

史瑞英,刘历波,张磊.建筑变形后幕墙结构屈曲破坏临界荷载研究[J].地震工程学报,2020,42(2):345-351.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.345
SHI Ruiying, LIU Libo, ZHANG Lei. Critical Load for Buckling Failure of Curtain Wall Structures after Deformation of the Building[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 345-351. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.345

建筑变形后幕墙结构屈曲破坏临界荷载研究

史瑞英¹, 刘历波², 张磊¹

(1. 河北工业职业技术学院 建筑工程系, 河北 石家庄 050091;

2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:为解决传统建筑沉降变形中存在的幕墙结构易发生变形、稳定性较差等问题,提出建筑沉降变形中幕墙结构屈曲稳定临界荷载的研究。选取框架玻璃幕墙作为研究对象,建立玻璃面板的有限元模型,分别从X、Y、Z三个方向对玻璃面板施加平动自由度约束力,进行幕墙结构屈曲稳定临界荷载的模拟;然后在建筑底部不同节点处设置竖向弹簧,通过调节弹簧刚度模拟建筑沉降变形的竖向作用力,在此基础上,采用能量法分别计算玻璃肋的应变势能、外力势能和弹性约束势能,根据势能驻值原理计算得出建筑沉降变形中幕墙结构屈曲稳定临界荷载;最后设置不同的玻璃肋参数,选取单一变化因素进行实验。实验结果表明:在不同玻璃肋跨度和截面厚度对比下,所提方法的计算结果较为准确,且所提方法的临界荷载计算耗时低于其他方法,具有较高的实际应用价值。

关键词: 幕墙结构; 玻璃肋; 屈曲稳定; 临界荷载; 有限元模型

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0345-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.345

Critical Load for Buckling Failure of Curtain Wall Structures after Deformation of the Building

SHI Ruiying¹, LIU Libo², ZHANG Lei¹

(1. Department of Materials Engineering, Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, Hebei, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: To solve the problems of curtain wall structures in the traditional deformation of building settlements, research on the critical load of buckling stability of the curtain wall structure in the deformation of building settlements was proposed. The glass curtain wall of the structure was selected as a research object; a finite element model of the glass panel was established to simulate the critical load of the buckling stability of the curtain wall structure. The vertical springs were placed in different nodes at the bottom of the building, and the vertical force of the building's deformation was simulated by adjusting the spring stiffness. On this basis, the potential deformation energy, the potential energy of external force and the potential energy of elastic restriction of

收稿日期: 2019-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41104005)

第一作者简介: 史瑞英(1976—),女,河北乐亭人,硕士,副教授,研究方向:建筑结构设计。E-mail: ruiying1976@126.com。

通信作者: 刘历波(1979—),男,河北乐亭人,硕士,副教授,研究方向:建筑结构设计。E-mail: liulibo@hebeu.edu.cn。

the glass rib were calculated by the energy method. Then, the critical load of the buckling stability of the curtain wall structure in the deformation of the building's settlement was calculated according to the principle of the potential value of the standing energy. Different glass rib parameters were established and the single variable factor for the experiment was selected. The experimental results showed that the results of the calculation of the proposed method are accurate and the calculation time of the critical load of the proposed method is less than that of other methods.

Keywords: curtain wall structure; glass rib; buckling stability; critical load; finite element model

0 引言

幕墙是一种建筑外围保护结构,目前在公共建筑建设中广泛应用,尤其是玻璃幕墙已经被看作是现代工业文明的标志^[1]。然而幕墙结构被广泛应用的同时,其质量并未随之提高。近年来幕墙玻璃面板脱落、结构老化等问题层出不穷,对人们的生命和财产造成了严重损伤,引起了社会的广泛关注。在玻璃幕墙制造过程中,由于受到现有玻璃制造技术条件的限制,只能生产限制尺寸的玻璃,然后通过玻璃肋支撑结构连接多块玻璃构成玻璃幕墙^[2-3]。玻璃肋是指幕墙中具有支撑作用的玻璃面和玻璃框架,玻璃肋与机械构件共同承担承载力,支撑玻璃幕墙^[4-5]。建筑物在建造或使用过程中可能会出现建筑沉降变形的情况,沉降作用力可能是均匀的,也可能是不均匀的。这一沉降作用力会作用于幕墙结构之上,影响其稳定性,加之风力、热力和地震动力的影响,导致幕墙结构的稳定性出现一定问题。针对这些问题,相关领域的研究者对建筑沉降变形中幕墙结构屈曲稳定临界荷载进行了大量研究。

文献[6]对高层建筑中单层索网幕墙结构的设计与施工进行研究。单层索网幕墙结构由受力复杂的柔性钢索组成,该研究以三个工程为实例,对单层索网幕墙结构的施工要点进行详细设计。但该方法在操作过程中成本较高,不利于后期的应用。文献[7]提出以 11 组不考虑侧向约束和 10 组考虑侧向约束的玻璃肋试件为对象研究玻璃肋的稳定性。该方法虽然在一定阶段取得了成效,但玻璃肋在承受面内荷载时常伴随平面弯扭失稳的现象。文献[8]提出对超高坐地式玻璃肋幕墙系统进行大风压作用下的结构性能和位移能力研究,验证了玻璃肋幕墙系统的安全性,但该方法对环境要求较高,存在一定局限性。

基于上述问题,对建筑沉降变形中幕墙结构屈曲稳定临界荷载进行研究。通过详细分析幕墙结构

参数,为后续研究奠定基础;建立有限元模型模拟屈曲稳定临界荷载,与临界荷载计算公式形成对比;使用能量法计算幕墙结构屈曲稳定临界荷载,获得较为准确的结果,并通过实验对所提方法进行验证。

1 幕墙结构参数

以框架玻璃幕墙为研究对象设置幕墙结构参数。框架玻璃幕墙最外层为玻璃面板,被固定于框架横框上,与竖向固定在主体结构上的框架垂直并相互连接,可依据外界荷载或温度变化发生相对移动。横框和竖框共同组合,形成幕墙结构的受力体系。通常将主要受力的玻璃面板称为玻璃肋,玻璃肋是研究幕墙结构屈曲稳定临界荷载的主要附件^[9]。

玻璃幕墙结构高 9.5 m,宽 3.5 m。用于框支撑的钢化玻璃尺寸为 13 00 mm×1 000 mm,密度为 24 500 N/m³,幕墙结构顶部玻璃厚度为 25 mm,侧部玻璃厚度为 15 mm,玻璃框架之间采用圆钢管连接。中空玻璃与框支撑的钢化玻璃尺寸相同,真空部分的厚度为 10 mm。玻璃幕墙结构如图 1 所示。



图 1 玻璃幕墙结构

Fig.1 Structure of glass curtain wall

2 有限元模型

幕墙框架采用弹性模量为 78 GPa 的铝合金材料,采用 Beam188 单元^[10-11]。玻璃面板部分采用有限元软件 ANSYS 中的 Shell63 单元进行模拟,其弹性模量为 68 GPa。

框架玻璃幕墙结构中用于玻璃框架连接的附件较多,且这些附件与玻璃胶之间存在微弱影响^[12-14]。为方便计算,在幕墙结构屈曲稳定分析中不考虑这些因素的影响。在该条件下,玻璃面板的边界处分别受到 X、Y、Z 三个方向的平动作用力限制,对玻璃面板施加三个方向的平动自由度约束力。依据上述参数构建的有限元模型如图 2 所示。

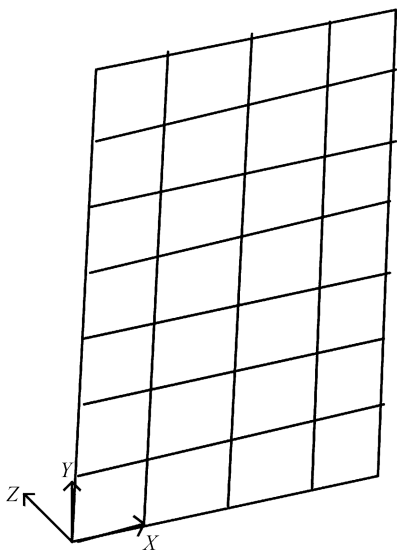


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

依据图 2 中的有限元模型,对幕墙结构屈曲稳定临界荷载进行模拟。在有限元模型结构的计算分析中,幕墙的梁柱构件采用空间梁柱单元,幕墙内部要求的底钢板和配重钢板采用可以同时考虑面内和面外刚度的空间板单元,层间配重采用分散式集中恒荷载进行处理。

3 建筑幕墙屈曲稳定临界荷载模拟

3.1 建筑沉降变形的竖向作用力模拟

建筑沉降变形过程中建筑主体以及幕墙结构会产生竖向作用力。通过改变不同位置处弹簧作用力模拟建筑沉降^[15-17],为幕墙结构屈曲稳定临界荷载研究奠定基础。

建筑沉降变形的竖向作用力模拟过程为:

(1) 在建筑底部不同节点处设置竖向弹簧,改

变弹簧刚度,使幕墙结构在自重状态下受到竖向作用力。

(2) 竖向作用力将导致幕墙结构内力重分布,呈现新的受力状态,再反作用于建筑底部,成为影响建筑沉降变形的作用力^[18-20]。

(3) 将上述步骤进行迭代计算,直至建筑幕墙结构趋于稳定状态。

(4) 完成建筑沉降变形的竖向作用力模拟。

3.2 幕墙结构屈曲稳定临界荷载限定条件

将模拟完成的建筑沉降变形竖向作用力作用于幕墙结构中,计算结构屈曲稳定临界荷载。计算时需满足以下条件:

(1) 假定玻璃幕墙材料具有各向同性;

(2) 幕墙结构屈曲失稳的位移较小;

(3) 在计算过程中不考虑绕强轴方向的变形因素;

(4) 每片玻璃按照弯曲刚度分配荷载;

(5) 以建筑沉降变形竖向作用力为正向荷载。

在上述假定条件下,以有限元模型为基础,采用能量法对建筑沉降变形中幕墙结构屈曲稳定临界荷载进行计算。

3.3 幕墙结构屈曲稳定临界荷载计算

在玻璃幕墙结构中,玻璃肋承担主要荷载,因此计算过程以玻璃肋为主体。通过计算玻璃肋的应变势能、外力势能和弹性约束势能获取屈曲稳定临界荷载^[21],完成临界荷载的计算。

3.3.1 应变势能的计算

将玻璃肋支座的端弯矩表示为 W ,选取弯曲刚度 G 和截面自由扭转刚度 G' 作为其截面参数。通常选取玻璃梁的一端为坐标原点,原点设定后,以跨度为方向,假设截面侧向位移函数 D 和扭转角函数 A 均为正弦函数:

$$D = C \sin(\pi x / l) \quad (1)$$

$$A = F \sin(\pi x / l) \quad (2)$$

式中: l 表示玻璃肋长度; C 和 F 分别表示幕墙结构跨中侧移和扭转的绝对值。

根据式(1)、(2) 可以获取玻璃肋的应变势能:

$$U = \frac{G}{2} \int_0^l \left(\frac{dD}{dx} \right)^2 dx + \frac{G'}{2} \int_0^l \left(\frac{dA}{dx} \right)^2 dx \quad (3)$$

3.3.2 外力势能计算

从上述假设条件可知,不考虑绕强轴方向的变形因素,在端弯矩计算中只需计算玻璃肋的扭转变形。将玻璃肋上端纤维和下端纤维点与跨中的距离表示为 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$,玻璃肋扭转过程中 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 不

相同,因此围绕 x 轴会产生一个转角 θ ,计算公式为:

$$\theta = \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{r'}$$

(4)

式中: l' 表示跨中截面长度。

则玻璃肋的外力势能可表示为:

$$O = -2W\theta$$

(5)

3.3.3 弹性约束势能计算

玻璃肋弹性约束中包括的弹性约束势能也是幕墙结构势能的计算内容之一^[22],需要依据截面形心侧向位移函数 D 和截面转动情况进行计算^[23-24]。首先获取玻璃肋截面底端约束点的侧向位移:

$$S = D - \frac{1}{2}l'A = C\sin(\pi x/l) - \frac{1}{2}l'F\sin(\pi x/l)$$

(6)

依据式(6)可得出弹性约束势能:

$$E = \frac{e}{2}\int_0^l S^2$$

(7)

式中: e 表示弹性约束。

综合上述分析,可计算出幕墙结构玻璃肋的总势能:

$$Z_{\text{total}} = U + O + E$$

(8)

根据势能驻值原理可知:

$$\frac{\partial Z_{\text{total}}}{\partial C} = \frac{\partial Z_{\text{total}}}{\partial F} = 0$$

(9)

依据式(9) 可获取幕墙结构屈曲稳定的临界荷载:

$$M = \frac{0.9}{1.4h} \cdot \frac{GJ}{2(1+0.2)}$$

(10)

式中: J 表示玻璃肋扭转常数。

4 实验分析

为验证所提方法的可靠性,需要进行实验分析。将所提方法计算得到的临界荷载与文献[6]方法、文献[7]方法以及文献[8]方法的计算结果进行对比。

4.1 实验参数

实验中设置玻璃肋的不同参数,分别为玻璃肋跨度、截面厚度、跨高比。在其他参数不变、单一参数改变的条件下进行对比实验。设置玻璃肋的跨度为 5 000~9 000 mm,截面厚度分别为 10、15、20、25 和 30 mm,跨高比分别为 10、15、20、25 和 30 mm。

4.2 实验结果分析

4.2.1 不同玻璃肋跨度下临界荷载对比

利用本文方法进行实验,程序运行临界荷载对数模型曲线拟合结果如图 3 所示。

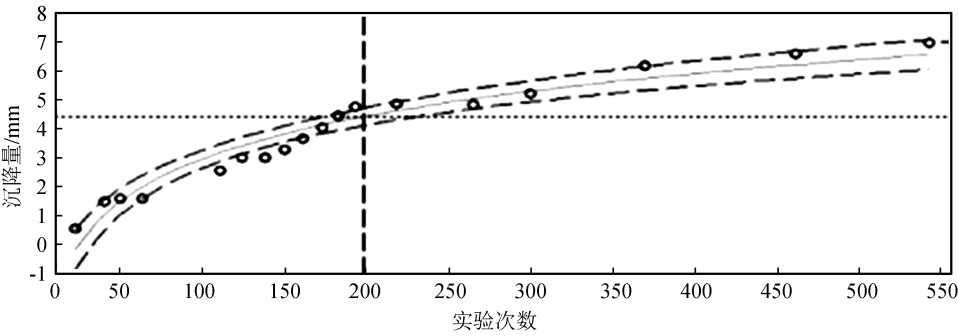


图 3 临界荷载对数模型曲线拟合图

Fig.3 Fitting curve of logarithmic model of critical load

由图 3 可知,程序运行临界荷载对数模型曲线拟合结果呈线性回归。该对数曲线拟合模型预测 200 次的平均沉降量为 4.5 mm,用该预测模型预测最后一次观测值与实际观测值相对误差在合理范围内,符合设计要求。

为验证所提方法的有效性,实验对比了四种方法在不同玻璃肋跨度下的临界载荷计算结果准确度,实验结果如表 1 所列。

分析表 1 中数据可以看出,整个实验过程中,随着玻璃肋跨度的逐渐增大,四种方法的计算结果准确度逐渐降低。在玻璃肋跨度为 5 000 mm 时,所

表 1 不同玻璃肋跨度下临界荷载计算结果准确度对比
Table 1 Accuracy comparison between calculation results of critical load under different glass rib spans

玻璃肋跨度 /mm	所提 方法/%	文献[6] 方法/%	文献[7] 方法/%	文献[8] 方法/%
5 000	94.5	92.1	90.1	93.4
6 000	92.2	91.5	89.6	90.4
7 000	90.5	89.5	88.6	88.4
8 000	90.1	89.1	86.5	87.6
9 000	89.3	87.6	84.2	86.2

提方法的临界荷载计算准确度为 94.5%,文献[6]方法的计算准确度为 92.1%,文献[7]方法为 90.1%,

文献[8]方法为 93.4%;当玻璃肋跨度提高到 9 000 mm 时,所提方法的临界荷载计算准确度为 89.3%,文献[6]方法的计算准确度为 87.6%,文献[7]方法为 84.2%,文献[8]方法为 86.2%。整体看来,所提方法的计算结果准确度大于其他方法,表明所提的计算方法性能较好,能够应用于实际建筑工程中。

4.2.2 不同玻璃肋截面厚度下临界荷载对比

在不同玻璃肋截面厚度下对比四种方法的临界荷载值,实验结果如图 4 所示。

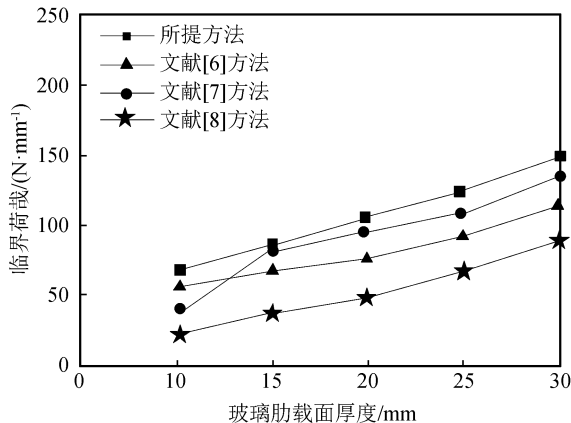


图 4 不同玻璃肋截面厚度下对比结果

Fig.4 Comparison results under different thickness of glass rib section

分析图 4 可知,随着玻璃肋截面厚度的增加,四种方法计算所得的幕墙结构屈曲稳定的临界荷载均逐渐增大。在玻璃肋截面厚度为 10 mm 时,所提方法的临界荷载计算值约为 62 N/mm,文献[6]方法约为 52 N/mm,文献[7]方法约为 40 N/mm,文献[8]方法约为 21 N/mm;当玻璃肋截面厚度增加至 20 mm 时,所提方法的临界荷载计算值约为 105 N/mm,文献[6]方法约为 98 N/mm,文献[7]方法约为 75 N/mm,文献[8]方法约为 49 N/mm;对比可知所提方法的临界荷载计算能力更强。

4.2.3 不同方法临界荷载计算耗时分析

计算耗时是反映幕墙结构屈曲稳定临界荷载计算性能的重要指标。为进一步验证所提方法的有效性,将四种方法的临界荷载计算耗时进行对比,结果如图 5 所示。

分析图 5 可以看出,所提方法的计算耗时最高不超过 90 s,而其他三种方法均达到 90 s 以上;文献[6]方法的计算耗时最高达 110 s,文献[7]方法最高达 100 s,文献[8]方法最高达 101 s。所提方法不

仅计算耗时低于其他三种文献方法,且耗时折线波动较小,具有很好的稳定性。

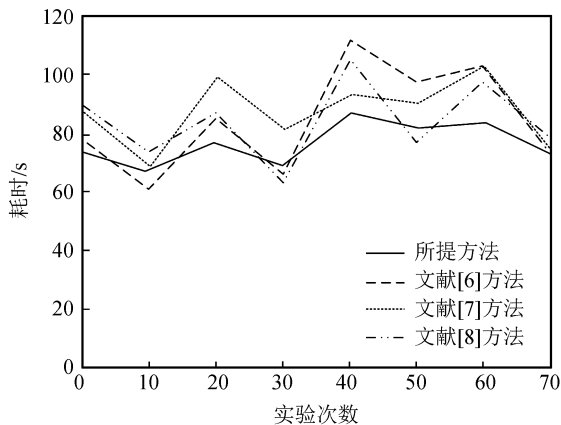


图 5 不同方法临界荷载计算耗时对比

Fig.5 Comparison between calculation time-consuming by different methods

5 结论和建议

高层建筑数量的增加对幕墙结构的稳定性提出了更高的要求。在多重因素干扰下,如何保障幕墙结构的稳定性成为值得关注的问题。本文就建筑沉降变形中幕墙结构屈曲稳定临界荷载进行研究,将框架玻璃幕墙设定为研究对象,详细介绍幕墙的结构参数,并指出玻璃肋在幕墙结构中起到了重要的承载作用。建立玻璃面板的有限元模型,并对模型进行条件约束。对建筑沉降的竖向作用力进行分析,采用能量法计算出幕墙结构中玻璃肋的总势能,完成幕墙结构屈曲稳定临界荷载的研究。实验结果表明所提方法的计算结果误差较小,用时较短。但所提方法仍旧存在一些不足,在计算过程中需要设定约束条件,且对玻璃幕墙的性能考虑较为片面,未对幕墙结构屈曲稳定临界荷载的影响系数进行具体分析。

本文所研究的创新点是模拟建筑幕墙屈曲稳定临界荷载。在未来的研究中,还需要针对建筑沉降变形中的幕墙结构进行更加全面的探讨,获取更为有效的计算方法,为建筑结构的稳定提供更加有效的数据支撑,并在工程质量事故的判断中找到依据,为检验建筑施工质量以及建成后安全运营提供重要的数据依据和参考资料。

参考文献(References)

- [1] 陈杨,王志宇,袁芳,等.压板加固全隐框玻璃幕墙面板的受弯

- 承载力试验及有限元分析[J].科学技术与工程,2019,19(23):177-186.
- CHEN Yang,WANG Zhiyu,YUAN Fang,et al.Flexural Bearing Capacity Test and Finite Element Analysis of Full-hidden Frame Glass Curtain Wall Panels Reinforced with Pressure Plate[J].Science Technology and Engineering,2019,19(23):177-186.
- [2] 项晋源,王向阳,王春梅,等.超高层异形曲面单元体幕墙双环形轨道吊装技术[J].施工技术,2017,46(23):72-76.
- XU Jinyuan,WANG Xiangyang,WANG Chunmei,et al.Hoisting Technique of Double-circle Track of Abnormity Bent Surface Unit Curtain Wall in Super Tall Building[J].Construction Technology,2017,46(23):72-76.
- [3] 杨鸽,GRIFFITHS D V,朱晟.考虑堆石料空间变异性的土石坝坝坡地震稳定性随机有限元分析[J].地震工程学报,2019,41(4):939-948.
- YANG Ge,GRIFFITHS D V,ZHU Sheng.Seismic Slope Stability Analysis of Earth-Rockfill Dams Considering Spatial Variability of Rockfill Materials Via Random Finite Element Method[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(4):939-948.
- [4] 吴丽丽,严茂超,王元清,等.超高位置玻璃幕墙支撑体系方案的对比分析:以国家金融信息大厦为例[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(2):241-251.
- WU Lili,YAN Maochao,WANG Yuanqing,et al.Comparison on Supporting System Schemes for Super-Positioned Curtain Wall;Taking National Financial and Information Building as an Example[J].Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2016,32(2):241-251.
- [5] 刘飞,张建营,夏青森.长宽比对玻璃幕墙承载性能和变形影响研究[J].菏泽学院学报,2016,38(5):73-77.
- LIU Fei,ZHANG Jianying,XIA Qingsen.Effect of Length-width Ratio on Bearing Capacity and Deformation of Glass-curtain Wall[J].Journal of Heze University,2016,38(5):73-77.
- [6] 朱向前,龚静华,李信桥,等.单层索网幕墙结构在高层建筑中的设计与施工[J].建筑结构,2016,46(19):57-61.
- ZHU Xiangqian,GONG Jinghua,LI Xinqiao,et al.Design and Construction of Single-layer Cable Net Curtain Wall in High-rise Buildings[J].Building Structure,2016,46(19):57-61.
- [7] 刘军进,陈灏恺,李建辉,等.全玻璃幕墙中玻璃肋稳定性的试验研究[J].土木工程学报,2018,51(6):54-63.
- LIU Junjin,CHEN Haokai,LI Jianhui,et al.Experimental Study on the Stability of Glass Ribs in Full Glass Curtain Wall [J].China Civil Engineering Journal,2018,51(6):54-63.
- [8] 陶照堂,惠存,李永春,等.超高坐地式玻璃肋幕墙系统结构性能和位移能力试验研究[J].建筑结构,2018,48(22):112-115.
- TAO Zhaotang,HUI Cun,LI Yongchun,et al.Experimental Investigation on Structural Performance and Displacement Ability of Ultra High Bottom Supported Glass Fin Curtain Wall System[J].Building Structure,2018,48(22):112-115.
- [9] 曹金章.基于 ANSYS 的单层索网幕墙结构几何非线性有限元分析[J].建设科技,2018(10):8-13.
- CAO Jinzhang.Geometric Nonlinear Finite Element Analysis of Single-layer Cable Curtain Wall Structure Based on ANSYS [J].Construction Science and Technology,2018(10):8-13.
- [10] 单华峰,夏唐代,俞峰,等.下挖桩层桩顶约束对基桩屈曲稳定临界荷载影响分析[J].岩土工程学报,2017,39(增刊2):49-52.
- SHAN Huafeng,XIA Tangdai,YU Feng,et al.Critical Buckling Capacity of Piles with Different Pile-head Constraints for Excavation beneath Existing Foundation[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(Sup2):49-52.
- [11] YANG Y,HUANG J Z,LI X Y.The Effect of the Bolt Spacing on the Performance of the Steel-aluminum Composite Mullions of Curtain Wall[J].Thin-Walled Structures,2017,117:239-246.
- [12] WEN Q,YUE Z,ZHOU M,et al.Research on Out-of-plane Critical Buckling Load of Upper Chord in Half-through Truss Bridge[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2018,46(1):104-109.
- [13] HAN YY,ZHU X,LI T Y,et al.Free Vibration and Elastic Critical Load of Functionally Graded Material Thin Cylindrical Shells under Internal Pressure[J].International Journal of Structural Stability and Dynamics,2018,18(11):1850138.
- [14] 文健,胡娉.基于有限元数值分析的木结构抗震性能分析及其在建筑中的应用[J].地震工程学报,2019,41(3):588-595.
- WEN Jian,HU Ping.Seismic Behavior Analysis of Timber Structures Based on Finite Element Numerical Analysis and Its Application in Buildings[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):588-595.
- [15] 刘丰.支座沉降对幕墙立柱双跨梁模型的影响[J].建筑结构,2017,47(增刊2):162-165.
- LIU Feng.Influence of Support Settlement on Double-span Continuous Beam Model of Curtain Wall Column[J].Building Structure,2017,47(Sup2):62-165.
- [16] 刘射洪,袁聚云,赵昕.软黏土地基沉降的时变效应对超高层建筑结构内力的影响[J].建筑结构学报,2015,36(8):150-157.
- LIU Shehong,YUAN Juyun,ZHAO Xin.Effect of Time-dependent Settlement of Soft Clay Soil on Internal Forces in Super Tall Buildings[J].Journal of Building Structures,2015,36(8):150-157.
- [17] 涂江静,吴红光.龙背湾混凝土面板堆石坝抗震设计[J].水利水电技术,2016,47(8):105-108.
- TU Jiangjing,WU Hongguang.Seismic Design of Longbeiwang Concrete Face Rockfill Dam[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(8):105-108.
- [18] 王立长,邱旭光,李志会,等.桩顶预留沉降间隙提高桩-岩(土)复合地基岩(土)利用率技术[J].建筑结构,2016,46(2):59-64.

WANG Lichang, QIU Xuguang, LI Zhihui, et al. Pile-rock (Soil) Composite Foundation Technology of Improving Base Rock (Soil) Utilization Rate by Reserving Pile-top Settlement Clearance[J]. Building Structure, 2016, 46(2): 59-64.

[19] TOSHIAKI Fujimoto, SHUHEI Oka. 日本现存高层钢管混凝土建筑的结构特性[J]. 建筑结构, 2016, 46(18): 58-61, 70.

TOSHIAKI Fujimoto, SHUHEI Oka. Structural Characteristics of Existing High-rise CFT Buildings in Japan[J]. Building Structure, 2016, 46(18): 58-61, 70.

[20] 刘丰. 支座沉降对幕墙立柱双跨梁模型的影响[J]. 建筑结构, 2017, 47(增刊 2): 162-165.

LIU Feng. Influence of Support Settlement on Double-span Continuous Beam Model of Curtain Wall Column[J]. Building Structure, 2017, 47(Supp2): 162-165.

[21] 黄嘉, 于德顺, 卢黎, 等. 坡顶建筑桩长对岩坡稳定性影响的数值分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(19): 53-58.

HUANG Jia, YU Deshun, LU Li, et al. Numerical Analysis of Pile Length Effect on Rock Slope Stability of Building on Top of Slope[J]. Building Structure, 2017, 47(19): 53-58.

[22] 王凤来. 装配式配筋砌块砌体建筑评价标准研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(12): 24-28.

WANG Fenglai. Research on the Standards for Assessing Prefabricated Reinforced Concrete Masonry Buildings[J]. Building Structure, 2018, 48(12): 24-28.

[23] 王浩, 柯世堂. 基于风洞试验超高层多塔连体建筑风致响应及等效静风荷载研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(21): 103-108.

WANG Hao, KE Shitang. Study on Wind-induced Response and Equivalent Static Wind Loads of Super-tall Multi-tower Connected Building Based on Wind Tunnel Tests[J]. Building Structure, 2018, 48(21): 103-108.

[24] 陈瑜, 关重阳, 马渊程. 某砖混住宅楼裂缝检测与加固建议[J]. 建筑结构, 2015, 45(9): 52-55.

CHEN Yu, GUAN Zhongyang, MA Yuancheng. Crack Detection and Reinforcement Treatment of a Brick-Concrete Structure Residential Building[J]. Building Structure, 2015, 45(9): 52-55.