

文章编号:1673-2049(2019)06-0055-09

单层工业厂房上部承重结构体系可靠度计算方法

何化南¹, 杜彦成¹, 幸坤涛²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘要:针对现行《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)仅能评定工业厂房的可靠性等级,无法计算其结构体系具体可靠指标的局限性,以既有单层工业厂房上部承重结构体系为研究对象,结合层次分析法的理论研究成果,确定了上部承重结构体系可靠指标的分级标准;针对同类构件在安全性等级不同情况下结构体系承载功能的影响程度也存在差异的问题,提出构件等级权重比这一概念,并依据 GB 50144—2008 分别确定了不同安全性等级的重要构件和次要构件对应的权重系数;最终提出了根据构件的类型、位置 and 安全性等级确定构件的权重系数,并结合构件可靠指标计算了单层工业厂房上部承重结构体系承载功能的可靠指标。将所提方法评定的结果与 GB 50144—2008 及灰色聚类分析评定的结果分别进行对比验证。结果表明:所提方法计算简单,能用具体的可靠指标反映结构承载工程的可靠性状态,可以满足工程应用的需要。

关键词:单层工业厂房;可靠度;层次分析法;上部承重结构;承载功能;构件权重

中图分类号:TU312.3

文献标志码:A

Reliability Calculation Method for Upper Load-bearing Structure System of Single-storey Industrial Buildings

HE Hua-nan¹, DU Yan-cheng¹, XING Kun-tao²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In view of the limitation that the current *Standard for Appraisal of Reliability of Industrial Buildings and Structure* (GB 50144—2008) can only assess the reliability grade of industrial workshops and can not calculate the specific reliability index of their structural system, the existing single-storey industrial building system was taken as the research object, and the theoretical research results of the analytic hierarchy process were combined to determine the reliability level. The classification criterion of reliability index of upper load-bearing structure system was determined. Aiming at the problem that the influence degree of bearing function of structure system of the same kind was different under different conditions of safety grade, the concept of component grade weight ratio was put forward, and the important components and secondary components of different safety grades were determined respectively according to GB 50144—2008. Finally, the weight coefficients of components were determined according to the types, locations and safety levels of components, and the reliability indexes of the load-bearing structure system of single-storey industrial buildings were calculated with the reliability indexes

收稿日期:2018-12-11

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2016YFC0701301)

作者简介:何化南(1972-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士,E-mail:hehuanandl@163.com。

of components. The evaluation results of the proposed method were compared with those of GB 50144—2008 and grey cluster analysis. The results show that the proposed method is simple in calculation and can reflect the reliability state of the structural load-bearing engineering with specific reliability indicators, which can meet the needs of engineering applications.

Key words: single-storey industrial building; reliability; AHP; upper load-bearing structure; bearing function; weight of component

0 引言

根据调研,中国钢铁、化工、机械、建材等许多行业内,都存在工业建筑长期处于腐蚀、高温、动载等各种不利环境下使用的情况^[1],已严重影响结构的安全性和使用性,需要对这些建筑的可靠度给予评定并进行必要的维修加固。

针对既有工业建筑的可靠性评定,中国专家进行了大量的研究工作。李云贵等^[2]应用条件概率理论和数值分析方法,提出了一种能较好地考虑失效机构间相关性的结构体系失效概率的点值近似估算方法。Zhao 等^[3]提出应用 Laplace 积分变换降低构件相关性的影响,对结构体系可靠度进行计算。贡金鑫^[4]提出了一种结构可靠度计算的近似方法,即将多元正态函数的高维积分运算,通过随机变量的变换转化为一维或二维积分,变换后被积函数中的一些参数通过优化的方法确定。这些方法依托数理统计和概率论,能够较准确地计算结构体系的可靠指标,但由于工业厂房工况复杂,会导致计算过于繁琐。

还有学者基于传力树法,对既有单层工业厂房进行可靠度评定。李泰来等^[5]依托传力树法,将构件划分为直接构件与间接构件,以各构件失效影响的面积确定构件的权重系数,分别计算一条传力树中直接构件与间接构件的失效概率,并引入宽界限法,得到了一种能够计算大型工业厂房体系失效概率的方法,但是在确定构件失效后的影响面积时,仅与构件相关的空间有关,而无法确定结构实际可能的失效面积。顾文姝^[6]同样以传力树为计算基础,将构件损伤归纳为非主干弱损伤、非主干强损伤、主干弱损伤、主干强损伤 4 种基本损伤,并提出了位置重要性参数 Y_{i1} 和损伤数量参数 Y_{i2} ,也能对既有结构的可靠性状态进行量化评定,但是自成体系,与中国现行的设计规范及可靠性鉴定标准缺乏联系。

孙长明等^[7]将三级模糊综合评判应用于工业厂房的可靠性鉴定中,并结合算例对结构体系可靠性等级进行评定,得到了结构体系可靠性等级隶属度向量。这种方法能够在一定程度上量化反映工业厂

房的可靠性状态,但是受专家经验影响较大,且无法计算结构体系可靠指标。

张永利等^[8]针对单层钢结构工业厂房,提出基于状态评估的可靠性评定方法,即通过对截面削弱、构件表面温度、构件变形和地基基础变形等状态评定指标的检测和分析,来评定结构可靠性等级。这种方法不需要对结构进行准确的力学分析和校核,操作简单,但是可靠性分析不够深入,仅适用于企业日常的生产管理。

王威等^[9]将灰色聚类分析引入建筑结构可靠性评定,阐述了灰色聚类分析方法评价建筑结构可靠性的原理和步骤,并用 5 个工业厂房作为工程实例进行验证,证明其可行性。该方法可以定量表示结构对各可靠性等级的聚类系数,评定结果分辨率较高,但在确定变形及外观条件、裂缝、构造和连接、环境因素等聚类指标的白化数时,缺乏明确的取值标准,受专家经验影响较大。

另外,随着数学领域的发展,有限元方法被引入到工程应用中来,借助计算机的高度普及和发展,有学者尝试着将 ANSYS 软件引入到结构可靠性鉴定中来,并取得了一定的成果。张纪刚等^[10]以青岛某复杂大跨多曲面异形钢屋盖结构为例,将杆件最大应力作为结构可靠性性能的主要指标,采用 ANSYS 软件的 PDS 模块和蒙特卡洛抽样法对该结构进行了可靠性分析,可以为 ANSYS 用于工业厂房结构体系可靠性分析提供借鉴;赵成豪^[11]采用 ANSYS 软件对某既有单层钢筋混凝土工业厂房进行建模计算,通过提取构件应力寻找结构关键薄弱构件,并应用 ANSYS 软件的 PDS 模块对该构件进行可靠性分析,得到该构件承载力的失效概率,但无法计算结构体系承载力的失效概率。

目前,中国对既有工业建筑进行可靠性评定的主要依据是《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)^[12],该标准应用层次分析法原理,将工业建筑划分为地基基础、上部承重结构、围护结构 3 个结构系统,按照一定的规则分别评定各系统的可靠性等级,再对工业建筑整体进行综合评级。其

中上部承重结构从承载功能和结构整体性两方面分别评定,然后取两者的较低等级作为上部承重结构的可靠性等级。这种方法容易理解,操作简单,但是没有充分考虑不同位置、不同类型的构件对结构体系可靠性影响程度的差异,且无法计算结构体系的具体可靠指标。上海市地方标准《既有建筑物结构检测与评定标准》(DG/TJ 08-804-2005)^[13]则依据陈少杰等^[14-15]的研究成果,将层次分析法应用于既有建筑结构体系的可靠性评定,较好地考虑了构件权重的影响,评定结果相较 GB 50144—2008 更加符合工业厂房的实际可靠性状态,但目前同样停留在对结构体系进行评级,无法计算结构可靠指标。

由上述研究成果可知,虽然中国针对既有工业建筑的可靠性评定已经有了一定的理论研究成果,但都存在各自的优势和缺点。本文为逐渐突破现行规范无法计算工业厂房结构体系可靠指标的局限,针对单层工业厂房上部承重结构的承载功能,以该标准的有关规定为基础,结合上述层次分析法在建筑结构可靠性评定方面的研究成果,计算承载功能的可靠指标,更准确地对结构承载功能的可靠性等级进行评定。结合 GB 50144—2008 对结构整体性的评级结果,从而得到单层工业厂房上部承重结构的可靠性等级,以期在符合 GB 50144—2008 规定的前提下,达到逐步对现行规范进行完善的目的。

1 层次分析法在结构体系可靠性评定中的应用研究

层次分析法(AHP)是美国著名运筹学家 Saaty 提出的一种用于解决复杂问题的定性与定量相结合的系统分析与决策方法^[16]。该方法的基本思想是将若干因素对同一个目标的影响程度,归结为确定它们在目标中占的比重。如果要比较 n 个因素 $U=(U_1,U_2,\cdots,U_n)$ 对目标 I 的影响,确定各因素在 I 中占的比重,每次选取 2 个因素 U_i,U_j ,用 c_{ij} 表示 U_i 与 U_j 对 I 的影响程度之比,构造判断矩阵 C

$$C=(c_{ij})_{n\times n} \tag{1}$$

且满足: $c_{ij}>0,c_{ji}=1/c_{ij},c_{ii}=1,(i,j=1,2,\cdots,n)$ 。

若矩阵 C 满足: $c_{ij}c_{jk}=c_{ik}(i,j,k=1,2,\cdots,n)$,则称矩阵 C 为一致性矩阵。

矩阵 C 的最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 ω 归一化后为

$$\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)^T \tag{2}$$

式中: ω_i 为 i 类构件中各构件的权重系数, $\sum_{i=1}^n \omega_i=1$ 。

文献[17]证明了向量 ω 即为权重向量,表示了 U_1,U_2,\cdots,U_n 在目标 I 中占的比重。文献[14]较系统地研究了层次分析法在结构体系可靠性评估中的应用,结果表明,通过引入层次分析法,确定构件权重,对结构体系可靠性评定的结果较 GB 50144—2008 更为合理。文献[15]则提出同种构件在一层结构中的作用和地位基本相同,因而同种构件的权重系数应该相同或者差别不大,并计算出了单层工业厂房中不同类型构件的权重比,如表 1 所示;各构件权重系数的计算公式如式(3)所示。文献[15]中的方法已写入上海市地方标准《既有建筑物结构检测与评定标准》(DG/TJ 08-804-2005)。

$$\omega_i=\frac{r_i}{\sum r_in_i} \tag{3}$$

式中: r_i 为 i 类构件的权重比,按表 1 取值; n_i 为 i 类构件的数量。

表 1 不同类型构件权重比
Tab.1 Weight Ratio of Different Types of Components

厂房类型	边柱	中柱	屋架	屋面板	吊车梁	檩条
无檩条	3.57	6.00	1.89	1.00	1.89	
无吊车梁、檩条	3.73	6.44	2.00	1.00		
屋面板不承重	4.99	8.28	2.74		2.74	1.00

2 结构体系承载功能可靠指标分级标准的确定

根据层次分析法的基本原理,结构体系承载功能可靠指标的计算应基于构件可靠指标,因而要确定单层工业厂房上部承重结构体系承载功能可靠指标分级标准,首先要确定其构件可靠指标分级标准。

2.1 既有结构构件可靠指标分级标准

中国现行《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)^[18]规定了结构构件承载能力极限状态的可靠指标下限值,如表 2 所示。

表 2 构件承载能力极限状态的可靠指标
Tab.2 Reliability Indexes of Components Under Ultimate State of Bearing Capacity

破坏类型	可靠指标下限值		
	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

现行规范与中国 89 系列规范确定的各类构件的目标可靠度是一致的,但文献[19]中指出,2000 系列设计规范采用了可靠度“适当提高”的处理方式,实际上使这一代设计规范中的目标可靠度指标

总体上提高了 0.5 左右,2010 系列设计规范的目标可靠度也基本上维持在与 2000 系列规范相同的水准。

GB 50144—2008 条文说明第 3.3.1 节对安全等级为二级的工业建筑 3 种结构(混凝土结构、钢结构和砌体结构)的 10 余种典型构件承载能力[构件抗力 R 与作用效应 S 的比值 $R/(\gamma_0 S)$, γ_0 为结构重要系数],在各等级界限下的可靠指标 β 值进行了计算,计算结果(表 3)验证了文献[19]所述方法的正确性。

表 3 各等级界限下的可靠指标

Tab. 3 Reliability Indexes Under Each Grade Limit							
构件类型	破坏类型	a 级和 b 级界限		b 级和 c 级界限		c 级和 d 级界限	
		β 值	β 平均值	β 值	β 平均值	β 值	β 平均值
重要构件	延性破坏	3.04~4.08	3.50	2.89~3.67	3.24	2.73~3.47	3.07
	脆性破坏	3.70~4.70	4.11	3.33~4.23	3.70	3.14~3.99	3.49
次要构件	延性破坏	3.04~4.08	3.50	2.79~3.55	3.14	2.64~3.34	2.96
	脆性破坏	3.70~4.70	4.11	3.22~4.09	3.57	3.03~3.85	3.37

文献[20]则在总结工业建筑可靠性鉴定标准中可靠指标分级原则,以及现行各类设计标准的可靠度控制水平和“最小处理原则”的基础上,首次提出工业建筑可靠指标的分级标准,如表 4 所示。

表 4 文献[20]采用的可靠指标分级标准

Tab. 4 Classification Standard of Reliability Indexes in Literature [20]					
构件类型	破坏类型	不同分级标准下的 β 平均值			
		a 级	b 级	c 级	d 级
重要构件	延性破坏	满足现行设计标准	3.20	2.70	<2.70
	脆性破坏	标准要求	3.70	3.20	<3.2
次要构件	延性破坏	满足现行设计标准	2.95	2.45	<2.45
	脆性破坏	标准要求	3.45	2.95	<2.95

综合上述标准规定及文献描述,对于安全等级为二级的普通工业厂房,表 4 中“满足现行设计标准要求”在延性破坏条件下的可靠指标应为 3.7,脆性破坏条件下为 4.2。因此,本文采用表 5 作为安全等级为二级的既有单层工业厂房结构构件可靠指标的分级标准。

2.2 结构体系承载功能可靠指标的分级标准

由式(3)及表 1 计算可得上部承重结构各构件权重系数 ω_t ,构造向量 $\omega=(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_t, \cdots, \omega_n)^T$ 。以表 5 中各等级构件可靠指标界限为元素构造向量

表 5 本文采用的可靠指标分级标准
Tab. 5 Classification Standard of Reliability Indexes in the Paper

破坏类型	各等级界限下的可靠指标 β 值		
	a 级和 b 级界限	b 级和 c 级界限	c 级和 d 级界限
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

B ,以延性破坏为例,则 $B=(3.7, 3.2, 2.7)$ 。向量 ω 与向量 B 相乘可得矩阵

$$T=\omega B= \begin{bmatrix} 3.7\omega_1 & 3.2\omega_1 & 2.7\omega_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 3.7\omega_t & 3.2\omega_t & 2.7\omega_t \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 3.7\omega_n & 3.2\omega_n & 2.7\omega_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

将矩阵 T 每一列元素相加可得矩阵 P

$$P= \begin{bmatrix} 3.7 \sum_{i=1}^n \omega_i & 3.2 \sum_{i=1}^n \omega_i & 2.7 \sum_{i=1}^n \omega_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵 P 即为结构体系承载功能可靠指标的各等级界限。由于 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$,所以可得

$$P=\begin{bmatrix} 3.7 & 3.2 & 2.7 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由此可知,延性破坏下既有工业建筑上部承重结构体系承载功能可靠指标的各等级界限与结构构件各等级界限相同。同理,脆性破坏下的结构体系承载功能可靠指标各等级界限同样可按上述步骤推导得到,结果同样与结构构件各等级界限相同。

3 结构体系承载功能可靠指标计算

结构体系承载功能可靠指标的计算需以构件的可靠指标为基础,中国对于既有结构构件可靠指标计算的研究已经相当成熟,对于一般构件,可靠指标可按《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)附录 E.2 的相关规定,结合现场检测的荷载情况、材料性能及构件损伤进行计算,本文不再赘述。

当已知结构体系中所有构件的可靠指标,以其为元素,构造向量 D

$$D=(\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_t, \cdots, \beta_n) \quad (7)$$

式中: β_t 为第 t 根构件的可靠指标。

根据式(3)及表 1 计算各构件的权重系数,构造向量,即

$$\omega=(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)^T \quad (8)$$

结构体系承载功能的可靠指标向量 β 为

$$\beta=D\omega \quad (9)$$

将式(9)所得结果与表 5 进行对照,即可对既有单层工业厂房上部承重结构体系承载功能的可靠性划分等级,确定其可靠性状态:

- (1) $\beta>3.7$,结构体系评为 a 级,表明该结构符合国家现行标准规范的可靠性要求。
- (2) $3.7\geq\beta>3.2$,结构体系评为 b 级,表明该结构略低于国家现行标准规范的可靠性要求,在目标使用年限内不影响或尚不明显影响正常使用。
- (3) $3.2\geq\beta>2.7$,结构体系评为 c 级,表明结构不符合国家现行标准规范的可靠性要求,影响整体安全,应采取措施,且可能有极少数构件必须立即采

取措施。
(4) $\beta\leq 2.7$,结构体系评为 d 级,表明结构极不符合国家现行标准规范的可靠性要求,已严重影响整体安全,必须立即采取措施。

4 工程实例

图 1 为太原某炼钢厂连铸车间厂房平面图,由于技术升级,需要对该厂房钢水接受跨(FG)、浇铸跨(GH)部分(粗虚线区域)进行配套改造。为保证安全,厂方委托北京市某检测中心对厂房当前的可靠性进行检测鉴定,并提出加固、改造意见。

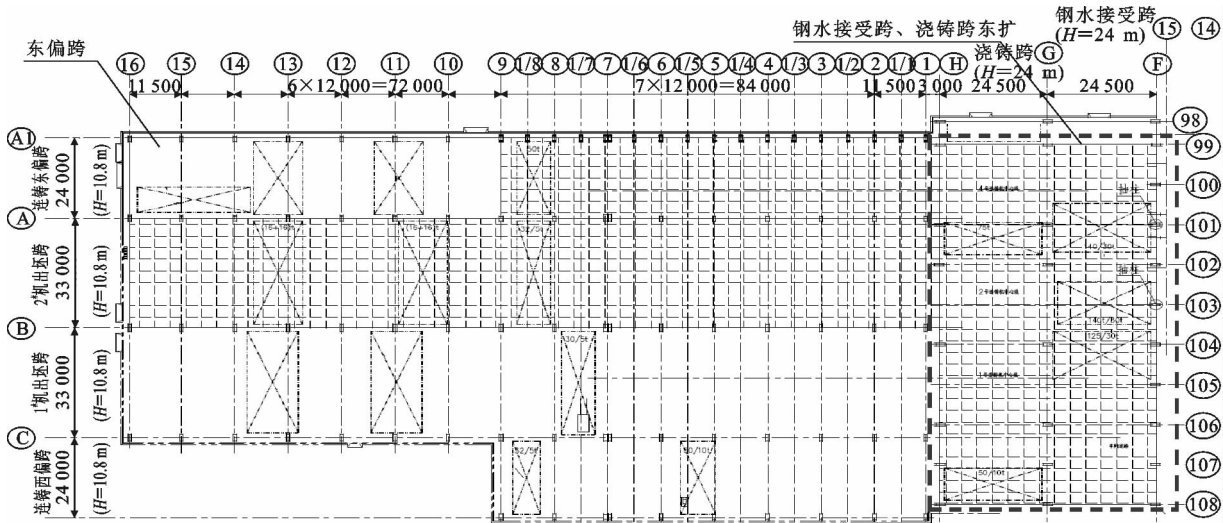


图 1 连铸车间厂房平面图(单位:mm)

Fig. 1 Plane Graph of Continuous Casting Workshop (Unit:mm)

该厂房钢水接受跨、浇铸跨可单独划分为一个鉴定单元,为单层钢排架结构,排架柱为斜腹杆 H 形双肢组合钢柱,材料采用 A3F 镇静钢;浇铸跨 12 m 吊车梁采用 3 号镇静钢,接受跨所有吊车梁及浇铸跨 24 m 吊车梁采用 16Mn 钢,其中 12 m 吊车梁截面尺寸为 HN1800×700×16×28,24 m 吊车梁截面尺寸为 HN3140×800×20×30;屋面系统采用桁架式钢屋架,材料为 A3F 镇静钢;屋面板为轻型压型钢屋面板。

根据现场检测结果,结构整体性方面,F/107~108,G/107~108,H/107~108 柱间支撑形式与原设计不符,且部分杆件弯曲变形;个别屋架间交叉支撑存在变形或切断现象,因而结构整体性评定为 B 级。

承载能力方面,该厂房 G/99 柱腹板厚度平均值为 20.3 mm,F/99 柱腹板厚度为 18.2 mm,截面尺寸偏差在《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》(GB/T 709—2008)允许范围内;钢构件

表面温度在 150 ℃ 范围内,可忽略温度对结构承载能力的影响;采用硬度法测试钢材抗拉强度,均满足原设计要求;结构构造及构件外观检测结果标注在图 2 中。根据上述检测结果,结合原设计资料,采用 PKPM 系列的钢结构模块,任取该厂房一榀,建模计算,算出最不利荷载组合下的结构应力在构件承载力范围内,各构件应力比如图 3 所示。

综上,结构构件可靠性评级结果为:大部分排架柱的安全性、使用性等级评定为 b 级,部分排架柱的使用性等级评定为 c 级,如图 2(a)所示;部分吊车梁出现疲劳裂缝,安全性等级评为 d 级,使用性等级评为 c 级,其他吊车梁安全性等级和使用性等级均评定为 b 级(经对部分吊车梁疲劳验算,G/99~101,G/102~106 吊车梁圆弧端疲劳验算的抗力与荷载效应比为 0.86,其他吊车梁抗力与荷载效应比大于 1),如图 2(b)所示;屋盖系统所有构件的安全性等级评为 b 级,个别支撑构件出现弯曲变形现象,使用性等级评为 c 级,其他构件使用性等级评为 b

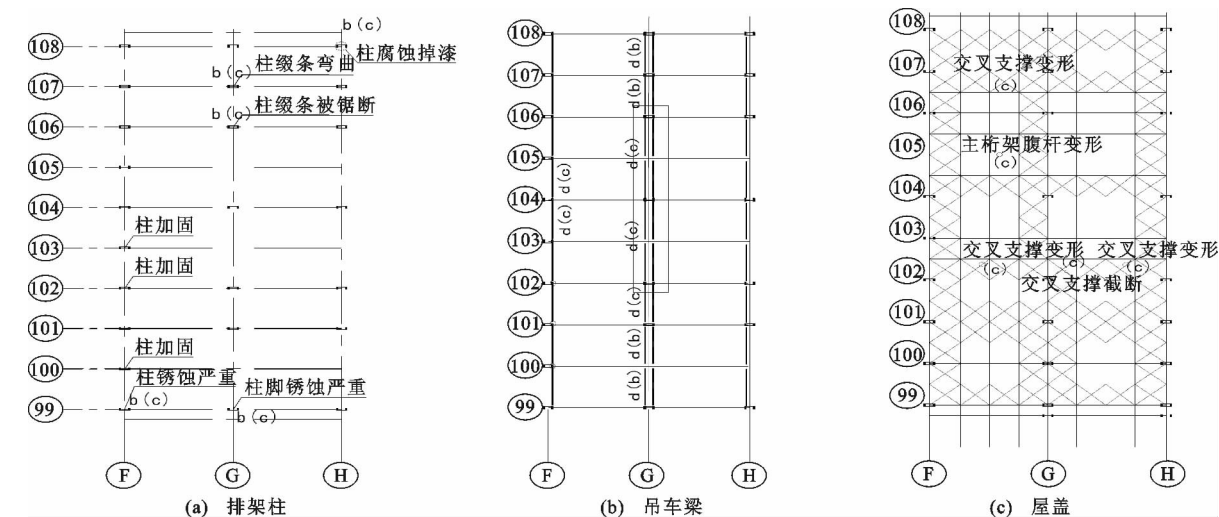


图 2 构件可靠性评级结果

Fig. 2 Rating Results of Reliability of Components

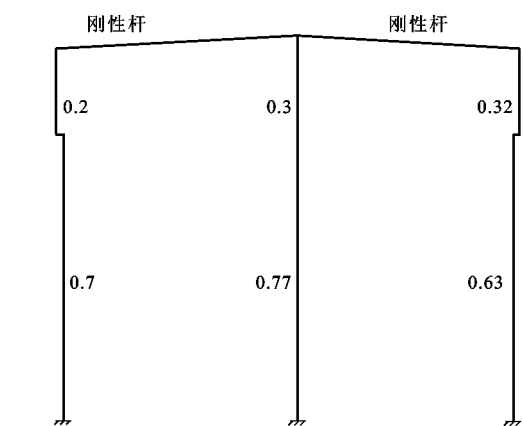


图 3 构件应力比

Fig. 3 Stress Ratio of Component

级,如图 2(c)所示。根据 GB 50144—2008 规定,上部承重结构的承载功能等级应根据构件的安全性等级评定,具体评定结果如表 6 所示。

表 6 构件安全性等级鉴定结果

Tab. 6 Assessment Results of Reliability
Grades of Components

构件类型	边柱	中柱	屋架	吊车梁	
构件等级	b 级	b 级	b 级	b 级	d 级
构件数量	18	6	38	21	15
合计	18	6	38	36	

该厂房的屋面板不承重,为围护结构,根据式 (3)及表 1 计算构件权重系数,该厂房上部承重结构共有边柱 18 根,中柱 6 根,屋架 38 榀,吊车梁 36 根,则边柱的权重系数 ω_s 为

$$\omega_s = \frac{4.99}{4.99 \times 18 + 8.28 \times 6 + 2.74 \times 38 + 2.74 \times 36} = 0.015$$

同理,可得中柱、屋架、吊车梁的权重系数分别为 0.024,0.008,0.008。以各构件权重系数构造如式(8)所示构件权重系数向量,即

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{18}, \omega_{19}, \dots, \omega_{24}, \omega_{25}, \dots, \omega_{62}, \omega_{63}, \dots, \omega_{98})^T, \text{其中, } \omega_1 \sim \omega_{18} \text{ 均为 } 0.015, \omega_{19} \sim \omega_{24} \text{ 均为 } 0.024, \omega_{25} \sim \omega_{62}, \omega_{63} \sim \omega_{98} \text{ 均为 } 0.08。$$

为简化计算,本例中对 b 级、c 级构件的可靠指标取为分级标准的平均值,即 b 级构件取 3.45,c 级构件取 2.95,a 级、d 级构件可靠指标通过外推^[9],分别取为 3.95,2.45。构造式(7)所示构件可靠指标向量,即

$$D = (\beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_{98}) \quad (10)$$

根据式(9)可得该厂房上部承重结构体系承载功能的可靠指标,即

$$\beta = 18 \times 0.015 \times 3.45 + 6 \times 0.024 \times 3.45 + 38 \times 0.008 \times 3.45 + 21 \times 0.008 \times 3.45 + 15 \times 0.008 \times 2.45 = 3.35$$

将该结果与表 5 对照可知,该厂房上部承重结构体系的承载功能应评为 B 级,另外由于结构整体性评为 B 级,则可靠性综合评为 B 级。按 GB 50144—2008 评定该结构体系,边柱、屋架构件集的承载功能应评为 B 级,中柱、吊车梁构件集的承载功能应评为 C 级,因此整个上部承重结构体系可靠性应评为 C 级。因此,按上述方法计算结构体系承载功能可靠度,与规范有所出入,评定结果不够准确,需要改进。

5 构件等级权重比

为使结构体系承载功能可靠度的计算结果更加

准确,对本文上述方法进行了改进,即考虑了构件安全性等级对构件权重系数的影响。改进后结构体系承载功能的可靠指标仍按第 3 节所述方法计算,但构件权重向量按下述方法确定。

5.1 确定构件等级的权重比

出现第 4 节案例结果的原因为,《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)第 7.3.4 节规定:对于重要构件集,当不含 c 级、d 级构件且 b 级构件数量不多于 30% 时,构件集承载功能评为 A 级;当不含 d 级构件且 c 级构件数量不多于 20% 时,构件集承载功能评为 B 级;当 c 级构件数量不多于 50%,或 d 级构件数量少于 10% (竖向构件)或少于 15% (水平构件)时,构件集承载功能评为 C 级;当 c 级构件数量多于 50%,或 d 级构件数量不少于 10% (竖向构件)或不少于 15% (水平构件)时,构件集承载功能评为 D 级。对于次要构件集,也有类似规定。

评定构件集承载功能等级时,由各安全性等级构件的数量要求差异可知,对于同类型构件,等级越低,对结构体系可靠性的影响越大。因而,确定构件权重时,除了考虑构件类型和构件位置,还应考虑构件安全性等级的影响。

通过咨询 GB 50144—2008 主编单位中冶建筑研究总院有限公司相关专家,上述规定可以理解为:对于重要构件,当 d 级构件数量多于 10% 时,构件集评为 D 级;当不含 d 级构件且 c 级构件数量多于 20% 时,构件集评为 C 级;当不含 c、d 级构件且 b 级构件数量多于 30% 时,构件集评为 B 级;当不含 c、d 级构件且 a 级构件数量多于 70% 时,构件集评为 A 级。a、b、c、d 各级构件数量在不同等级的构件集中所占比例为 7 : 3 : 2 : 1,可以认为不同等级的同种构件权重比为 $\frac{13}{7} : \frac{13}{3} : \frac{13}{2} : \frac{13}{1}$,归一化后为 0.14 : 0.17 : 0.25 : 0.51。同理可得,对于次要构件,构件等级权重比为 0.14 : 0.17 : 0.24 : 0.45。

因此,重要构件的构件等级权重比向量 \mathbf{R}_{Dz} 为

$$\mathbf{R}_{Dz} = (0.07, 0.17, 0.25, 0.51)$$

次要构件的构件等级权重比向量 \mathbf{R}_{Dc} 为

$$\mathbf{R}_{Dc} = (0.14, 0.17, 0.24, 0.45)$$

5.2 确定构件的权重系数

以表 1 中数据为元素构造构件类型权重比向量 \mathbf{R}_G ,其中,屋面板、檩条为次要构件,其他均为重要构件。各类型、各等级重要构件的权重比 $\mathbf{R}_{B_z} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_{D_z}$,次要构件的权重比 $\mathbf{R}_{B_c} = \mathbf{R}_G \cdot \mathbf{R}_{D_c}$ 。

以无檩条的单层工业厂房为例说明权重比的计

算方法,即

$$\mathbf{R}_G = (3.57, 6.00, 1.89, 1.00, 1.89)^T$$

对于重要构件,各类型、各等级构件权重比为

$$\mathbf{R}_{B_z} = (3.57, 6.00, 1.89, 1.89)^T \cdot (0.07, 0.17,$$

$$0.25, 0.51) = \begin{bmatrix} 0.26 & 0.60 & 0.90 & 1.81 \\ 0.43 & 1.01 & 1.52 & 3.04 \\ 0.14 & 0.32 & 0.48 & 0.96 \\ 0.14 & 0.32 & 0.48 & 0.96 \end{bmatrix}$$

对于次要构件,各类型、各等级构件权重比为

$$\mathbf{R}_{B_c} = (1.00)^T \cdot (0.14, 0.17, 0.24, 0.45) = [0.14 \quad 0.17 \quad 0.24 \quad 0.45]$$

则该类工业厂房各类型、各等级构件的权重比 \mathbf{R}_{B1} 为

$$\mathbf{R}_{B1} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{a 级} & \text{b 级} & \text{c 级} & \text{d 级} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0.26 & 0.60 & 0.90 & 1.81 \\ 0.43 & 1.01 & 1.52 & 3.04 \\ 0.14 & 0.32 & 0.48 & 0.96 \\ 0.14 & 0.32 & 0.48 & 0.96 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \text{边柱} \\ \text{中柱} \\ \text{屋架} \\ \text{屋面板} \end{matrix}$$

同理,可得表 1 所示无吊车梁、无檩条结构及屋面板不承重的单层工业厂房各类型、各等级构件权重比 \mathbf{R}_{B2} , \mathbf{R}_{B3} 分别为

$$\mathbf{R}_{B2} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{a 级} & \text{b 级} & \text{c 级} & \text{d 级} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0.27 & 0.63 & 0.94 & 1.89 \\ 0.47 & 1.09 & 1.63 & 3.26 \\ 0.14 & 0.34 & 0.51 & 1.01 \\ 0.14 & 0.17 & 0.24 & 0.45 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \text{边柱} \\ \text{中柱} \\ \text{屋架} \\ \text{屋面板} \end{matrix}$$

$$\mathbf{R}_{B3} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{a 级} & \text{b 级} & \text{c 级} & \text{d 级} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0.36 & 0.84 & 1.26 & 2.53 \\ 0.60 & 1.41 & 2.09 & 4.19 \\ 0.20 & 0.47 & 0.69 & 1.39 \\ 0.20 & 0.47 & 0.69 & 1.39 \\ 0.14 & 0.17 & 0.24 & 0.45 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \text{边柱} \\ \text{中柱} \\ \text{屋架} \\ \text{吊车梁} \\ \text{檩条} \end{matrix}$$

各构件的权重系数可按下式计算

$$\omega_i = \frac{r_{ij}}{\sum n_{ij} r_{ij}} \quad (11)$$

式中: r_{ij} 为第 i 类第 j 等级构件的权重比,根据 \mathbf{R}_{B1} , \mathbf{R}_{B2} , \mathbf{R}_{B3} 取值; n_{ij} 为第 i 类第 j 等级构件的数量。

5.3 工程实例

仍以第 4 节中的工程案例验证上述方法,其上部承重结构为无屋面板的结构体系,应选用 \mathbf{R}_{B3} 作为各类、各等级构件的权重比,应用式(11)计算各构件的权重,可得 b 级边柱的权重 ω_{sb} 为

$$\omega_{sb} = 0.84 / (0.84 \times 18 + 1.41 \times 6 + 0.47 \times 38 + 0.47 \times 21 + 1.39 \times 15) = 0.0117$$

同理,可得 b 级中柱、b 级屋架等构件的权重,如表 7 所示。

表 7 各级构件权重
Tab. 7 Weight of Component

构件类型	边柱	中柱	屋架	吊车梁	
构件等级	b 级	b 级	b 级	b 级	d 级
构件权重/ 10^{-2}	1.17	1.95	0.65	0.65	1.94

由式(8)可得构件权重向量 $\omega=(\omega_1,\cdots,\omega_{18},\omega_{19},\cdots,\omega_{24},\omega_{25},\cdots,\omega_{98})^T$,其中, $\omega_1\sim\omega_{18}$ 均为 0.011 7, $\omega_{19}\sim\omega_{24}$ 均为 0.019 5, $\omega_{25}\sim\omega_{83}$ 均为 0.006 5, $\omega_{84}\sim\omega_{98}$ 均为 0.019 4。

根据式(9)可得该厂房上部承重结构体系承载功能的可靠指标,即

$$\beta=18\times0.011\,7\times3.45+6\times0.019\,5\times3.45+38\times0.006\,5\times3.45+21\times0.006\,5\times3.45+15\times0.019\,4\times2.45=3.17$$

将该结果与表 5 对照可知,该厂房上部承重结构体系的承载功能应评为 C 级,与按 GB 50144—2008 评定的结果相符。

为进一步验证本文方法的可行性,采用文献[9]中的灰色聚类分析方法对本文工程实例进行可靠性评定,与本文方法进行对比验证。根据文献[9],采用抗力与荷载效应比(A1)、已使用年数(Y/50)(A2)、变形及外观评定(A3)、构造和连接(A4)、环境因素(A₅)作为影响结构可靠度的因素,具体分级评定标准如表 8 所示,实际评估数据样本如表 9 所示。

表 8 评价指标分级标准

Tab. 8 Grading Standard of Evaluation Indexes

影响因素	评价级别			
	A	B	C	D
A1	≥ 1.00	0.96	0.90	≤ 0.80
A2	≤ 0.20	0.50	0.80	≥ 1.00
A3	≥ 1.00	0.75	0.50	≤ 0.25
A4	≥ 1.00	0.75	0.50	≤ 0.25
A5	≥ 1.00	0.75	0.50	≤ 0.25

表 9 建筑结构评估数据样本

Tab. 9 Samples of Structure Assessment Data

影响因素	A1	A2	A3	A4	A5
评估数据	0.86	0.84	0.50	0.50	0.50

聚类向量 $\sigma=(0,0,0.837,0.204)$,由聚类结果可知,该结构可靠性等级为 C 级。

由此可知,本文方法所得结果与标准及灰色聚类分析的评定结果相一致,能够反映结构的真实可靠性状态。

6 结 语

(1)本文提出同类型但不同安全性等级的构件对结构体系承载功能的影响程度不同,并依据 GB 50144—2008 提出了相应的权重比来定量反映影响程度的差异,从而提出了根据构件类型和构件安全性等级确定构件权重系数,进而计算既有单层工业厂房上部承重结构体系承载功能的可靠指标。通过工程实例验证,本文方法计算简单,能用具体的可靠指标反映结构当前承载功能的可靠性状态,并可以与现行《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2008)规定的结构整体性评定方法很好结合,从而达到逐步完善该标准的目的。

(2)由于本文采用的构件等级权重比等数据虽直接或间接出自中国现行规范,经受了实际工程的检验,但受专家个人因素影响较大,这一点有待在以后的研究和工程实践中不断加以改进。

参考文献:

References:

[1] 惠云玲,岳清瑞,幸坤涛,等.我国工业建筑可靠性鉴定及其发展[J].北京建筑大学学报,2016,32(3):49-54.
HUI Yun-ling, YUE Qing-rui, XING Kun-tao, et al. Reliability Evaluation and Development of Industrial Construction in China[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016, 32(3): 49-54.

[2] 李云贵,赵国藩.结构体系可靠度的近似计算方法[J].土木工程学报,1993,26(5):70-76.
LI Yun-gui, ZHAO Guo-fan. An Approximate Method for Structural System Reliability Analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(5): 70-76.

[3] ZHAO G F, LI Y G, WANG H D. Asymptotic Analysis Methods for Structural Reliability[J]. China Ocean Engineering, 1995, 9(3): 303-310.

[4] 贡金鑫.结构体系可靠度计算的一种近似方法[J].四川建筑科学研究,1992(3):1-7.
GONG Jin-xin. An Approximate Method for Structural System Reliability Calculation[J]. Sichuan Building Science, 1992(3): 1-7.

[5] 李泰来,朱 瞰.大型工业厂房可靠度分析方法的研究[J].武汉水利电力大学学报,2000,33(4):64-67, 78.
LI Tai-lai, ZHU Tun. Research on Reliability Analytical Method for Large-scale Factory Building System [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and E-

- lectric Engineering, 2000, 33(4): 64-67, 78.
- [6] 顾文姝. 考虑损伤关联的《危险房屋鉴定标准》评价模型[J]. 科技视界, 2016(22): 210-211, 164.
- GU Wen-shu. Considering Damage Relevance in Evaluation Model of *Standard of Dangerous Building Appraisal* [J]. Science & Technology Vision, 2016 (22): 210-211, 164.
- [7] 孙长明, 蔡宝晖, 阎石. 模糊数学在工业厂房可靠性鉴定中的应用[J]. 沈阳建筑工程学院学报: 自然科学版, 2001, 17(4): 268-271.
- SUN Chang-ming, QI Bao-hui, YAN Shi. Application of Fuzzy Mathematics for Workshop Structures Reliability Assessment [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering University: Natural Science, 2001, 17(4): 268-271.
- [8] 张永利, 姚继涛, 钟龙娃. 单层钢结构厂房可靠性的状态评定方法[J]. 建筑结构, 2007, 37(增): 5-8.
- ZHANG Yong-li, YAO Ji-tao, ZHONG Long-wa. Method to Appraisal Reliability of Monolayer Steel Struetural Workshop Based on State Analyses [J]. Building Structure, 2007, 37(S): 5-8.
- [9] 王威, 韩阳, 赵月平. 灰色聚类分析在建筑结构可靠性评定中的应用[J]. 工业建筑, 2006, 36(增): 235-237.
- WANG Wei, HAN Yang, ZHAO Yue-ping. Application of Grey Cluster Analysis to Building Construction Reliability Assessment [J]. Industrial Construction, 2006, 36(S): 235-237.
- [10] 张纪刚, 张同波, 欧进萍. 青岛游泳跳水馆复杂异形网架结构抗震性及可靠性研究[J]. 工程力学, 2010, 27(增1): 260-265.
- ZHANG Ji-gang, ZHANG Tong-bo, OU Jin-ping. Reliability and Seismic Analyses of the Grid Structure for Swimming and Diving Hallin Qingdao Sports Center [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S1): 260-265.
- [11] 赵成豪. 既有钢筋混凝土厂房的检测鉴定及承载能力可靠性分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- ZHAO Cheng-hao. Testing and Appraisal of Existing Reinforced Concrete Workshops and Reliability Analysis of Carrying Capacity [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [12] GB 50144—2008, 工业建筑可靠性鉴定标准[S].
- GB 50144—2008, Standard for Appraisal of Reliability of Industrial Buildings and Structures[S].
- [13] DG/TJ 08-804-2005, 既有建筑物结构检测与评定标准[S].
- DG/TJ 08-804-2005, Standard of Structural Inspection and Assessment for Existing Buildings[S].
- [14] 陈少杰, 顾祥林, 张伟平. 层次分析法在既有建筑结构体系可靠性评定中的应用[J]. 结构工程师, 2005, 21(2): 31-35.
- CHEN Shao-jie, GU Xiang-lin, ZHANG Wei-ping. The Application of AHP Method in Assessment of Existing Building Structures [J]. Structural Engineers, 2005, 21(2): 31-35.
- [15] 顾祥林, 陈少杰, 张伟平. 既有建筑结构体系可靠性评估实用方法[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 12-17.
- GU Xiang-lin, CHEN Shao-jie, ZHANG Wei-ping. An Applicable Method to Assess the Reliability of Existing Building Structures [J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 12-17.
- [16] SAATY T L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process [M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2001.
- [17] 黄德所, 张俊学. 层次分析法中特征向量法确定权重向量的理论[C]//张嗣瀛. 1998 中国控制与决策学术年会论文集. 大连: 大连海事大学出版社, 1998: 879-882.
- HUANG De-suo, ZHANG Jun-xue. The Method of Determining Weight Vectors by the Feature Vector Method in AHP [C]//ZHANG Si-ying. Proceedings of 1998 China Control and Decision Academic Conference. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1998: 879-882.
- [18] GB 50153—2008, 工程结构可靠性设计统一标准[S].
- GB 50153—2008, Unified Standard for Reliability Design of Engineering Structures[S].
- [19] 蒋利学, 朱雷, 李向民. 既有结构可靠性评定的基本问题和策略探讨[J]. 结构工程师, 2015, 31(6): 72-79.
- JIANG Li-xue, ZHU Lei, LI Xiang-min. Discuss on the Basic Problems and Strategies for the Reliability Assessment of Existing Structures [J]. Structural Engineers, 2015, 31(6): 72-79.
- [20] 岳清瑞, 幸坤涛, 惠云玲. GB 50144《工业建筑可靠性鉴定标准》(报批稿)的修订及主要内容[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 152-156, 167.
- YUE Qing-rui, XING Kun-tao, HUI Yun-ling. Revision and Its Main Content for GB 50144 *Standard for Appraisal of Reliability of Industrial Buildings and Structures* (Draft for Approval) [J]. Industrial Construction, 2016, 46(11): 152-156, 167.