

郑山锁,丁明松,郑捷,等.基于多元线性回归方法的砌体结构加固费用估算模型研究[J].地震工程学报,2018,40(1):6-13.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.006

ZHENG Shansuo, DING Mingsong, ZHENG Jie, et al. A Retrofit Cost Estimation Model of Masonry Structures Based on the Multiple Linear Regression Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 6-13. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.006

基于多元线性回归方法的砌体结构 加固费用估算模型研究^①

郑山锁¹, 丁明松¹, 郑捷¹, 侯丕吉²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为建立适用于砌体结构的加固费用快速估算模型,对中国陕西、山西、四川等地砌体结构建筑物的历史加固费用及相关建筑参数进行统计,建立涵盖 35 栋砌体结构建筑物加固费用估算模型的回归与验证数据库,同时对影响加固费用的各建筑参数作显著性分析,并基于后向消去的多元线性回归方法,利用 SPSS 统计分析软件对已采集的加固数据进行回归,得到 4 个费用估算模型;按照相应评价准则分别对各模型进行评价,提出一套最优的砌体结构加固费用快速估算模型,并对该回归模型进行验证分析。回归得到的费用估算模型满足精度要求,具有一定的工程应用价值。

关键词: 砌体结构; 多元线性回归; 加固费用; 估算模型

中图分类号: TU364

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)01-0006-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.006

A Retrofit Cost Estimation Model of Masonry Structures Based on the Multiple Linear Regression Method

ZHENG Shansuo¹, DING Mingsong¹, ZHENG Jie¹, HOU Piji²

(1. School of Civil Engineering, Xian University of Architecture and Technology, Xian 710055, Shaanxi, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xian University of Science and Technology, Xian 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, retrofit costs and relative building parameters of masonry structures in Shaanxi, Shanxi, and Sichuan Provinces were collected, to enable a retrofit cost estimation model for masonry structure buildings to be developed. A regression and validation database, including the retrofit cost estimation models of 35 buildings, was built, and the building parameters which influence retrofit costs analyzed. Then, based on the multiple linear regression method, four models were established using the existing retrofit data with SPSS analysis software. After evaluating the four models according to their corresponding evaluation criteria, an optimal rapid estimation model for the retrofit cost of masonry structures was proposed and verified. The results show that the regression model meets the precision requirements and could be valuable in practical engineering.

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金(51678457); 陕西省重点研发计划(2017ZDXM-SF-093); 陕西省教育厅产业化项目(2017JC15); 西安市建设科技研究项目(SJW2015-14)

作者简介: 郑山锁(1960—), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 结构工程与工程抗震。E-mail: zhengshansuo@263.net。

通信作者: 丁明松(1990—), 男, 山东人, 硕士, 研究方向: 城市多龄期建筑震害评估评估与分析。

Key words: masonry structure; multiple linear regression; retrofit cost; estimation model

0 引言

近年来社会的进步伴随着城镇化进程的加速,人口急剧增长并开始变得越来越聚集。早期的一些建筑物由于没有进行抗震设计或设计标准的改变,其自身质量不能够得到保证,以及高龄期建筑抗震性能的急剧退化,均使得地震带来的后果也愈加严重。因此在地震发生前对建筑物进行加固处理是避免地震影响的最为直接、有效的方法。

建筑物的加固改造一般包括建筑物的抗震鉴定、加固费用预算、抗震加固设计以及加固改造施工等一系列流程。其中加固费用的预测是整个加固项目中比较重要的一个环节,决策人员对建筑物加固改造项目的很多决定都依赖于对建筑物加固费用的预测。对于业主及项目决策人员来说,加固项目决策的合理性在一定程度上取决于加固改造费用预测的准确度,一方面加固改造费用的预测是加固改造项目造价及投资控制的基础,另一方面加固改造费用的预测能够为项目的可行性研究及加固设计方案的选择提供指导性建议,同时加固改造费用的快速估算也能为城市砌体结构建筑群加固决策体系的建立提供数据支持。国外一些既有的模型在某些方面存在不足并且不适用于我国,而国内对建筑结构的加固研究起步比较晚且目前主要集中在加固方法等方面的研究上,对加固费用估算模型的研究相对较少并且缺乏太大的进展。

1 研究方法

本研究拟采用多元线性回归方法建立费用估算的多元线性回归模型。由于建筑物各参数均可能会对加固费用产生一定的影响,如果未经显著性检验就将所有建筑参数均考虑在回归模型中,则有可能在影响费用模型精确性的同时降低费用估算的速度。在对自变量进行显著性分析时,回归模型中的自变量是不确定的,并且现阶段没有明确的理论可以直接确定哪些变量会对因变量影响较大。同时由于不同的自变量组合模型计算出的加固费用也有所差异,而所有模型组合中必将有一个费用估算模型预测的加固费用是最精确的,因此在回归分析中,自变量最优组合的确定对精确预测加固费用来说至关重要。

为考虑各个自变量对加固费用的贡献程度,应用后向消去的多元线性回归方法对所有自变量参数进行变量回归系数的显著性分析,并按照最优模型

评价准则来确定最优加固费用回归分析模型。后向消去法^[1]是从包含所有变量的模型进行分析,根据其因变量的贡献程度逐次剔除对成本费用影响不显著的自变量,与之相对应的前向选择法则是当某个自变量要比其他自变量对加固费用的影响更显著时,该自变量将会第一个加入到模型中进行回归分析,而当其他对加固费用没有显著影响的变量也加入到该模型中时,则回归分析过程终止。尽管前向选择法和后向消去法都能够回归得到同一个模型,但由于后向消去法在前期的回归模型分析中能够分析所有自变量对因变量的影响,这点是前向选择法所不具备的,因此后向消去法在模型的回归分析中更加合理。Lowe等^[2]在对建筑建设成本的研究中,分别采用后向消去法和前向选择法对建筑建设成本进行回归分析,发现采用后向消去法得到的模型线性相关系数以及绝对误差百分比均比前向选择法得到的要小,即相对于前向选择法,后向消去法得到的模型拟合程度更好,更能准确反映建筑物的实际建设成本。

总的来说,相比于前项选择法,利用后向消去法对自变量与因变量进行回归分析时更易选取对加固费用影响显著的自变量参数,得到的模型能更精确地估算建筑物实际的加固费用,因此本文亦将采用后向消去法对加固费用模型进行多元线性回归分析。

2 费用估算模型的建立

(1) 多元线性回归模型的建立

多元线性回归分析^[3]是处理变量之间关系的一种统计方法,用来研究多个独立变量对因变量的影响程度。该方法通过建立多个独立变量与因变量之间的统计关系方程式,对未来时刻的预报量做出预报估计,有助于我们认识客观事物的定量关系及其内在规律。通过多元线性回归方法对加固费用与影响加固费用的各相关参数进行分析,明确加固费用与影响参数之间的相互关系。在加固费用多元线性回归模型的研究中,假定加固费用与影响参数满足模型的线性假定,并且均相互独立,则加固费用估算的多元线性回归模型可以表示为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \cdots + \beta_p X_p + \epsilon \quad (1)$$

式中:Y为估算的加固费用; $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ 为影响加固费用的独立参数; β_0 为模型的常数项,取

值与样本数据有关; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \cdots, \beta_p$ 为模型回归相关系数,取值与样本数据有关。

(2) 多元线性回归模型参数的定义

砌体结构建筑物在经过长时间的服役后,其安全性、适用性随着时间的推移将逐渐降低,通常建筑物龄期越长,其抗震性能较新建建筑物差,一般情况下认为加固成本费用会随着龄期的增加而增多。此外,建筑物的层数对加固费用的影响也比较大,建筑物的高度越高,其倾覆力与剪力将越大,性能退化严重的建筑物在地震中的损伤将会越严重,这就可能会使建筑物加固费用也随之提高。在 FEMA 加固费用估算模型^[4]中,考虑了建筑面积对加固费用的影响,但未考虑层数对费用的影响,因此将建筑面积作为自变量参与模型分析,并研究建筑层数对加固费用的影响程度。

参照既有加固费用模型并结合课题组已有建筑数据,将与加固费用密切相关的多个独立变量分别定义为建筑物的龄期、层数、建筑物的层高、建筑总面积等,则加固费用多元线性回归模型可表示为:

$$Y=\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\beta_4 X_4 \tag{2}$$

式中所示砌体结构的加固费用多元线性回归模型中自变量与因变量的定义如表 1 所列。

表 1 模型变量的定义
Table 1 Definition of model variables

变量	定义	变量形式	
		因变量	自变量
Y	加固费用	√	
X ₁	建筑物的层高		√
X ₂	建筑物的层数		√
X ₃	建筑物的龄期		√
X ₄	建筑总面积		√

由于早期国内对于结构抗震的研究较少,导致目前现存较多的砌体结构建筑物未进行抗震设防,

地震中砌体结构很容易破坏。考虑到砌体结构建造的历史时期不同以及建造时所依据的设计规范体系不同,不同龄期建筑物的抗震设防标准也会有所差异,而对建筑物进行加固设计时抗震设防标准的改变通常也会影响到加固成本。有研究表明^[5],结构抗震设防标准的改变对加固费用有较大影响,当加固抗震设计基本地震加速度由 0.08g 增加到 0.21g 时,加固费用增加 14% 左右,因此当加固后建筑物的设防标准较加固前设防标准每提高 0.05g,加固费用将在式(2)的基础上提高 5.38%。在本文研究中,考虑设防标准的改变对加固费用的影响,提出式(3)所示的加固费用模型。

$$Y_{PGA}=\left(1+0.0538\times\frac{\alpha_1-\alpha_0}{0.05}\right)\cdot Y \tag{3}$$

式中:Y_{PGA}为考虑设防烈度改变后的加固费用; α_0 与 α_1 分别为建筑物加固前与加固后的设计地震加速度值。

3 模型分析数据库

根据砌体结构的加固费用估算模型参数的定义,对陕西、山西、四川等地 35 栋砌体结构建筑物的历史加固费用(已包含人工费等费用)及建筑参数进行统计。所采集的数据均包含上文所述的自变量以及因变量,并按照一定比例随机将建筑进行分类,建立两套加固费用数据库,其中一套数据库用以进行加固费用估算模型的回归分析以得到费用估算回归模型,另一套验证数据库用以对回归得到的费用估算模型的准确性进行验证。为此随机将其中 25 栋建筑划为模型回归数据库中,剩余的建筑物则被划为模型验证数据库中。

模型分析数据库以及模型验证数据库如表 2 及表 3 所示。

表 2 模型分析数据库
Table 2 Analysis database of regression models

样本	龄期 /a	加固时间 /a	每层均高 /m	层数	总面积 /m ²	原设防 烈度	现设防 烈度	加固费用 Y _{PGA} /万元
1	12	2008	3.1	5	1 036	Ⅶ度(0.10g)	Ⅶ度(0.10g)	61.20
2	10	2008	3.0	5	2 600	Ⅶ度(0.15g)	Ⅶ度(0.15g)	96.10
3	25	2010	3.36	3	870	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	27.83
4	19	2004	3.0	2	895.4	Ⅶ度(0.15g)	Ⅷ度(0.20g)	22.90
5	17	2008	3.0	6	1 120	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	72.32
6	28	2010	3.3	2	2 372	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	91.00
7	12	2009	3.68	4	1 838	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	66.20
8	43	2014	3.3	6	8 000	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	357.7
9	22	2010	3.8	4	1 907.2	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	95.34
10	约 45	2009	3.5	3	3 293.58	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.10g)	164.1

续表 2

样本	龄期 /a	加固时间 /a	每层均高 /m	层数	总面积 /m ²	原设防 烈度	现设防 烈度	加固费用 Y _{PGA} /万元
11	28	2003	3.3	2	1 065	Ⅵ度(0.05g)	Ⅷ度(0.20g)	61.80
12	15	2008	3.0	6	1 422.9	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	87.60
13	7	2008	3.0	5	1 583.48	Ⅶ度(0.15g)	Ⅶ度(0.15g)	63.80
14	10	2013	3.6	4	2 096	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	63.25
15	15	2008	3.0	6	2 845.84	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	138.4
16	约 26	2011	3.3	3	1 032.12	Ⅵ度(0.05g)	Ⅵ度(0.05g)	36.70
17	17	2010	3.6	3	2 076	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	132.7
18	23	2010	3.3	4	1 638	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	32.56
19	20	2010	3.6	3	1 020	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	34.20
20	28	2004	3.3	2	5 33.4	Ⅵ度(0.05g)	Ⅷ度(0.20g)	32.50
21	17	2008	3.0	6	2 802.38	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	188.0
22	18	2009	3.0	2	300	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.10g)	10.74
23	19	2012	3.6	2	473	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.10g)	17.60
24	37	2008	3.0	6	3 673.86	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.10g)	121.5
25	23	2014	3.9	3	1 522	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	69.70

表 3 模型验证数据库

Table 3 Validation database of regression models

样本	龄期 /a	加固时间 /a	每层均高 /m	层数	总面积 /m ²	原设防 烈度	现设防 烈度	加固费用 /万元
1	12	2001	3.3	3	889.5	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	32.1
2	15	2010	3.3	3	1 349.34	Ⅶ度(0.15g)	Ⅷ度(0.20g)	65.34
3	17	2008	3.0	6	2 560	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	135.68
4	10	2008	3.0	5	2 391.17	Ⅶ度(0.15g)	Ⅶ度(0.15g)	78.2
5	27	2009	3.6	4	2 534	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	130.2
6	15	2008	3.0	6	4 268.77	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.15g)	201.1
7	约 35	2009	3.0	6	1 358.4	Ⅵ度(0.05g)	Ⅷ度(0.20g)	66
8	10	2003	3.6	3	848.52	Ⅵ度(0.05g)	Ⅶ度(0.10g)	24.7
9	15	2006	3.3	3	1 944	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	89.78
10	26	2010	3.6	1	224	Ⅷ度(0.20g)	Ⅷ度(0.20g)	6.12

4 模型回归与最优分析

由于模型分析数据库中部分建筑物加固前后的设防标准并不统一,加固设防标准的改变会导致加固费用的增加。为统一加固费用模型的研究标准,按式(3)对表 2 所示模型分析数据库中 25 栋建筑物的加固费用进行处理,并对各自变量与加固费用之间的线性关系及影响程度进行分析。建筑物各自变量参数与其未考虑设防标准改变时的加固费用间的关系如图 1 所示。

通过对层高、层数、龄期以及建筑面积与加固费用之间关系的拟合分析,得到各参数与加固费用之间的拟合线性相关系数及标准估计值误差(表 4)。

由表 4 及图 1(d)可以发现,加固费用与建筑面积拟合的线性相关系数最接近于 1,各数据点均匀分布于拟合曲线两侧,表明加固费用与建筑面积之间存在较强的线性关系,也就是说建筑面积对于费用的影响最为显著;而建筑层高与加固费用之间的

线性相关系数最小,图 1(a)中的数据点离散性较大,层高与加固费用之间几乎不存在线性关系,加固费用受层高的影响最小;从图 1(b)、(c)以及表 4 中线性相关系数来看,建筑龄期与层数对加固费用的影响程度均比层高的影响程度高,但比不上建筑面积。

为验证各参数对加固费用的影响程度并得到各参数与加固费用之间的回归模型,利用 IBM 公司的 SPSS 统计分析软件对未考虑设防标准改变时的加固费用数据与建筑物的各自变量参数,应用后向消去法对其进行多元线性回归分析,通过分析得到如表 5 所示的 4 个加固费用线性回归模型,在表 5 所示模型的基础上结合式(3)即可求出各模型在考虑设防烈度改变后的加固费用。

由表 5 看出,在后向消去法的回归分析中,层高首先被从回归模型中去除掉,也就是说层高对加固费用的影响程度在所有自变量中是最低的;其次分

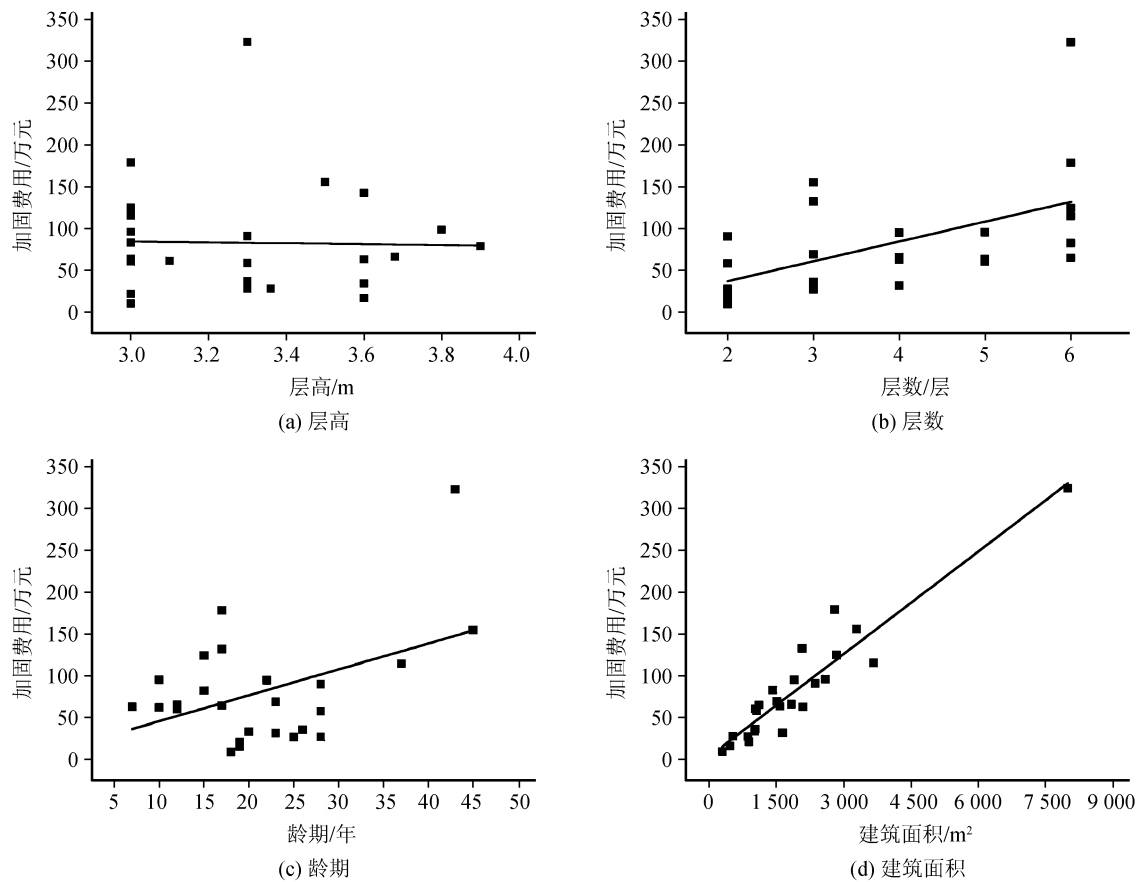


图 1 不同自变量参数与加固费用的关系图

Fig.1 Relationship between different independent variables and retrofit cost

表 4 各自变量与加固费用的拟合结果				
Table 4 Fitting results between variables and retrofit cost				
参数	层高	层数	龄期	建筑面积
调整 R^2	0.043	0.566	0.375	0.882
σ	73.52	41.56	53.39	24.63

别是建筑物的龄期与建筑层数;建筑面积作为最后

一个被保留在模型中的自变量,对加固费用的影响最为显著。该分析结果与表 4 中各项自变量对加固费用的线性相关系数保持了一致。

通过 SPSS 统计分析软件的分析,给出了各线性回归模型的线性相关系数(R^2)、调整后的线性相关系数(R_a^2),以及标准估计值误差(σ)(表 6)。

表 5 多元线性回归模型			
Table 5 Multiple linear regression models			
模型	模型中自变量	去除的自变量	模型公式
1	X_1, X_2, X_3, X_4	-	$Y = -30.519 + 6.086X_1 + 4.767X_2 + 0.066X_3 + 0.038X_4$
2	X_2, X_3, X_4	X_1	$Y = -7.829 + 4.031X_2 + 0.042X_3 + 0.039X_4$
3	X_2, X_4	X_3	$Y = -6.748 + 3.880X_2 + 0.039X_4$
4	X_4	X_2	$Y = 4.463 + 0.041X_4$

表 6 各模型的 SPSS 分析结果				
Table 6 Analysis results of each model using the SPSS analysis				
模型	R	R^2	调整 R^2	σ
1	0.944	0.892	0.864	24.069
2	0.942	0.888	0.872	23.489
3	0.942	0.887	0.876	23.045
4	0.942	0.887	0.882	22.966

由表 6 可以看出,模型 4 的线性相关系数最大。

仅仅从各变量拟合程度的角度上看,模型 4 的线性关系最强,因此可以认定模型 4 是最优模型。但仅仅根据线性相关系数一个指标就认定该模型为最优模型具有一定的片面性,而且在实际应用中,加固费用不仅仅由建筑面积所决定,还要考虑设防烈度改变对加固费用带来的影响。在多个回归模型中进行选择时,应当对其参数指标进行综合考量,以选出最

佳的回归模型。

为了在所有的回归模型中比较全面地判断出最优模型,需要参照一些评价准则进行。在应用回归分析中,常用的评价准则主要有残差均方($RMSE_p$)、赤池信息量准则(AIC_p)、调整后的赤池信息量准则(AIC_p^c)以及贝叶斯信息准则(BIC_p)4种,如式(4)~(7)所示。

$$RMSE_p = \frac{RSS_p}{n - p - 1} \tag{4}$$

$$AIC_p = n \ln \left(\frac{RSS_p}{n} \right) + 2p \tag{5}$$

$$AIC_p^c = AIC_p + \frac{2(p + 2)(p + 3)}{n - p - 3} \tag{6}$$

$$BIC_p = n \ln \left(\frac{RSS_p}{n} \right) + p \ln n \tag{7}$$

式中:残差平方和 $RSS_p = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$; n 为样本容量; p 为回归模型中自变量的个数。

根据模型分析数据库中已知建筑物的各参数,应用表 5 中 4 种加固费用回归模型分别对各栋建筑物进行加固费用估算,并按照式(3)对各栋建筑物考虑设防烈度的变化对加固费用的影响。根据实际加固费用与考虑设防烈度的估算加固费用即可得到各模型的加固费用残差(表 7)。

对表 7 中 4 个模型的每栋建筑加固费用残差值进行分析,得到各模型的最小残差、最大最差、均差残差以及残差均方和 RSS_p (表 8)。

由式(4)~(7)看出,各评价指标均与模型的残差均方和有直接或间接的关系。虽然表 8 中给出的模型 1 与模型 2 的残差均方和较小,但由于各评价指标与模型中自变量个数有着密切的关系,因此并不能直接根据模型残差均方和来判断各评价指标的优劣。按照文中所介绍的最优模型评价准则,对 4 个模型的每项评价指标分别进行计算,计算结果如表 9 所列。

根据表 9 中各指标的计算结果, AIC_p 、 AIC_p^c 、 BIC_p 准则均表明模型 2 在所有的模型中是最优的。如果仅仅从 $RMSE_p$ 准则上来看,则模型 1 是最优模型,虽然如此,但模型 1 与模型 2 在 $RMSE_p$ 准则上相差不是很大,只是由于模型 1 多包含了对加固费用无显著影响的层高这个自变量,从而对模型的计算速度产生了一定的影响。尤其是对本文所研究的群体建筑物加固费用估算来说,更多的评价准则

表明模型 2 为最佳准则。由于模型 3 与模型 4 中没有包含对加固费用有显著影响的个别自变量,使得各项评价指标均比模型 2 差。针对上述结论,认定模型 2 为最优回归模型。

表 7 实际费用与估算费用的残差值

Table 7 Residual values between actual cost and estimated cost				
样本	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
1	8.86	16.32	10.14	16.26
2	19.93	18.05	21.95	17.96
3	12.11	11.41	15.99	15.30
4	12.40	12.99	16.97	23.49
5	5.84	5.03	7.63	19.52
6	4.08	2.92	7.52	13.72
7	16.38	14.28	16.25	16.62
8	4.28	7.99	8.18	13.54
9	9.74	11.74	14.19	15.68
10	24.72	22.25	25.58	20.10
11	13.70	11.92	14.39	8.90
12	8.52	7.32	9.82	21.04
13	12.41	10.58	12.61	8.59
14	27.52	27.21	29.27	30.15
15	0.57	3.34	4.84	22.22
16	8.10	8.91	10.44	13.08
17	48.00	46.76	51.84	46.12
18	39.78	40.58	42.09	42.06
19	11.47	10.68	12.47	15.08
20	7.86	8.70	9.16	11.92
21	48.21	49.06	50.64	57.60
22	0.35	2.63	4.66	9.92
23	3.64	2.93	4.91	10.54
24	41.41	48.36	48.91	52.94
25	3.83	5.11	7.45	5.84

表 8 各模型的残差分析结果

Table 8 Residual value results of each model				
模型	最小残差	最大残差	残差均值	残差均方和
1	0.35	48.21	15.75	11 204.19
2	2.63	49.06	16.28	11 774.69
3	4.66	51.84	18.32	13 638.35
4	5.84	57.60	21.13	15 849.70

表 9 各模型的评价指标

Table 9 Evaluation indexes of each model				
模型	评价指标			
	$RMSE_p$	AIC_p	AIC_p^c	BIC_p
1	560.210	160.629	165.296	165.505
2	560.700	159.871	163.029	163.527
3	619.925	161.544	163.544	163.982
4	689.117	163.301	164.444	164.520

5 费用估算模型的验证

通过对加固数据进行多元线性回归及理论分析,视模型 2 为最优加固费用估算模型,即通过模型

2 能够比较准确地计算出参与回归的建筑物实际的加固费用。然而现实中该模型并不是用来对这部分建筑物进行加固费用的预测,而是用来对拟加固建筑物的加固费用进行预测,因此模型准确计算拟加固建筑物加固费用的能力是非常重要的,这也决定了该模型的实际应用价值,即能否用于实际加固工程的加固费用计算。

分别应用回归得到的 4 个模型对验证数据库中的 10 栋建筑物进行加固费用的计算,通过比较模型估算结果与实际加固费用的差异来验证多元线性回归模型的实际预测能力。各个模型估算的加固费用与建筑物实际加固费用的残差与绝对误差百分比如表 10、表 11 所示,通过分析即可确定各个模型的计算精确度。

表 10 各模型的费用残差

Table 10 Cost residuals of each model

样本	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
1	6.34	7.36	7.48	8.83
2	6.21	4.73	4.73	2.34
3	8.64	6.19	6.79	14.48
4	24.86	27.8	27.71	24.3
5	21.7	21.95	22.6	21.84
6	2.28	2.11	1.61	2.31
7	15.56	16.23	14.73	3.87
8	15.95	15.11	15.33	16.66
9	11.07	9.07	9.07	5.61
10	0.26	0.09	0.25	7.53

表 11 各模型的费用绝对误差百分比

Table 11 Absolute percentage error of each model

样本	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
1	19.74	22.92	23.31	27.52
2	9.51	7.23	7.24	3.58
3	6.37	4.56	5	10.67
4	31.79	35.55	35.43	31.08
5	16.66	16.85	17.36	16.78
6	1.14	1.05	0.8	1.15
7	23.58	24.59	22.32	5.86
8	64.57	61.17	62.06	67.47
9	12.33	10.1	10.1	6.25
10	4.23	1.47	4.12	122.99

对表 10~表 11 中所列各个模型的实际加固费用与模型计算加固费用的残差与绝对误差百分比结果进行计算,结果如表 12 及表 13 所列。

从表 12 中看出,各个模型的费用估算结果残差均值变化不大,而且各个模型残差的标准差也大致相同。仅仅从残差角度很难判断出估算加固费用与实际加固费用之间的变化幅度,因此在参考残差结果的同时,还要对各个回归模型的绝对误差百分比

进行比较,以此来确定模型的精确度。

表 12 回归模型残差汇总

Table12 Summary of residual values of regression models

样本	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
均值	11.29	11.06	11.03	10.78
标准差	19.32	19.64	19.70	19.87

表 13 回归模型的绝对误差百分比

Table 13 Absolute percentage error of regression models

模型	绝对误差百分比/%			
	最大值	最小值	均值	标准差
1	64.57	1.14	18.99	18.56
2	61.17	1.05	18.55	18.43
3	62.06	0.8	18.77	18.62
4	122.99	1.15	29.33	38.41

在决策管理中,回归模型精确度是模型要考虑的一个至关重要的因素,高精确度的模型有助于决策人员做出科学的决策,因此其精度必须要在可接受的范围以内。Barnes^[6]认为在绝大多数情况下,建议项目建设成本模型要保证 33%的精确度,此时则认为模型是可以被接受的;Ogunlana 等^[7]在成本估算研究中建议加固项目初步设计阶段的加固费用预测的合理精度应当控制在 15%~20%以内,在详细设计阶段应将预测精度提高到 13%~18%以内。而我国在拟建项目可行性研究中规定要保证项目成本±10%的误差精度要求^[8]。由于本文研究的加固费用预测并不涉及项目的详细设计方案,因此在精确度上可以适当予以放宽,在本章节关于加固费用模型的研究中建议估算模型要保证具有 25%的精确度。

在表 13 中给出了各个模型的估算费用与实际建筑物加固费用之间的绝对误差,除了模型 4 以外的 3 个模型在费用估算上均将其绝对误差百分比均值控制在 25%的范围以内,在费用估算的精度上均能满足要求。由表中的数据看出,模型 2 在标准差上优于各个模型,其对费用估算的能力较其他模型稳定,其次是模型 1 与模型 3。通过实际加固数据的模型验证,模型 2 在数据上要优于其他模型,同时权衡费用估算的速度等因素,可以认定模型 2 为最优模型。

6 结语

(1) 提出了一种基于后向消去的加固费用估算模型回归方法,随着数据库中建筑数量的增加与模型的参数完善,将提供更精确的费用估算。

(2) 在文中提出的可能对加固费用有影响的建筑参数中,建筑面积对加固费用的影响最为显著,可以说加固费用的高低在一定程度上主要取决于建筑面积的大小,其次是建筑物的层数与建筑龄期,而层高对于建筑物加固费用的影响最小,并不存在明显的线性关系。

(3) 砌体结构加固费用估算模型的建立能够实现对加固费用的准确估算,利于加固改造项目造价及投资控制,同时为城市砌体结构建筑群的加固决策体系的建立提供了可能,具有工程应用价值。

参考文献(References)

- [1] 盛承懋.应用回归分析[M].上海:上海科学技术文献出版社,1989.
- SHENG Chengmao. Applied Regression Analysis[M]. Shanghai; Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1989.
- [2] LOWE D J, EMSLEY M W, HARDING A. Predicting Construction Cost Using Multiple Regression Techniques[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2006, 132

(7): 750-758.

- [3] 罗凤明,邱劲飏,李明华,等.如何使用统计软件 SPSS 进行回归分析[J].电脑知识与技术,2008(2):293-294,304.
- LUO Fengming, QIU Jinbiao, LI Minghua, et al. How to do Regression Analysis by Statistical Software SPSS[J]. Computer Knowledge and Technology, 2008(2):293-294,304.
- [4] SABOL T A, ZORAPAPEL G T, HART G C. Typical Cost for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings; Supporting Documentation[M]. Earthquake Hazard Reductions Series. US Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1988, 40.
- [5] POTANGAROA R. The Seismic Strengthening of Existing Buildings for Earthquakes[D]. Wellington: Victoria Univ, 1985.
- [6] BARNES N M L. Control of Engineering Projects[J]. Financial Control of Construction, 1974.
- [7] OGUNLANA O, THORPE A. Design Phase Cost Estimating: The State of the Art[J]. International Journal of Construction Management and Technology, 1987, 2(4):34-47.
- [8] 左苏.基于主成分回归模型的工程项目成本预测[D].扬州:扬州大学,2014.
- ZUO Su. Research on the Prediction of Project Cost Based on Principle Components Regression Models [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.