

基于 AP 法的整体幕墙钢龙骨转接件敏感性分析*

Sensitivity Analysis of Steel Keel Bearing of Integral Curtain Wall based on AP Method

陈 逵, 王国林, 张振浩

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要: 既有幕墙结构检测对于钢龙骨转接件节点位置的选择各个规范并未作出明确的要求, 考虑到钢龙骨整体结构冗余度较高, 各个转接件节点的重要性也不尽相同。为了对幕墙钢龙骨转接件进行高效、快速检测需要合理选择转接件节点的检测位置, 采用变换荷载路径法 (AP 法) 计算四个典型钢龙骨转接件的重要性系数、区域重要性系数及区域范围转接件失效后的频率。结果表明: 整体幕墙转接件重要性系数平均值比值随着转接件高度的增加而增大; 最外侧转接件重要性系数随着转接件高度位置与幕墙整体宽度比值的增大逐渐增大; 随着幕墙整体高度增大外侧转接件重要性系数逐渐减小; 幕墙外侧区域重要性系数大于内侧区域重要性系数, 通过等效应力与改进的模态灵敏度两种响应获得的区域重要性具有较好的一致性。

关键词: 幕墙结构; 变换荷载路径法 (AP 法); 等效应力; 灵敏度; 重要性系数

中图分类号: TU312+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0101-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.020

CHEN Kui, WANG Guolin, ZHANG Zhenhao

(Institutes of Technology of Changsha, Changsha 410000, China)

Abstract: The detection of the existing curtain wall structure does not make clear requirements for the selection of the node position of the steel keel adapter. Considering the high redundancy of the overall structure of the steel keel, the importance of each adapter node is not the same. In order to carry out efficient and rapid detection of curtain wall steel keel connectors, it is necessary to reasonably select the detection position of the connector nodes. The importance coefficient, regional importance coefficient and frequency of the four typical steel keel connectors after failure are calculated by using the variable load path method (AP method). The results show that the ratio of the average value of the importance coefficient of the integral curtain wall adapter increases with the increase of the height of the adapter; the importance coefficient of the outermost connector increases with the increase of the ratio of the height of the connector to the overall width of the curtain wall. As the overall height of the curtain wall increases, the importance coefficient of the outer adapter gradually decreases; the importance coefficient of the outer region of the curtain wall is greater than that of the inner region. The regional importance obtained by the equivalent stress and the improved modal sensitivity is in good agreement.

Keywords: curtain wall structure; load path transformation method; equivalent stress; sensitivity; importance coefficient

* 基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目 (2018JJ2443)。

作者简介: 陈 逵 (1979—), 男, 博士, 主要从事结构检测及加固、结构损伤分析等方面研究。

通信作者: 王国林 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构损伤分析研究。

收稿日期: 2023-01-06

0 引言

20 世纪 30 年代石材幕墙在美国诞生, 到现今石材幕墙结构得到了长足的发展。石材幕墙面板采用天然石材面板, 整体结构稳定性能高、耐久性能好^[1-3]。幕墙结构具有美观的外部装饰作用, 且有良

建筑结构

好的抵御风雨的浸入,被广泛地应用在工程建筑上。

幕墙结构转接件采用背栓式连接方式,幕墙转接件数量较多,既有幕墙结构检测对钢龙骨转接件位置的选择各个规范并未作出明确的要求,考虑到幕墙整体结构冗余度较高,各个转接件节点的重要性也不尽相同。如何对幕墙转接件进行高效、快速检测涉及转接件的重要性分析。

变换荷载路径法(AP法)^[4]在设计过程中无需考虑各种意外情况的发生对结构的影响,而现行研究下,仅规定了框架结构重要构件的选取,国内外建立了关于结构冗余度、鲁棒性的研究理论,可用于框架结构、网架结构构件敏感性分析^[5-8]。日本钢结构协会^[9]以承载能力的变化定义为敏感性指标;蔡建国、韩庆华等^[6,10-11]提出的基于构件应力响应反映敏感性系数;万成、朱宏平等以模态灵敏度判断结构中重要构件。因此,通过AP法使转接件失效对4个不同规格的模型进行分析,利用敏感性与改进的模态灵敏度两种响应进行对比研究不同规格幕墙,不同位置、区域重要性系数及频率,为今后幕墙结构分析提供参考。

1 转接件敏感性分析系数

日本钢结构协会以某些构件失效后的承载能力的变化量与初始状态下的承载能力为分析对象,将前者与后者的比值定义为敏感性指标 SI ,表达式^[9]为:

$$SI = \frac{\lambda_0 - \lambda_{\text{damage}}}{\lambda_0} \quad (1)$$

式中: λ_0 为初始状态下的结构承载能力; λ_{damage} 为某些构件失效后的结构承载能力。当 $SI \rightarrow 1$ 时,失效构件为敏感构件;当 $SI \rightarrow 0$ 时,失效构件为非敏感构件。蔡建国、徐颖^[6,12]等提出在进行敏感性分析时,构件受损前后的应力比对敏感性系数有较大影响。这里选择构件的等效应力作为分析参量进行敏感性计算,以构件作为最小评价单位,以转接件失效作为控制变量,基于等效应力变化比计算构件的敏感性指标,表达式^[11]为:

$$s_{ij} = \left| \frac{\gamma_i^j - \gamma_i^0}{\gamma_i^j} \right| \quad (2)$$

式中: γ_i^0 为初始状态下构件 i 的构件等效应力值; γ_i^j 为构件 i 在转接件 j 失效后的构件等效应力值; S_{ij} 为转接件 j 对构件 i 的敏感性系数。敏感性系数 S_{ij} 可

以反映转接件 j 对构件 i 的敏感程度, S_{ij} 数值越大,则表示该转接件失效后该构件影响越大; S_{ij} 数值越小,则表示该转接件失效后该构件影响越小。

取所有构件的敏感性系数平均值作为转接件 j 的重要性系数,表示为:

$$a_j = \sum_{i=1}^n S_{ij} / n \quad (3)$$

利用有限元进行仿真模拟,以构件的等效应力为响应,提取各个构件在荷载工况下的等效应力数据,计算各个转接件的重要性系数 S_{ij} 。

2 幕墙有限元模型

依据某实际工程设计了4个不同规格的模型,层高3.2 m,石材横向间距1 m,纵向间距0.8 m,见表1。为了模拟石材在实际工程中受到的风荷载,将各层风荷载等效成线荷载施加在竖向龙骨上,石材的自重等效成均布线荷载作用在石材幕墙上下横梁上。龙骨(型钢)与角钢的单元类型均采用Beam 31梁单元,钢材材料本构采用随动方程,钢材材料类型均为Q235B,截面尺寸规格和材料参数见表2、表3。

表1 模型几何属性
Table 1 Model geometric properties

模型	层数/层	幕墙宽度/m	幕墙高度/m
模型一	5	5	19.2
模型二	7	7	27.2
模型三	9	9	35.2
模型四	12	12	47.2

表2 构件尺寸
Table 2 Component dimensions

构件类型	截面尺寸/mm	壁厚/mm
型钢	100 × 50	4
角钢	50 × 50	5

表3 材料属性
Table 3 Material properties

密度 / (kg · m ⁻³)	弹性模量 / 10 ⁵ MPa	泊松比	屈服强度 / MPa	失效应变
7 850	2.06	0.3	235	0.23

3 敏感性分析

3.1 转接件重要性分析

利用删除单元模拟转接件的失效,通过数值模拟结果,提取各个转接件失效后各构件的等效应力值,依据式(2)、(3)计算出不同模型各个转接件的重要性系数。四种模型转接件重要性系数见表4。

表 4 转接件重要性系数
Table 4 Importance coefficient of connector

楼层层数	模型一		模型二		模型三		模型四	
	α (重要性系数平均值)	α 平均值比值						
第十二层							0.006	
第十一层							0.010	1.214
							0.008	
第十层							0.009	1.123
							0.008	
第九层					0.007		0.007	1.141
					0.012	1.547	0.008	1.137
第八层					0.008		0.007	
					0.033	1.548	0.006	1.125
第七层			0.014		0.021		0.006	
			0.051	1.583	0.067	1.553	0.006	1.125
第六层			0.032		0.043		0.006	
			0.124	1.504	0.051	1.536	0.005	1.087
第五层	0.152		0.083		0.033		0.005	
	0.305	1.495	0.034	1.435	0.015	1.541	0.005	1.125
第四层	0.204		0.024		0.010		0.004	
	0.363	1.482	0.024	1.397	0.014	1.533	0.004	1.111
第三层	0.245		0.017		0.009		0.004	
	0.307	1.455	0.021	1.314	0.012	1.506	0.004	1.111
第二层	0.211		0.016		0.008		0.004	
	0.251	1.651	0.030	1.553	0.008	1.500	0.006	1.100
第一层	0.152		0.019		0.005		0.005	
底部	0.137		0.022		0.008		0.002	

在模型一~模型三中，同一层间的上下两排转接件重要性系数平均值比值上一排转接件是下一排转接件的 1.4~1.6 倍，随着建筑高度增大，同一层间两排转接件重要性系数平均值比值缩小为 1.1~1.2；考虑风荷载的影响，最外侧转接件在同一层中越来越重要，对最外侧转接件重要性系数进行拟合，可以得到拟合曲线、拟合函数。拟合曲线如图 1 所示，函数表达式为：

$$\alpha = mc + n \tag{4}$$

$$c = \frac{h_i}{b} \tag{5}$$

式中： α 为支座重要性系数； m 为曲线斜率； c 为高宽比； n 为曲线截距； h_i 为支座离地高度； b 为幕墙宽度。

拟合曲线参数如下表 5 所示，由表 5、图 1 反映出，最外侧转接件随着楼层高度增大转接件重要性系数不断增大；随着幕墙高度的增大，系数 m 逐渐增大，系数 n 逐渐减小。

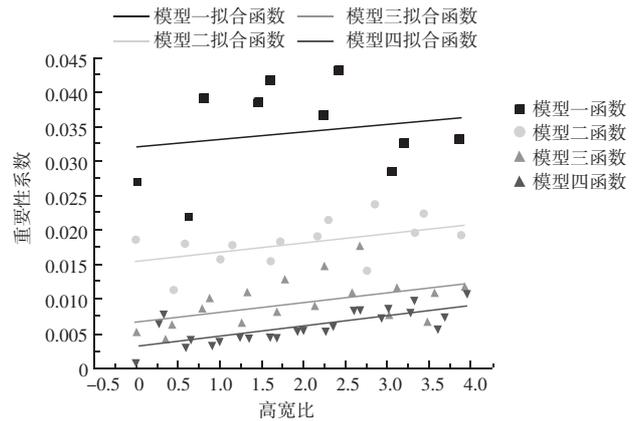


图 1 最外侧转接件重要性系数拟合曲线及函数
Fig. 1 Fitting curve and function of importance coefficient of outermost bearing

表 5 拟合曲线参数
Table 5 Fitting curve parameters

模型	幕墙高度/m	m	n
模型一	19.2	0.00 106	0.03 225
模型二	27.2	0.00 135	0.01 567
模型三	35.2	0.00 141	0.00 697
模型四	47.2	0.00 146	0.00 345

建筑结构

3.2 区域重要性分析

根据结构特征，以及转接件生死后构件响应的影 响范围，将整体结构划分为上中下及左中右共计 9 个区域，考虑结构、荷载的对称性，简化计算过程，分析一半结构。区域划分从左到右、从上到下依次 为 I - VI。区域划分及区域转接件重要性系数结果 如图 2 所示。

区域重要性系数随着建筑高度的增大，整体结 构区域重要性系数也呈现增大的趋势；整体幕墙钢龙 骨外侧区域重要性系数均大于内部区域重要性系数。

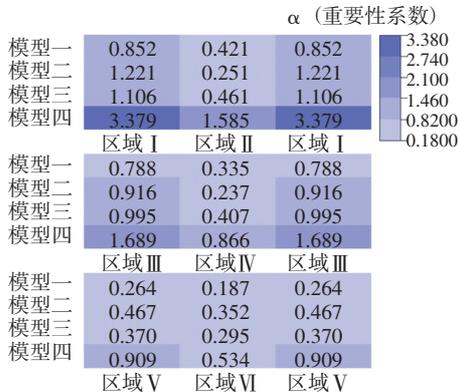


图 2 区域重要性系数
Fig. 2 Regional importance coefficient

4 模态灵敏度分析

由于幕墙结构构件众多，传递荷载路径多样， 考虑到转接件的损伤一般表现在结构刚度的变化， 因此以模态参数判断结构刚度的变化。基于转接件 重要性系数分析，幕墙结构构件处于线弹性阶段， 运动方程可表示为^[13-14]：

$$[K]\{\Phi_r\} - \lambda_r[M]\{\Phi_r\} = 0 \quad (6)$$

式中： $[K]$ 、 $[M]$ 分别为质量、刚度矩阵，均为实对 称矩阵； λ_r 为结构的第 r 阶特征值； $\{\Phi_r\}$ 为第 r 阶 模态特征向量。

将振型正则化，且设 P_m 为幕墙支座失效变量， 对式 (6) 求导，推导可得：

$$\frac{\partial [K]}{\partial P_m}\{\Phi_r\} + [K]\frac{\partial \{\Phi_r\}}{\partial P_m} - \frac{\partial \lambda_r}{\partial P_m}[M]\{\Phi_r\} - \lambda_r\frac{\partial [M]}{\partial P_m}\{\Phi_r\} = \{\Phi_r\}^T \frac{\partial [K]}{\partial P_m}\{\Phi_r\} - \lambda_r\{\Phi_r\}^T \frac{\partial [M]}{\partial P_m}\{\Phi_r\} \quad (7)$$

式 (7) 即为特征值一阶灵敏度的表达式，由于 支座失效对结构 $[M]$ 无影响、 $\lambda_r = 4\pi^2 f^2$ ，对于幕

墙结构主要受竖向荷载（自重）的影响，即以结构的 第一阶频率 (f) 为主，故模态频率对 P_m 的灵敏 度为：

$$\frac{\partial f}{\partial P_m} = \frac{1}{8\pi^2 f} \{\Phi_1\}^T \frac{\partial [K]}{\partial P_m} \{\Phi_1\} \quad (8)$$

从上式可得由频率对结构损伤的灵敏度可判断 失效转接件对结构刚度的影响，进而判断区域重要 性。4 种模型不同区域的频率结果如图 3 所示。

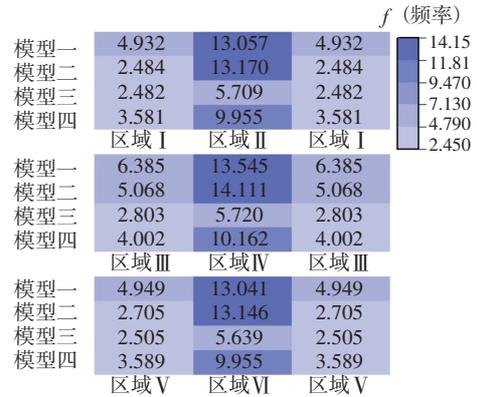


图 3 各区域转接件失效后的频率
Fig. 3 Frequency after bearing failure in each zone

区域范围转接件失效后的频率改变反映结构刚 度变化，从而反映该区域转接件对结构刚度的贡献， 即在频率变化越小结构整体刚度减小越多，说明该 区域转接件对结构整体刚度贡献更大，其重要性越 大。从图 3 看出每个模型外部区域的频率均小于内部 区域的频率，反映该区域在整体结构中更重要，分析 结果与区域重要性系数分析结果具有一定的一致性。

5 结论

为了更加高效、准确的对石材幕墙结构转接件 进行检测，采用 AP 法利用等效应力比与改进的模态 灵敏度两种响应对四个典型模型进行对比分析，得 到以下结论：

(1) 9 层以内的钢龙骨同一层两排转接件重要 性系数平均值比值上一排转接件是下一排转接件的 1.4 ~ 1.6 倍，随着建筑高度增大，同一层间两排转 接件重要性系数相差越小，平均值比值约为 1.1 ~ 1.2 倍。

(2) 支座区域重要性于整体结构内外部三分之 一区域 (I 、 III 、 V) 范围重要性系数比内部中心 区域 (II 、 IV 、 VI) 范围重要性系数大。

(3) 结构模态灵敏度于整体结构内外部三分之一区域 (I、III、V) 范围转接件失效后的频率比内部中心区域 (II、IV、VI) 范围转接件失效后的频率小, 即结构整体刚度削弱更严重, 说明该区域对整体刚度贡献更大, 影响更大。分析结果与区域重要性系数分布一致。

参 考 文 献

- [1] 李晓渊, 高未未, 刘伟斌. 外墙干挂石材幕墙安全检测鉴定与评级建议 [J]. 建筑结构, 2018, 48 (22): 116-118, 115.
- [2] 王作虎, 姚渊, 高占广. GFRP 加固背栓式石材幕墙面板的抗弯性能 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (1): 229-234.
- [3] YEUN K W, HONG K N, KIM J. Development of a retrofit anchor system for remodeling of building exteriors [J]. Structural engineering and mechanics: An international journal, 2012, 44 (6): 839-856.
- [4] STEVENS D, CROWDER B, SUNSHINE D. DoD research and criteria for the design of buildings to resist progressive collapse [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137 (9): 870-880.
- [5] PANDEY P, BARAI S. Structural sensitivity as a measure of redundancy [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123 (3): 360-364.
- [6] 蔡建国, 王峰岚, 韩运龙. 大跨空间结构重要构件评估实用方法 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2011, 38 (3): 7-11.
- [7] ENGLAND J, AGARWAL J, BLOCKLEY D. The vulnerability of structures to unforeseen events [J]. Computers & Structures, 2008, 86 (10): 1042-1051.
- [8] 江晓峰, 陈以一. 大跨桁架体系的连续性倒塌分析与机理研究 [J]. 工程力学, 2010, 27 (1): 76-83.
- [9] 日本钢结构协会. 《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》[M]. 陈以一等译. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- [10] 韩庆华, 傅本钊, 徐颖. 桁架结构敏感性分析及抗连续倒塌性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2017, 48 (12): 3293-3300.
- [11] 高英棋, 左辉, 董凯杰. 高温下钢框架敏感构件评估方法 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12 (3): 134-138.
- [12] 徐颖, 韩庆华, 练继建. 层球面网壳抗连续倒塌性能研究 [J]. 工程力学, 2016, 33 (11): 105-112.
- [13] 朱宏平, 何波. 基于敏感性分析的周期结构损伤检测 [J]. 工程力学, 2003 (3): 108-114.
- [14] 万成, 朱奕锋, 汪敏吉. 灵敏度分析在空间钢结构抗连续倒塌控制中的应用 [J]. 钢结构 (中英文), 2019, 34 (8): 32-36.

(上接第 100 页)

填筑体上, 随着填筑高度逐层加钢管的方式进行观测。

最高填方部位经沉降监测, 施工期间累计最大位移沉降 $S_{瞬}$ 为 234 mm, 工后一年的沉降量 $S_{工后}$ 为 24.3 mm, 且工后沉降总体呈逐渐收敛的趋势, 地基变形满足使用要求。

5 结 论

(1) 对于高填方地基, 通过对原地基、填料、施工工艺等进行控制, 可以有效改善深厚填土地基的质量, 满足上部建筑荷载及变形要求。

(2) 对高填方沉降的计算, 暂无成熟的理论计算公式, 可以采用传统经验公式及数值模拟对沉降进行预测、分析, 并通过实际的沉降监测数据对计算的准确性进行修正。

参 考 文 献

- [1] 姚仰平, 盛岱超, 李强, 等. 机场高填方工程基础理论与应力 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 刘宏, 张倬元. 四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [3] 谢春庆. 山区机场高填方夯实地基处理方法的研究 [J]. 勘察科学技术, 2001 (5): 11-15.
- [4] 王程亮. 山区机场已填筑高填方地基在处理方法研究 [D], 北京: 清华大学, 2015.
- [5] 陈卓, 段小雨, 李立仁. 高填方区多层房屋地基强夯法的应用于分析 [J]. 建筑技术, 2008 (5): 345-348.
- [6] 顾大兴. 强夯法在重庆高填方地基工程中的应用 [J]. 工程技术, 2016, 11: 80-81.
- [7] 谢俊平. 浅析强夯法在高填方地基处理中的应用 [J]. 工程技术, 2017 (7): 267.
- [8] 高填方地基技术规范: GB51254-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.