

文章编号: 0258-0926(2019)05-0140-06; doi:10.13832/j.jnpe.2019.05.0140

基于 Octree-SBFEM 跨尺度模型的大型商用飞机 撞击核电厂的精细化损伤演化分析

邹德高^{1,2}, 隋 翊^{1,2}, 陈 楷^{1,2}, 潘 蓉³, 熊京川⁴

1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连, 116024; 2. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁大连, 116024;
3. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082; 4. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518000

摘要: 采用比例边界多面体有限元分析方法, 结合八分树网格离散技术, 开展了第三代核电厂在大型商用客机撞击下屏蔽厂房的损伤演化分析, 讨论了基础效应、撞击区域形状选取和结构-地基相互作用的影响。结果表明: 比例边界多面体有限元分析方法具有极强的网格离散能力、单元质量高, 且对模型修改有极高的适应性, 与传统方案相比, 效率可提高几十倍; 精细化模型更准确地模拟了损伤演化与渐进破坏过程; 飞机撞击核岛分析中的基础效应及结构-地基相互作用 (SSI 效应) 在非岩性地基时不可忽略。

关键词: 八分树; 比例边界有限元; 塑性损伤; AP1000; 飞机撞击; 结构-地基相互作用

中图分类号: TL37 **文献标志码:** A

Cross-Scale Refined Damage Evolution Analysis of Impact of Large Commercial Aircraft on a Reactor Building Based on Octree-SBFEM

Zou Degao^{1,2}, Sui Yi^{1,2}, Chen Kai^{1,2}, Pan Rong³, Xiong Jingchuan⁴

1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024, China;
3. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100082, China;
4. China Nuclear Power Design Co. Ltd. (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518000

Abstract: Combined with the scaled boundary polyhedron finite element analysis method, this paper firstly applies the Octree Technique to the nuclear engineering. The refined damage evolution analysis of large commercial aircraft crashing into Generation III+ nuclear power plants is developed. Meanwhile, the influence of foundation effect, shape of impact region chosen and SSI effect is discussed. The results indicate that the cross-scale refined analysis method is with extremely strong capability of discrete grid, high quality and little quantity of element. Furthermore, the method is highly flexible for the model modification; the refined FEM model simulates more accurately the damage evolution and gradually destruction process; the structure-soil interaction (SSI) effect in the analysis of the aircraft impact on nuclear islands cannot be ignored in non-lithology foundation.

Key words: Octree, Scaled boundary finite element, Plastic damage, AP1000, Aircraft impact, Structure-soil interaction

0 引 言

飞机撞击核电厂一直以来被认为是一种超设计基准事件。2009 年美国核管理委员会 (NRC)

颁布的联邦法规 10CFR 50.150^[1]、中国国家核安全局于 2016 年颁布的新版 HAF 102—2016《核动力厂设计安全规定》^[2]都增加了商用飞机的恶意

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2018-10-21

基金项目: 地震行业科研专项经费项目 (No. 201208013), 国家科技重大专项资助项目 (2011zx06002010-7)

作者简介: 邹德高 (1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高坝和核电厂工程抗震、岩土工程数值分析方法、岩土材料力学特性和本构模型等方面的研究

撞击评估要求。

荷载时程分析法 (FTHA) 与弹靶耦合分析法 (MTIA) 是数值模拟的主要方法。根据弹、靶特性的不同, 又可分为“硬冲击”和“软冲击”^[3]。Riera^[4]指出在“软冲击”条件下, 飞机高速碰撞时的冲击力可表达为对应的荷载时程曲线。程书剑等学者^[5-7]采用 MTIA 验证了 FTHA 的可行性; Zhang T^[8]应用 MTIA 展现了撞击简化后的岭澳核电站屏蔽厂房客机的破碎过程并将撞击力时程曲线与 FTHA 的结果进行了对比; 李亮^[9]通过 FTHA 比较了不同机型对我国某三代堆型撞击后, 安全壳整体变形及钢筋塑性应变的结果; 林峰^[10]结合 FTHA 分析了 AP1000 核电厂不同高度被飞机撞击后的屏蔽厂房最大变形。

研究表明, 精细化模型和细尺度单元能更准确地反映结构破坏过程与失效规律, 也是工程灾变模拟的必然趋势^[11-12]。但核电厂结构复杂, 传统网格离散需大量的几何操作, 人工成本巨大, 且难以优化和修改。此外, 均匀细尺度离散方案^[13]一方面将生成巨量网格, 弹塑性分析难以进行; 另一方面, 选择性的几何简化则会造成不可预估的潜在影响。

本文结合比例边界多面体有限元分析方法, 将八分树 (Octree) 网格离散技术应用于最新的第三代核电厂 AP1000 的精细化损伤演化分析。讨论了荷载时程分析法中撞击区形状的选取、基础效应及结构-地基相互作用 (SSI 效应) 对飞机撞击结果的影响。

1 计算模型和材料参数

本文计算采用大连理工大学工程抗震研究所自主研发的高性能计算软件系统 GEODYNA^[14]。

1.1 AP1000 核电厂计算参数

第三代核电厂 AP1000 结构复杂, 核岛厂房结构包括屏蔽厂房、钢制安全壳和内部结构 (图 1)。屏蔽厂房上部侧面设置的空气通风口, 使内外部空气交换以实现降温的目的, 是非能动安全系统的一部分。屏蔽厂房钢筋混凝土墙厚度 0.914 m, 上部通过锥形顶与顶部重力水箱连接。钢制安全壳为一独立支撑的圆柱体外壳容器, 直径为 39.6 m, 高度为 65.65 m, 其中壁厚约为 44.5 mm,

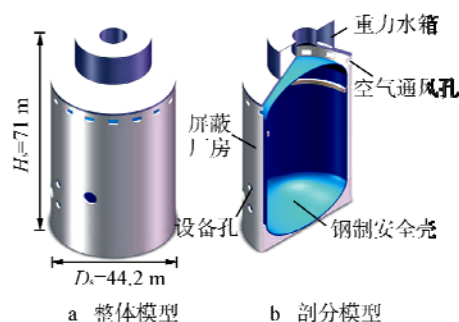


图 1 AP1000 反应堆厂房模型

Fig. 1 Reactor Building of AP1000 Model

上部与下部为椭圆形, 上部壁厚约为 41.3 mm, 下部壁厚约为 47.6 mm, 与屏蔽厂房之间间距为 1.37 m。核岛厂房结构共同固定在约 1.8 m 厚的钢筋混凝土底板上。

混凝土采用塑性损伤模型^[15], 密度为 2400 kg/m³, 剪切模量为 32.5 GPa, 泊松比为 0.2, (极限) 压缩强度为 27.6 MPa, (极限) 拉伸强度为 3.26 MPa。

1.2 基于 Octree-SBFEM 跨尺度有限元模型

结合比例边界多面体有限元与八分树技术的 Octree-SBFEM 方法, 突破了传统数值方法对单元形状的限制^[16-23]。灵活自由且形式多样的八分树单元, 可处理任意复杂的多面体, 使得跨尺度过渡可高效平稳地实现, 同时生成的有限元网格自动化程度更高, 如图 2 所示。

Octree-SBFEM 跨尺度有限元模型的建立: ①建立核岛厂房数值体模型; ②按照材料或装配体的不同进行分割, 形成分割体模型; ③设定每部分的单元尺度, 完成网格离散。

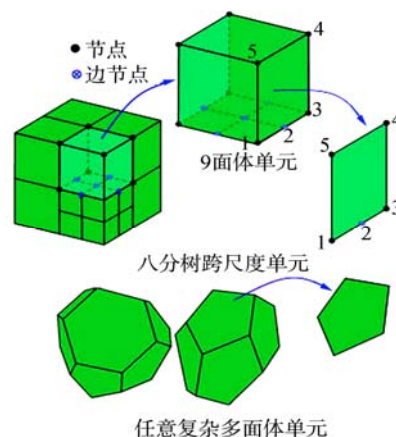


图 2 比例边界多面体单元

Fig. 2 Scaled Boundary Finite Element

图3展示了计算模型的有限元网格, 撞击区及过渡区单元尺寸为80~250 mm, 其余装配体单元尺寸为800~1000 mm, 装配体单元尺寸跨度达到10倍, 且离散过程无需人工干预, 可快速完成(90万自由度模型离散时间仅为102 s)。反应堆厂房的空气通风孔、设备孔和椭圆基础等结构细节, 都实现了高质量的网格离散。

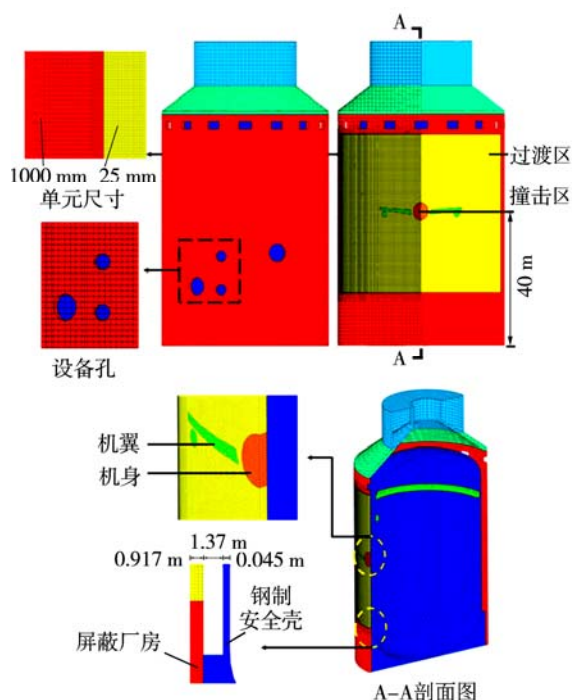


图3 计算模型的有限元网格

Fig. 3 Finite Element Mesh of Calculation Model
0.917、1.37 和 0.045 m 分别为屏蔽厂房厚度、间隙和钢壳厚度

1.3 飞机荷载时程分析

根据国家标准 HAD101/04 《核电厂厂址选择的外部人为事件》中的附录^[2], 选取波音707-320型飞机相对应的荷载-时间函数曲线和撞击面积-时间函数曲线作为计算的输入荷载。

2 撞击区域形状选取

应用荷载时程分析法时, 需确定飞机撞击区形状, 传统的方法是由 Riera(1968)提出的28 m²等效圆形平均面积。此后国内外学者采用荷载时程分析法时, 撞击区形状多使用等效面积方案。

然而将飞机整体的撞击荷载集中到平均面积上, 忽略了机翼、发动机等的二次射物特点, 可能会使撞击过程与实际有极大的差别。也有在完成网格离散的模型表面, 近似地选取与飞机投

影形状相似的区域, 但其形状受网格尺寸的影响较大。

本文基于 Octree-SBFEM 跨尺度模型, 可将飞机真实投影形状一同参与网格离散, 简便快捷地实现了撞击区域形状的精准确定。为对比2种方案的差异, 分别建立“投影面积”和“平均面积”模型的2种工况, 图4为两者的分割体模型。撞击区与过渡区单元尺寸均为250 mm × 250 mm × 250 mm。其中图4b等效平均面积取28 m², 撞击高度均为屏蔽厂房中间位置, 即距底板40 m位置。图5为撞击后屏蔽厂房损伤区域分布, 观察到损伤范围与程度有明显的不同: “投影面积”中, 机翼两侧出现连续损伤区, 并向结构下方扩展, 同时发动机下方也出现了斜向下的长条形损伤区域; 而“平均面积”只观察到了撞击区两侧的损伤扩展, 由于机身与机翼荷载的集中施加, 造成的损伤程度明显地加深。在0.4 s的撞击过程中, 取出3个关键时刻, 每个时刻的对比结果见图6。对比结果表明: “平均面积”模型无法得到真实准确的屏蔽厂房损伤演化结果, 所以在采用荷载时程分析法时, 撞击区域形状应由飞机实际投影面积确定。

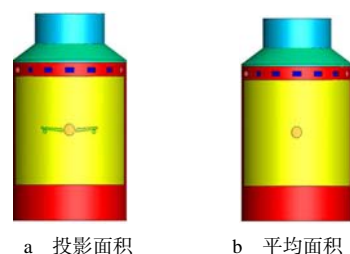


图4 撞击区面积不同形状模型

Fig. 4 Different Area Shape of Impact Region Models

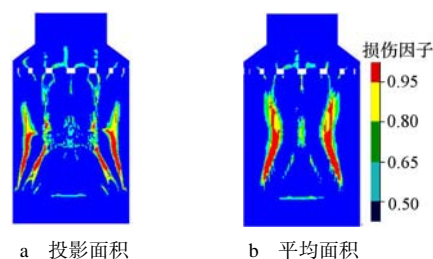


图5 撞击区面积不同形状模型对应的损伤区域
Fig. 5 Damage Region for Different Area Shape of Impact Region Models

注: 此图图例适用于图6、图8、图11、图12

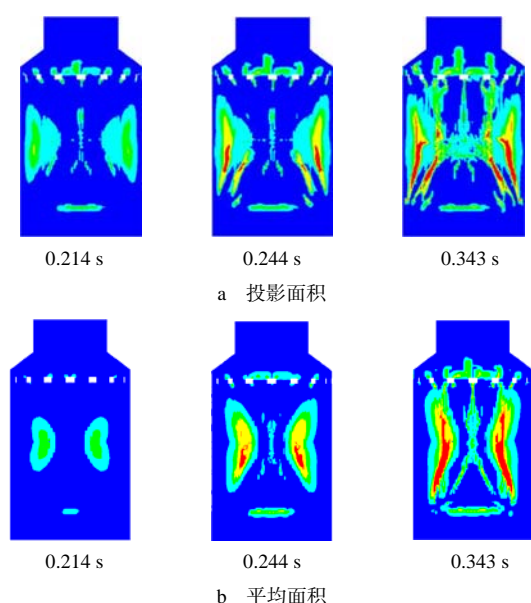


图 6 损伤演化过程的时刻图（不同形状）
Fig. 6 Time Chart for Damage Evolution Process (Different Shapes)

3 基础结构对损伤演化的影响

固定在钢筋混凝土底板上的基础结构是钢制安全壳与屏蔽厂房的连接纽带（图 7），但因统一建模、网格剖分的过程较为复杂，往往在研究中予以忽略，但其影响却不得而知。

由于基础结构对于反应堆厂房的整体刚度有着显著影响，故需要对“无基础结构”工况做详细分析。图 8 为“考虑基础结构”和“无基础结构”对比结果。当不考虑基础结构时，屏蔽厂房下部刚度减弱，使“变软”的屏蔽厂房受到撞击后，机翼两侧与发动机下部的两部分对屏蔽厂房撞击后的损伤扩展区域出现了明显的减弱。与此同时，“无基础结构”模型屏蔽厂房最下方损伤位置发生了改变，在与底板交界处产生，且程度显著加深。

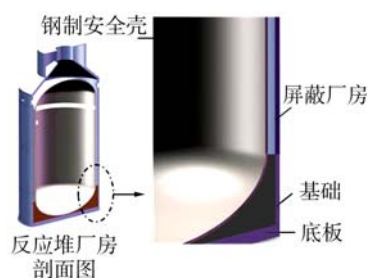


图 7 基础结构示意图
Fig. 7 Schematic Diagram of Foundation

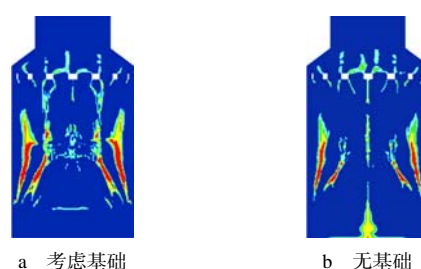


图 8 基础结构对屏蔽厂房损伤结果的影响
Fig. 8 Effect of Foundation on Damage Evolution of Shield Building

4 飞机撞击核岛反应堆厂房分析中 SSI 效应

在核电站工程的抗震研究中，特别是非岩性地基时，必须要考虑 SSI 效应对核电厂动力响应的影响^[24]。然而在飞机撞击核电厂的研究中，由于反应堆厂房复杂的结构形式和繁琐的网格剖分，以往分析过程中一般均忽略了地基，但如此简化的影响是无法预料的。

为充分讨论 SSI 效应的影响，结合 Octree-SBFEM 跨尺度模型，建立了完整的核岛反应堆厂房-地基整体模型（图 9）。根据波动传播理论^[25]，地基土体单元尺寸确定为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ，最终均质地基在水平方向尺寸为 $240\text{ m} \times 240\text{ m}$ ，竖直方向为 68 m 。同时，为模拟地基的半无限域特征，保证散射波可透过边界向无限域传播，在地基四周及底面施加粘弹性人工边界界面单元^[26-27]。AP1000 标准设计中考虑到 6 种地基土类型^[28]，根据行业规范^[29-30]、相关研究资料^[31-32]及实际工程报告等，相应选取 5 种满足要求的地基材料，见表 1。

图 10 为“刚性地基”、“岩性地基 1”和“岩性地基 3”屏蔽厂房损伤区域分布的对比情况：损伤因子在 0.95 以上的区域中，机翼两侧面积分别为 28.7 、 29.1 、 29.9 m^2 ；发动机下方表

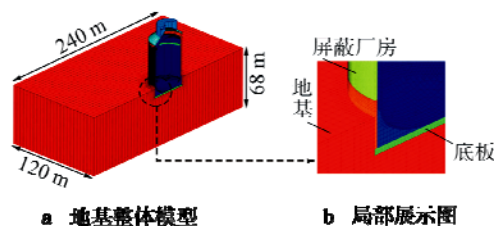


图 9 反应堆厂房与地基整体模型及局部展示图
Fig. 9 Integrated Reactor Building-Soil Model and Local Display of Integrated Model

表1 地基土特征参数

Table 1 Parameters of Foundation Soil

地基类型	岩性 1	岩性 2	岩性 3	非岩性 1	非岩性 2
剪切波速 /m·s ⁻¹	2000	1000	700	400	330
弹性模量 /10 ³ MPa	24.5	6.17	2.97	0.862	0.552
剪切模量 /10 ³ MPa	10.2	2.45	1.15	0.327	0.209
密度 /kg·m ⁻³	2551	2449	2347	2041	1918
泊松比	0.20	0.26	0.29	0.32	0.32

面则分别为 13.2、13.5、13.9 m²。故可认为当地基为岩性时，可不考虑飞机撞击核岛反应堆厂房分析中的 SSI 效应。

图 11 为“刚性地基”和“非岩性地基 2”屏蔽厂房损伤区域分布的对比情况：“非岩性地基 2”的损伤规律出现了显著变化，机翼两侧损伤出现了向上发展的趋势，同时发动机下部损伤进一步减弱。其中损伤因子在 0.95 以上的区域中，机翼两侧表面积分别为 28.7、36.2 m²；发动机下方表面积则分别为 13.1、8.5 m²。在 0.4 s 的撞击过程中，取出 3 个关键时刻，不同时刻“刚性地基”、“岩性地基 3”和“非岩性地基 2”屏蔽厂房损伤区域分布的对比结果见图 12。结果表明：飞机撞击核岛反应堆厂房分析中的 SSI 效应在非岩性地

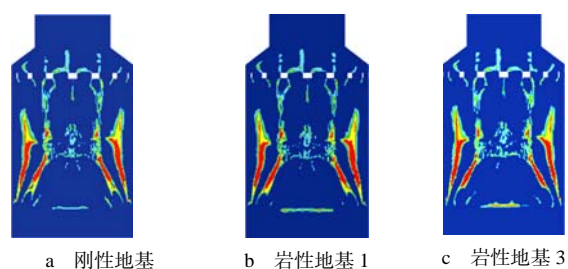


图 10 岩性地基模型拉损伤区域
Fig. 10 Damage Region of Rock Foundation Model

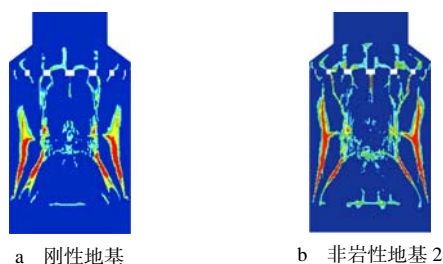


图 11 非岩性地基模型拉损伤区域
Fig. 11 Damage Region of Non-Rock Foundation Model

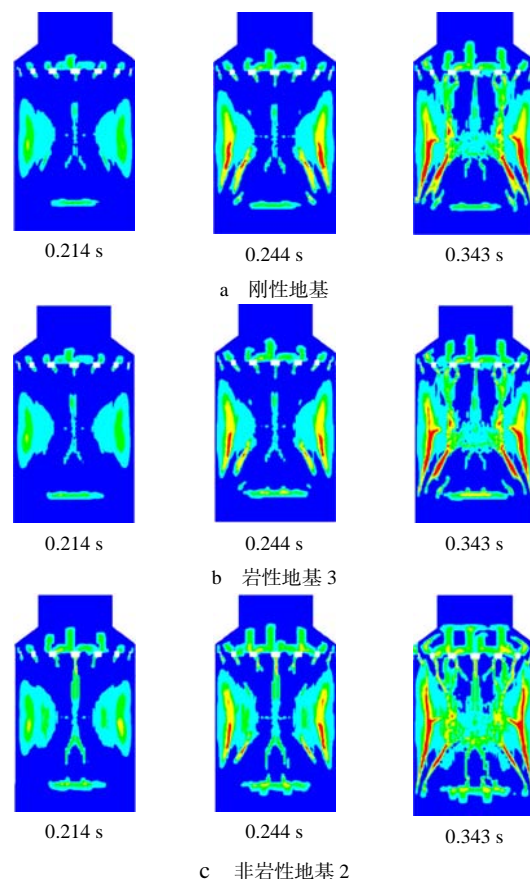


图 12 损伤演化过程的时刻图（不同地基）
Fig. 12 Time Chart of Damage Evolution Process (Different Foundations)

基时不可忽略。

5 结 论

(1) 跨尺度精细化技术具有极强的网格离散和计算能力，所建立的核岛反应堆厂房和地基模型单元质高量少，且对模型修改有极高的适应性，与传统的前处理方案相比，效率可提高几十倍。

(2) 应采用飞机实际投影面积考虑飞机撞击荷载施加区域，以保证结构变形和塑性损伤演化的准确性；当不考虑内部结构的建立时，基础结构不能一并省缺，否则会造成计算结果的失真。

(3) 岩性地基时，可不考虑 SSI 效应的影响，非岩性地基情况下，不可忽略飞机撞击核岛反应堆厂房分析中的 SSI 效应。

跨尺度精细化网格剖分和计算技术使得进一步研究飞机撞击造成振动对核电厂内部结构、系统及设备的影响成为可能。同时亦可为核电厂在

遭遇极端灾难情况下的安全评价方面工作提供强有力的技术支持。

参考文献：

- [1] United States Nuclear Regulatory Commission. Aircraft impact assessment: 10CFR50.150 [S]. Washington, D.C: US Nuclear Regulatory Commission, 2009.
- [2] 中华人民共和国国家核安全局. 核电厂厂址选择的外部人为事件: HAD101/04. [S]. 北京: 中国法制出版社, 1989.
- [3] KOECHLIN P, POTAPOV S. Specificity of aircraft crash compared to other missile impacts [C]//American society of mechanical engineers. Proceedings of the 6th international conference on nuclear engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 1-7.
- [4] RIERA J D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces [J]. Nuclear Engineering and Design, 1968, 8(4): 415-426.
- [5] 程书剑, 王晓雯, 葛鸿辉, 等. AP1000 钢筋混凝土屏蔽厂房抗大型商用飞机撞击分析[J]. 核动力工程, 2015, 36(05): 140-143.
- [6] LEE K, JUNG J W, HONG J W. Advanced aircraft analysis of an F-4 Phantom on a reinforced concrete building[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 273: 505.
- [7] SIEFERT A, HENKEL F O. Nonlinear analysis of commercial aircraft impact on a reactor building—Comparison between integral and decoupled crash simulation [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 269: 130-135.
- [8] ZHANG T, WU H, FANG Q, GONG Z.M. Influences of nuclear containment radius on the aircraft impact force based on the Riera function [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 293: 196-204.
- [9] 李亮, 潘蓉, 朱秀云, 等. 基于荷载时程分析法的飞机撞击反应堆安全壳的对比研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(09): 17-21.
- [10] LIN F, TANG H. Nuclear containment structure subjected to commercial aircraft crash and subsequent vibrations and fire [J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 322: 68-80.
- [11] 陈可洋. 网格剖分及其精度和计算量分析[J]. 内陆地震, 2011, 25(01): 12-20.
- [12] 邹德高, 隋翊, 周扬, 等. 核电厂桥梁结构-地基动力相互作用精细化分析[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(04): 407-413.
- [13] 邹德高, 刘锁, 陈楷, 等. 基于四叉树网格和多边形比例边界有限元方法的岩土工程非线性静动力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 33-40.
- [14] 邹德高, 孔宪京, 徐斌. Geotechnical dynamic nonlinear analysis – GEODYNA 使用说明 [Z]. 大连: 大连理工大学土木水利学院工程抗震研究所. 2003.
- [15] XIANG YU, XIANJING KONG, DEGAO ZOU, et al. Linear elastic and plastic-damage analyses of a concrete cut-off wall constructed in deep overburden[J]. Computers and Geotechnics, 2015 (69) : 46.
- [16] CHEN KAI, ZOU DEGAO, KONG XIANJING. A novel nonlinear solution for the polygon scaled boundary finite element method and its application to geotechnical structures [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 82: 201-210.
- [17] CHEN KAI, ZOU DEGAO, KONG XIANJING. A nonlinear approach for the three-dimensional polyhedron scaled boundary finite element method and its verification using Koyna gravity dam [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 96: 1-12.
- [18] ZOU DEGAO, CHEN KAI, KONG XIANJING. An enhanced octree polyhedral scaled boundary finite element method and its applications in structure analysis [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, 84: 87-107.
- [19] CHEN KAI, ZOU DEGAO, KONG XIANJING. An efficient nonlinear octree SBFEM and its application to complicated geotechnical structures [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 96: 226-245.
- [20] ZOU DEGAO, TENG XIAOWEI, CHEN KAI. An extended polygon scaled boundary finite element method for the nonlinear dynamic analysis of saturated soil [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2018, 91: 150-161.
- [21] CHEN KAI, ZOU DEGAO, KONG XIANJING. Global concurrent cross-scale nonlinear analysis approach of complex CFRD systems considering dynamic impervious panel-rockfill material-foundation interactions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 114: 51-68.
- [22] 陈楷, 邹德高, 孔宪京, 等. 多边形比例边界有限单元非线性化方法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(10): 1996-2004.
- [23] 孔宪京, 陈楷, 邹德高, 等. 一种高效的 FE-PSBFE 耦合方法及在岩土工程弹塑性分析中的应用[J]. 工程力学, 2018, 35(06): 6-14.
- [24] 邹德高, 隋翊, 周晨光, 等. 深厚覆盖层上核岛厂房的动力响应研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 1-5, 27.
- [25] KAUSE E, MANOLIS G. Wave motion in earthquake [M]. Boston: WIT Press, 2000.
- [26] 周晨光. 高土石坝地震波动输入机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [27] 周晨光, 孔宪京, 邹德高, 等. 地震波动输入方法对高土石坝地震反应影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(04): 382-389.
- [28] Westinghouse. AP1000 design control document, Rev. 17[Z]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2009.
- [29] 中国地震局. 核电厂抗震设计规范: GB50267-97[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
- [30] 中国地震局. 工程场地地震安全性评价工作规范: DB001-94 [S]. 北京: 地震出版社, 1994:1-50.
- [31] 侯春林, 李小军, 潘蓉, 等. AP1000 设计地震反应谱在具体厂址评价中的应用[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(7): 1196-1201.
- [32] 李小军, 侯春林, 戴志军, 等. 核岛结构设计地基场地及计算基底效应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36 (8): 2201-2208.

(责任编辑: 张明军)