柱的柱脚位置，符合钢网格墙结构理想的破坏模式。图 13 为结构在地震波 RH3TG055 下的耗能曲线，从图中可以看出，钢网格构件耗能占比最高，其次是框架梁、框架柱，说明结构的耗能机制合理，钢网格构件充分吸收和消耗了地震能量，发挥出了第一道防线的作用。

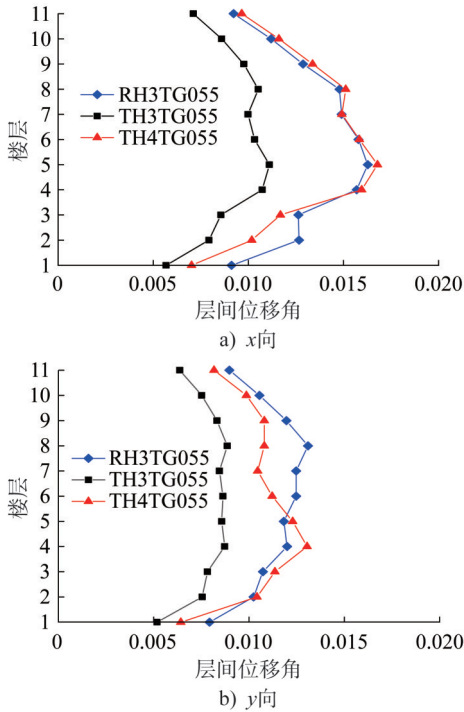


图 11 弹塑性层间位移角

Fig. 11 Elastic-plastic inter-story drifts

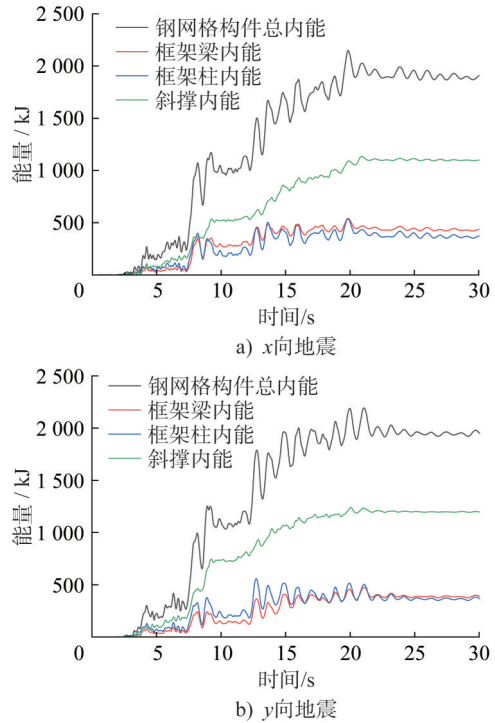


图 13 耗能曲线

Fig. 13 Energy dissipation curves

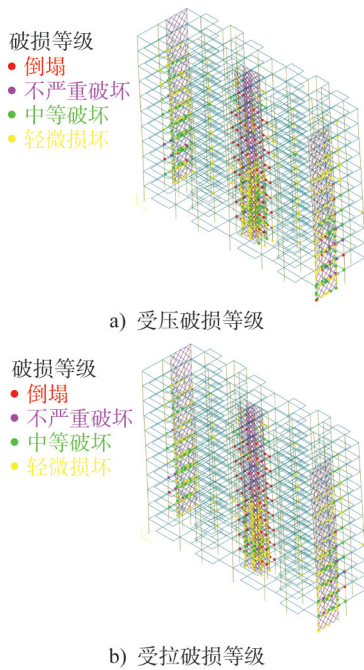


图 12 破损等级包络图

Fig. 12 Damage level envelope diagram

4 结论

本文提出了钢网格墙的PBSD抗震设计方法,并采用该法对实际工程进行了计算,得出结论如下:

(1) 钢网格墙的破坏模式为:钢网格墙在罕遇地震下率先进入屈服阶段,起到主要的耗能作用,随后框架梁

端出现塑性铰,非弹性变形主要集中在钢网格构件和梁端,并且层间位移沿高度方向分布均匀,最后柱脚出现塑性铰,结构破坏。

(2) 基于钢网格墙结构模型试验数据和钢网格墙结构的变形特点,将2%作为钢网格墙结构的目标位移角,推导了钢网格墙结构的屈服位移计算公式,来预测结构的塑性位移和延性性能。基于能量守恒原理推导结构在非弹性状态达到目标位移时的设计基底剪力计算公式,并采用层剪力分布模式计算出各层的侧向水平力。

(3) PBSD法最终体现在钢网格构件、框架梁、框架柱的设计中。采用能量法计算主要耗能构件钢网格所需的截面面积;按照弹性设计方法确定框架梁、柱的截面。

(4) 以实际工程为背景,将其中的钢板剪力墙替换为钢网格墙,应用PBSD法对结构进行设计,并对结构进行弹性分析和罕遇地震下的弹塑性分析。结果表明,采用PBSD法设计的钢网格墙结构弹塑性位移沿竖向均匀分布,塑性铰的开展符合预定的破坏模式,钢网格构件发挥出了“第一道防线”的作用,结构的耗能能力较好,也验证了PBSD法的可行性。

参考文献:

[1] 闫翔宇,段岩,陈志华,等.一种基于T型钢构件的分离式钢网格剪力墙:CN201820730788.5[P]. 2018-12-14.
 YAN Xiangyu, DUAN Yan, CHEN Zhihua, et al. A separated steel grid shear wall based on T-shaped steel

- components: CN201820730788.5 [P]. 2018-12-14. (in Chinese)
- [2] 张天柱. 非四边连接钢网格墙力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
ZHANG Tianzhu. Research on mechanical properties of grid-shaped steel wall with non-four-side connections[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [3] American Institute of Steel Construction. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 341-05 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2005.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Steel Structure of Tall Building: JGJ 99—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢板剪力墙技术规程: JGJ/T 380—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Steel Plate Shear Walls: JGJ/T 380—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [6] MOEHLE J P. Displacement-based design of RC structures subjected to earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 1992, 8(3): 403-428.
- [7] California Seismic Safety Commission. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: ATC-40[S]. California: California Seismic Safety Commission, 1996.
- [8] Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings: FEMA 273 [S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [9] American Society of Civil Engineers. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings: ASCE/SEI 41-06 [S]. New York: American Society of Civil Engineers, 2006.
- [10] 小谷俊介, 叶列平. 日本基于性能结构抗震设计方法的发展[J]. 建筑结构, 2000, 30(6): 3-9, 58. DOI: 10.19701/j.jzjg.2000.06.001.
OTANI Shunsuke, YE Lieping. Japanese development of performance-based design technology[J]. Building Structure, 2000, 30(6): 3-9, 58. DOI: 10.19701/j.jzjg.2000.06.001. (in Chinese)
- [11] 钱稼茹, 罗文斌. 建筑结构基于位移的抗震设计[J]. 建筑结构, 2001, 31(4): 3-6. DOI: 10.19701/j.jzjg.2001.04.001.
QIAN Jiaru, LUO Wenbin. Displacement based seismic design methodology for building structures[J]. Building Structure, 2001, 31(4): 3-6. DOI: 10.19701/j.jzjg.2001.04.001. (in Chinese)
- [12] 谢礼立. 论《建筑工程抗震设计导则》的编制思想[J]. 铁道勘察, 2004, 30(3): 1-5. DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.2004.03.001.
XIE Lili. An introduction to the guidelines for anti-seismic design of buildings[J]. Railway Investigation and Surveying, 2004, 30(3): 1-5. DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.2004.03.001. (in Chinese)
- [13] 曲扬, 罗永峰, 朱钊辰, 等. 空间网格结构多维地震反应分析方法研究现状[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(1): 8-18. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.01.002.
QU Yang, LUO Yongfeng, ZHU Zhaochen, et al. State of the art review on multi-dimensional seismic analysis techniques for spatial reticulated structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(1): 8-18. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.01.002. (in Chinese)
- [14] 袁昌鲁. 钢框架-密肋网格复合钢板剪力墙抗震性能试验研究和塑性设计方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
YUAN Changlu. Seismic behavior experimental study and performance-based plastic design method of steel frame with multi-ribbed grid composited steel plate shear wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 郝际平, 袁昌鲁, 樊春雷, 等. 钢板剪力墙结构基于性能的塑性设计方法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 118-127. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1207.
HAO Jiping, YUAN Changlu, FAN Chunlei, et al. Performance-based plastic design method for the slender unstiffened steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 118-127. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1207. (in Chinese)
- [16] 崔瑶, 王鑫, 冉田苒, 等. 滑动节点板支撑钢框架(SGBFs)的抗震设计[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(2): 63-70. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.006.
CUI Yao, WANG Xin, RAN Tianran, et al. Seismic design of sliding gusset plate braced frames (SGBFs) [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(2): 63-70. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.006. (in Chinese)
- [17] 门进杰, 李东坡, 孙治国, 等. 带耗能框架的框排架混合结构受力特性及抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 55-66. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0606.
MEN Jinjie, LI Dongpo, SUN Zhiguo, et al. Mechanical feature and seismic design method of frame-bent hybrid structure with energy-dissipating frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 55-66. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0606. (in Chinese)
- [18] 段岩. 钢网格剪力墙力学性能及简化计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
DUAN Yan. Research on mechanical properties and simplified calculation method of grid-shaped steel plate shear wall[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [19] 李振宇, 温元浩, 闫翔宇, 等. 钢网格墙结构抗震性能及布置优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(10): 1039-1049. DOI: 10.11784/tdxbz202012043.
LI Zhenyu, WEN Yuanhao, YAN Xiangyu, et al. Seismic

- performance and optimal layout of a grid-shaped steel plate shear wall [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2021, 54 (10) : 1039-1049. DOI: 10.11784/tdxbz202012043. (in Chinese)
- [20] HOUSNER G W. Limit design of structures to resist earthquake [C]//*Proceedings of 1st World Conference Earthquake Engineering*, San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 1956.
- [21] AKIYAMA H. Earthquake-resistant limit-state design for buildings[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985: 275-278.
- [22] LEELATAVIWAT S, GOEL S C, STOJADINOVIĆ B. Toward performance-based seismic design of structures [J]. *Earthquake Spectra*, 1999, 15 (3) : 435-461. DOI: 10.1193/1.1586052.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Load Code for the Design of Building Structures: GB 50009—2012* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)