

外挂混凝土墙板对钢框架结构自振周期的影响^{*}

马俊^{1,2}, 李元齐^{1†}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

摘要: 外挂混凝土墙板是装配式钢结构建筑、甚至普通钢框架结构建筑的主要围护墙体材料, 对结构自振周期的影响不容忽视. 在对各国规范中钢框架结构基本自振周期计算方法进行归纳的基础上, 基于已有的一栋带蒸压轻质加气混凝土墙板足尺钢框架结构模型试验数据和一栋带预制装配式混凝土墙板钢框架教学楼实测数据, 分析了相关规范计算方法的适用性. 结果表明, 考虑墙体的经验公式对带外挂混凝土墙板钢框架结构自振周期的估计较为准确. 基于40栋带外挂混凝土墙板钢框架结构自振周期实测数据, 提出了带外挂混凝土墙板钢框架结构自振周期经验公式. 公式以结构高度为自变量, 基本自振周期为结构高度的幂函数, 公式计算结果离散度较小, 与实测结果吻合较好, 可供设计人员参考.

关键词: 钢框架; 外挂混凝土墙板; 自振周期; 经验公式

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Effect of Exterior Concrete Wall Panels on Natural Period of Steel Frame Structures

MA Jun^{1,2}, LI Yuanqi^{1†}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Construction Eighth Engineering Division Co, Ltd, Shanghai 200122, China)

Abstract: Exterior concrete wall panels are becoming one of the main building envelope wall for prefabricated steel frame structures as well as ordinary steel frame buildings, and the effect of exterior concrete wall panels on the natural period of steel frames cannot be ignored. The calculation method for the fundamental natural period of steel frame buildings in current design codes are summarized, and the feasibility of these formulas for steel frames with exterior concrete wall panels is evaluated by comparing the empirical results with the test data of a full-scale steel frame structure with autoclaved lightweight concrete(ALC) panels and the field measured data of a steel frame school building with precast concrete wall panels. The results show that empirical formulas considering the effect of wall materials can predict the natural period in a reasonable precision. Based on the field measured natural periods of the steel frames with exterior concrete wall panels, the empirical formula for estimating the fundamental natural period of the steel frame structures with exterior concrete wall panels is put forward. The structural height is adopted as independent variable in the empirical formula, and the fundamental natural period is a power function of the structural height. The results obtained from the empirical formula have little discreteness and agree well with the field measured data. The

* 收稿日期:2017-05-30

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51538002), Key Program of National Natural Science Foundation of China (51538002)

作者简介:马俊(1986-),男,浙江德清人,同济大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail:liyq@tongji.edu.cn

empirical formula may provide a reference to engineering designers.

Key words: steel frames; exterior concrete wall panel; natural periods; empirical formulas

钢框架结构自振周期是钢框架结构抗震设计中的重要参数,其取值关系到地震作用、基底剪力等参数的计算.为了满足空间功能分隔和外部围护等建筑功能要求,钢框架建筑中通常具有大量围护墙体材料.墙体的存在增强了钢框架结构的侧向刚度,减小了结构的自振周期^[1-2].各国规范在计算钢框架结构自振周期时均考虑了墙体的影响,但在实际应用中,由于墙体材料不同和墙体的安装、布置方式非常灵活,墙体对钢框架自振周期的影响程度很难进行统一描述.

随着我国墙改政策的实施和工业化建筑的推广,外挂混凝土墙板已逐步成为钢框架结构的主要围护墙体材料.外挂混凝土墙板的材料性质和安装方式与传统的填充墙截然不同,对结构自振周期的影响也有别于传统墙体.然而,已有研究主要集中在砖或混凝土砌块砌体填充墙对钢框架结构自振周期的影响,对于采用外挂混凝土墙板的钢框架结构自振周期取值还缺乏相关研究,设计过程中也缺少相关依据^[3-4].因此,有必要研究外挂混凝土墙板对钢框架结构自振周期的影响,提出合理的自振周期计算公式.

本文首先对国内外规范中钢框架结构基本自振周期的计算方法进行归纳,随后采用规范中计算方法对已完成的一栋带蒸压轻质加气混凝土墙板足尺钢框架结构试验模型和一栋带预制装配式混凝土墙板钢框架教学楼的基本自振周期进行计算,并将计算结果与试验结果进行对比,分析了规范计算方法对带外挂混凝土墙板钢框架结构的适用性.基于收集到的40栋已有的带外挂混凝土墙板钢框架结构自振周期实测数据,提出了带外挂混凝土墙板钢框架结构基本自振周期经验公式,供设计人员参考.

1 规范中钢框架基本自振周期计算方法

国内外规范^[5-19]中的钢框架结构基本自振周期计算方法主要包括经验公式法和瑞利公式法.经验公式在实测数据基础上经统计分析后归纳而成,已经包含了墙体影响.根据是否在表达式中明确考虑墙体布置影响,经验公式可分为忽略和考虑墙体布置两类形式.瑞利公式法是基于结构质量和刚度

的动力计算方法,计算结果通常需要采用周期折减系数进行修正,以考虑墙体对自振周期的影响.

1.1 经验公式

1.1.1 忽略墙体布置的经验公式

在实测数据基础上,多数规范建议了基于结构特征参数的钢框架结构基本自振周期经验公式.这些经验公式大体上可分为基于结构高度、基于建筑楼层数、基于结构高度和底部宽度三类,部分规范中建议了多个基本自振周期经验公式.

第一类基本自振周期经验公式以钢结构建筑的高度作为自变量.澳大利亚规范^[5]、意大利规范^[6]、瑞士规范^[7]、韩国规范^[8]和我国台湾规范^[9]中,钢框架结构基本自振周期是结构高度的函数,如下:

$$T_1 = \alpha h^\beta. \quad (1)$$

式中: T_1 为结构基本自振周期,s; h 为结构高度,m; α 和 β 是经验公式系数,取值根据各国规范有所不同.澳大利亚规范中, α 和 β 分别取为0.1375和0.75,意大利、瑞士、韩国和我国台湾规范中,钢框架结构的 α 和 β 分别取为0.085和0.75.

第二类基本自振周期经验公式以建筑楼层数作为自变量.我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[10]和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)^[11]中,钢框架结构基本自振周期是建筑楼层数的线性函数,如下所示:

$$T_1 = \lambda N. \quad (2)$$

式中: N 是建筑楼层数; λ 是经验公式系数.对于高层钢结构建筑,文献^[10]中, λ 取为0.1~0.15;文献^[11]中, λ 取为0.1.

第三类基本自振周期经验公式是结构高度和沿作用力方向结构宽度的函数.法国规范^[12]、西班牙规范^[13]、埃及规范^[14]、印度规范^[15]中建议了该类经验公式,如下所示:

$$T_1 = \alpha \frac{h}{\sqrt{d}}. \quad (3)$$

式中: h 为结构高度,m; d 是沿作用力方向的结构宽度,m; α 是经验公式系数.法国规范和西班牙规范中, α 取为0.1;埃及和印度规范中, α 取为0.09.

国内外规范中的钢框架结构基本自振周期经验公式大致分为以上三类,同时,部分国家规范中建议了多个不同形式的经验公式.

美国 ASCE7—10^[16]中分别建议了基于结构高度和建筑楼层数的经验公式. 当框架结构承担全部地震作用时,可采用基于结构高度的经验公式计算钢框架结构的基本自振周期:

$$T_1 = 0.0724h^{0.8}. \quad (4)$$

同时,对于总层数在 12 层以下且各层层高不小于 3 m 的钢框架结构,可采用基于建筑楼层数的经验公式计算钢框架结构的基本自振周期:

$$T_1 = 0.1N. \quad (5)$$

日本规范^[17]中同时建议了基于结构高度和建筑楼层数的经验公式:

$$T_1 = (0.02 + 0.01\alpha_h)h, \quad (6)$$

$$T_1 = (0.1 \pm 0.03)N. \quad (7)$$

式(6)中,基本自振周期是结构高度的函数, α_h 是钢结构建造的楼层高度与结构总高度之比. 式(7)中,基本自振周期是建筑楼层数的函数,经验公式系数根据墙体和支撑的布置进行调整.

1.1.2 考虑墙体布置经验公式

部分国家规范中明确考虑了墙体布置对结构自振周期的影响. 欧洲规范^[18]和新西兰规范^[19]建议采用式(8)~式(11)计算高度在 40 m 以内的带填充墙的钢框架结构基本自振周期:

$$T_1 = C_t h^{0.75}, \quad (8)$$

$$C_t = 0.075 / \sqrt{A_c}, \quad (9)$$

$$A_c = \sum [A_i \cdot (0.2 + (l_{wi}/h))^2]. \quad (10)$$

式中: C_t 是针对填充墙布置的修正系数; A_c 是首层填充墙有效面积, m^2 ; A_i 是首层第 i 片填充墙的有效截面积, m^2 ; l_{wi} 是沿水平力作用方向填充墙长度, m ; h 是结构高度, m . 同时,墙体长高比 l_{wi}/h 需小于等于 0.9.

欧洲规范和新西兰规范均用修正系数 C_t 考虑了填充墙布置对结构自振周期的影响. 值得注意的是,规范中仅考虑了底层填充墙的影响,对于其余楼层中的填充墙则没有具体考虑.

1.2 瑞利公式

除了经验公式方法,国内外规范中还推荐使用瑞利公式来计算钢框架结构的基本自振周期. 瑞利公式如下所示:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i d_i^2}{g \sum_{i=1}^n F_i d_i}}. \quad (11)$$

式中: W_i 是第 i 层的重力荷载, kg ; F_i 是第 i 层所受

水平力, N ; d_i 是相应的第 i 层弹性变形, m .

为了便于使用,部分规范中给出了简化的瑞利公式. 我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)针对质量和刚度沿高度分布比较均匀的钢结构建筑,建议了考虑非结构构件影响的简化瑞利公式:

$$T_1 = 1.7\xi_T \sqrt{u_n}. \quad (12)$$

式中: u_n 是将各层重力荷载作为楼层集中水平力后按弹性静力方法计算得到的顶层侧移, m ; ξ_T 是考虑非结构构件影响的修正系数,宜取为 0.9.

欧洲、新西兰和瑞士规范中给出的简化瑞利公式如下:

$$T_1 = 2\sqrt{\Delta}. \quad (13)$$

式中: Δ 是将各层重力荷载作为水平荷载后得到的结构顶点弹性水平位移, m .

日本规范针对质量和刚度分布均匀的结构,建议了基本自振周期的简化瑞利公式:

$$T_1 = \frac{\sqrt{\delta}}{5} \sim \frac{\sqrt{\delta}}{5.7}. \quad (14)$$

式中: δ 是将各层重力荷载作为水平荷载后得到的结构顶点弹性水平位移, cm . $\sqrt{\delta}/5$ 适用于单自由度系统, $\sqrt{\delta}/5.7$ 对应多自由度系统.

瑞利公式基于结构动力计算,考虑了材料性质、构件截面等参数影响. 经验公式则基于实测数据,考虑了墙体作用等动力计算中不能考虑的不确定因素. 实际应用中,许多国家规范将经验公式计算结果作为基本自振周期上限值,避免地震力设计值过度降低. 譬如:美国规范规定基本自振周期取值不得大于经验公式计算值;我国台湾规范规定基本自振周期取值不得大于经验公式值的 1.4 倍;澳大利亚规范规定基底剪力设计值不得小于根据自振周期经验公式计算值所得基底剪力计算值的 80%.

2 各国规范基本自振周期计算方法对比

为了分析规范计算方法对带外挂混凝土墙板钢框架结构的适用性,根据规范中建议公式,对已有的一栋带蒸压轻质加气混凝土墙板钢框架结构试验模型和一朵带预制装配式混凝土墙板钢框架教学楼的基本自振周期进行了计算,并将计算结果与试验和实测结果进行对比.

2.1 带蒸压轻质加气混凝土墙板钢框架结构

2.1.1 结构介绍

带蒸压轻质加气混凝土墙板钢框架结构试验模

型为日本防灾科学技术研究所完成的足尺 4 层钢框架结构^[20]. 试验模型如图 1 所示, 结构的标准层平面图及外立面布置如图 2 所示. 钢框架结构 X 向 1 跨, Y 向 2 跨, 平面尺寸为 10 m×6 m, 结构总高度为 14.375 m, 其中底层层高 3.875 m, 其余楼层层高 3.5 m. 钢框架结构中框架柱均采用截面为 RHS-300×9 的方钢管, 框架梁截面尺寸见表 1. 外挂混凝土墙板采用 125 mm 厚蒸压轻质加气混凝土墙板, 墙板在结构的 X 向两侧和 Y 向沿 B 轴一侧满布布置, 在 Y 向沿 A 轴一侧未布置墙板. 蒸压轻质加气混凝土墙板安装方式: 采用摇摆工法, 墙板通过内置螺栓和导向角钢连接到钢框架, 连接构造如图 3 所示. 摇摆工法使墙板具有随动变形性能, 墙板能适应主体结构在各种外力作用下的变形. 实际工程中, 蒸压轻质加气混凝土外挂墙板的连接方式主要有外墙竖装时的摇摆工法、滑动工法、固定工法, 以及外墙横装时的摇摆工法和固定工法^[21].



图 1 带蒸压轻质加气混凝土墙板钢框架
Fig. 1 4-storey steel frame with ALC panels

表 1 框架梁截面尺寸

Tab. 1 Sections of beams

楼层	G1 框架梁	G11 框架梁	G12 框架梁
RF	H346×174×6×9	H346×174×6×9	H346×174×6×9
4F	H350×175×7×11	H350×175×7×11	H340×175×9×14
3F	H396×199×7×11	H400×200×8×13	H400×200×8×13
2F	H400×200×8×13	H400×200×8×13	H390×200×10×16

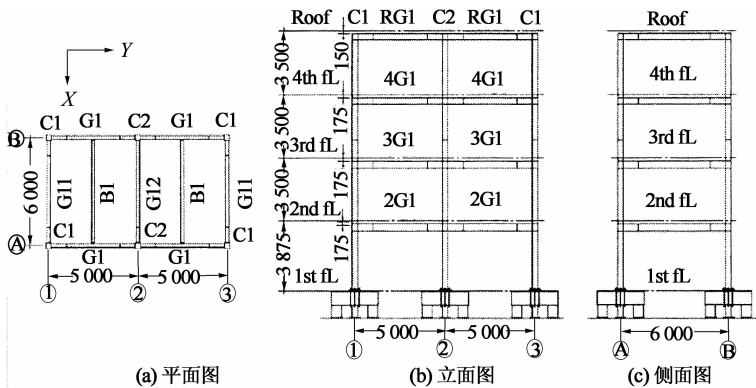


图 2 带蒸压轻质加气混凝土墙板钢框架结构平面及立面图
Fig. 2 Plan and elevation of the 4-storey steel frame with ALC panels

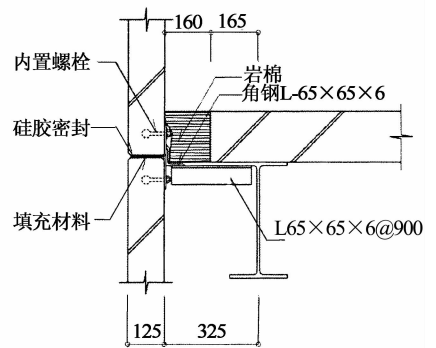


图 3 蒸压轻质加气混凝土外挂墙板连接构造
Fig. 3 Connection between ALC panels and steel frame

该钢框架结构在模拟振动台上进行了不同激励幅度的振动台试验. 当输入地震波为 5%、10%、12.5%、20% 的 JR 鹰取波时, 基于测得的加速度时程数据, 采用单输入多输出的 ARX 模型对该结构的模态参数进行了识别, 结构基本自振周期识别结果依次为 0.810 4 s、0.820 3 s、0.830 6 s、0.825 8 s^[22]. 对不同激励幅度下的基本自振周期试验结果取平均值, 得到钢框架模型的基本自振周期为 0.82 s.

2.1.2 各国规范基本自振周期计算结果对比

表 2 中采用规范计算方法对带蒸压轻质加气混凝土墙板钢框架结构试验模型的基本自振周期进行了计算, 并将规范公式计算结果与试验结果进行了对比.

表 2 4 层钢框架结构基本自振周期规范公式计算值
Tab. 2 Fundamental natural period of the 4-storey steel frame structure based on code methods

规范	基本自振周期/s	误差/%
我国规范	0.400~0.600	-51~-27
	0.611	-26
美国规范	0.400	-51
	0.431	-48
忽略墙体经验公式	日本规范	0.280~0.520 -66~-37
	意大利、瑞士、韩国、我国台湾规范	0.628 -24
	澳大利亚规范	1.015 23
	埃及、印度规范	0.528 -36
	法国、西班牙规范	0.587 -29
考虑墙体经验公式	欧洲、新西兰、瑞士规范	0.732 -11
	我国规范	0.959 17
瑞利公式	欧洲、新西兰规范	1.254 53
	日本规范	1.100 34

对于忽略墙体经验公式,除澳大利亚规范外,根据其余规范计算得到的基本自振周期计算结果均小于试验值,误差范围约为 24%~66%。基于结构高度的经验公式计算结果误差多数在 25%左右,但是日本规范的计算结果误差较大,约为 48%。基于结构楼层数的基本自振周期计算结果变化范围较大,误差范围为 27%~66%。基于结构高度和底部宽度的经验公式计算结果误差分别为 36%和 29%。值得注意的是,我国规范中建议的基于建筑楼层数的经验公式误差范围为 27%~51%,与试验结果相差偏大。

对于考虑墙体布置经验公式,欧洲规范和新西兰规范的计算结果与试验结果非常接近,误差仅为 11%。与忽略墙体经验公式计算结果相比,考虑墙体布置经验公式的计算结果与试验结果更加接近。

对于瑞利公式方法,基于简化瑞利公式的基本

自振周期计算结果均大于试验结果。我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)中的建议公式由于考虑了非结构构件的影响,修正后的基本自振周期计算结果与试验结果最为接近,但对于修正系数的取值仍需进一步研究。

2.2 带预制装配式混凝土墙板钢框架教学楼

2.2.1 结构介绍

带预制装配式混凝土墙板钢框架教学楼为日本名古屋大学东山校区的 IB 电子情报馆。建筑外观如图 4 所示,标准层平面图如图 5 所示,结构体系为纯钢框架。钢框架结构 X 向 11 跨, Y 向 3 跨,平面尺寸 60 m×15.2 m,结构总高度 41.1 m,建筑楼层数 10 层。钢框架结构中框架柱采用方钢管,框架梁采用 H 型钢,截面尺寸见文献[23]。外挂混凝土墙板采用 150 mm 厚预制装配式混凝土墙板,墙板沿结构四周满布布置。

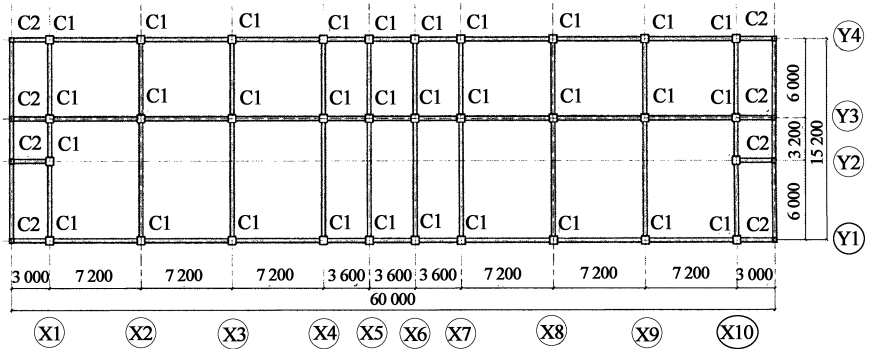
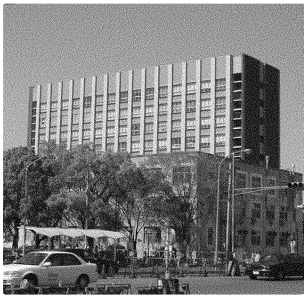


图 4 带预制装配式混凝土墙板钢框架

图 5 带预制装配式混凝土墙板钢框架结构平面图

Fig. 4 Steel frame school building with PC walls

Fig. 5 Plan of the steel frame school building with PC walls

该钢框架教学楼建成后,进行了多次环境激励。基于环境激励下的结构振动加速度,采用随机减量技术对结构模态参数进行了识别,结构基本自振周期识别结果为 1.0 s^[23]。

2.2.2 各国规范基本自振周期计算结果对比

表 3 中采用规范计算方法对带预制装配式混凝土墙板钢框架教学楼的基本自振周期进行了计算,并将规范公式计算结果与实测结果进行了对比。

对于忽略墙体经验公式,根据规范计算得到的基本自振周期计算结果误差范围为 0~123%。基于结构高度的经验公式计算结果误差范围为 23%~123%,其中澳大利亚规范的计算结果误差较大,为 123%。基于结构楼层数的基本自振周期计算结果误差范围为 0%~50%,其中我国规范下限值和美国规范的计算结果与实测结果吻合。基于结构高度和

表 3 钢框架教学楼基本自振周期规范公式计算值
Tab. 3 Fundamental natural period of the steel frame school building based on code methods

	规范	基本自振周期/s	误差/%
忽略墙体经验公式	我国规范	1.000~1.500	0~50
		1.420	42
	美国规范	1.000	0
		1.233	23
	日本规范	0.700~1.300	-30~30
	意大利、瑞士、韩国、我国台湾规范	1.380	38
考虑墙体经验公式	澳大利亚规范	2.230	123
	埃及、印度规范	0.950	-5
	法国、西班牙规范	1.050	5
	欧洲、新西兰、瑞士规范	1.000	0
瑞利公式	我国规范	1.030	3
	欧洲、新西兰规范	1.340	34
	日本规范	1.180	18

底部宽度的经验公式计算结果误差为5%，与实测结果接近。

对于考虑墙体布置经验公式，欧洲规范和新西兰规范的计算结果与实测结果一致，较好地预测了钢框架教学楼的基本自振周期。

对于瑞利公式方法，基于简化瑞利公式的基本自振周期计算结果大于实测结果。我国《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)中的建议公式考虑了非结构构件的影响，修正后的基本自振周期计算结果误差为3%，与实测结果接近。欧洲规范、新西兰规范和日本规范由于未考虑非结构构件对结构自振周期的影响，基本自振周期计算结果误差分别为34%和18%。

通过上述两栋钢框架结构基本自振周期实测值与规范计算结果的对比可知，对于带外挂混凝土墙

板钢框架结构，欧洲规范和新西兰规范建议的经验公式中由于考虑了墙体布置的影响，结构基本自振周期计算值最接近真实值；美国、意大利等国家规范中基于结构高度的经验公式与法国、西班牙等国家规范中基于结构高度和宽度的经验公式未明确考虑墙体类型、布置等影响，需对经验公式系数进行修正；基于结构楼层数的经验公式计算结果范围较大；基于瑞利公式的计算结果大于实测结果，需用考虑非结构构件影响的修正系数予以修正。

3 带外挂混凝土墙板钢框架自振周期

3.1 带外挂混凝土墙板钢框架自振周期实测数据

本文收集了40栋已有的带外挂混凝土墙板钢框架结构建筑或足尺试验模型，结构自振周期实测数据见表4，表中同时给出了结构的长、宽、高、楼层

表4 带外挂混凝土墙板钢框架结构自振周期实测数据

Tab. 4 Field measured natural periods of steel frame structures with exterior concrete wall panels

序号	建筑用途 数据来源	楼层数 n	高度 h/m	长度 l/m	宽度 d/m	外挂混凝土墙板形式	激励方式	实测自振周期/s	
								第一阶	第二阶
1	足尺试验 ^[24]	4	11.13	8.00	4.00	轻质水泥砂浆板	环境激励	0.36	0.32
2	足尺试验 ^[25]	3	8.625	8.00	5.00	挤出成型中空水泥板	振动台	0.40	0.22
3	足尺试验 ^[22]	4	14.375	10.0	6.00	蒸压轻质加气混凝土板	振动台	0.82	0.77
4	足尺试验 ^[26]	4	11.00	12.6	5.40	蒸压轻质加气混凝土板	强迫振动	0.41	—
5	足尺试验 ^[27]	3	12.20	5.00	5.00	蒸压轻质加气混凝土板	振动台	0.50	—
6	足尺试验 ^[28]	2	5.74	6.70	6.40	蒸压轻质加气混凝土板	振动台	0.27	0.25
7	足尺试验 ^[29]	2	7.63	7.00	5.00	蒸压轻质加气混凝土板	振动台	0.21	0.20
8	足尺试验 ^[30]	5	13.88	3.16	3.16	蒸压轻质加气混凝土板	强迫振动	0.64	—
9	足尺试验 ^[31]	5	15.835	12.0	10.0	蒸压轻质加气混凝土板	振动台	0.64	0.61
10	住宅 ^[32]	3	8.625	10.98	3.66	蒸压轻质加气混凝土板	强迫振动	0.39	0.16
11	住宅 ^[33]	2	6.20	9.40	8.90	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.20	0.20
12	住宅 ^[33]	3	9.30	13.0	6.30	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.32	0.25
13	住宅 ^[33]	3	9.30	10.4	6.70	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.25	0.20
14	住宅 ^[33]	3	9.50	6.40	5.50	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.25	0.20
15	住宅 ^[33]	5	15.10	9.85	4.80	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.63	0.40
16	住宅 ^[33]	5	15.20	10.0	5.70	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.40	0.32
17	住宅 ^[34]	3	9.20	7.30	5.50	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.26	—
18	售楼处 ^[35]	3	9.325	9.45	3.95	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.37	0.16
19	售楼处 ^[36]	3	4.90	10.05	8.75	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.21	—
20	售楼处 ^[36]	3	8.91	8.23	5.18	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.32	0.22
21	售楼处 ^[36]	3	8.91	10.62	3.96	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.36	0.20
22	售楼处 ^[36]	3	9.20	10.32	4.88	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.29	0.24
23	售楼处 ^[36]	3	9.424	12.15	4.83	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.37	0.21
24	售楼处 ^[36]	3	9.50	8.79	4.57	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.36	0.19
25	办公楼 ^[37]	6	20.40	67.5	45.0	预制装配式混凝土墙板	环境激励	0.50	0.49
26	办公楼 ^[38]	9	30.27	—	14.26	预制装配式混凝土墙板	强迫振动	0.94	0.80
27	办公楼 ^[39]	3	15.50	42.0	24.0	蒸压轻质加气混凝土板	强迫振动	0.24	0.10
28	办公楼 ^[40]	9	23.60	77.0	8.73	预制装配式混凝土墙板	—	0.46	0.42
29	办公楼 ^[41]	6	24.00	54.0	21.6	预制装配式混凝土墙板	强迫振动	0.83	—
30	办公楼 ^[42]	13	54.55	30.2	30.2	蒸压轻质加气混凝土板	强迫振动	1.23	1.20
31	办公楼 ^[43]	6	20.58	17.0	11.6	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.53	—
32	办公楼 ^[44]	14	59.85	51.2	21.2	预制装配式混凝土墙板	地震激励	1.43	1.00
33	办公楼 ^[45]	2	4.90	10.6	8.75	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.22	0.22
34	办公/住宅 ^[46]	13	49.57	25.6	19.5	预制装配式混凝土墙板	人力加振	1.25	—
35	办公/住宅 ^[47]	4	12.50	—	—	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.35	0.28
36	办公楼 ^[48]	20	69.00	70.13	22.8	轻质水泥砂浆板	强迫振动	1.52	1.23
37	教学楼 ^[49]	15	59.43	32.28	18.0	预制装配式混凝土墙板	环境激励	1.33	1.10
38	教学楼 ^[50]	16	67.50	42.0	32.0	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	1.33	1.18
39	教学楼 ^[51]	11	43.50	54.0	25.0	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	1.11	0.43
40	停车场 ^[52]	5	16.90	—	—	蒸压轻质加气混凝土板	环境激励	0.45	0.37

数、激励方式以及外挂混凝土墙板类型、建筑用途、数据来源等信息。表中结构体系为钢框架,外挂混凝土墙板主要为预制装配式混凝土墙板和蒸压轻质加气混凝土墙板,建筑高度为4~69 m,建筑楼层数为2~20层。

3.2 自振周期计算公式回归分析

基于实测数据,采用非线性回归技术,建立带外挂混凝土墙板钢框架结构的基本自振周期经验公式。经验公式形式参考各国规范中建议公式,以高度、宽度等结构特征参数作为自变量,形式见表5。基于楼层数的经验公式由于结果离散性较大,因此表中未列出该类公式形式。非线性回归分析采用最小二乘法对实测数据进行统计回归,回归结果见表5。对于回归结果,采用相关系数和模型效率EF对回归效果进行评价,评价公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为待回归数据和回归值; \bar{x} 和 \bar{y} 为均值。

$$EF = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2]}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

式中: y_i 为待回归数据; \bar{y} 为待回归数据均值; \hat{y}_i 为对应的回归值。

表5 非线性回归公式及结果

Tab.5 Nonlinear regression formulas and results

序号	回归公式	回归系数			相关系数	模型效率
		α	β	γ		
1	$T=ah$	0.024 4	—	—	0.95	0.83
2	$T=ah^\beta$	0.067 6	0.730 5	—	0.96	0.92
3	$T=\alpha \frac{h}{\sqrt{d}}$	0.101 2	—	—	0.93	0.86
4	$T=ah^\beta d^\gamma$	0.070 5	0.884 3	-0.158 1	0.94	0.89

注: T 是结构基本自振周期; h 是结构高度; d 是结构宽度。

由表5的回归结果可见,第二类回归公式对实测数据的拟合效果较好,同时该回归公式形式简单,与规范公式形式统一,因此建议采用该公式作为经验公式,以结构高度作为自变量。将回归系数略做简化后,建议带外挂混凝土墙板钢框架结构基本自振周期(单位:s)经验公式为:

$$T=0.067\ 6H^{0.73} \quad (17)$$

式中: H 为结构高度,m。

式(17)与实测数据的对比如图6所示,由图中可见,经验公式离散度较小,准确度较高,实测数据点分布在经验公式拟合曲线附近,经验公式与实测结果符合较好。

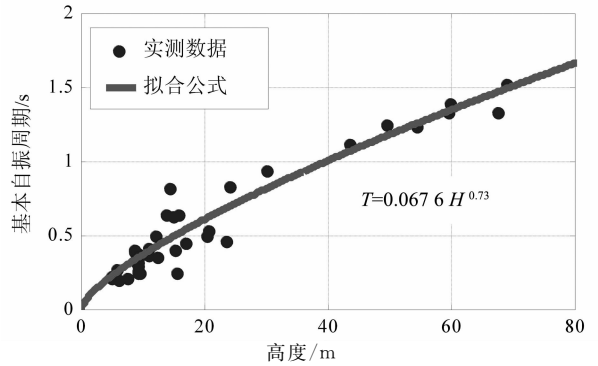


图6 建议经验公式与实测数据对比

Fig.6 Comparison between the recommended empirical formula and filed measured data

4 结 论

本文研究了外挂混凝土墙板对钢框架结构自振周期的影响,主要结论如下:

1)对于带外挂混凝土墙板钢框架结构,考虑墙体布置的经验公式计算结果与实际结构基本自振周期最为接近,基本自振周期经验公式宜考虑墙体布置。

2)忽略墙体布置经验公式中,基于结构高度的经验公式与基于结构高度和宽度的经验公式需对公式系数进行修正;基于结构楼层数的经验公式计算结果离散性较大。

3)瑞利公式计算结果大于实际结构基本自振周期,需用考虑非结构构件影响的修正系数对计算结果予以修正。

4)基于带外挂混凝土墙板钢框架结构自振周期实测数据,采用非线性回归技术,建议了考虑外挂混凝土墙板影响的钢框架结构基本自振周期经验公式,经验公式以结构高度作为自变量,可供设计人员参考。

参考文献

[1] BARGHI M, AZADBAKHT M. Evaluating the effect of masonry infills on natural period of buildings with moment-resisting frame [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2011,20(6):649-660.

- [2] MEMARI A M, AGHAKOUCHAK A A, ASHTIANY M G, *et al.* Full-scale dynamic testing of a steel frame building during construction[J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(12): 1115-1127.
- [3] 张望喜, 岳风华, 刘杰, 等. 多参数影响下的砌体墙体抗震性能分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(3): 45-54. ZHANG W X, YUE F H, LIU J, *et al.* Analysis on seismic performance of masonry walls under multiple influence parameters[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(3): 45-54. (In Chinese)
- [4] 黄远, 张锐, 朱正庚, 等. 外墙挂板的混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(7): 36-41. HUANG Y, ZHANG R, ZHU Z G, *et al.* Experimental study on seismic performance of concrete frame structure with exterior cladding walls[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(7): 36-41. (In Chinese)
- [5] AS 1170. 4—2007 Structural design actions: part 4 earthquake actions in Australia[S]. Sydney: Standards Australia, 2007: 17.
- [6] NTC 2008 Technical standards on constructions[S]. Rome: Italian Council of Public Works, 2008: 14-15.
- [7] SIA 261:2003 Actions on structures[S]. Zurich: Swiss Society of Engineers and Architects, 2003: 14.
- [8] KBC—2005 Korean building code—structural[S]. Seoul: Architectural Institute of Korea, 2005: 12.
- [9] 台内营字第 0990810250 号 建筑物耐震设计规范及解说[S]. 台北: 建筑管理组, 2011: 2-7. CPAMI 0990810250 Seismic design specifications and commentary of buildings[S]. Taipei: Building Administration Division, 2011: 2-7. (In Chinese)
- [10] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 154. GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 154. (In Chinese)
- [11] JGJ 99—98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 17. JGJ 99—98 Technical specification for steel structure of tall buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 17. (In Chinese)
- [12] AFPS—90 Recommendation for the redaction of rules relative to the structures and installations built in regions prone to earthquakes[S]. Paris: French Association for Earthquake Engineering, 1990: 23.
- [13] NCSE—02 Code of earthquake-resistant building: general part and construction[S]. Madrid: Ministry of Development, 2009: 26-27.
- [14] ESEE 1998 Regulation for earthquake-resistant design of buildings in Egypt[S]. Cairo: Egyptian Society for Earthquake Engineering, 1988: 19-20.
- [15] IS 1893—2002 Criteria for earthquake resistant design of structures: part 1 general provisions and buildings[S]. New Delhi: Bureau of Indian Standards, 2002: 27.
- [16] ASCE 7—10 Minimum design loads for buildings and other structures[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2010: 90-91.
- [17] AIJ-RLB 2004 Recommendations for loads on buildings[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004: 17-18. (In Japanese)
- [18] EN1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance: part 1 general rules, seismic actions and rules for buildings[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004: 57-58.
- [19] NZS 1170. 5:2004 Structural design actions: part 5 earthquake actions[S]. Wellington: Standards New Zealand, 2004: 31.
- [20] SUITA K, MATSUOKA Y, YAMADA S, *et al.* Collapse experiments on full-scale 4-story steel building: part 1 experimental procedure and outline of responses[J]. *Annual Report of the Architectural Institute of Japan Kinki Branch (Structures)*, 2008, 48: 437-440. (In Japanese)
- [21] Asahi Kasei Construction Materials Corporation. Hebel technical handbook[M]. Tokyo: Asahi Kasei Construction Materials Corporation, 2014: 30-57.
- [22] IKEDA Y. Verification of identification methods for linear systems utilizing shaking table tests of full-scale 4-story steel building[J]. *AIJ Journal of Technology and Design*, 2010, 16: 889-894. (In Japanese)
- [23] 小島宏章. 実測記録に基づく中低層建物の動的相互作用効果に関する研究[D]. 名古屋: 名古屋大学大学院環境学研究科, 2005: 20-73. (In Japanese)
- [24] TAKAHASHI K, ARIMA F, MIYAZAKI M, *et al.* Studies on response control technologies for building structures: part 1 vibration tests of the large damping structures[R]. Nagasaki: Faculty of Engineering, Nagasaki University, 1989, 87-96. (In Japanese)
- [25] MIYAKE T, FUKUCHI Y. Study on anti-seismic effects of nonstructural members in several story steel structure: part 1 share in story shear force and improvement of damping by non-structural members[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 1994, 462: 151-160. (In Japanese)
- [26] OSAWA Y, TAKADA S, MIYAKE N, *et al.* Vibration experiments of full scale steel frame buildings[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1970: 405-406. (In Japanese)
- [27] FUNAKI N, KANG J, KAWAMATA S. Vibration response of a three-storied full-scale building frames by means of turbulent flow dampers sealed by viscoelastic material[J]. *Annual Report of the Architectural Institute of Japan Tohoku Branch (Structures)*, 2000, 63: 157-160. (In Japanese)
- [28] KIRIYAMA S, NAKATA S, HANAI T, *et al.* Comparison of seismic performance of base-isolated house with various devices[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2004, 50: 561-574. (In Japanese)
- [29] HIGASHIDA T, KATO S, YANO K. Structural characteristic verification by shaking table test on two story seismically non-isolated house and isolated house with steel frame[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2006, 52: 237-247. (In Japanese)
- [30] KAWASHIMA M, SUZUKI T, HIRITA Y, *et al.* Pseudo-damage detection in a five-storey structure based on shaking test[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2010: 159-160. (In Japanese)
- [31] KANAZAW K, SATO D, KITAMURA H, *et al.* Long-term vibration monitoring on passively controlled steel building of E-defense full-scale test[C]// Proceedings of the 13th Japanese Earthquake Engineering Symposium. Tsukuba: Architectural Institute of Japan, 2014: 1538-1543. (In Japanese)

- [32] MORI T, YOSHIKAWA Y, HAYASHI M, *et al.* Forced vibration tests on a light-weight steel brace structure building of three stories; effect of ALC curtain walls on the vibration characteristics of a building[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1991:559—560. (In Japanese)
- [33] ANDO N, NITTA F, KATO Y. A design method of small buildings for vibration control under the influence of traffic [J]. *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering*, 2000, 537:29—36. (In Japanese)
- [34] MIWA M, NAKATA S, KIRIYAMA S, *et al.* Stiffness of exterior ALC walls of a steel structure building in the environmental vibration[C]// Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2007:485—486. (In Japanese)
- [35] FUKUWA N, NISHIZAKA R, YAGI S, *et al.* Field measurement of damping and natural frequency of an actual steel-framed building over a wide range of amplitudes[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 59:325—347.
- [36] SONG S. Damping properties evaluation of lightweight low-rise structure[D]. Tokyo: Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, 2013:147—163. (In Japanese)
- [37] YAMAMOTO S, SEKI T, SUZUKI N, *et al.* Vibration experiments of steel office buildings[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1969:707—708. (In Japanese)
- [38] SUZUKI T, SUZUKI S, HIRASAWA M, *et al.* Vibration experiments of a 9-storey steel building: part 1 forced vibration test[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1970:401—402. (In Japanese)
- [39] SIGIMOTO Y, KONNO T, NAKANO T, *et al.* Vibration experiments of a low-rise steel telephone office building: part 1 complete of the skeleton work[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1972:525—526. (In Japanese)
- [40] ODAKA T. Nonlinear response analysis of plastic hinged frames subjected to earthquake ground motions[J]. *Bulletin of Aichi Institute of Technology*, 1982, B17:239—253. (In Japanese)
- [41] HAYASHI M. Forced vibration test on an eccentric steel frames of 6 stories[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1993:873—874. (In Japanese)
- [42] OKADA Y, SUZUKI T, NISIMURA Y, *et al.* Evaluation on vibrational properties of a 13-story steel-framed building excited by shaker part 1 outline of the building and vibration tests [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1995, B2:909—910. (In Japanese)
- [43] YAMASHIDA Y, YOSHIKAWA Y, MORI T, *et al.* Effect of active mass damper on a low or medium-rise building for vibration characteristic; part 2 a medium-rise steel structure [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1998:287—288. (In Japanese)
- [44] FUKANO H, OHMIYA M, TERAMOTO T, *et al.* Dynamic analysis of the NIKKEN SEKKEI building based on seismic observation record part 7 microtremor observation and free vibration tests[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2005:413—414. (In Japanese)
- [45] SODA S, HANAI T, MINAGAWA T, *et al.* Development of DIY seismic retrofit of low-rise steel structures part 7 preparation of design and construction manual[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2013:1365—1366. (In Japanese)
- [46] TOBITA Y, FUKUMOTO N, KIKUCHI K, *et al.* Vibration experiments for a 13 story steel structure building[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1994:1121—1122. (In Japanese)
- [47] MIWA M, KIRIYAMA S, MAKATA S. A report of four story steel framed building constructed near the expressway and a measure against vibration[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2000:345—346. (In Japanese)
- [48] OWADA S, SHIROTA H, JOH M, *et al.* Vibration measurement of SEMITOMO SEIMEI building in Sapporo[J]. *Annual Report of the Architectural Institute of Japan Hokkaido Branch*, 1973, 39:57—60. (In Japanese)
- [49] NAKAO Y, MORIHATA T. A study on vibrational characteristics of a steel framed building of 15 stories; part 1 microtremors observation and effects of PC curtain walls[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1987:941—942. (In Japanese)
- [50] NAGAYA T, MATSUI T, KANAZAWA K, *et al.* System identification of a high-rise building on the ambient vibration measurement; Case study for “Tower 75” in Meijo University [C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2007:517—518. (In Japanese)
- [51] ARAKAWA T, HARA K. The evaluation of vibration characteristics for a middle rise steel building based on measurement data; part 1 the structural health monitoring[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2009:579—580. (In Japanese)
- [52] SHIMADA S, FUJINAMI T, JODAI S. Vibration control of a building under traffic loading on viaduct by tuned mass damper[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 39A:689—698. (In Japanese)