

文章编号: 1000-4750(2012)03-0090-05

住宅楼面活荷载的统计分析及其可靠度的分析

吴小强¹, 姚继涛², 刘雅君¹

(1. 延安大学建筑学院, 陕西, 延安 716000; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055)

摘 要: 根据西安市、包头市多层及高层住宅楼面活荷载的调查结果, 对楼面等效均布活荷载进行了统计分析, 据此分析了我国钢筋混凝土楼板设计的可靠度水平。在楼面活荷载的等效中, 提出房间受荷面积比的概念, 并以此考虑活荷载可能出现的不利布置。分析结果说明: 我国目前住宅楼面等效均布活荷载的概率特性已发生较大变化, 有必要在更大的范围对楼面活荷载进行调查或考证; 受荷面积比对楼面等效均布活荷载以及楼板的可靠度均有显著影响, 有必要予以考虑; 在考虑楼面活荷载的不利布置时, 现行国家规范基本能够保证住宅楼板的可靠度。

关键词: 建筑结构; 住宅楼面; 荷载; 统计分析; 结构可靠度

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A

STATISTICAL ANALYSIS OF LIVE LOAD ON RESIDENCE FLOOR AND ANALYSIS OF RESIDENCE FLOOR RELIABILITY

WU Xiao-qiang¹, YAO Ji-tao², LIU Ya-jun¹

(1. School of Architecture, Yanan University, Yanan, Shaanxi 716000, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: According to the survey results of the live loads on floors of some multi-storey and high-rise residence buildings in Xi'an city and Baotou city, a statistical analysis on the equivalent uniform live loads on floors is performed, and then the reliability of the designed reinforcement concrete floors is investigated. A new factor called the minimum loads-supporting area ratio is proposed to take into account the least favorable distribution of live loads. Analysis results show that the equivalent uniform live loads cannot reflect the main features of live loads on floors of residence buildings, and further research work may need to be carried out; the minimum loads-supporting area ratio should be taken into account because it has great influence on the equivalent live loads on floors and floor reliability; the reliability level of floors of the residence buildings are high enough according to the present national codes, even subjected to the least favorable distribution of live loads.

Key words: building structure; residence floor; loads; statistical analysis; structural reliability

荷载的概率特性对工程结构的可靠度有着直接的影响, 我国最近一次大范围的荷载调查工作是在 1977 年至 1981 年期间进行的, 根据该次调查和统计分析结果我国在国家标准 GBJ68-84 中规定了办公楼、住宅楼面等效均布活荷载的概率模型和代表值^[1], 并建立了概率极限状态设计方法。楼面等

效均布活荷载不仅与楼面活荷载有关, 还与楼盖的结构形式有关。相对于 20 世纪七、八十年代, 目前的生产、生活方式和楼盖结构形式都发生了较大的变化, 楼面等效均布活荷载的概率特性相应地也会随之发生变化。虽然现行国家标准 GB50009-2001 将住宅楼面等效均布活荷载的标准值由 1.5kN/m²

收稿日期: 2010-06-02; 修改日期: 2010-08-18

基金项目: 国家十五科技攻关项目(2002BA806B-5-3A); 陕西省建设厅项目(2001-0213)

通讯作者: 吴小强(1977—), 男, 陕西延安人, 讲师, 硕士, 主要从事结构可靠性研究(E-mail: nwwolf197724@163.com)

作者简介: 姚继涛(1965—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 博导, 兼任中国土木工程学会工程结构可靠度委员会委员, 全国建筑物鉴定与加固标准技术委员会委员, 西安市安全生产专家组成员, 国家“西部之光”访问学者, 主要从事结构可靠度性理论、建筑物可靠性鉴定研究(E-mail: yaojitao@126.com);

刘雅君(1954—), 女, 陕西延安人, 教授, 主要从事结构可靠性理论研究(E-mail: yadxm@126.com).

提高到 2.0kN/m^2 ^[2], 但过去所建立的概率模型是否依然有效, 结构实际的可靠度是否满足现行国家标准的要求, 都需进行再次的考证。

为了了解当前住宅楼面活荷载的实际水平, 西安建筑科技大学对西安市、包头市的住宅楼面活荷载进行了一定范围的调查^[3]。调查户数为 105 户, 其中最小户型为一室一厅一卫, 最大户型为四居两厅两卫, 共计 469 个房间, 总面积约 7900m^2 ; 房屋结构形式包括多层砌体结构(55 户)、剪力墙结构(25 户)、框架结构(20 户)和框架-剪力墙结构(5 户), 楼板类型主要为现浇钢筋混凝土双向板。调查中按习惯将楼面活荷载划分为持久性、临时性两类。调查持久性楼面活荷载时, 实地称量或估计物体的重量(考虑地面二次装修), 并记录常住人口数; 调查临时性楼面活荷载时, 主要是口头询问最多聚集人数。调查中还记录了住户搬迁的周期。

本文将根据调查结果, 采用改进的等效方法将楼面活荷载转换为楼面均布活荷载, 并对其进行统计分析, 最后根据新的楼面等效均布活荷载的概率模型, 分析当前住宅结构楼板设计的可靠度水平。

1 楼面活荷载的等效

为便于设计, 楼面活荷载需统一转换为作用于整个房间的楼面均布活荷载, 且原则上应保证转换前后楼盖构件控制部位的效应, 特别是内力相同。我国在 1977 年至 1981 年期间对荷载调查结果进行分析时, 曾考虑三种转换方法^[4]: 直接取室平均活荷载, 即取房间实测活荷载与房间实际面积的比值; 取板带平均活荷载, 即取受力最不利的 1m 宽开间方向板带上的实测活荷载与该板带面积的比值; 取板带等效均布活荷载, 即取上述板带上具有相同最不利效应的均布活荷载。第一种方法最为简单, 但由其所确定的效应偏小; 第二种方法和第三种相对合理, 但仅适用于单向板的情况。为简单起见, 我国最终选用了室平均活荷载法。

为了更准确地反映实际荷载产生的内力, 这里按楼板最大内力相等的原则将楼面活荷载等效为均布荷载, 等效时近似采用简支梁(单向板)或四周简支板(双向板)的计算简图, 按弹性理论计算楼板内力^[5-8]。按这种方法转换楼面活荷载时, 必须考虑楼面活荷载的分布, 并且对于安全性问题而言, 应考虑最不利的分布方式。对于持久性楼面活荷载, 这里设定房间的楼面活荷载均匀作用于以房间

几何中心为不动点、两边同比例缩小的矩形区域上, 并称该区域的面积为房间的受荷面积, 该面积与房间面积的比值称为房间的受荷面积比。当房间的受荷面积等于房间大件家具占地面积之和时, 认为受荷面积比达到最小值, 而楼面活荷载的分布最不利, 这相当于房间所有大件物品紧密集中于房间中央的情况。对于安全性分析, 这种可能发生的情况应予以考虑, 在持久性楼面活荷载的转换中应采用这种最不利的荷载分布方式。对于临时性楼面活荷载, 由于实际受荷面积难以确定, 这里近似采用全面积受荷的方式, 即采用室平均活荷载的近似等效方法。

2 统计分析结果

无论是持久性还是临时性楼面活荷载, 其概率模型一般均取为等时段的平稳二项矩形波过程, 统计分析时需确定荷载一次持续施加于结构上的时段长度 τ 、每一时段上出现荷载的概率 p 和任意时点的概率分布 $F(x)$ ^[9-10]。

2.1 时段长度 τ 和概率 p

我国在根据调查统计结果修订国家标准 GBJ68-84 时, 对于持久性楼面活荷载, 近似取 $\tau = 10a$, $p = 1$; 对于临时性楼面活荷载, 按每周出现 1 次、每次持续 4h 的情况考虑, 取 $\tau = 4h$, $p = 0.0238$, 并且近似而偏于安全地假定, 临时性楼面活荷载以其在持久性楼面活荷载时段长度 (10a) 内的最大值在该时段长度内持续施加于结构上, 并称其概率分布为临时性活荷载任意时点的分布, 这时临时性楼面活荷载的时段长度 $\tau = 10a$, 出现的概率 $p = 1$ 。根据本次调查的结果, 用户搬迁的平均周期为 $9.54a$, 可近似取持久性楼面活荷载的时段长度 $\tau = 10a$, 出现概率 $p = 1$; 对于临时性楼面活荷载, 这里同样取 $\tau = 10a$, $p = 1$ 。

2.2 最小受荷面积比

根据房间面积和大件家具占地面积的调查结果, 可确定房间的最小受荷面积比 α_{\min} , 其统计结果见表 1。对于卧室和餐厅, 其最小受荷面积比 α_{\min} 集中于 0.3~0.5 的范围; 对于客厅, 则集中于 0.2~0.4 的范围。

表 1 房间最小受荷面积比 α_{\min}

房间最小受荷面积比 α_{\min}	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7
卧室和餐厅	15	41	21	13	10
客厅	56	19	15	10	0

2.3 概率分布类型

对于任意时点的持久性楼面等效均布活荷载 L_i ，考虑到“卧室和餐厅”与“客厅”之间可能存在着较大差别，因此统计分析中对两者的 L_i 的分布类型和参数分别进行了检验和推断。两者的频率直方图说明，楼面等效均布活荷载的分布具有明显的偏态性质； χ^2 检验和 K-S 检验的结果进一步说明，它们不拒绝极值 I 型分布，因此可认为其服从极值 I 型分布；但秩检验的结果说明，“卧室和餐厅”、“客厅”的楼面等效均布活荷载并非来自同一母体，需按不同的随机变量处理。

对于任意时点的临时性楼面等效均布活荷载 L_{rs} ，这里不考虑房间类型的差别，近似将各类房

间的 L_{rs} 均按一个母体对待。经 χ^2 检验和 K-S 检验，它们均不拒绝极值 I 型分布，亦可认为其服从极值 I 型分布。

2.4 均值和标准差

根据统计分析结果，“卧室和餐厅”任意时点持久性、临时性楼面等效均布活荷载 L_i 、 L_{rs} 的均值 μ_i 、 μ_{rs} 和标准差 σ_i 、 σ_{rs} 见表 2，其中 L_i 的均值 μ_i 和标准差 σ_i 随受荷面积比 α 的增大而减小。对于 L_{rs} ，这里仅考虑受荷面积比 $\alpha = 1$ 的情况。“客厅”任意时点持久性、临时性楼面等效均布活荷载 L_i 、 L_{rs} 的均值 μ_i 、 μ_{rs} 和标准差 σ_i 、 σ_{rs} 见表 3，它们的变化规律与“卧室和餐厅”的相同。

表 2 卧室和餐厅楼面等效均布活荷载的均值和标准差

/(kN/m²)

Table 2 Mean and standard deviation of equivalent uniform live load on floor bedroom and dining

受荷面积比 α	持久性楼面等效均布活荷载				临时性楼面等效均布活荷载				楼面等效均布活荷载 L_T	
	L_i		L_{iT}		L_{rs}		L_{rT}		均值	标准差
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差		
0.2	0.9305	0.4122	1.3804	0.4122					1.6977	0.4342
0.3	0.8009	0.3413	1.2292	0.3413					1.5465	0.3850
0.4	0.6823	0.2810	1.0749	0.2810					1.3922	0.3327
0.5	0.5994	0.2543	0.9185	0.2543					1.2358	0.3105
0.6	0.5152	0.2662	0.8492	0.2662					1.1665	0.3203
0.7	0.4560	0.1941	0.6996	0.1941					1.0169	0.2635
0.8	0.4132	0.1760	0.6340	0.1760					0.9513	0.2505
0.9	0.3814	0.1627	0.5856	0.1627					0.9029	0.2413
1.0	0.3386	0.1453	0.5209	0.1453	0.3173	0.1782	0.5408	0.1782	0.8382	0.2299

表 3 客厅楼面等效均布活荷载的均值和标准差

/(kN/m²)

Table 3 Mean and standard deviation of equivalent uniform live load on living room floor

受荷面积比 α	持久性楼面等效均布活荷载				临时性楼面等效均布活荷载				楼面等效均布活荷载 L_T	
	L_i		L_{iT}		L_{rs}		L_{rT}		均值	标准差
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差		
0.2	0.5924	0.3166	0.9897	0.3166					1.3070	0.3633
0.3	0.5048	0.2448	0.8120	0.2448					1.1293	0.3028
0.4	0.4372	0.2438	0.7431	0.2438					1.0604	0.3020
0.5	0.3779	0.2458	0.6863	0.2458					1.0036	0.3036
0.6	0.3165	0.2187	0.5909	0.2187					0.9082	0.2821
0.7	0.2821	0.2122	0.5459	0.2122					0.8632	0.2773
0.8	0.2627	0.2011	0.5150	0.2011					0.8323	0.2687
0.9	0.2417	0.1956	0.4871	0.1956					0.8044	0.2646
1.0	0.2191	0.1900	0.4575	0.1900	0.3173	0.1782	0.5408	0.1782	0.7748	0.2605

根据极值 I 型分布的性质，持久性楼面等效均布活荷载在设计使用年限 T 内的极值 L_{iT} 亦服从极值 I 型分布，其均值和标准差分别为：

$$\mu_{iT} = \mu_i + 0.7797\sigma_i \ln(T / \tau) \quad (1)$$

$$\sigma_{iT} = \sigma_i \quad (2)$$

对于临时性楼面等效均布活荷载在设计使用年限 T 内的极值 L_{rT} ，也存在类似的关系。表 2 和

表 3 中也列出了 $T = 50 a$ 时 L_{iT} 、 L_{rT} 的均值 μ_{iT} 、 μ_{rT} 和标准差 σ_{iT} 、 σ_{rT} 。

根据我国习惯，设计使用年限 T 内持久性、临时性楼面等效均布活荷载应按式(3)、式(4)所示的方式进行组合，并以其中的不利者作为楼面等效均布活荷载在设计使用年限 T 内的极值 L_T 。 L_T 的概率分布类型可近似取为极值 I 型分布，其均值和标准

差可根据式(3)和式(4)所示的关系确定,计算结果见表 2 和表 3, 它们同样随受荷面积比 α 的增大而减小。

$$L_T = L_{iT} + L_{rs} \quad (3)$$

$$L_T = L_i + L_{rT} \quad (4)$$

根据我国 1977 年至 1981 年期间荷载统计分析的结果,设计使用年限 T 内住宅楼面等效均布活荷载的极值 L_T 的均值为 1.2878kN/m^2 , 标准差为 0.2996kN/m^2 。本次统计分析的结果说明,当采用同样的等效方法时,即采用受荷面积比 $\alpha = 1$ 的室平均活荷载方法时,住宅“卧室和餐厅”及“客厅”的 L_T 的均值和标准差都较过去有明显的降低,这与我国住宅房间面积、楼板形式的变化有着直接的关系。但是,如果按最小受荷面积考虑楼面活荷载的布置,则过去的统计结果并不代表目前最不利的情况,即 $\alpha = 0.2$ 时的情况,它大致相当于目前 $\alpha = 0.4 \sim 0.5$ (卧室和餐厅)和 $\alpha = 0.2 \sim 0.3$ (客厅)时的情况。

3 楼板可靠度分析

对于住宅钢筋混凝土楼板的设计,其抗力一般由下式控制:

$$1.2S_{Gk} + 1.4S_{Qk} \leq R_k / \gamma_R \quad (5)$$

按现行国家规范,楼面等效均布活荷载的标准值 $S_{Qk} = 2.0\text{kN/m}^2$ 。记:

$$\rho = \frac{S_{Qk}}{S_{Gk}} \quad (6)$$

ρ 的数值范围一般为 $0.4 \sim 2.0$ 。现行国家规范将混凝土、钢材的分项系数分别由 1.35 、 1.08 调整为 1.4 、 1.10 , 这里按线性插值组合的方法近似将抗力的分项系数 γ_R 由 1.13 调整为 1.15 。与式(6)对应的楼板的可靠度函数为:

$$Z = R - S_G - S_Q \quad (7)$$

其中:永久作用效应 S_G 服从正态分布,其均值和变异系数分别为 $1.06 S_{Gk}$ 和 0.074 ;楼面等效均布活荷载效应 S_Q 服从极值 I 型分布,其均值和变异系数取本次统计分析的结果;抗力 R 服从对数正态分布,其均值和变异系数分别为 $1.13 R_k$ 和 0.10 。

经可靠度分析,图 1 和图 2 分别给出了住宅“卧室和餐厅”、“客厅”楼板关于比值 ρ 的平均可靠指标随最小受荷面积比 α_{\min} 变化的情况,可见:最小受荷面积比 α_{\min} 对楼板的可靠度有着非常显著的影响,当 α_{\min} 由 0.2 变化为 1.0 时,可靠指

标的差值达到了 1.2 以上;在大多数情况下,按现行国家规范所设计的住宅楼板的可靠指标满足 3.2 的最低要求,但按目前室平均活荷载等效方法(取 $\alpha_{\min} = 1$)所确定的可靠指标要远高于 3.2 ,这种表面上的结论并不能反映楼板可靠度的实际情况。

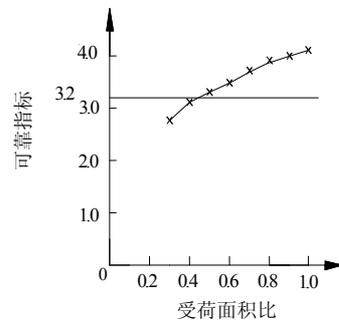


图 1 住宅卧室和餐厅楼板的可靠指标

Fig.1 Reliability of residential floor bedroom dining

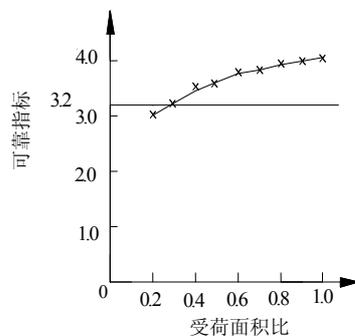


图 2 住宅客厅楼板的可靠指标

Fig.2 Reliability of residential floor living room

4 结论

本次调查与分析工作只是验证性的,调查范围有限,但统计分析的结果初步说明,我国目前住宅楼面等效均布活荷载的概率特性已发生较大变化,可考虑在更大的范围对楼面活荷载进行调查或考证。其次,在涉及安全性的问题中,应考虑楼面活荷载的不利布置,考虑受荷面积比对楼面等效均布活荷载以及楼板可靠度的影响。就本次调查和分析的结果而言,如果考虑楼面活荷载的不利布置,现行国家规范也基本能够保证住宅楼板的可靠度。

参考文献:

- [1] GBJ68-84, 建筑结构设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
GBJ68-84, Unified standard for design of building structures [S]. Beijing: China Architectural and Building Press, 1985. (in Chinese)
- [2] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

- GB50009-2001, Load code for the design of building structure [S]. Beijing: China Architectural and Building Press, 2001. (in Chinese)
- [3] 牛建刚. 典型住宅结构楼面荷载的调查与统计分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
Niu Jiangan. Investigation and statistical analysis on floor loads of typical residential buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004. (in Chinese)
- [4] Bruce Ellingwood, Theodore V Galambos, James G Macgregor, et al. Development of a probability based load criterion for minimum design loads in buildings and other structures [D]. NBS SP-577, June, 1980.
- [5] Rosowsky D V, Huang Y L, Chen W F, et al. Modeling concrete placement loads during construction [M]. Structural Engineering Review, 1994, 6(2): 71—84.
- [6] Ayoub H, Saeed Karshenas. Survey results for concrete construction live load on newly poured slabs [M]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(5): 1542—1563.
- [7] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 174—201.
- Editors of Static computation handbook for building structures. Static computation handbook for building structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Architectural and Building Press, 1998: 174—201. (in Chinese)
- [8] 陈基发, 沙志国. 建筑结构荷载设计手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 156—222.
Chen Jifa, Sha Zhiguo. Load design manual of building structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Architectural and Building Press, 2004: 156—222. (in Chinese)
- [9] 余安东, 叶润修. 建筑结构的安全性及可靠性[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986: 89—97.
Yu Andong, Ye Runxiu. Structural safety and reliability [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1986: 89—97. (in Chinese)
- [10] 杨伟军, 赵传智. 土木工程结构可靠度理论与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 73—78.
Yang Weijun, Zhao Chuanzhi. Structural reliability theory and design of civil engineering [M]. Beijing: People Traffic Press, 1999: 73—78. (in Chinese)

(上接第 89 页)

- [6] 许强, 童根树. 任意开口薄壁截面圆弧曲梁的通用线性理论[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 141—147.
Xu Qiang, Tong Genshu. A general linear theory for thin-walled curved beams with open sections [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(6): 141—147. (in Chinese)
- [7] 许强. 薄壁曲梁线弹性理论和弹塑性稳定极限承载力分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
Xu Qiang. Linear elastic theory and ultimate load carrying capacity analysis of thin-walled curved beams [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- [8] 童根树, 许强. 工字形截面圆弧曲梁的非线性理论[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 1—7.
Tong Genshu, Xu Qiang. Nonlinear theory for round curving beams with I-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 1—7 (in Chinese)
- [9] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Chen Ji. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 杨永华. 弹性开口薄壁截面圆弧钢拱的稳定承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Yang Yonghua. Research on stability capacity of elastic open thin-walled circular steel arch [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [11] Papangelis, Trahair. Flexural-torsional buckling tests of arches [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(4): 889—906.