

基于实物实验的地震下扶梯桁架后屈曲仿真分析

唐广东, 熊敏, 丁晓红

上海理工大学, 机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月8日; 录用日期: 2023年3月13日; 发布日期: 2023年3月21日

摘要

为了评估自动扶梯桁架的安全性, 对地震状况下建筑物层间变形所导致扶梯桁架压缩的力学特性进行了实验研究和仿真分析。首先, 基于自动扶梯抗震标准的要求, 进行了实物实验, 获得扶梯桁架压缩变形形态和桁架支撑角钢水平支反力随压缩量大小的变化曲线。然后, 通过采用多线性材料模拟扶梯桁架型材的塑性段应力-应变特性, 并在分析中考虑焊缝和结构的桁架几何尺寸误差的影响, 建立扶梯桁架精细化有限元模型, 进行非线性后屈曲分析。结果表明, 扶梯桁架仿真与实验的压缩变形方向和位置一致, 桁架支撑角钢水平支反力随压缩量大小曲线趋势相同, 其中压缩过程中的桁架支撑角钢最大水平和压缩后桁架的回弹量误差均小于5%, 验证了所建立的精细化有限元分析模型的有效性, 为自动扶梯的抗震分析提供参考。

关键词

扶梯桁架, 地震, 压缩实验, 非线性, 后屈曲分析

Simulation Analysis of Post-Buckling of Escalator Truss under Earthquake Based on Physical Experiment

Guangdong Tang, Min Xiong, Xiaohong Ding

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 8th, 2023; accepted: Mar. 13th, 2023; published: Mar. 21st, 2023

Abstract

In order to evaluate the safety of escalator truss, the mechanical properties of escalator truss

compression caused by inter-story deformation of buildings in earthquake were studied experimentally and simulated. Firstly, based on the requirements of the escalator seismic standard, a physical experiment was carried out to obtain the compression deformation shape of the escalator truss and the change curve of the horizontal support reaction force of the truss support angle steel with the compression amount. Then, by using multi-linear materials to simulate the stress-strain characteristics of the plastic section of the escalator truss profile, and considering the influence of the weld and the geometric size error of the structure in the analysis, a refined finite element model of the escalator truss is established for nonlinear post-buckling analysis. The results show that the compression deformation direction and position of the escalator truss simulation are consistent with those of the experiment, and the horizontal support reaction force of the truss support angle steel with the compression process in simulation has the same trend with this of the experiment. The error of simulation and experimental data of maximum horizontal reaction force of the truss support angle steel and the rebound amount of the compressed truss in the compression process are less than 5%, which verifies the effectiveness of the established refined finite element analysis model and provides a reference for the seismic analysis of the escalator.

Keywords

Escalator Truss, Earthquake, Compression Test, Nonlinear, Post-Buckling Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的发展与人民生活水平的提高,自动扶梯作为一种常用的人员运输工具,已被广泛应用于商场、机场、地铁、火车站等人流密集场所。扶梯桁架,作为其主要支撑结构[1],不仅需要在强度上保证扶梯的正常运行,同时需要考虑在各种意外情况发生时,仍能保持乘客的安全,包括在地震发生时,不会对乘客造成附加伤害。

目前,国内外一些学者对自动扶梯桁架的力学性能分析和设计进行了相关研究。徐伟通[2]在常规工况下对自动扶梯关键零部件的力学特性展开了仿真研究,给出了最大变形出现的位置。高原[3]分析了船用自动扶梯桁架在各种晃动工况下的静强度问题。周游[4]基于 ANSYS 分析了型材偏差对桁架挠度的影响。方晓旻[5]提出了扶梯桁架轻量化的方法。陈杨[6]基于 APDL 和 VB 的二次开发技术,开发了一套扶梯桁架结构有限元自动建模与分析系统。Jiang Jie [7]基于有限元法和 Visual C++的二次开发及数据接口技术,开发了扶梯桁架参数化有限元分析平台。Xiaowei Yin [8]建立了扶梯桁架参数化模型,对扶梯桁架系统进行了可靠性分析。以上扶梯桁架的研究限于常规工况下静强度分析和快速建模技术,针对地震工况下扶梯桁架力学性能分析未有涉及。

本研究基于地震情况下自动扶梯的设计要求(中国和日本国家标准) [9] [10],模拟特大地震时建筑物层间变形对扶梯桁架挤压,进行了桁架压缩实验,并通过建立扶梯桁架精细化有限元模型,进行非线性后屈曲分析,得到扶梯桁架压缩过程的力学特性。对比仿真与实验结果,验证建模和仿真方法的有效性。

2. 后屈曲分析基本理论

2.1. 有限元理论

有限元方法的基本思想时将结构离散化,用有限个简单的单元来表示复杂的对象,单元之间通过有

限个节点相互连接，结构离散化以后，在运动状态中各节点的动力平衡方程如下：

$$\{F_i\} + \{F_d\} + \{P_i\} = \{F_e\} \quad (1)$$

式中： $\{F_i\}$ 、 $\{F_d\}$ 、 $\{P_i\}$ 分别为惯性力、阻尼力和动力载荷，均为向量； $\{F_e\}$ 为弹性力。

弹性力向量可用结点位移 $\{u\}$ 和刚度矩阵 $[K]$ 表示如下：

$$\{F_e\} = [K]\{u\} \quad (2)$$

根据达朗贝尔原理，可利用质量矩阵 $[M]$ 和节点加速度 $\frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2}$ 表示惯性力如下：

$$\{F_i\} = -[M] \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} \quad (3)$$

假设结构具有黏滞阻尼，可用阻尼矩阵 $[C]$ 和节点速度 $\frac{\partial \{u\}}{\partial t}$ 表示阻尼力如下：

$$\{F_d\} = -[C] \frac{\partial \{u\}}{\partial t} \quad (4)$$

将式(2)、(3)、(4)带入式(1)，得到动力学方程如下：

$$[M] \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} + [C] \frac{\partial \{u\}}{\partial t} + [K]\{u\} = \{P_i\} \quad (5)$$

2.2. 牛顿-拉普森迭代法

由于地震下建筑物层间变形引起扶梯桁架的几何形状变化，造成结构刚度矩阵跟随几何形状变化，导致几何非线性的问题。此时，刚度矩阵不再是常数，而是与位移相关的函数。因此求解非线性问题根本就是求解如下非线性方程：

$$\{\phi\} = [K(u)]\{u\} - \{P\} \quad (6)$$

由于近似线性方程组建立的方法可以各不相同，因而形成了非线性方程组的各种解法。对于工程问题一般使用迭代法进行求解，常用的迭代方法有：直接迭代法(简称 N-R 法)、修正牛顿法、拟牛顿法和弧长法。

牛顿法的基本思想如下：

考虑单变量 x 的线性方程：

$$f(x) = 0 \quad (7)$$

在 x_0 处泰勒展开，只保留线性项，得到：

$$f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) = 0 \quad (8)$$

设 $f'(x) \neq 0$ ，上式的解为：

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (9)$$

重复上述过程，得到 $f(x) = 0$ 的第 $n+1$ 次近似解为：

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (10)$$

回到非线性方程组式(6)。设 $\{u_n\}$ 是上式的第 n 次近似解, 在 $\{u_n\}$ 处将 $\{\phi\}$ 展开, 并且只保留线性项, 由此重复得到第 $n+1$ 次近似解如下:

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} - [K_t^n]^{-1} \{\phi_n\} \quad (11)$$

式中: $[K_t^n]$ 为切线刚度矩阵。

2.3. 求解方法

上述问题本质上就是求解式(5), 要求解式(5), 必须解决以下两个问题: 一是结构质量矩阵 $[M]$ 、阻尼矩阵 $[C]$ 和刚度矩阵 $[K]$; 二是必须找到求解式(5)这种大型二阶微分方程组的有效方法。

在动力计算中可采用两种质量矩阵, 即协调质量矩阵和集中质量矩阵。二者计算精度相近, 但是集中质量矩阵将结构的质量平均分配到单元的各个节点上, 即只有对角线上的元素为非零值, 对于大规模计算, 采用集中质量矩阵可大大减少计算量。因此, 本研究采用的是集中质量矩阵。考虑到实验中油压机压缩为缓慢压缩, 压缩中能量的耗散可以忽略。因此本研究忽略了阻尼的影响。由于压缩中存在非线性效应, 刚度矩阵 $[K]$ 为位移的函数, 因此刚度矩阵与非线性算法有关。

ANSYS 中针对式(5)提供两种求解方法, 模态法和积分法。其中积分法又可分为完全积分法和缩减积分法。根据迭代求解中间隔多久修正一次切线刚度矩阵, 完全积分法又可分为完全 Newton-Raphson 方法、修正 Newton-Raphson 方法和初始刚度法。模态法、缩减积分法以及完全积分法中的初始刚度法、修正 Newton-Raphson 方法均不允许存在大变形等非线性特性, 因此本研究采用的是完全 Newton-Raphson 方法。

通过完全 Newton-Raphson 求解法将一系列非线性问题转化为线性问题后, 使用稀疏矩阵法进行求解。

3. 压缩试验

在地震中由于建筑物的层间变形而导致上下层建筑物的梁等支撑物间隔距离出现变化, 易发生扶梯桁架支撑角钢不能获得建筑物的支撑, 即扶梯桁架支撑角钢从建筑物中获得的水平支反力为零或者负值, 则自动扶梯主体会发生坠落的情况。

为了模拟地震时建筑物的层间变形对自动扶梯桁架的压缩, 采用油压机对某型号自动扶梯进行压缩实验。实验用自动扶梯的提升高度 3000 mm, 水平跨距 9476 mm, 倾斜角度 30° , 如图 1 所示。

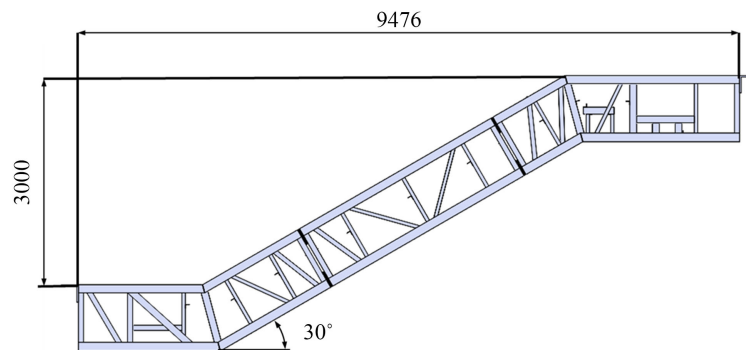


Figure 1. Basic parameters diagram of escalator

图 1. 自动扶梯基本参数示意图

3.1. 扶梯桁架结构

自动扶梯桁架主要由上下弦材、竖材、斜材、中间横梁等组成, 通过焊接的方式进行连接。其中上、

下弦材采用的不等边角钢，竖材及部分斜材采用等边角钢，中间横梁采用等边角钢及槽钢。扶梯桁架截面型材如表 1 所示。

Table 1. Steel model of escalator truss

表 1. 扶梯桁架截面型材

项目	型号	材质	国标
上、下弦材	L125X75X10		
上、下平层端部竖材	L75X75X9		
中间竖材	L50X50X6		
上平层槽钢	C100X50X5		
下平层与倾斜段连接角钢	L100X75X10		
上、下平层部分竖材	L75X75X6	Q235	GB/T 7714-2015
上水平段电机支座角钢	L150X100X15		
底部横梁	L40X40X5		
上、下支撑大角钢	L250X250X25		
倾斜段斜材	FB100X9		
倾斜段斜材	FB65X12		

3.2. 实验方法

根据 GB/Z 28597-2012 中的规定：为防止自动扶梯坠落，需要将自动扶梯一端的支撑角钢固定在建筑物的梁等支撑物上，另一端与支撑物之间需留有足够的搭接量；安装自动扶梯的建筑物在受到地震力影响时其层间变形角应在 1/100 以下，经过换算强制压缩位移为 195 mm。

对实验中底部支撑结构与扶梯桁架支撑角钢固定方法如图 2 所示，上部支撑角钢通过螺栓固定在上部架台上，下部支撑角钢搭接在底部架台上。实验过程如表 2 所示，逐步的压缩和卸载，直至压缩量为 195 mm。

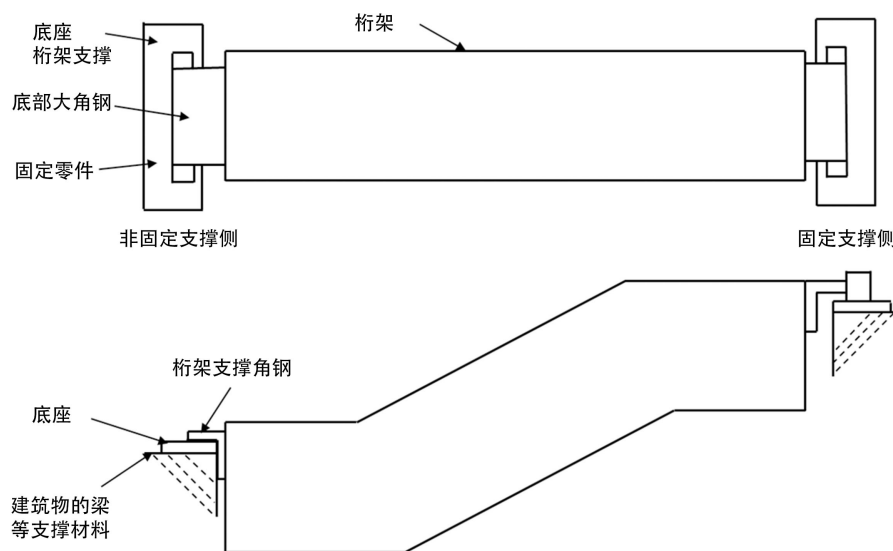


Figure 2. Experimental support diagram of escalator truss

图 2. 扶梯桁架实验支撑示意图

Table 2. Experimental procedure
表 2. 实验步骤

步骤	操作
Step1	压缩至 40 mm
Step2	卸载
Step3	压缩至 80 mm
Step4	卸载
Step5	压缩至 195 mm
Step6	卸载

乘客载荷及其他机器载荷(梯级、驱动系统等),根据其质量通过悬吊重块的方式施加在扶梯桁架横梁上,如图 3 所示。

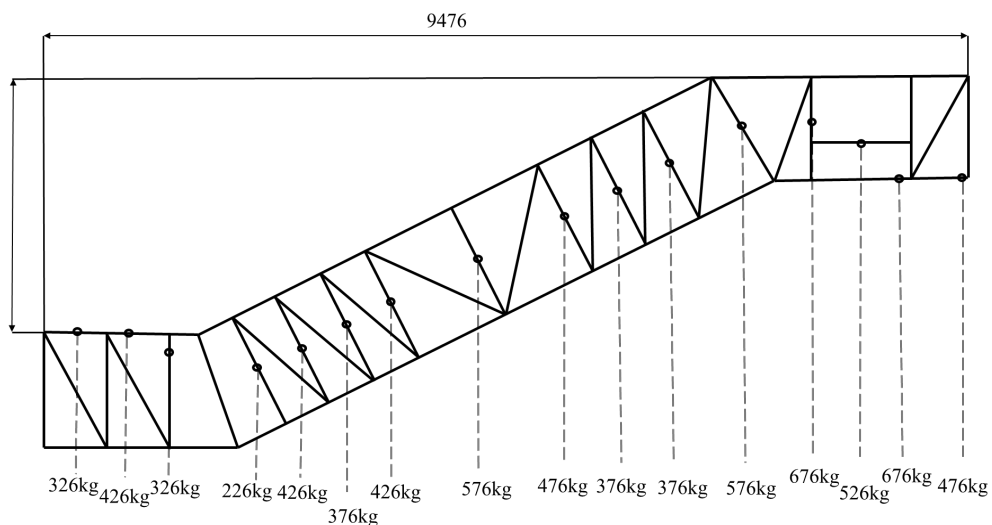


Figure 3. Diagram of experimental lifting block
图 3. 实验吊重块示意图

3.3. 实验结果

为了获得扶梯桁架支撑角钢水平支反力随压缩量的变化关系,实验测量扶梯桁架底部被压缩大角钢的位移值及上部大角钢与支撑物间的水平支反力,得到了桁架支撑角钢水平方向水平支反力随压缩量大小变化曲线。

假设乘客乘坐扶梯上行,乘客右侧为实验所指右侧。扶梯桁架变形形态如图 4(a)所示,变形位置在下转折处,变形方向朝向右侧。桁架支撑角钢水平方向支反力随压缩量大小变化曲线如图 4(b)所示。

4. 精细化有限元模型

为了节约实验成本,通过建立扶梯桁架精细有限元模型,对以上实验过程进行仿真分析,从而精准模拟地震下建筑物层间变形对扶梯桁架的挤压过程,对扶梯桁架在此状况下的力学特性进行预测。

采用 shell181 单元模拟扶梯桁架各型材,shell181 单元为四节点壳单元,支持非线性、应力刚化、大应变和大变形分析,适合分析板壳结构等多种结构[11]。

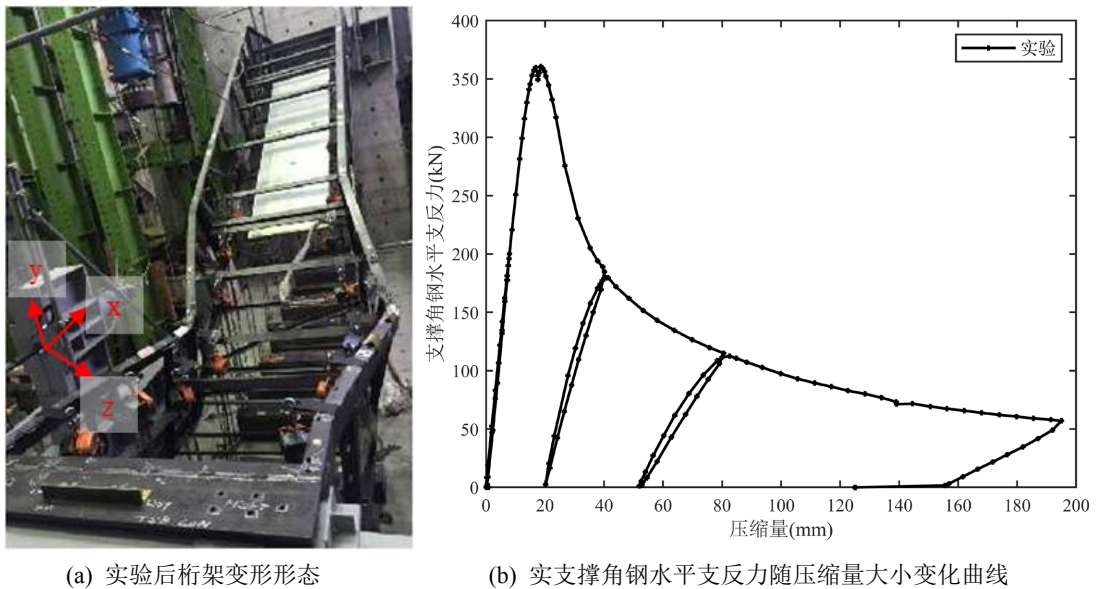


Figure 4. Truss deformation diagram after experiment and reaction-compression curve
图 4. 实验后桁架变形形态及支反力 - 压缩量曲线

仿真边界条件设置如下：上部支撑大角钢全约束(6 个自由度)，底部支撑大角钢释放 x 方向自由度，约束其他 5 个方向自由度，悬吊重块的质量以质量点的方式加在仿真模型对应位置。

4.1. 材料

扶梯桁架型材材料特性如表 3 所示。

Table 3. Material characteristics

表 3. 材料特性表

截面形状/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
L125X75X10	335	465		
L75X75X9	335	465		
L50X50X6	315	477		
C100X50X5	334	435		
L100X75X10	316	432		
L75X75X6	315	468	211	0.3
L100X75X10	315	477		
L40X40X5	334	435		
L250X250X25	305	447		
FB100X9	314	432		
FB65X12	283	403		

以上弦材为例，说明其材料特性的定义。

常用的弹塑性材料插值模型有双线性以及多线性材料模型。为了更加真实的逼近塑性段的材料特性，采用多线性材料模型(6 线性段)拟合材料应力 - 应变曲线。如图 5 所示。其他部件型材均采用同样的材料插值模型。

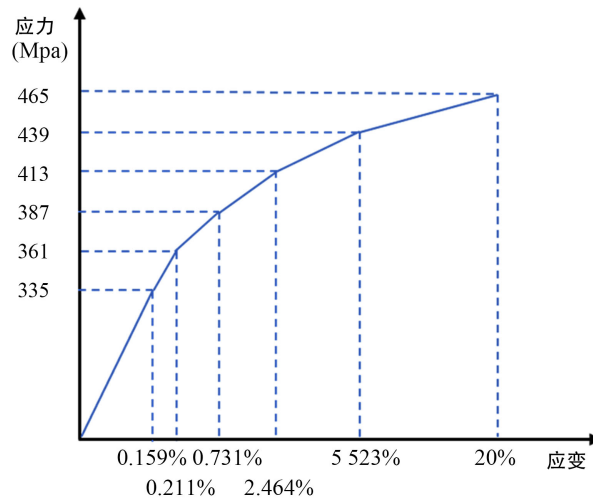


Figure 5. Material characteristic curve of upper chord
图 5. 上弦材材料特性曲线

4.2. 焊缝

实验中扶梯桁架下转折处变形严重, 为了精确模拟扶梯桁架压缩过程的后屈曲力学特性, 同时考虑到计算成本, 在图 6 所示的位置添加焊缝(所标注线条为焊缝), 焊缝根据实际几何尺寸采用 $6\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 的 shell181 单元。

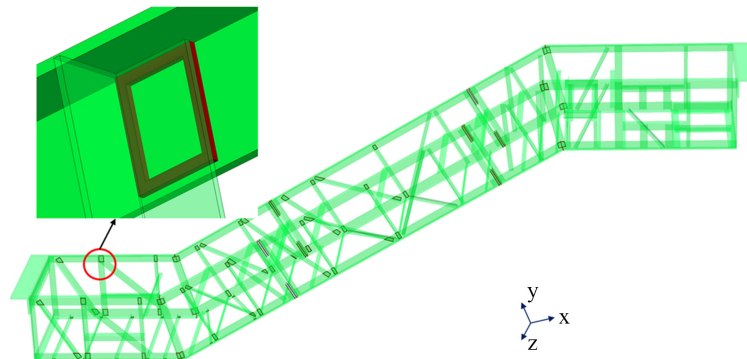


Figure 6. Layout of truss weld
图 6. 桁架焊缝布置图

4.3. 结构初始缺陷

由于扶梯桁架装配是分段进行, 难免存在尺寸误差, 从而导致扶梯桁架存在的左右不对称的问题, 称之为结构初始缺陷。显然, 此初始缺陷会对扶梯桁架压缩后力学特性产生影响。因此, 需要建立精细化有限元模型, 分别考虑初始缺陷存在位置(左侧或者右侧)、初始缺陷大小($4\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$)对扶梯桁架后屈曲仿真结果的影响。

以图 7 说明初始缺陷的位置及其大小, 图 7 为初始缺陷在右侧, 大小为 6 mm 。

分别建立以下有限元模型: 1) 无初始缺陷模型; 2) 初始缺陷分别在左侧、右侧, 大小分别为 4 mm 、 6 mm 、 7 mm 、 8 mm 、 9 mm 、 10 mm 的模型, 并进行相应的分析, 并与图 4 对比。结果如下:

a) 无初始缺陷的模型, 仿真分析的变形位置与实验相同, 但变形方向与实验相反;

b) 初始缺陷在左侧的模型, 各初始缺陷数值大小不同的变形位置与实验结果相同, 同样也存在变形方向与实验相反;

c) 初始缺陷在右侧的模型, 各初始缺陷数值大小不同的变形位置及变形方向均与实验相同, 其桁架支撑角钢水平支反力随压缩量大小的变化曲线如图 8 所示。

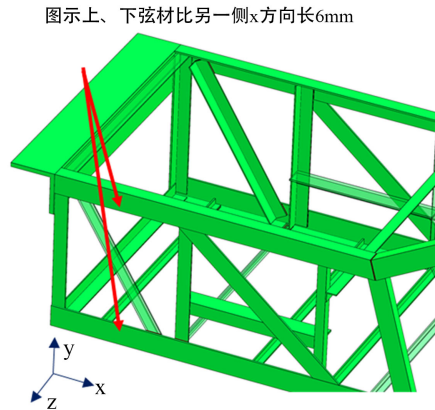


Figure 7. Initial defect description
图 7. 初始缺陷说明

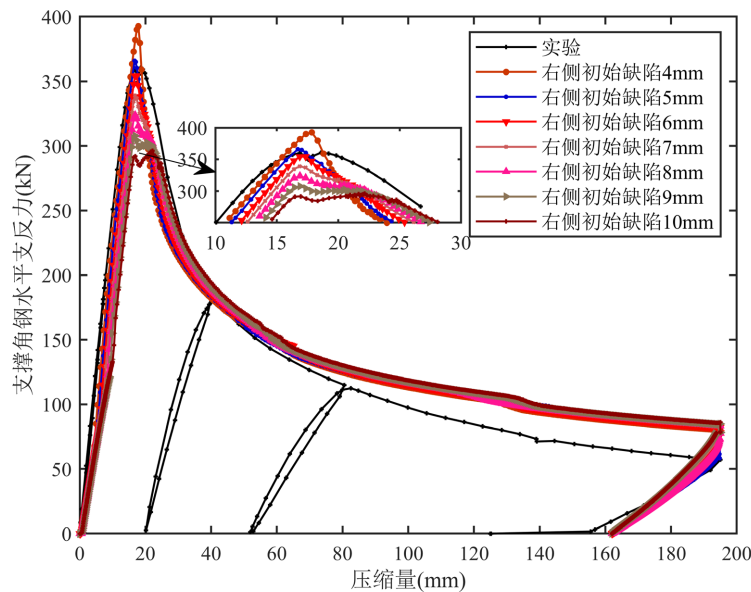


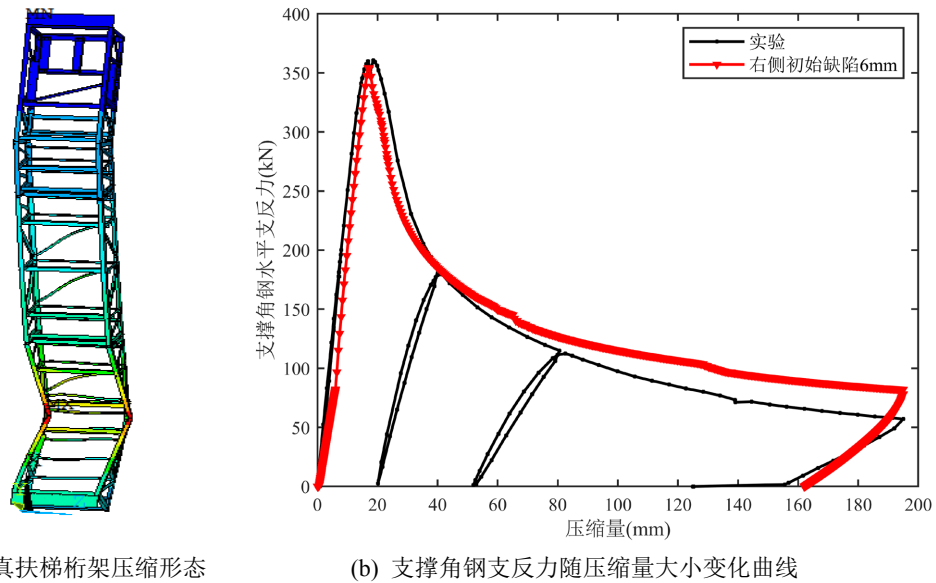
Figure 8. Curves of the reaction force of the horizontal support angle steel with the compression amount

图 8. 支撑角钢水平支反力随压缩量大小变化曲线

4.4. 仿真与实验对比

4.3 节中初始缺陷在右侧, 数值为 6 mm 时的仿真分析结果与实验结果最为接近, 因此进一步对此结果与实验结果进行详细的分析和对比。

压缩解除后仿真分析桁架变形形态如图 9(a)所示, 桁架支撑角钢水平支反力随压缩量大小变化曲线如图 9(b)所示, 仿真分析与实验数据对比见表 4 所示。



(a) 仿真扶梯桁架压缩形态

(b) 支撑角钢支反力随压缩量大小变化曲线

Figure 9. Simulation and experimental comparison**图 9.** 仿真与实验对比**Table 4.** Comparison of simulation and experimental data**表 4.** 仿真与实验数据对比

	最大支反力时		最大压缩量时		最大支反力时	
	载荷/kN	压缩量/mm	载荷/kN	压缩量/mm	载荷/kN	压缩量/mm
实验	361	18.6	57.1	195	0	155.5
仿真	365.8	16.7	76.3	195	0	162
误差	1.32%	-11.37%	33.62%	0%	0%	4.18%

仿真分析变形方向与实验一致，最大支反力大小及相应压缩位移量均吻合较好，强制位移撤销后，桁架也产生一定的回弹，并且回弹量与实验相比误差在 4.18%。

5. 结论

为了分析地震导致的建筑物层间变形是否会使自动扶梯“坠落”，基于自动扶梯抗震设计标准，进行了扶梯桁架实物压缩实验，并考虑材料多线性模型、桁架焊缝和桁架几何尺寸误差的影响建立了扶梯桁架精细化有限元模型，进行了扶梯桁架后屈曲分析，获得了桁架压缩后的形态和扶梯桁架支撑角钢的水平支反力随压缩量大小变化的曲线。仿真分析的扶梯桁架后屈曲形态和位置均与实验结果一致，最大水平支反力和桁架强制压缩量撤销后的回弹量误差均小于 5%，表明此精细化有限元模型和分析方法适用于扶梯桁架抗震设计仿真分析。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(52005377)。

参考文献

- [1] 杨天玲, 朱道林, 张海波, 黄金永. 基于 ANSYS 的自动扶梯桁架结构分析及实验研究[J]. 机电工程, 2021, 38(12): 1641-1646.

-
- [2] 徐伟通. 自动扶梯关键部件力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2019.
<https://doi.org/10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.000791>
- [3] 高原, 曹国华, 秦健聪. 船用自动扶梯桁架的有限元分析及其应用[J]. 机械强度, 2017, 39(3): 738-742.
<https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.2017.03.042>
- [4] 周游, 陆毅臻. 基于 ANSYS 的自动扶梯型材偏差对桁架挠度的影响[J]. 特种设备安全技术, 2021(2): 39-40.
- [5] 方晓旻, 朱昌明. 自动扶梯金属结构轻量化方法研究[J]. 机械强度, 2008(3): 433-436.
<https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.2008.03.030>
- [6] 陈杨. 基于 ANSYS 的扶梯桁架结构自动建模与分析系统开发[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] Jiang, J., Wang, S.J., Zhao, L.D., Wu, H.P. and Kong, L.X. (2020) Research on Parametric Finite Element Analysis Method of Escalator Truss. *Journal of Physics: Conference Series*, **1549**, Article ID: 032122.
- [8] Yin, X.W., Qian, W.X. and Pham, H. (2018) Parametric Simulation Analysis and Reliability of Escalator Truss. *Open Physics*, **16**, 938-942. <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0115>
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/Z 28597-2012. 地震情况下的电梯和自动扶梯要求 汇编报告[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [10] 日本电梯协会事务局, 黄建华. 日本升降机抗震设计、施工指南的修订[J]. 中国电梯, 2010, 21(19): 23-27.
- [11] 王宇, 王树, 朱波. 利用 ANSYS Shell181 单元分析钢结构问题[J]. 山西建筑, 2006(12): 32-34.