

近场地震作用下核安全壳非线性 地震响应特性研究

张莉¹,王冬梅¹,肖军²,钱鸿涛²

(1. 中国核电工程有限公司,北京 100840; 2. 生态环境部核与辐射安全中心,北京 150080)

摘要:人类对核能的需求推动了其发展,但核事故频发也凸显了核安全的重要性。地震,特别是近场地震,对核电站等大型建筑的安全构成了严重威胁。传统的核电站地震响应分析多基于地震动垂直入射的假设,然而,近场地震往往以斜入射为主,其影响更为复杂多变。该文通过建立核安全壳及其周围土体的精细模型,并依托三维黏弹簧人工边界法,实现了地震动斜入射的输入模拟。选择不同入射角度的2种典型振动P波和SV波,综合分析核安全壳结构的地震动态反应。研究结果表明,在近场地震作用下,核安全壳的动力响应呈现出更为复杂的特性,而假设地震动垂直入射的方案无法全面揭示上述复杂的破坏模式。这一发现强调近场地震运动形式对核电结构动力响应的显著影响,为同类型工程的抗震设计与优化提供了定量认识与有益的参考。

关键词:核电站;核安全壳;近场地震;斜入射;非线性地震反应

中图分类号:TU312; P315.9

文献标志码:A

Study on the characteristics of the nonlinear seismic response of the nuclear containment structure under near-field seismic action

ZHANG Li¹, WANG Dongmei¹, XIAO Jun², QIAN Hongtao²

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 2. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 150080, China)

Abstract: Humanity's demand for nuclear energy has driven its development, yet the frequent occurrence of nuclear accidents has emphasized the crucial importance of safety. Earthquakes, especially near-field earthquakes, pose a substantial threat to the safety of large structures, such as nuclear power plants. Traditional seismic response analyses of nuclear power plants often depend on the assumption of vertical incidence of input motions. However, near-field earthquakes predominantly exhibit oblique incidence, resulting to more intricate and diverse effects. This paper realizes the simulation of obliquely incident ground motions by using the three-dimensional visco-spring artificial boundary method to build a comprehensive model of the nuclear containment structure and its surrounding soil. Subsequently, two typical input motions—P-waves and SV-waves—are selected and input into the model at varying angles of incidence to conduct an in-depth analysis of the seismic dynamic response of the nuclear containment shell. Based on the research results, it can be observed that the dynamic response of the nuclear containment shell under near-field earthquakes exhibits more complicated characteristics, which cannot be entirely captured by assuming vertical incidence of input motions. This finding emphasizes the significant impact of near-field seismic motion patterns on the dynamic response of nuclear power structures, providing quantitative insights

收稿日期:2024-06-20; 修回日期:2024-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52208191);山西省科学基金项目(202303021211079);山西省留学基金委项目(2023-085)

作者简介:张莉(1988—),女,高级工程师,硕士,主要从事核安全构筑物的抗震分析、地震概率安全分析等方面研究。

E-mail: zhanglib@cnpe.cc

通信作者:钱鸿涛(1981—),男,高级工程师,硕士,主要从事核电厂概率安全分析方面的研究。E-mail: qianhongtao@chinansc.cn

and valuable references for the seismic design and optimization of similar projects.

Key words: nuclear power plant; nuclear containment structure; near-field earthquake; oblique incidence; nonlinear seismic response

0 引言

核能凭借其高效能与环境友好特性,在全球范围内赢得了广泛的认可与推广。积极推动核电事业的进步,对于实现碳中和愿景有着深远的战略意义^[1-3]。回顾过去的30 a,中国的核工业蓬勃发展,众多核电机组纷纷投入商业运营,为地方的建设与繁荣注入了坚实的能源动力。在此过程中,核安全壳结构作为防止放射性物质外泄的最后一道坚固屏障,其在核电站的安全运维中的重要性不言而喻^[4-6]。然而,地震这一频发的自然灾害,时刻威胁着核安全壳结构的安全稳定。自福岛核事故以来,提升核电站的地震安全性能已成为全球范围内亟待正视并着力解决的重大课题。

近年来,众多国内外学者积极采用缩尺试验与数值模拟两者相结合的先进方法,对核安全壳的抗震性能展开了全面而深入的研究。他们利用振动台试验和拟静力试验,对安全壳的缩尺模型进行了细致的探究^[7-12]。两项检测结果均明确指出,安全壳在预设地震的作用下表现出卓越的安全性能,以确保其结构稳固,有效地将放射性物质隔离在外。确保了其结构的稳固性和对放射性物质的有效隔离。与此同时,数值模拟法作为现代科学研究的一项重要手段,在验证实验结果和拓展理论方面展现出了显著优势。在核电结构的抗震研究中,数值模拟法越来越受到人们的关注^[13-15]。它不仅能够精确再现复杂的地震作用过程,为实验结果提供详尽的验证和补充,还能在实验条件受限的情况下,通过构建高精度的数值模型,探索更多极端条件下的结构响应,从而极大地拓宽了研究的视野和深度。

值得注意的是,当前核电结构研究领域普遍采纳了一个简化的假定,即地震动输入主要被视为直接、垂直地作用于建筑物基底的剪切波或压缩波^[16-17]。这一假设植根于物理学中关于波在不同介质间传播的基本原理,鉴于地壳介质的密度自下而上逐渐递增,当地震波从地壳深层向地表传播时,其入射角度会逐渐减小,直至近乎与地面垂直。然而,这种处理方式在很大程度上忽略了地震动输入方向多样性对核电结构地震响应产生的复杂影响。实际上,地震动的传播可能包含多个方向上的振动分量,如水平、垂直乃至斜向分量,这些分量会以各自独特的方式影响结构的动力特性和响应模式^[18-21]。近年来,入射角在建筑地震安全性方面的研究逐渐成为热点,特别是对于具有复杂结构特性的大型或组合结构而言,其空间不一致性更为显著。因此,综合考虑地震波的入射方向不仅有助于我们更深入地理解核电结构的响应特征,还能够为其抗震设计提供更加精确的参考。

本文的核心目标是评估近场地震条件下核安全壳的非线性响应特征。为了实现这一目标,采用了三维黏弹簧人工边界法,成功模拟了斜向射入地震动的场景,构造出一个精细的核安全壳模型及其周边的土体。这一技术打破了传统地震响应分析中地震动仅垂直入射的局限,使研究能够更准确地反映近场地震的实际状况。在此基础上,选取了P波和SV波2种代表性的地震动输入模型,如0°、15°、30°等不同的入射角度,旨在全面探究不同地震动和入射角度对核安全壳动力响应的具体影响。本研究成果在研究同类项的后续问题时,可提供有价值的参考资料。

1 核安全壳有限元模型建立

1.1 核电站安全壳简介

核电站构造的难点在于其核心的核安全壳及其内部错综复杂的构造。核安全壳,作为核电站日常运作中不可或缺的部分,承担着至关重要的安全使命。面对可能超越设计标准的地震威胁,核安全壳展现出卓越的防护性能,如同一道坚不可摧的屏障,有效阻止核电站内部潜在的有害悬浮放射性物质外泄,确保核电站整体的密封性、结构完整性和周边环境的安全。

以某一核电站的典型安全壳圆筒为例,具体结构见图1。安全壳包括圆柱形筒壳、半球形穹顶和环形梁等部分,采用混凝土壳体结构。其圆筒内径为37 m,外径则为38.8 m。圆筒的高度达到49.38 m,而整个容

纳建筑物的总高度为 61.4 m。穹顶的壁厚度为 0.8 m,以确保其结构强度与稳定性。混凝土的弹性模量高达 36 000 MPa,泊松比为 0.2,密度为 2 400 kg/m³,抗拉强度为 2.85 MPa,抗压强度为 40 MPa,符合高强度核安全壳的要求。此外,安全壳内所采用的钢筋材料,其屈服强度为 350 MPa,进一步增强了整体结构的抗震与承载能力。

图 1 中所标出的顶部、穹壳连接处与底部是后文分析地震响应的关键部位。本文运用有限元分析软件 ABAQUS 6.10 进行高保真建模与精细化分析。在进行如此复杂的结构动态分析时,精确的单元类型选择是必不可少的。选用八节点六面体线性全积分单元(即 C3D8 单元),在其优良的数值特性和广泛适用性的基础上,精确模拟混凝土材料的物理性能。

为准确有效地反映地震作用下核安全壳的破坏程度,在数值模型中嵌入可考虑刚性退化的混凝土塑性损伤模型。该模型可以动态模拟混凝土在受力过程中的破坏演化,包括微裂缝的形成、扩大直至宏观破坏,从而更真实地评估近场地震对核安全壳结构安全性的影响。螺纹钢采用假定刚度退化率为 0.01 的双线性恢复力模型。有关材料设定的更多内容可以参考文献[22-23]。假定的核安全壳结构具有 5% 的阻尼比,它被赋予阻尼特性的方法是瑞利阻尼。

固有振动周期或固有频率作为评估结构特性的重要量化指标,对于通过动态分析得出的结果具有关键的指导意义。表 1 列出了前 6 个阶段的自振频率及其对应的核安全壳周期。值得注意的是,该核安全壳的第 1、2 阶自振频率均为 4.92 Hz,这一数据清晰地表明,对其响应特性产生重要影响的结构,在地震的作用下,属于短周期结构的范畴。

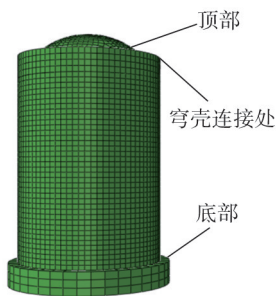


图 1 核安全壳有限元数值模型

Fig. 1 Finite element numerical model of nuclear containment structure

表 1 核安全壳的动力特性参数(前 6 阶自振频率和周期)

Table 1 The first six natural frequencies and corresponding periods of the nuclear containment structure

振型	自振频率/Hz	周期/s
第 1 阶	4.92	0.203
第 2 阶	4.92	0.203
第 3 阶	6.85	0.146
第 4 阶	6.86	0.146
第 5 阶	8.18	0.122
第 6 阶	8.21	0.122

1.2 核安全壳的三维有限元模型

有限元数值模型主要由核安全壳和土层构成,见图 2。为了模拟地震作用下的响应,从无限半空间域中截取了特定的土层结构作为研究范围,其尺寸为 300 m×300 m×90 m。土层的顶面被设定为自由平面。在研究域内,采用 10 m×10 m×10 m 的实体单元进行离散化处理。经过离散化处理后,模型包含 9 610 个节点和 8 100 个六面体单元,黏弹性边界被用于土层底面和周围 4 个边界处的吸收反射波的侧面,这些边界处由弹簧-减震单元共同组成,吸收边界处的反射波。黏弹性边界由弹簧-阻尼单元共同组成,X 向和 Z 向分别代表水平方向和竖直方向^[24]。土层的材料参数见表 2。

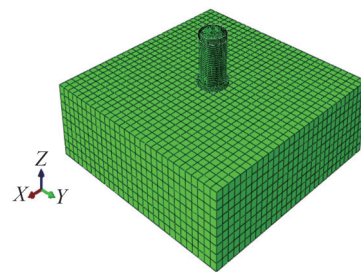


图 2 核安全壳的三维有限元计算模型
(包含核安全壳周边的土体结构)

Fig. 2 Three-dimensional finite element calculation model of the nuclear containment structure (including the soil structure around the nuclear containment structure)

表 2 土层的材料参数

Table 2 Material parameters of soil layer

剪切模量 G /GPa	弹性模量 E /GPa	密度 ρ /(kg/m ³)	泊松比 ν	剪切波速 C_s /(m/s)	压缩波速 C_p /(m/s)
7.2	18	2 700	0.25	1 632.9	2 828.4

2 近场三维地震动输入方法

2.1 近场地震动输入方法

将输入运动整合到具有黏弹性人工边界的有限元模型中,等效节点力输入方法因能确保人工边界处应力的连续性和具有较高的精度。具体来说,通过将输入的地震动或其他形式的运动信息转化为等效节点力,可以更加直接和准确地模拟外部激励对结构的影响。这种转化过程不仅考虑了结构的几何形状和材料特性,还充分考虑了边界条件的影响,从而确保了模拟结果的准确性和可靠性^[20,24]。

一般来说,地震工程中以地震动的入射方向简化近场地震的运动模式。本节以 SV 波斜入射运动为参考说明地震动在空间内的运动模式。当 SV 波以 Z 坐标轴正方向的 θ_2 角输入半无限空间时,入射波与反射波形成的平面呈 X 坐标轴正方向的 α 角。斜入射的 SV 波被地面反射,转化为角度相同的反射 SV 波和具有特定角度 θ_1 的反射 P 波^[18-20,22]。在平面 P 波的斜入射计算中也可以进行类似的推导,见图 3。本文利用自主开发的计算程序,可将空间内任意一点的位移和速度时程转换为等效力时程,并将其施加在黏弹性边界处。

2.2 输入地震动

核电结构在地震作用下的响应与结构特性、地震动性质及场地条件紧密相关。本研究针对位于基岩、岩土剪切波速高的一类场地,本文所选取输入地震动的详细信息和时程见表 3 和图 4,该地震记录包含垂直压缩波与水平剪切波成分。在数值模拟中,采用隐式动力法进行求解,最大的时间步长增量为 0.01 s,以模拟核电结构在地震作用下的动态响应。

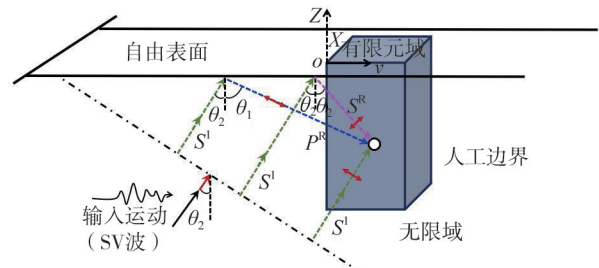


图 3 三维 SV 波斜入射波场计算模型

Fig. 3 Three-dimensional SV-wave oblique incidence wave field calculation model

表 3 输入地震动的详细信息

Table 3 Detailed information of input motions

地震事件	观测台站	震级	震中距/km	方向
Imperial Valley-06	Calexico Fire Station	6.5	10.45	EW, UD

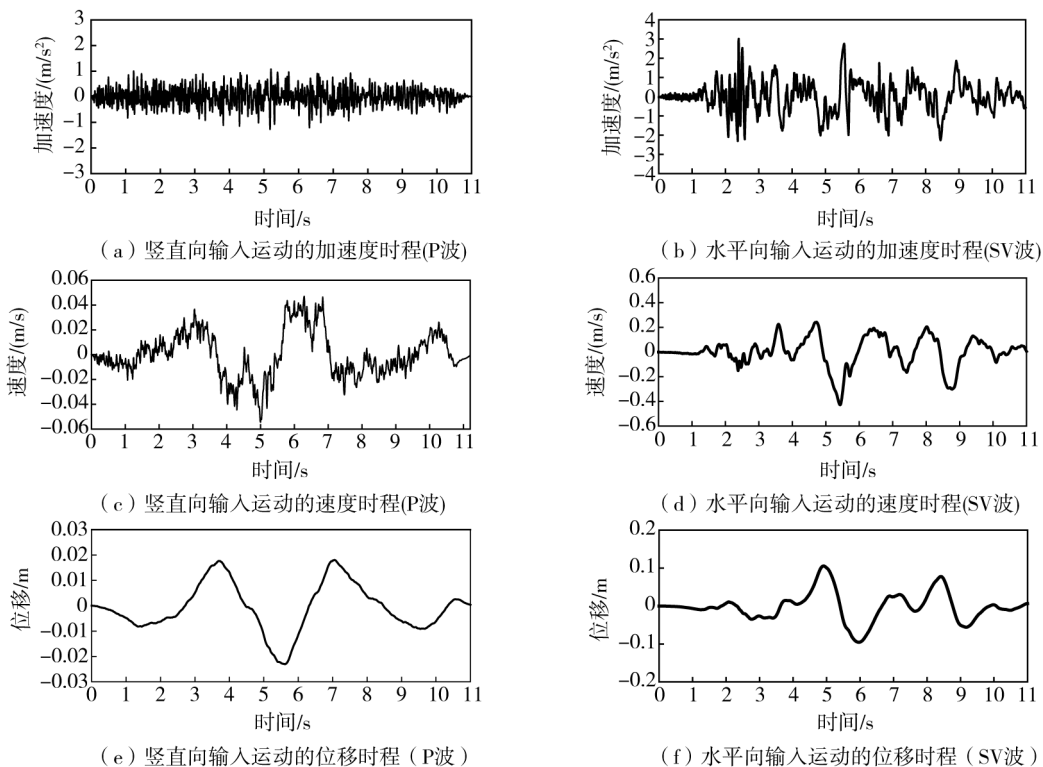


图 4 输入运动的加速度时程,速度时程与位移时程

Fig. 4 Acceleration time history, velocity time history and displacement time history of input motions

3 核安全壳地震反应分析

核安全壳的地震动输入考虑到2种不同的地震动类型,即P波和SV波。为了更真实地模拟近场地震的复杂情况,在每种地震动类型的工况下,都设定了 0° 、 15° 和 30° 这3种不同的入射角度。这样的设置不仅有助于揭示地震动斜入射对核安全壳动力响应的具体表现,还能为后续的抗震设计与优化提供更准确的参考依据。其中, 0° 入射代表地震动的垂直入射, 15° 和 30° 代表地震动的斜入射,用来模拟近场地震。

3.1 核安全壳的动态响应(P波)

竖直峰值位移在3个核安全壳的关键位置变化很小(顶部、穹壳连接处和底部),在同等入射条件下,水平峰值位移变化明显,水平峰值位移随着入射角度(由 0° 入射到 30° 入射)的增加而显著增加,见图5。图5(b)进一步表明,竖直峰值速度随入射角增大略有减小,而水平峰值速度则显著增大,特别是在 30° 入射时,顶部水平峰值速度达到垂直入射时的46倍,这归因于斜入射时P波在自由表面反射产生SV波,增强了水平方向的振动效应。

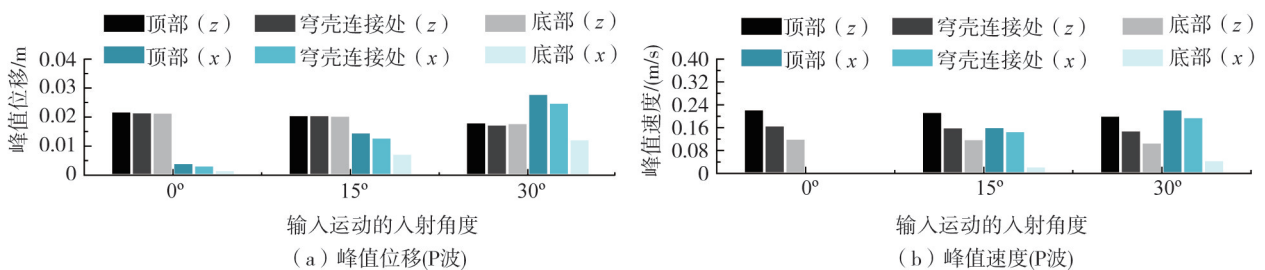


图5 P波入射下核安全壳3个典型位置的峰值位移与峰值速度

Fig. 5 Peak displacement and peak velocity at three typical positions of the nuclear containment structure under P-wave incidence

3.2 核安全壳的动态响应(SV波)

在不同地震动入射条件下,核安全壳上3个关键位置的水平峰值位移呈现出随入射角增大而显著增加的趋势,见图6。特别地,在 30° 入射角时,这些位置的水平峰值位移达到了最大值;相反,在垂直入射的情况下,位移量则是最小的。竖向峰值位移随入射角增大略有减小,SV波在斜入射后的反射产生新的SV波明显增强了水平方向的振动。同时,竖直峰值速度也随入射角增大而增大,斜入射时明显高于垂直入射。水平峰值速度同样显著增大, 30° 入射时顶部速度是垂直入射的1.49倍,这归因于SV波与反射波的叠加效应。

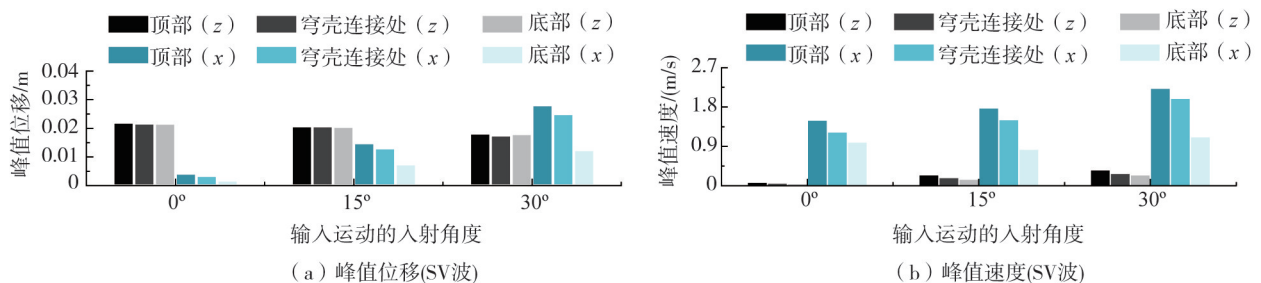


图6 SV波入射下核安全壳3个典型位置的峰值位移与峰值速度

Fig. 6 Peak displacement and peak velocity at three typical positions of the nuclear containment structure under SV-wave incidence

3.3 结构损伤

本节采用线性调幅的方法,将入射地震动的峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)由 $0.15g$ 逐渐均匀地提高到 $0.45g$ (其中 g 代表重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$),每次提高幅度 $0.05g$,以深入探究斜入射地震动对核电厂底部结构破坏的具体影响。本节研究聚焦于核安全壳底部特定点的损伤演化情况。从整体来看,随着输入地震动PGA的逐步增大,该关键部位的损伤响应显著提前,具体表现为损伤曲线在时间轴上向左偏移,这一现象直观地反映了结构损伤程度随PGA增加而逐渐加剧的趋势。

在较低PGA水平(分别为 $0.15g$ 和 $0.2g$)下,垂直入射的地震波并未触发核安全壳底部混凝土进入塑性状态,而相比之下,近场地震动则显著加速了这一过程,使得混凝土在 6 s 或 4.5 s 后迅速进入塑性阶段,同时退化刚度也在快速增长,尤其是当入射角度为 30° 时更为显著,见图7(a)、(b)。随着PGA提升至 $0.25g$

及以上,即便是在垂直入射条件下,也开始观察到混凝土结构的塑性变形,见图 7(c)~(g)。值得注意的是,在相同或更高的 PGA 水平下,斜入射地震动引起的损伤始终更为严重,这突显了近场地震对核电站结构安全性的更大威胁。

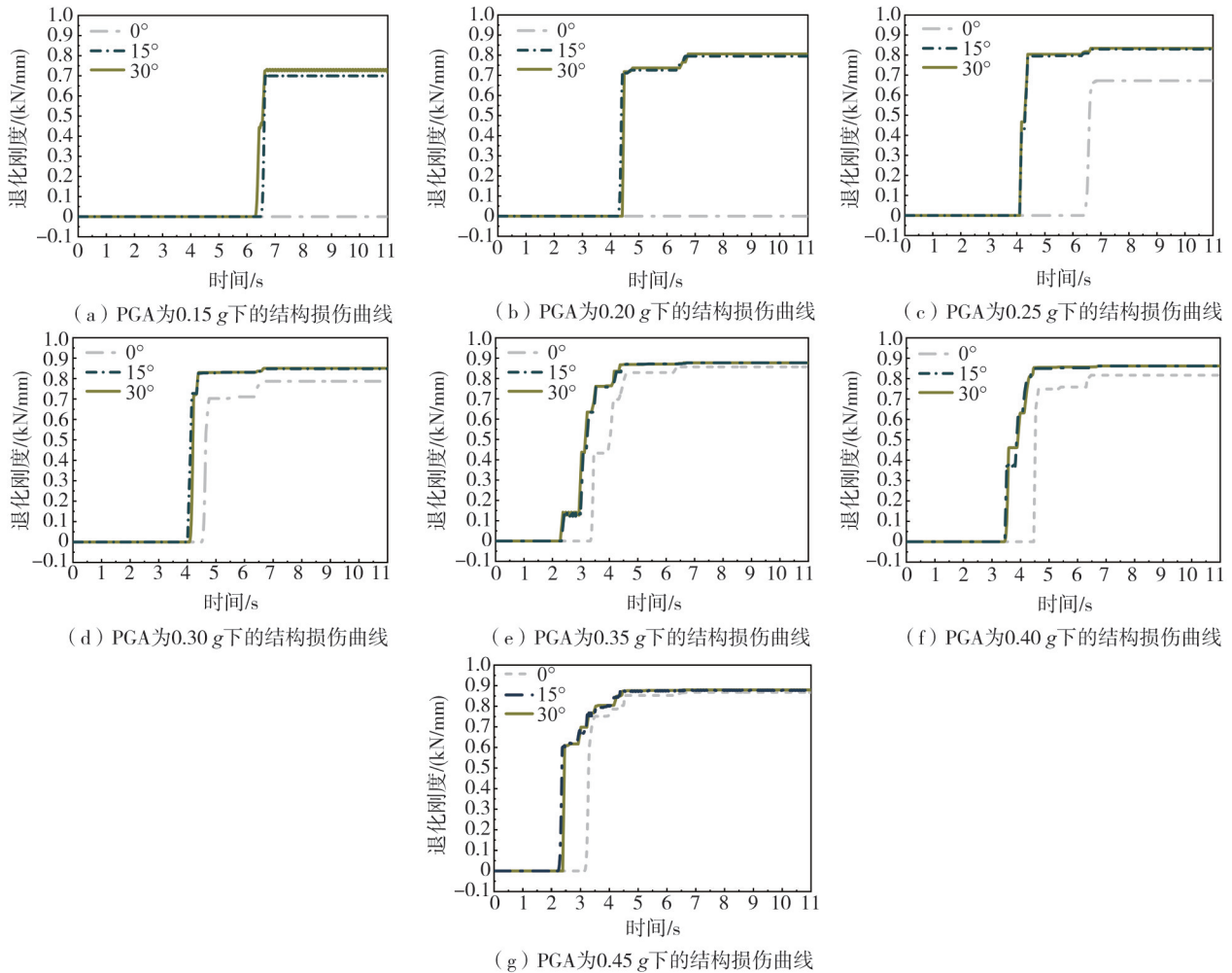


图 7 不同 PGA 条件下核安全壳底部点的损伤曲线(入射方向包括 0°, 15° 和 30°)

Fig. 7 Damage curves of the bottom point of the nuclear containment structure under different PGA conditions (including incident directions of 0°, 15°, and 30°)

结构损伤应力云图见图 8~图 10,直观地展示了在 PGA 为 0.45 g 的强地震动作用下,核安全壳的损伤特征。结果表明,与垂直入射相比,近场地震时结构底部混凝土更早地进入了塑性状态,这表明斜入射地震波对结构底部的冲击更为剧烈。随着地面运动的持续进行,近场地震动导致的塑性损伤区域显著扩大,这一现象不仅限于结构底部,还存在向周围区域蔓延的趋势,这进一步加剧了结构的整体损伤程度。值得关注的是,核安全壳的背波面损伤情况更加严重,这可能是由于地震动在该区域产生了复杂的相互作用和叠加效应。

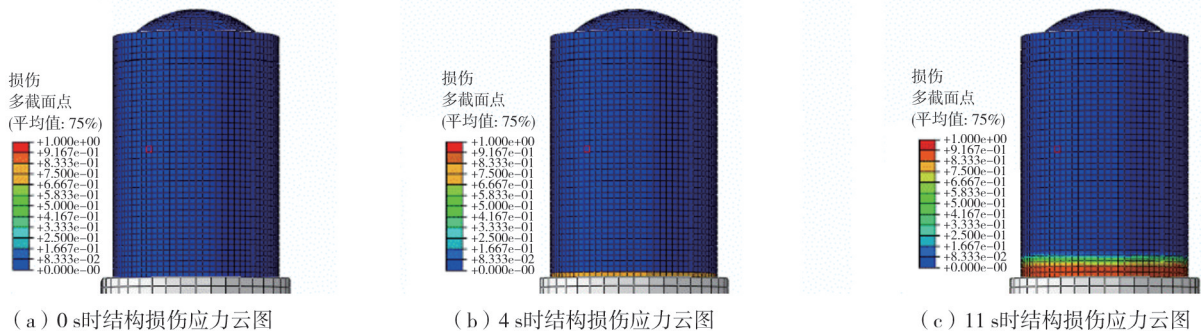
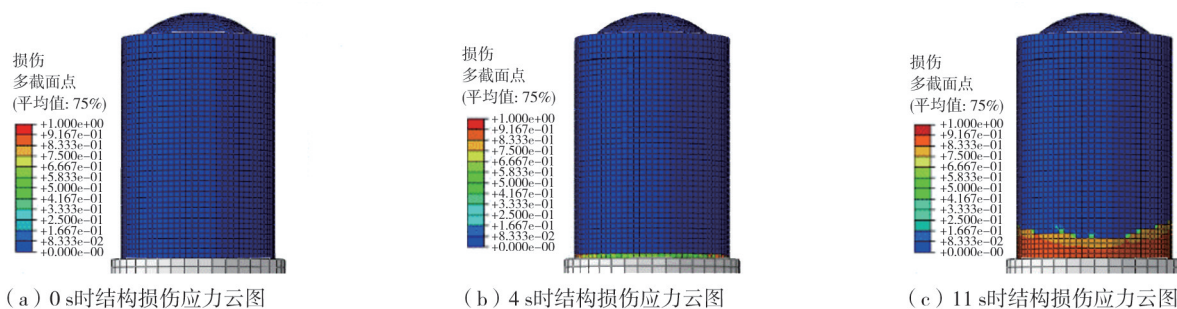
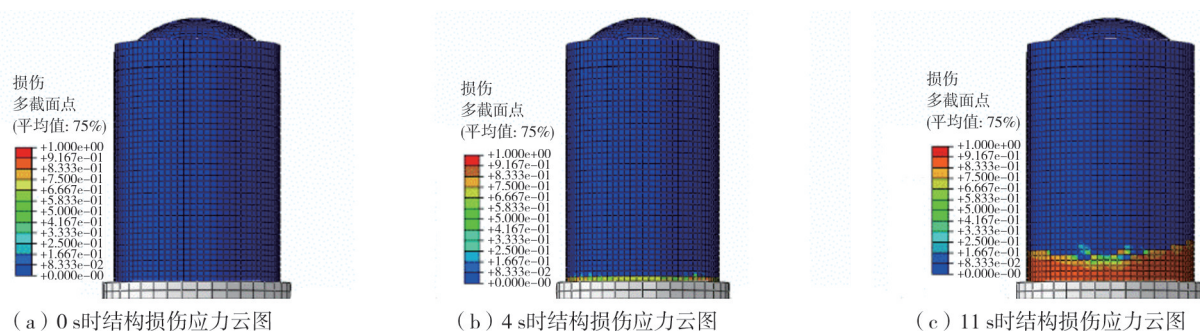


图 8 入射方向为 0°各时刻结构损伤分布

Fig. 8 Damage distribution of structural damage of each moment when the incident direction is 0°

图9 入射方向为 15° 各时刻结构损伤分布Fig. 9 Damage distribution of structural damage at each moment when the incident direction is 15° 图10 入射方向为 30° 各时刻结构损伤分布Fig. 10 Damage distribution of structural damage at each moment when the incident direction is 30°

4 结论

本文通过建立核安全壳及其周围土体的精细模型,并依托三维黏弹簧人工边界法,实现了近场地震动的精确模拟。本文选取P波和SV波2种典型地震动,以不同的入射角度输入至数值模型中,对核安全壳结构进行了深入的动力响应分析,得出如下结论:

1) 本文采用三维黏弹簧人工边界法,实现了近场地震动的精准模拟。这一技术的创新性应用,有效打破了传统地震响应分析中仅考虑地震动垂直入射的单一视角,极大地扩展了研究的适用范围,使其能够更真实地反映近场地震复杂多变的实际情景。

2) 地震动输入一般涉及2种类型,分别是设置在 0° 、 15° 和 30° 这3个不同入射角度的P波和SV波,以模拟近场地震的不同情况。与 0° 入射相比,近场地震条件下对核电站抗震安全性的关键部位的动力响应产生了显著的变化,并伴有明显增大的趋势。

3) 近场地震时核电结构底部混凝土相较于 0° 入射更早进入塑性状态,此时混凝土更容易出现开裂破坏。底部是核电结构抗震性能的关键区域,在结构的抗震设计、分析及实际建造过程中,必须高度重视并特别关注底部区域的抗震性能。

本文在探讨核电结构的地震响应时,对周边土体进行了一定程度的简化处理,仅聚焦于核电结构本身。然而,为了更全面深入地推进该领域的研究,未来工作应当纳入对核电结构周边土体地形因素的考量,以期为同类型的工程提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] VARPASUO P. The seismic reliability of VVER-1000 NPP prestressed containment building[J]. Nuclear Engineering and Design, 1996, 160(3): 387-398.
- [2] JUN K D, IWASAKI R, KOBAYASHI H, et al. Probability-based seismic safety evaluation of existing buildings[J]. Engineering Structures, 1997, 19(9): 708-717.
- [3] TAKEDA M, OHKAWA Y, AKUTSU Y. An evaluation method for seismic isolation effect in siting of a nuclear facility[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1998, 62(3): 241-249.

- [4] OZAKI M, OKAZAKI A, TOMOMOTO K, et al. Improved response factor methods for seismic fragility of reactor building[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, 185(2/3): 277-291.
- [5] GHIOCEL D M, WILSON P R, THOMAS G G, et al. Seismic response and fragility evaluation for an Eastern US NPP including soil-structure interaction effects[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1998, 62(3): 197-214.
- [6] CHO S G, JOE Y H. Seismic fragility analyses of nuclear power plant structures based on the recorded earthquake data in Korea[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235(17/18/19): 1867-1874.
- [7] 王晓磊. 核安全壳抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
WANG Xiaolei. Study on the seismic performance of nuclear containment shell [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [8] 张朝弼. 强震及失水事故下核电安全壳结构极限承载力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
ZHANG Chaobi. Study on the ultimate bearing capacity of nuclear power containment structures under strong earthquakes and loss-of-coolant accidents[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] HUANG Y-N, WHITTAKER A S, LUCO N. Seismic performance assessment of base-isolated safety-related nuclear structures[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(13): 1421-1442.
- [10] CHOI I K, CHOON Y S, AHN S M, et al. Seismic fragility analysis of a CANDU type NPP containment building for near-fault ground motions[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2006, 10(2): 105-112.
- [11] HUANG Y N, WHITTAKER A S, LUCO N. A probabilistic seismic risk assessment procedure for nuclear power plants: (I) Methodology[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(9): 3996-4003.
- [12] KOBAYASHI T, YOSHIKAWA K, TAKAOKA E, et al. Time history nonlinear earthquake response analysis considering materials and geometrical nonlinearity[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, 212(1/2/3): 145-154.
- [13] HUANG Y N. Performance assessment of conventional and base-isolated nuclear power plants for earthquake and blast loadings [J]. *Structural and Environmental Engineering*, 2010, 39(13): 1421-1442.
- [14] KENNEDY R P, RAVINDRA M K. Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 79(1): 47-68.
- [15] SAXENA N, PAUL D K, KUMAR R. Effects of slip and separation on seismic SSI response of nuclear reactor building[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(1): 12-17.
- [16] 童庆海. 核电厂安全壳及内部结构基于性能的抗震能力评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
TONG Qinghai. Performance-based seismic capacity assessment of nuclear power plant containment and internal structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [17] 袁智博. 核电站安全壳振动台试验与数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
YUAN Zhibo. Table test and numerical analysis of nuclear power plant containment shell [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [18] 郜新军, 赵成刚, 刘秦. 地震波斜入射下考虑局部地形影响和土结动力相互作用的多跨桥动力响应分析[J]. *工程力学*, 2011, 28(11): 237-243.
GAO Xinjun, ZHAO Chenggang, LIU Qin. Dynamic response analysis of multi-span bridges considering local topographic effects and soil-structure interaction under oblique incidence of seismic waves [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(11): 237-243. (in Chinese)
- [19] 苑举卫, 杜成斌, 刘志明. 地震波斜入射条件下重力坝动力响应分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 120-126.
YUAN Juwei, DU Chengbin, LIU Zhiming. Dynamic response analysis of gravity dams under oblique incidence of seismic waves [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 120-126. (in Chinese)
- [20] 赵源, 杜修力, 李立云. 地震动入射角度对地下结构地震响应的影响[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(6): 624-630.
ZHAO Yuan, DU Xiuli, LI Liyun. Effect of incident angle of ground motion on seismic response of underground structures[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(6): 624-630. (in Chinese)
- [21] 尤红兵, 赵凤新, 荣棉水. 地震波斜入射时水平层状场地的非线性地震反应[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(2): 234-240.
YOU Hongbing, ZHAO Fengxin, RONG Mianshui. Nonlinear seismic response of horizontal layered site due to inclined wave[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 234-240. (in Chinese)
- [22] 孙建超. 地震波斜入射条件下核安全壳的地震响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
SUN Jianchao. Seismic response analysis of nuclear containment under oblique incidence of seismic waves [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [23] 包旭. 主余震序列作用下核电厂安全壳的动力响应分析和抗震安全评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
BAO Xu. Dynamic response analysis and seismic safety evaluation of nuclear power plant containment shell under the action of mainshock-aftershock sequence [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [24] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. *土木工程学报*, 1998, 31(3): 55-64.
LIU Jingbo, LV Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(3): 55-64. (in Chinese)