

钢结构建筑异型节点极限承载特征多尺度非线性数值模拟

Multiscale Nonlinear Numerical Simulation of Ultimate Bearing Characteristics of Special-shaped Joints in Steel Structures

江峰, 苏麒

(中化学交建同安产城融合建设(安庆)有限公司, 安徽 安庆 246000)

摘要: 异型节点作为传递建筑结构内力的枢纽, 满足受力要求是结构安全的重要保证。为了精准还原异型节点的力学特征, 提出钢结构建筑异型节点极限承载特征多尺度非线性数值模拟方法。考虑几何结构、材料属性等因素, 构建钢结构建筑异型节点的非线性有限元模型。模拟异型节点荷载施加过程, 多尺度分析节点的受力机理。从抗剪和抗弯两个方面, 计算异型节点的极限承载力, 输出异型节点的极限承载特征数值模拟结果。结果表明, 与传统数值模拟方法相比, 优化设计方法的极限承载力模拟误差降低了 1.88 N, 本文方法的应用能够有效控制异型节点的失稳概率。

关键词: 钢结构建筑; 异型节点; 极限承载特征; 多尺度模拟; 非线性数值模拟

中图分类号: TU391 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0134-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.023

JIANG Feng, SU Qi

(CNCCC-Tongan City-Industry Integration Construction (Anqing) Co., Ltd., Anqing 246000, China)

Abstract: As the hinge to transfer the internal force of the building structure, the special-shaped joint is an important guarantee for the safety of the structure to meet the stress requirements. In order to accurately restore the mechanical characteristics of special-shaped joints, a multi-scale nonlinear numerical simulation method is proposed for the ultimate bearing characteristics of special-shaped joints in steel structures. Considering geometric structure, material properties and other factors, a nonlinear finite element model of special-shaped joints in steel structure buildings is built. The loading process of special-shaped joints is simulated, and the mechanical mechanism of joints is analyzed at multi-scale. The ultimate bearing capacity of special-shaped joints is calculated from the aspects of shear resistance and bending resistance, and the numerical simulation results of the ultimate bearing characteristics of special-shaped joints are output. The results show that compared with traditional numerical simulation methods, the simulation error of the ultimate bearing capacity of the optimized design method has been reduced by 1.88 N; The application of this method can effectively reduce the probability of instability of irregular nodes.

Keywords: steel structure building; special node; ultimate bearing characteristics; multi scale simulation; nonlinear numerical simulation

作者简介: 江峰 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 建设工程安全管理与风险管理; 建筑业安全文化与安全行为; 建设工程、低碳建筑与绿色施工; 弱形式求积元法的发展与应用。

通信作者: 苏麒 (1987—), 男, 本科, 高级经济师, 主要研究方向: 系统工程学的发展与应用; 企业全面风险管理; 管理系统的建模、优化与仿真; 工程项目管理。

收稿日期: 2023-10-25

0 引言

与传统建筑结构相比, 钢结构具有强度高、塑性韧性好、材质均匀等特点, 被广泛地应用到建筑行业, 逐渐成为主流的建筑工艺^[1]。在钢结构建筑中, 节点不仅是结构受力的一个关键部分, 而且还起到了连接和传递力量的作用。由于各种新型、复杂、大型结构物的出现, 以 K 型节点、Y 型节点、

X 型节点、T 型节点为主体的异型节点在钢结构建筑中的应用范围越来越广泛。然而由于缺少理论与实验的支撑, 建筑设计人员仅限于参考传统的节点和图纸, 无法掌握其在各种荷载情况下的性能, 因而在设计中得出的钢结构建筑存在一定风险。因此开展此类节点的研究工作, 了解其承载特征, 建立合理的分析方法是必要的。

承载力是指地基的强度对建筑物负重的能力, 而极限荷载是结构或构件所能承受的最大的荷载。数值模拟是快速分析钢结构建筑异型节点极限承载特征的技术手段之一, 该技术能够利用计算机、有限元、有限体积等概念, 通过数字计算和图像显示等方式, 来解决工程、物理甚至是自然界中的各种问题。从现阶段节点极限承载特征数值模拟方法的研究与应用情况来看, 现有的数值模拟方法分析的承载特征尺度过于单一, 且存在一定的线性关系, 因此最终得出的数值模拟结果与实际节点之间的承载特征存在较大差异, 为此在传统数值模拟方法的基础上, 从多尺度和非线性两个方面进行优化。

多尺度理论是指在时空尺度上, 通过耦合相关尺度, 探索微观尺度、细观尺度与宏观尺度的相关性。非线性是指变量之间存在曲线、曲面或不确定属性的数学关系。文章引入多尺度与非线性理论, 提出钢结构建筑异型节点极限承载特征数值模拟方法, 以期能够减小节点极限承载特征数值模拟结果与实际特征之间的差异, 间接提高钢结构建筑以及异型节点的稳定程度, 具体方法设计如下。

1 异型节点极限承载特征非线性数值模拟方法设计

1.1 建立钢结构建筑异型节点非线性有限元模型

综合考虑钢结构建筑异型节点的结构、材料等基本属性, 利用有限元软件进行异型节点的多尺度非线性建模。并对有限元模型中的单元类型、网格划分、边界条件进行描述^[2]。以钢结构建筑中的 T 型节点为例, 考虑钢结构建筑物 T 形节点的圆角和交叉焊接, 采用实体单元 SOLID95 对其进行有限元模拟, 以提高模型的实用性和准确性。SOLID95 的三维实体单元可以同时考虑到材料和几何的非线性, 将每个单元通过 15 个节点来定义, 每个节点处有 3 个自由度^[3]。材料的本构关系是结构强度和变形计算所必需的, 是反映物质宏观性质的数学模型。钢

结构建筑 T 型节点本构关系可以表示为:

$$f = \begin{cases} D_0 \delta & \delta \leq \delta_1 \\ -\kappa_A \delta^2 + \kappa_B \delta + \kappa_C & \delta_1 < \delta \leq \delta_2 \\ \psi_q & \delta_2 < \delta \leq \delta_3 \\ \psi_q \left[1 + 0.6 \frac{\delta - \delta_{e3}}{\delta_{e4} - \delta_{e3}} \right] & \delta_3 < \delta \leq \delta_4 \\ 1.6 \psi_q & \delta > \delta_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 和 δ 分别对应的是应力值和应变值; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 和 δ_4 分别表示弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和强化阶段的应变下限值; D_0 为节点的初始刚度; ψ_q 为屈服强度; κ_A 、 κ_B 和 κ_C 为常数系数, 其求解公式为:

$$\begin{cases} \kappa_A = 0.2 \frac{\psi_q}{(\delta_2 - \delta_1)^2} \\ \kappa_B = 0.2 \kappa_A \cdot \delta_3 \\ \kappa_C = 0.8 \psi_q + \kappa_A \delta_1^2 - \kappa_B \delta_1 \end{cases} \quad (2)$$

其具体取值可以表示为:

$$D_0 = \frac{M}{\varphi_e} \quad (3)$$

式中: M 和 φ_e 分别表示弹性弯矩和弹性转角。将式 (2) 和式 (3) 的计算结果代入到式 (1) 中, 即可完成钢结构建筑异型节点材料属性的非线性设置。针对钢结构建筑异型节点的几何结构, 需要对其进行非线性转换, 即在受到力作用后, 结构的几何形状会发生改变, 从而导致结构的响应^[4]。结构的变形主要包括转动、位移和强度刚化, 在一定程度上产生了较大的变形, 从而导致了结构整体刚度的改变。在构建钢结构建筑异型节点的非线性有限元模型中, 必须使用体扫略网格划分, 以求出规则单元。计算网格密度时, 需要考虑计算效率、精度等因素, 在保证计算精度的同时, 寻找具有较少存储空间和较高运算效率的网格密度^[5]。通过结构确定、材料赋值、网格划分等步骤, 完成钢结构建筑异型节点非线性有限元模型的构建, 同理可以得出钢结构建筑中其他节点和构件的模型构建结果。在有限元模拟过程中, 梁、柱、T 型节点、L 型节点等各部件之间, 在相互接触到的部位设置接触对, 以防止互相侵入。设置极限变形失效作为有限元模型的失效准则, 以极限变形对应的轴力作为极限承载力。

1.2 模拟异型节点荷载施加过程

采用单调加载的方法在钢结构建筑异型节点的

建筑结构

非线性有限元模型上模拟荷载的施加过程, 根据钢结构建筑异型节点的几何结构估算荷载大小, 并进行分别加载^[6]。异型节点荷载的加载制度, 如图 1 所示。

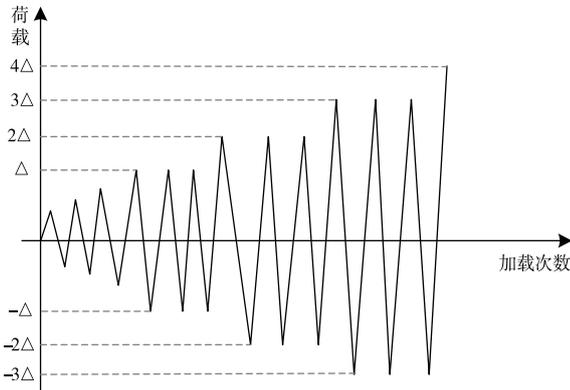


图 1 异型节点荷载施加制度曲线

Fig. 1 System curve of heterogeneous node load application

异型节点荷载的施加过程分为预加载和正式加载两个阶段。预加载是为了保证钢结构建筑异型节点各构件接触良好, 变形达到稳定, 在预加载时, 应按垂直轴力的 50% 进行加载和卸载^[7]。第一段负荷载预载持续 20 min, 余下的各阶段持续 15 min, 当出现损伤时, 应放慢装载速度, 并持续装载, 观察异形节点特征, 直至出现破坏。

1.3 多尺度分析钢结构建筑异型节点受力机理

钢结构建筑异型节点刚开始加载时, 异型节点处于弹性阶段, 接着节点核心区开始屈服, 其余部位仍处于弹性阶段, 随着柱顶位移继续加大, 整个节点核心区都达到屈服, 由于节点域腹板四周约束很强, 极限应力得到很大的强化, 所有承载力可继续增加, 节点位移继续增大, 节点上翼缘达到屈服, 节点顶位移再继续增加, 节点上翼缘燥缝与母材相交处开裂破坏, 承载力突降, 试件破坏, 此时节点域腹板仍然没有发生破坏^[8]。钢结构建筑异型节点的多尺度受力情况如图 2 所示。

钢结构建筑异型节点的受力情况可以量化表示为:

$$M_{\text{curved}} = (F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2) \cdot \frac{D}{2} \quad (4)$$

式中: M 为异型节点的等效弯矩; θ_1 和 θ_2 为 F_1 和 F_2 在水平和垂直方向上的夹角; D 为剪力值; F_1 和 F_2 分别为节点的横向力和竖向力, 其中 F_2 的计算公式为:

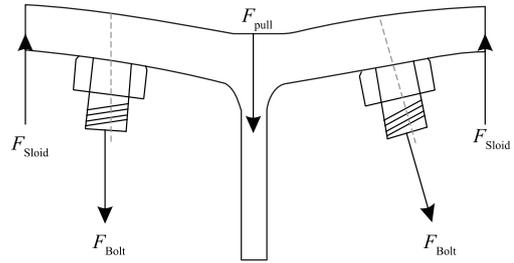


图 2 钢结构建筑异型节点多尺度受力分析图

Fig. 2 Multi-scale force analysis diagram of special-type nodes in steel structure buildings

$$F_2 = F_{\text{Bolt}} - F_{\text{pull}} + F_{\text{Skid}} \quad (5)$$

式中: F_{Bolt} 、 F_{pull} 和 F_{Skid} 分别为螺栓力、拉力和撬力。在异型节点的荷载施加作用下, 横向力和竖向力的值逐渐增加, 致使异型节点的弯矩增加, 根据式 (1) 表示的节点材料应力与应变的关系, 即可得出任意荷载下钢结构建筑异型节点的实际受力情况^[9]。当异型节点受力达到设置的极限变形失效准则时, 钢结构建筑异型节点处于破坏状态, 钢结构建筑的破坏过程大致可分为三个破坏阶段: 弹性阶段、屈服阶段、强化破坏阶段。

1.4 计算异型节点极限承载力

结合钢结构建筑异型节点受力机理的多尺度分析结果, 可以求得异型节点裂缝出现时的施加荷载为节点的抗剪极限承载力:

$$F_{\text{crack}} = \sigma \sqrt{f_{\text{pull}}^2 + f_{\text{pull}} F_s + f_{\text{pull}} F_l + F_s F_l} \quad (6)$$

式中: σ 为承载力综合影响系数; f_{pull} 为钢结构建筑异型节点荷载强度标准值; F_s 和 F_l 分别为与异型节点相连的上柱轴压力和梁端轴压力传来的正应力^[10]。同理可以计算出异型节点抗弯极限承载力的计算结果为:

$$F_{\text{curved}} = w_j h_j M_{\text{curved}} \cos \varphi \quad (7)$$

式中: w_j 和 h_j 分别为节点有效受力宽度和高度; M_{curved} 为节点弯矩; φ 为荷载与异型节点之间的夹角。最终对抗剪极限承载力和抗弯极限承载力进行融合, 得出异型节点极限承载力的计算结果。

1.5 实现异型节点极限承载特征多尺度非线性数值模拟

以钢结构建筑异型节点非线性有限元模型为研究对象, 通过异型节点荷载的施加, 计算不同应力荷载下的承载力, 从而得出异型节点极限承载特征的多尺度数值模拟结果, 如图 3 所示。

按照上述方式可以得出 K 型、Y 型、X 型等异

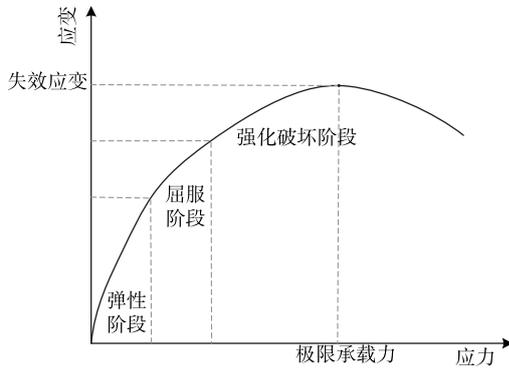


图3 异型节点极限承载特征曲线

Fig. 3 Limit bearing characteristic curve of heterogeneous nodes

型节点的特征分析结果，并以极限承载特征曲线的方式进行可视化输出。

2 模拟方法验证与应用测试

为了验证钢结构建筑异型节点极限承载特征多尺度非线性数值模拟方法是否能够反映节点的实际极限承载特征，测试数值模拟方法在节点改装工作中的应用价值，设计模拟方法验证与应用测试实验。由于数值模拟实验应用了非线性有限元模型，因此需要选择 ABAQUS 作为有限元软件。ABAQUS 由于其材料的本构模型和易于操作的人机交互特性，能够对各种复杂的非线性问题进行建模。ABAQUS 拥有大量的单元和材料模组，能够模拟大部分典型的工程材料，包括金属、阻尼器、复合材料、聚合物和钢筋混凝土^[11]。为了保证计算精度，ABAQUS 可以自行选择并不断地调节收敛标准和加载增量。

2.1 选取钢结构建筑异型节点试件

此次实验选择的异型节点试件来自某高层钢结构住宅实际工程，该建筑共 23 层，三层以上采用框筒-支撑结构。钢结构建筑使用的钢材强度等级为 Q235 钢，厚度为 8 mm。选择钢结构建筑中的 T 型节点和 L 型节点作为实验试件，其中 T 型节点的形状结构如图 4 所示。

准备的 T 型节点试件分别与规格为 $\phi 25$ 和 $\phi 30$ 的连接件相连，连接件的管径分别为 25 mm 和 30 mm，连接件长度均为 200 mm^[12]。按照上述方式对钢结构建筑中的 L 型节点试件进行配置，得出实验试件的制作结果。

2.2 布设极限承载力测点

在有限元分析的基础上，根据荷载的施加位置

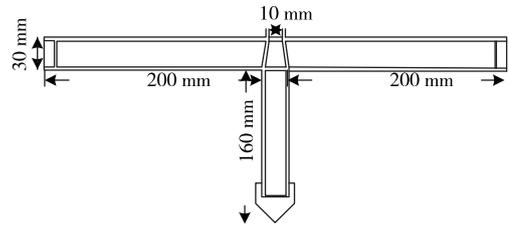


图4 T型节点的形状结构图

Fig. 4 Shape and structure diagram of type T nodes

以及异型节点的受力机理，将测点布置在节点应力集中的部位。在保证任意两个测点之间的间距不高于 400 mm 的前提下，T 型节点试件上布设的测点数量为 30 个，L 型节点上的测点数量为 25 个。在各个测点位置上安装应力-应变感应元件，尽量保证选择的元件尺寸不高于 30 mm，减少外界感应误差，从而得出较为精准的测试数据。

2.3 准备加载装置

准备 200 t 千斤顶作为钢结构建筑异型节点试件的加载装置，将异型节点试件放置于地面，节点的连接件两端由螺杆与地面相连，末端由三角形支承水平顶住，以防止滑动。首先采用水平安装的千斤顶对节点进行预荷，以保证试样不会出现横向滑移。再利用垂直布置的起重装置，对异形节点进行轴向拉力、压力、卸荷；然后利用千斤顶将水平推力作用于节点，直到节点破坏为止。

2.4 确定实验内容与量测指标

根据模拟方法测试实验目的，设置极限承载力模拟误差作为判断数值模拟结果是否与节点的实际极限承载力一致的测试指标，其数值结果为：

$$\varepsilon_F = |F_{\text{limit, simulation}} - F_{\text{limit, Measured}}| \quad (8)$$

式中： $F_{\text{limit, simulation}}$ 和 $F_{\text{limit, Measured}}$ 分别表示异型节点极限承载力的模拟值和实测值，其中变量 $F_{\text{limit, simulation}}$ 可通过数值模拟方法直接输出， $F_{\text{limit, Measured}}$ 为节点初始破坏状态下对应的荷载施加量，可通过测点位置上安装的应力感应元件直接测试得出。为保证设计的数值模拟方法能够准确地反映出异型节点的实际承载特征，极限承载力模拟误差越高证明对应数值模拟方法的准确性越高。另外，为了测试设计的数值模拟方法在钢结构建筑施工与管理中的应用价值，设置节点失稳概率指标，该指标的测试结果如下：

$$\mu = \frac{F_{\text{exert}}}{F_{\text{limit}} \cdot \kappa_g} \times 100\% \quad (9)$$

建筑结构

式中： F_{exert} 、 F_{limit} 和 κ_g 分别为异型节点实际荷载、极限承载量和异型节点的刚性参数。计算得出 μ 的值越小，说明对应数值模拟方法的应用价值越高。

2.5 实验过程与结果分析

通过异型节点的加载操作与相关数据的读取，得出钢结构建筑异型节点极限承载特征的实测值。根据异型节点试件的结构、尺寸建立对应的非线性有限元模型，经过受力分析、加载模拟等步骤，得出节点极限承载特征的多尺度非线性数值模拟结果，如图 5 所示。

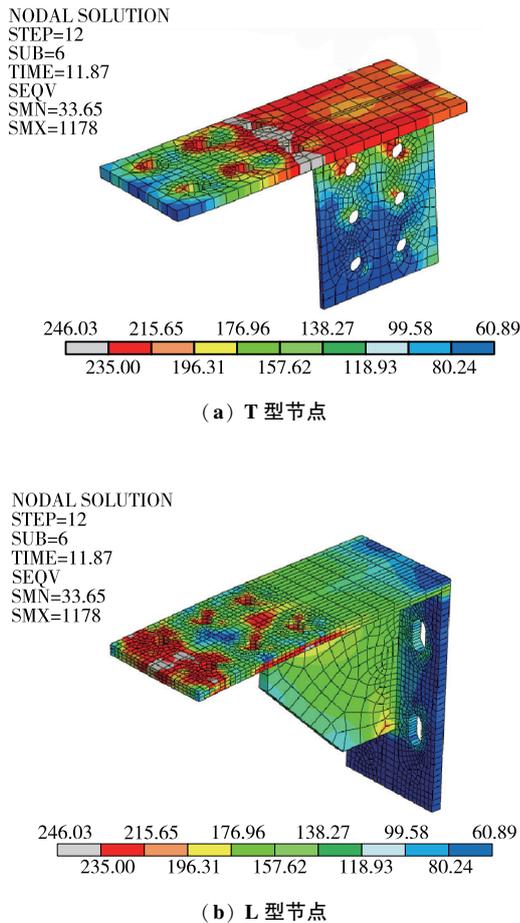


图 5 异型节点极限承载特征数值模拟结果
Fig. 5 Numerical simulation results of the limit bearing features of heterogeneous nodes

为了体现出优化设计方法在模拟精度和应用性能两个方面的优势，实验中设置基于内聚力模型的多尺度数值模拟方法和基于随机骨料模型的多尺度数值模拟方法作为实验的对比方法，按照上述流程得出对应的模拟分析结果。通过相关数据的统计，得出极限承载力模拟误差的测试结果，见表 1。

表 1 异型节点极限承载力模拟误差测试数据表
Table 1 Simulation error testdata table of the ultimate bearing capacity of non-type nodes

测点编号	异型节点极限承载力实测值/N	基于内聚力模型的多尺度数值模拟方法模拟值/N	基于随机骨料模型的多尺度数值模拟方法模拟值/N	异型节点极限承载特征多尺度非线性数值模拟方法模拟值/N
1	194	191.6	192.1	193.6
2	152	149.2	150.4	151.8
3	188	185.8	186.2	187.7
4	170	167.3	168.3	169.5
5	134	131.6	131.5	133.9
6	192	189.4	190.2	191.6

将表 1 的数据代入到式 (8) 中，计算得出极限承载力平均模拟误差分别为 2.52、1.88 和 0.32 N。根据输出的极限承载特征数值模拟结果，对异型节点的结构和材质进行加固调整，然后对节点的相关性能数据进行重新度量，经过式 (9) 的计算，得出数值模拟方法应用状态下，节点失稳概率的测试对比结果，如图 6 所示。

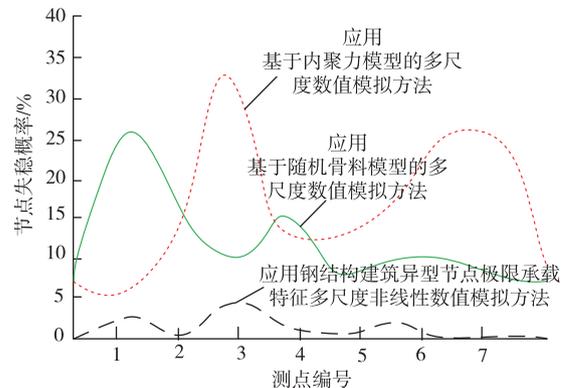


图 6 极限承载特征数值模拟方法应用性能测试对比曲线
Fig. 6 Comparcurve of numerical simulation method of limit carrying features

从图 6 中可以直观的看出，与对比方法相比，应用设计数值模拟方法的失稳概率更低，且能够将节点的失稳概率控制在 5% 以下，由此证明优化设计数值模拟方法具有更高的应用性能。

3 结束语

与标准节点相比，在钢结构建筑中异型节点的适应度更高，节点连接件的数量不固定，因此被广泛应用到建筑工程中。然而异型节点比标准节点承受的荷载更大、受力形式更为复杂，因此异型节点的风险系数也更高。为此，本文优化设计了钢结构

建筑异型节点极限承载特征多尺度非线性数值模拟方法, 实验结果表明该方法能够最大程度还原出异型节点的实际力学特征, 对于节点维护具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 周耀彬, 杜小艺, 付波, 等. 罕遇地震作用下某超限钢结构建筑转换桁架复杂节点有限元分析 [J]. 结构工程师, 2022, 38 (1): 195-202.
- [2] 陈红磊, 陈琛, 李国强. 模块化建筑钢结构模块间新型节点及其承载性能 [J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24 (4): 15-23.
- [3] 乔海洋, 兰涛, 丁敏, 等. 钢结构温室大棚夹箍 T 形节点极限承载力研究 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (3): 115-120.
- [4] 宋玉华. 高层建筑钢结构梁柱节点的冲击荷载性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43 (3): 43-46.
- [5] 王小安, 王明亮, 秦鹏飞. 面向高承载力需求的超高层建

筑施工临时钢结构支撑体系研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (12): 109-114, 126.

- [6] 谭杰, 舒兴平, 张再华. 新型榫卯钢结构梁柱边节点承载力试验及有限元分析 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (2): 50-56.
- [7] 杨昕光, 李吉娃, 徐海翔, 等. 安全壳结构内压极限承载能力分析 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (12): 74-78.
- [8] 盛鹰, 贾彬, 王汝恒, 等. 基于内聚力模型的复合裂纹耦合扩展多尺度数值模拟研究与实验验证 [J]. 材料导报, 2022, 36 (4): 199-208.
- [9] 谢家冲, 王金昌, 林志军, 等. 弥散裂缝模型在盾构管片非线性数值模拟中的适用性分析 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (9): 30-35, 40.
- [10] 赵杨, 郭玉荣. 基于随机骨料模型的钢筋混凝土柱多尺度数值模拟 [J]. 公路工程, 2020, 45 (4): 74-78, 91.
- [11] 陆近涛. 建筑用钢结构梁柱节点受力分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43 (6): 102-105.
- [12] 杨智皓, 路晓辉, 兰箭, 等. 环件轧制多尺度数值模拟研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 1-12.

(上接第 112 页)

参 考 文 献

- [1] 燕永平. 软岩地区双隧道开挖的应力应变特征及动力响应研究 [J]. 铁道建筑技术, 2022 (7): 106-110.
- [2] 康跃明. 高地应力双隧道施工围岩应力变化规律数值模拟研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44 (6): 272-278.
- [3] 孟宪聪, 张谢东, 武林, 等. 列车作用下双隧道轨枕与衬砌的动力响应分析 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (3): 99-106.
- [4] 孙纬宇, 严松宏, 汪精河, 等. SV 波不同角度入射下近接双隧道的地震响应分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2019, 49 (5): 956-963.
- [5] 李延涛, 胡国星, 宗金辉, 等. 地下水条件下平行双隧道对场地地震反应影响的分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (17): 280-286.
- [6] 李文新, 林岱. 基于 FLAC 3D 对某双隧道地压及围岩破坏分析 [J]. 矿冶, 2017, 26 (4): 27-30.
- [7] 马少坤, 邵羽, 刘莹, 等. 不同埋深盾构双隧道及开挖顺

序对临近管线的影响研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (9): 2487-2495.

- [8] 梁建文, 于军港, 张季, 等. 基于黏弹性边界的地铁双隧道地震响应分析 [J]. 土木工程学报, 2014, 47 (S1): 274-279.
- [9] 朱合华, 蔡武强, 梁文灏. GZZ 岩体强度三维分析理论与深埋隧道应力控制设计分析方法 [J/OL]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (1) 1-27.
- [10] 张琳, 邱琼, 薛子斌, 等. 新建隧道施工引起下卧既有隧道结构位移变化规律研究 [J]. 北方交通, 2022 (9): 71-74.
- [11] 吉彪. 矿井采空区地表塌陷的机理分析 [J]. 山西能源学院学报, 2018, 31 (5): 1-3, 6.
- [12] GAO J, HE T, HUO Y, et al. Comparison of Modified Mohr-Coulomb Model and Bai-Wierzbicki Model for Constructing 3D Ductile Fracture Envelope of AA6063 [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34 (2): 233-245.