

doi: 10.11720/wtyht.2024.1555

云龙,陈苏,傅磊,等.高放废物北山地下实验室洞室群地震动反应特征研究[J].物探与化探,2024,48(6):1519–1529.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1555

Yun L, Chen S, Fu L, et al. Seismic response characteristics of the cavern group of the Beishan underground research laboratory for the geological disposal of high-level radioactive waste[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1519–1529. http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1555

高放废物北山地下实验室洞室群地震动反应特征研究

云龙^{1,2}, 陈苏³, 傅磊⁴, 庄海洋⁵, 王驹^{1,2}

(1.核工业北京地质研究院,北京 100029;2.国家原子能结构高放废物地质处置创新中心,北京 100029;3.北京工业大学 建筑工程学院,北京 100024;4.中国地震局 地球物理研究所,北京 100081;5.华东交通大学 土木工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:高放废物北山地下实验室紧邻的河西走廊和北祁连地区地震环境复杂、强震多发,而地下实验室作为由三竖井+螺旋斜坡道构成的复杂地下结构,具有明显的大尺度空间分布特征,研究地下实验室地下结构群的地震反应特征,对于后期场址的地壳稳定性评价工作具有重要的工程意义。本文根据地下实验室的设计和已有的围岩物理、力学参数,建立了岩体—地下结构体系精细化三维有限元计算模型,开展了关键断裂对地下实验室近场地震安全性影响研究。结果表明:传统的地震动衰减关系难以考虑近场可能存在的有限断层效应、破裂方向性效应和上盘效应等近场震源效应,采用随机有限断层法可以有效地考虑上述近场地震动特性;目标场址场地类型为花岗岩硬基岩场地,近场发震断裂引起的地震动传到场址的反应谱中高频部分发育明显;因地下实验室的非规则结构引起的地下洞室群地震动反应表现出明显的空间变异性,岩体软化带对应地表峰值加速度富集明显,工程中应规避此区域。本次研究为将来高放废物处置库的选址和场址评价提供了地震安全分析方面的依据。

关键词:高放废物处置地下实验室;地震动;断层;地震反应;数值模拟**中图分类号:** O319.56**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)06-1519-11

0 引言

高水平放射性废物(简称高放废物)具有放射性、毒性大、半衰期长的特点,对其进行最终安全处置难度极大,面临一系列的、科学、技术和工程挑战^[1]。目前,深地质处置是国际上普遍认可的长期处置高放废物的可行方法,即将高放废物埋置在 500~1 000 m 深度范围内稳定的地质体中^[2]。高放废物地质处置库工程具有建设条件复杂、安全等级高、服务期限长(数万年计)等特点,研发难度很大。为此,为了进行场址特征评价、开发和测试处置概念和技术,获取处置库围岩热—水—力—化学—生物—放射性的耦合特征,并完成工程屏障,评估其长

期性能和安全性,世界范围内陆续建设了多个地下实验室,如瑞典的 Äspö、加拿大的 Whiteshell、芬兰的 ONKALO 和法国的 Meuse/Haute Marne 地下实验等^[3-6]。高放废物地下实验室是高放废物最终处置不可或缺的一环。

北山地下实验室南侧的河西走廊和青藏高原北缘构造环境复杂,强震多发。如公元 180 年甘肃高台西 7¹/₂ 级地震,1932 年甘肃玉门昌马 7.6 级地震。近几年在青藏高原北缘也时有发生,如 2021 青海玛多 M 4.7 级地震、2022 年门源 M 6.6 级地震。这些区域潜在强震的发生可能对地下实验室场址的稳定性产生影响。然而,由于地下岩石洞室的抗震性能比地面结构要好,导致针对大型洞室群地震反应及其抗震性能的研究不多,自 1995 年日本阪神地

收稿日期: 2023-12-21; **修回日期:** 2024-07-16**基金项目:** 国防科工局放射性废物处置项目专题“地下实验室场址地壳稳定性分析与评价研究”(FZ2101-6)**第一作者:** 云龙(1985-),男,博士,2014年毕业于核工业北京地质研究院地质工程专业,现任正高级工程师,主要从事活动构造及高放废物地质处置库选址方面的工作。Email:yunlneotectonic@126.com**通讯作者:** 王驹(1964-),男,博士,博士生导师,1984年毕业于南京大学地质学系放射性地质矿产专业,现任中核集团放射性废物处置领域首席专家、北山地下实验室建设工程总设计师,长期从事高放废物地质处置技术研究工作。Email:wangju9818@163.com

震中出现地下结构严重的震害后,才开始重视地下结构的抗震性能研究^[7]。如杜修力等^[8]、刘晶波等^[9]、Yuan 等^[10]和 Zhang 等^[11]分别对土质地基中地下结构的地震反应特征、地震破坏机理和抗震性能水平等进行了全面且系统地研究,何川等^[12]、崔臻等^[13]、Hashash 等^[14]和 Corigliano 等^[15]分别对岩质地基中隧道的抗震性能和动力反应特性进行了研究,主要考察了近断层的影响。然而,已有对岩质地基地下洞室群的地震响应影响的研究较为有限,尤其是对考虑复杂岩体构造的花岗岩硬岩场区大型地下洞室群整体抗震性能的研究较为缺乏。

根据我国“十四五”的核工业布局 and 规划,我国已于 2021 年 7 月在甘肃北山开工建设高放废物地下实验室,而相关地下工程在设计、施工等过程中均需考虑抗震问题^[16]。同时,高放废物地下实验室由多个非规则地下结构所组成,具有明显的大尺度空间分布特征,因此研究地下实验室地下结构群的地震反应特征已迫在眉睫。本文基于这一背景,结合现阶段近场强震非均匀地震动场模拟及地下工程抗震的研究成果,考虑岩体断层的分布,建立了岩体—地下结构体系精细化三维大尺度整体有限元计算模型,开展关键断裂对高放废物地质处置地下实验室近场地震安全性影响研究,研究成果探明了花岗岩硬岩场地的地震动传播规律及其特征,同时能够为地下实验室场址地壳稳定性评价提供技术支撑。

1 数值分析模型建立

数值分析模型针对位于甘肃北山的高放废物处

置地下实验室洞室群,综合震源—传播路径—局部位场地特性提供计算地震动输入,采用有限元—无限元耦合方法建立综合模型,开展体系响应分析。分析方法涉及到地震动模拟、地下工程高效数值建模、无限域有限化等关键技术。

1.1 单元类型与网络划分

采用缩减积分单元进行模拟,设置沙漏刚度为 0.01,单元数约 605 万。综合考虑网格控制,优化不同部位网格尺度,以适应计算与分析的要求。在几何变化较大的部位(尤其是突变处),采用比较密集的网格;而在几何变化较小的部位,为减小计算规模,则采用相对稀疏的网格。数值模型网格跨尺度方法既可以保持相当的计算精度,又可使网格数量减小。其次,网格划分时考虑了截止频率所对应的波长沿深度的变化,竖向网格最大尺寸 $h_{\max}$ 取截止频率对应波长的 1/8~1/10,按下式计算确定:

$$\frac{V_s}{10f_{\max}} \leq h_{\max} \leq \frac{V_s}{8f_{\max}}, \quad (1)$$

其中: V_s 为剪切波速; $f_{\max}$ 为截止频率。

表 1~表 2 给出了新场岩体代表性钻孔岩心基本物理性质参数、吸水性参数、弹性波速参数及其随深度的变化规律。截止频率 $f_{\max}$ 取为 20 Hz 时,据现场钻孔提供的波速,竖向单元尺寸 25~31.5 m。横向单元尺寸 13.5~17.0 m。综合考虑计算精度及稳定性,本项目在竖井及断层位置局部加密网格,采用 1~5 m 不等的单元尺寸。

表 1 钻孔岩心基本物理性质参数

Table 1 Basic physical property parameters of rock core

钻孔深度/m	岩性	块体天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	块体干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	块体饱和密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	颗粒密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	天然含水率/%
112.77~113.59	中粒花岗岩闪长岩	2.652	2.650	2.653	2.658	0.068
205.74~207.69	中细粒石英闪长岩	2.692	2.691	2.694	2.699	0.059
302.65~309.27	中细粒石英闪长岩	2.682	2.680	2.682	2.687	0.063
417.99~419.92	中粒花岗岩闪长岩	2.632	2.630	2.633	2.639	0.098
500.40~501.25	中细粒花岗岩闪长岩	2.646	2.644	2.647	2.651	0.073
548.42~549.22	中细粒花岗岩闪长岩	2.666	2.665	2.667	2.671	0.058

表 2 钻孔岩心弹性波速参数

Table 2 Elastic wave velocity parameters of borehole cores

钻孔深度/m	岩性	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	动态泊松比	动弹性模量/ GPa	动剪切模量/ GPa	动体积模量/ GPa	动拉梅系数/ GPa
112.77~113.59	中粒花岗岩闪长岩	4990.00	2839.67	0.26	53.88	21.42	37.47	23.19
205.74~207.69	中细粒石英闪长岩	5254.00	2656.33	0.33	50.46	19.03	48.95	36.26
302.65~309.27	中细粒石英闪长岩	5113.00	2802.33	0.28	53.89	21.13	41.94	27.85
417.99~419.92	中粒花岗岩闪长岩	4895.67	2931.00	0.22	55.17	22.62	32.95	17.87
500.40~501.25	中细粒花岗岩闪长岩	5103.67	2901.67	0.26	56.20	22.28	39.25	24.39
548.42~549.22	中细粒花岗岩闪长岩	5251.67	2679.67	0.32	50.63	19.15	48.14	35.37

1.2 复杂地质模型的边界处理方法

1973 年 Ungless 等^[17]提出了无限元传输边界的基本思想,随后由 Bettess^[18]、Beer^[19]等对其进行了发展,目前已被广泛应用于半无限域的研究^[20-21]。本文建立模型时,采用有限元网格模拟感兴趣的近场区域,使用无限元模拟远离结构的远场区域。在无限元分析理论中,通过边界上引入阻尼吸收波的辐射能量,使波的反射对近场区域的影响可以忽略。以二维无限元传输边界为例,为了抑制波的反射,设置一个阻尼边界条件,其阻尼应力为:

$$\sigma_{xx} = -d_p \dot{u}_x; \sigma_{xy} = -d_s \dot{u}_y, \quad (2)$$

式中: $\dot{u}_x$ 、 $\dot{u}_y$ 为振动速度; d_p 、 d_s 为介质密度,与波速有关,可表述为:

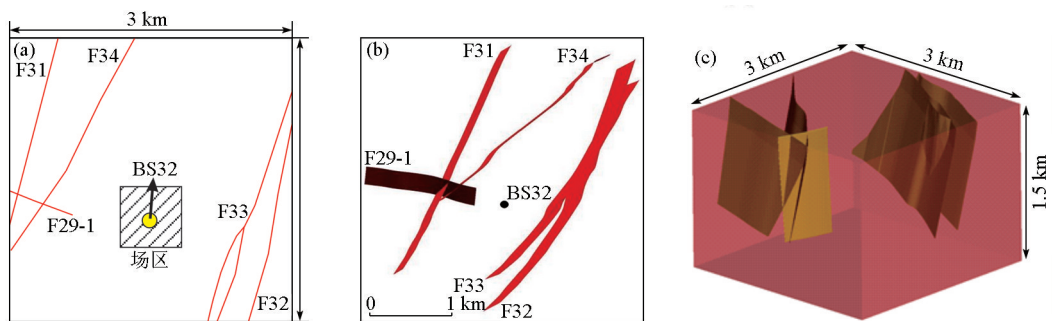
$$d_p = \frac{\lambda + 2G}{c_p} = \rho c_p; d_s = \rho c_s, \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; λ 和 G 为各向同性线弹性材料拉梅常数; c_p 、 c_s 分别为 P 波和 S 波波速。

1.3 有限元模型构建

基于前期地质调查和工程设计资料并结合上述建模技术,建立了高放废物地质处置地下实验室精细化数值模型。由于 BS32 孔未来是地下实验室人员竖井,位于地下实验室场址的中心位置,因此在建立区域地质模型时,将该孔获得的岩石力学参数作为控制参数。数值模型为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$ 的地质空间岩体,选入的区域范围见图 1a。选入的断层为 F31、F34、F29-1、F33、F32,如图 1b 所示。本文重点对 F29-1 是否穿越地下实验室开展讨论。根据提供的地质图确定了断层宽度及走向,模型边界采用无限元设置模拟半无限空间的能量开放特性,最终岩体计算模型如图 1c 所示。地下实验室结构模型见图 2。通过几何清理及重构,生成了地下实验室模型。

模型共设计了 18 组模拟工况(表 3)。针对地下实验室模型参数,分别考虑不同震级特性、是否穿越 F29-1 断层、岩体动力参数特性、断层参数特性 4

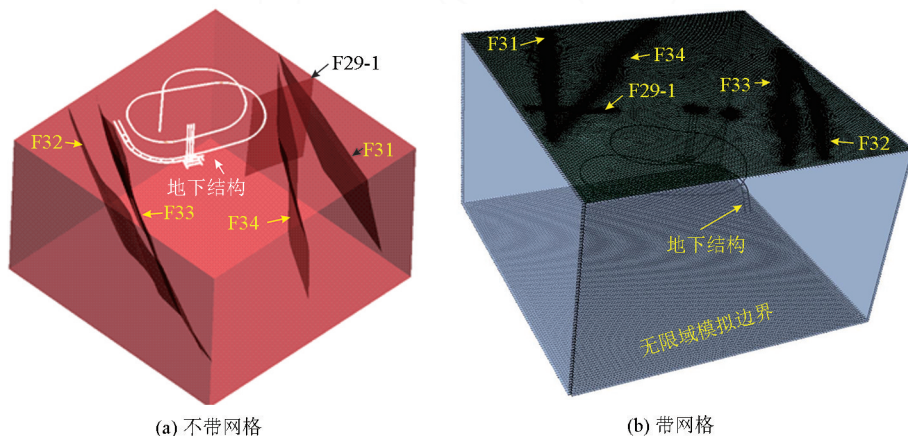


a—建模区域;b—入选断层;c—岩体计算模型

a—modeling area; b—selected faults; c—rock mass calculation model

图 1 模型区域断层空间分布

Fig.1 Spatial distribution of faults in the modeling area



(a) 不带网格

(b) 带网格

图 2 区域岩体—断层—地下实验室结构

Fig.2 Regional rock-fault-underground laboratory structure model

类对计算结果有较大影响的工况因素进行组合,分别对参数进行敏感性分析。弱化带杨氏模量取两侧分区杨氏模量平均值的 1/3 作为破碎层力学参数。

1.4 场地输入地震动

采用随机有限断层法进行设定地震的模拟,以获取合理考虑区域地震构造环境及地震动特性的地震动。前期的断裂活动性鉴定工作表明,场址西侧距离约 20 km 的旧井断裂为距离场址最近的能动断裂,确定其最大潜在发震震级为 6.5 级,因此在旧井断裂进行震级为 6.5 级和 7.0 级的地震模拟,考虑对

场址最不利的震源起始破裂情况,分别给出强地震动模拟的加速度时程和反应谱,相关区域模拟参数可见文献[20-21]。对于 6.5 级设定地震,新场预选地段场址的地震动持时大约在 7~9 s 之间,水平向基岩地震动平均值为 317 ± 130 Gal;对于 7.0 级设定地震,地震动持时大约在 13~14 s 之间,水平向基岩地震动峰值加速度平均值为 565 ± 91 Gal。反应谱中高频部分较为发育,符合硬基岩场地场址的一般地震动特性。模拟地震动见图 3、图 4。

表 3 模型计算工况

Fig.3 Model calculation conditions

震级	工况	穿越 F29-1	材料力学参数	弱化带力学参数/倍数	震级	工况	穿越 F29-1	材料力学参数	弱化带力学参数/倍数
6.5	C1	是	实际测试数据*	0.3	7.0	C10	是	实际测试数据	0.3
	C2	是	0.9 倍实际测试数据#	0.3		C11	是	0.9 倍实际测试数据	0.3
	C3	是	0.8 倍实际测试数据	0.3		C12	是	0.8 倍实际测试数据	0.3
	C4	是	1.1 倍实际测试数据	0.3		C13	是	1.1 倍实际测试数据	0.3
	C5	是	0.8 倍实际测试数据	0.2		C14	是	0.8 倍实际测试数据	0.2
	C6	是	实际测试数据	0.2		C15	是	实际测试数据	0.2
	C7	是	实际测试数据	0.5		C16	是	实际测试数据	0.5
	C8	否	实际测试数据	0.3		C17	否	实际测试数据	0.3
	C9	否	0.8 倍实际测试数据	0.2		C18	否	0.8 倍实际测试数据	0.2

注:C1~C18 代表 18 种工况;“*”代表模型岩体参数按照表 1 设置;“#”代表模型岩体参数按照表 1 强化或软化相应倍数。

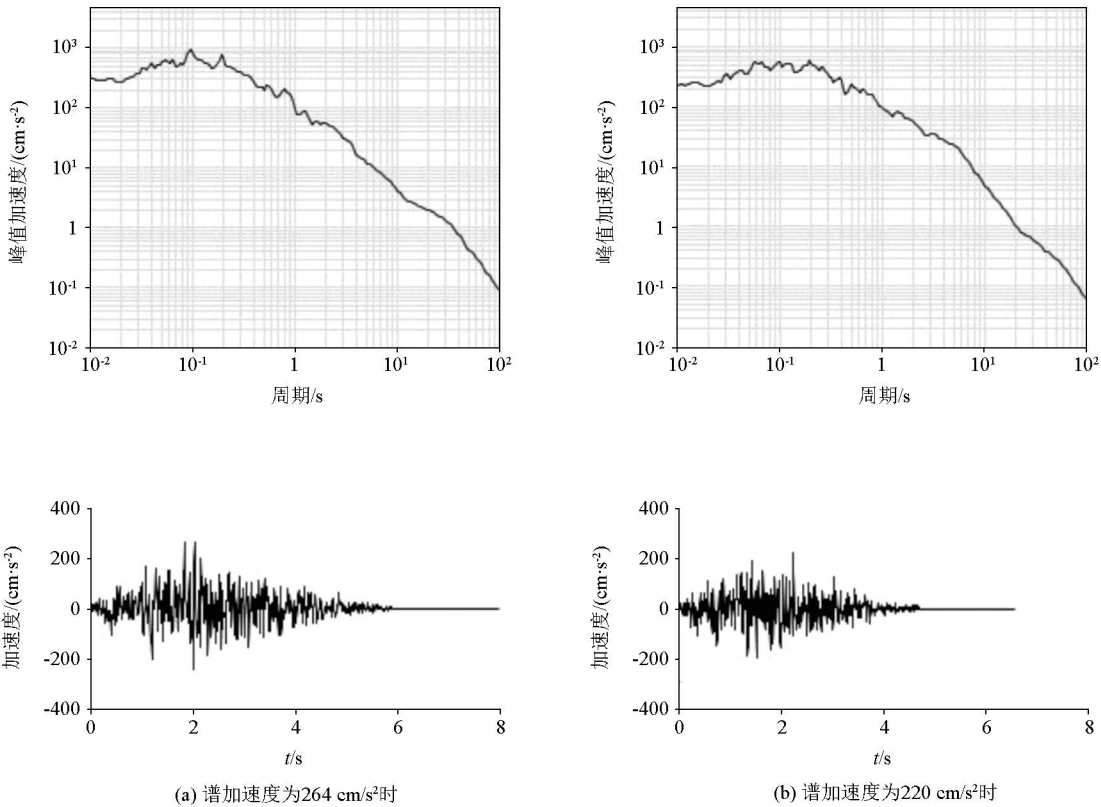


图 3 6.5 级地震动加速度时程及谱特性

Fig.3 Time history and spectral characteristics of ground acceleration with 6.5 magnitude earthquake

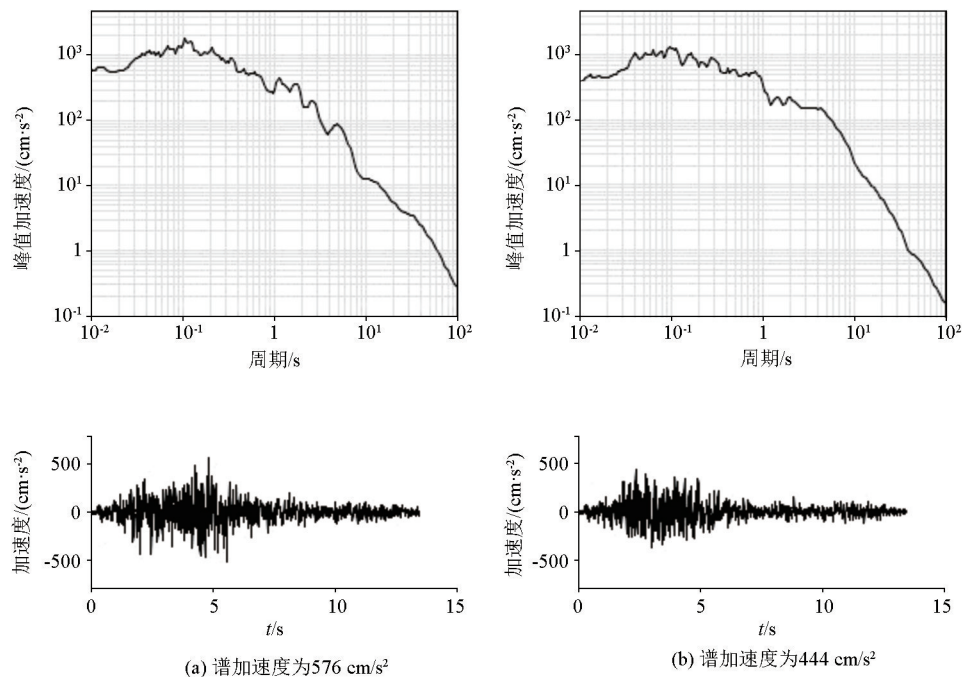


图 4 7.0 级地震动作用下加速度时程及谱特性

Fig.4 Time history and spectral characteristics of ground acceleration with 7.0 magnitude earthquake

2 模拟结果与分析

2.1 地震动传播规律

为便于简化表述,本文将人员提升井定为竖井一、入风井定为竖井二、排风井定为竖井三。定义加速度放大系数为某一工况下竖井各测点加速度反应最大值与输入地震动峰值加速度的比值。图 5 给出了 6.5 级地震动作用下,不同时刻地震动在体系内的地震动传播特性。由图可知,在振动初期,地震动传播与解析特性符合较好,但由于本模型内复杂断层存在及内部开孔等几何与力学特性的特异性强,地震动在到达自由地表后,体系内的加速度出现了

复杂的叠加效应,局部出现不均匀分布,且在断层地表位置加速度出现明显的集聚现象。

不同工况下竖井各测点水平方向峰值加速度放大系数如图 6 所示。由图可知,同一工况下,相同标高各竖井加速度反应规律较为一致:随输入地震动峰值加速度增大,人员提升竖井及入风、排风竖井峰值加速度放大系数大体呈增大的趋势,但局部位置出现了峰值加速度放大系数增大的现象。这可能是由于断层的存在使得地震动在自由地表反射后出现了体系内的复杂叠加效应,使得地下实验室结构在不同埋深位置出现了上行波与下行波的叠加,出现了局部位置的峰值加速度放大现象。在 6.5 级地震动作用下,C1 工况的竖井各测点水平向峰值加速度

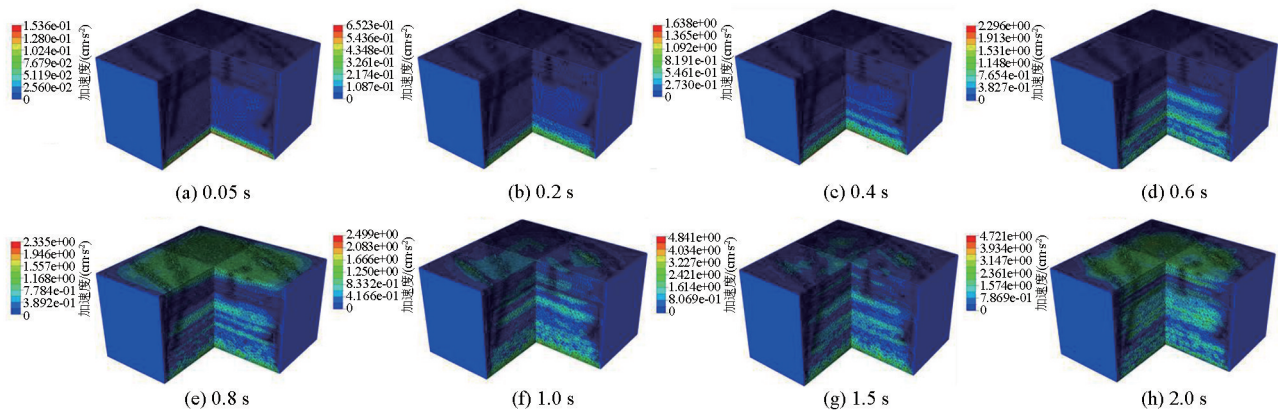


图 5 体系内不同时刻加速度分布特性

Fig.5 Acceleration distribution characteristics at different moments in the system

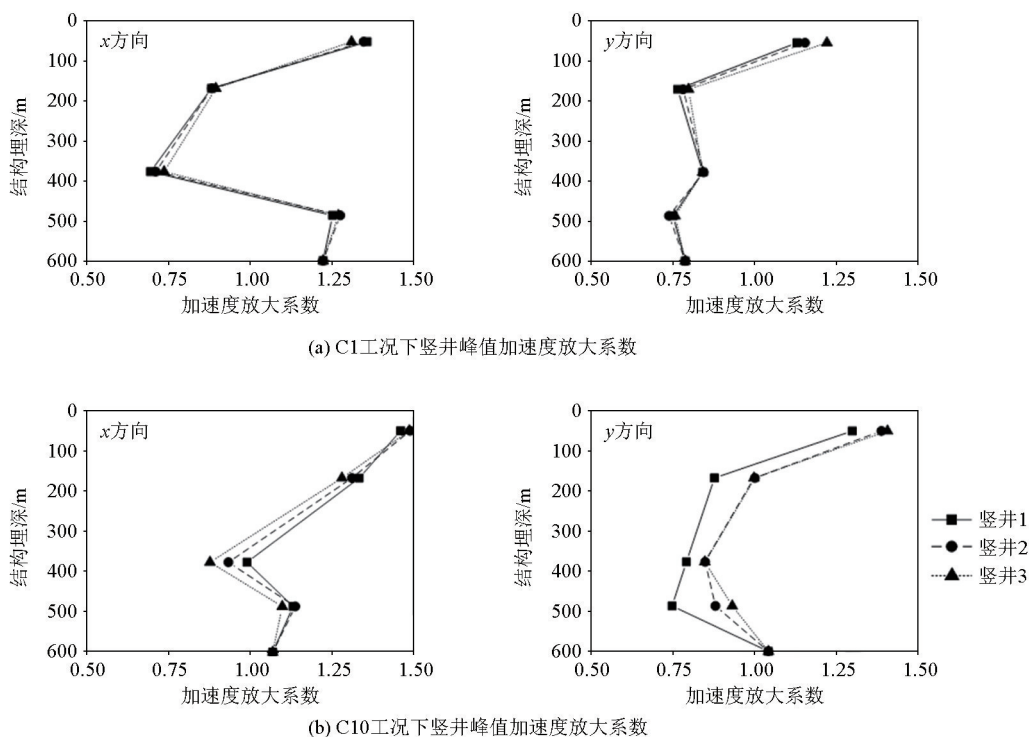


图 6 不同工况下岩体内加速度放大系数

Fig.6 Acceleration amplification factor in rock mass under different working conditions

放大系数最大,7.0 级地震动作用下,C10 工况的竖井各测点水平方向峰值加速度放大系数最大。结果表明:各竖井同一标高处水平方向峰值加速度放大系数空间差异性小。其次,-240 m 辅助试验水平高度以深,竖井 x 方向放大系数先增大后减小;-240 m 辅助试验水平高度以浅,竖井 x 方向放大系数逐渐增大,在竖井顶部取得最大值,其加速度放大系数接近 1.50。

由图 6 可知,同一工况下,各竖井 y 方向加速度反应规律较为一致;随输入地震动峰值加速度增大,竖井 y 方向峰值加速度放大系数呈增大的趋势。模拟结果表明:沿高度方向竖井各测点 y 方向加速度反应规律较为相似,除人员提升竖井个别测点外幅值均较为接近,结果表明斜坡道是否穿越 F29-1 断层对各竖井加速度反应影响不大。7.0 级地震动作用下沿结构高度方向,各竖井 y 方向峰值加速度放大系数呈先减小后增大的趋势,在竖井顶部取得最大值,其加速度放大系数为 1.64。

另外由图可知,地震动在目标岩体至下而上传播的过程中,峰值加速度角度出现了复杂分布特性,考虑到加速度主要反应地震动高频的传播特性,可以发现目标岩体对加速度高频的影响更为突出,分析对比得出:从地震动传播的角度,硬基岩夹软弱层的地层结构将会出现更多的界面散射、反射等特性,

出现复杂的地震动在不同位置的叠加及复杂的空间分布特性;从同震级不同工况对比角度而言,相同震级条件下,地震动峰值加速度时空、幅值分布基本相同,这说明目标岩体对地震动能量的敏感性较强。

7.0 级地震动作用下地表峰值加速度分布见图 7,由图可知:不同工况条件下,地表峰值加速度分布存在差异,峰值点位置也有所不同,但主要集中在断层表面所在位置,对比地震各工况地表峰值加速度分布可以发现:随着工程岩体力学参数的弱化,地表峰值加速度也随着减小,这在一定程度上体现出区域断层与岩体的相互作用,岩体弱化后地震能量在体系内重分布,相反岩体材料强化对结果影响较小(如 C1 对比 C2、C3、C4);当断层及岩体材料同时设置成较软材料时,地表加速度放大系数达到最大(对比 C1 与 C5);断层材料越软,其地表的峰值加速度放大越明显,相反,若断层材料参数由周边岩体材料参数的 1/3 增强至 1/2,地表加速度放大系数并未有显著变化(对比 C1 与 C6、C7);是否穿越 F29-1 断层对地表的峰值加速度分布影响不显著(对比 C1 与 C8)。由此可知,断层所在位置地表为加速度放大较为显著的位置。从各工况的整体分布而言,断层在地震动作用下将会对地震动产生更大的放大效应。建议地表场区建筑群集中于 BS32 孔地表位置周边范围内。

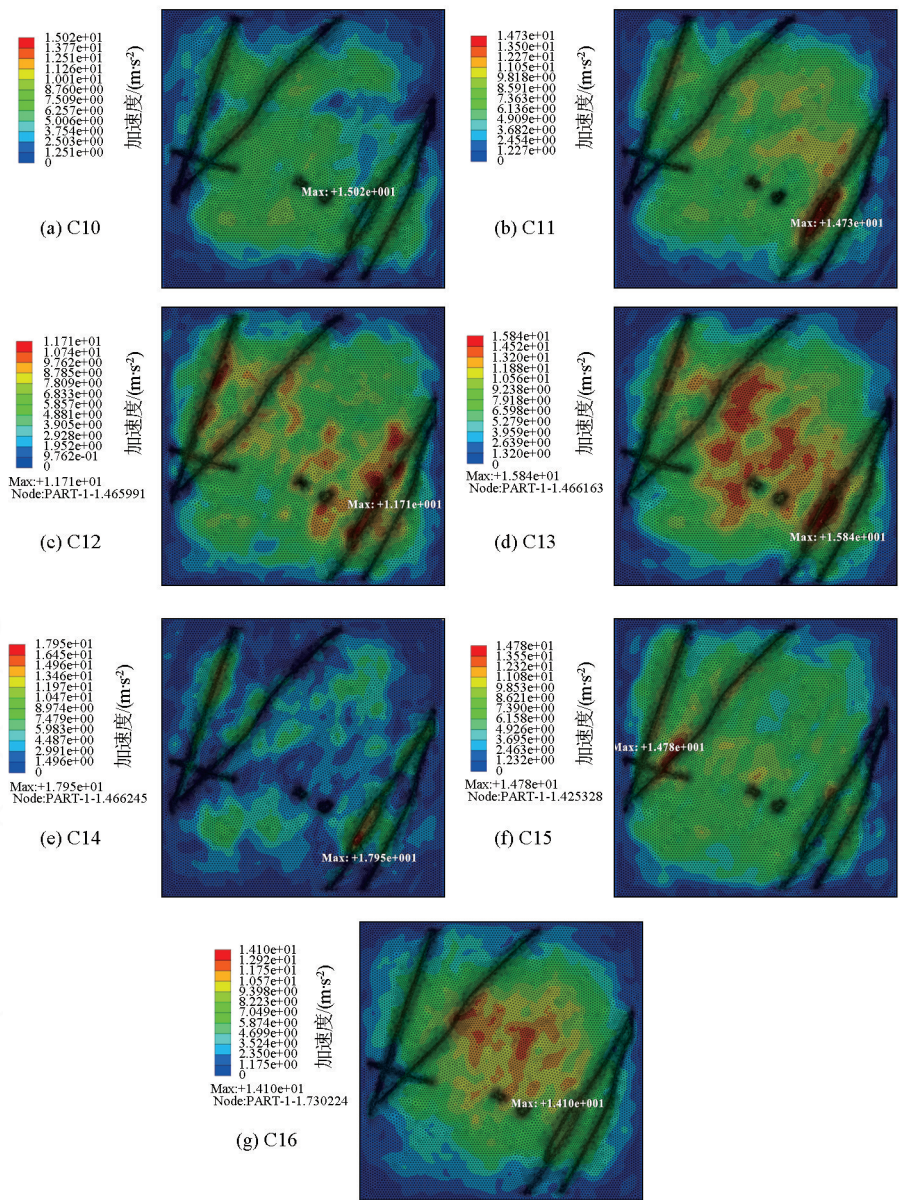


图 7 7.0 级地震动作用下不同工况地表加速度分布

Fig.7 Acceleration distribution on the surface with 7.0 magnitude earthquake under different working conditions

2.2 地下实验室峰值加速度反应

不同震级地震动输入条件下,地下实验室峰值见 表 4。由表可知:6.5 级地震动作用下工况 C4 的地下实验室峰值加速度反应最大,工况 C7、工况 C1 及 C8 次之,工况 9 最小。结果表明:6.5 级地震动作用下岩体弹性模量越大,地下实验室峰值加速度反应越大,加速度反应对高强度岩体更为敏感,地下实验室峰值加速度反应随岩体力学参数的强化而逐

渐增大;C1 的地下实验室峰值结构加速度反应与 C8 的峰值加速度反应基本完全相同,表明斜坡道穿越 F29-1 断层对地下实验室峰值加速度分布几乎没有影响。

7.0 级地震动作用下,工况 C16 的模型结构加速度反应最大,工况 C10、C11 及 C17 次之,工况 C18 最小。结果表明:7.0 级地震动作用下,断层弹性模量越大,地下实验室峰值加速度反应越大,C10

表 4 不同工况下加速度反应最大值

Table 4 Maximum acceleration response under different working conditions

震级	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
6.5	4.84	4.48	4.24	5.33	4.70	4.70	4.86	4.83	3.56
震级	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
7.0	11.40	11.39	9.58	10.90	8.89	10.30	12.42	11.38	8.93

与 C17 地下实验室峰值加速度反应结果基本相同,表明斜坡道是否穿越 F29-1 断层对地下实验室峰值加速度反应影响较小,可以忽略。对比 6.5 级地震动及 7.0 级地震动作用下地下实验室地震动峰值加速度反应,可以发现:不同地震动作用下,地下实验室结构的加速度响应存在差异,这是由于地震动本身的特性引起的(频率组构及时程特性),其次也体现了地下实验室地震反应对不同岩体及断层的选择性较为明显。

2.3 地震动传播的傅里叶谱对比

地震动在目标岩体内传播的谱特性见图 8,具体对比观测点如图 9 所示。图 8 中各节点编号分别

对应图 9 中的 4 个关键截面。由图 8 可知:同一工况下,人员提升竖井及入风、排风井傅里叶谱反应规律较为一致,各测点在傅里叶谱各频段振动的幅值随输入地震动峰值加速度增大呈增大的趋势;此外,不同地震动作用下加速度反应频谱组成表现出不同的特点:6.5 级地震动作用下,地下实验室各测点 x 方向的加速度在 1~10 Hz 范围内较为发育,通过对比竖井 y 方向与 x 方向上各测点的傅里叶谱发现, y 方向上各测点频谱的低频成分更加丰富;其次,6.5 级地震动作用下, y 方向上竖井顶部测点频谱振幅最大值对应的基本频率比 x 方向上的更高。

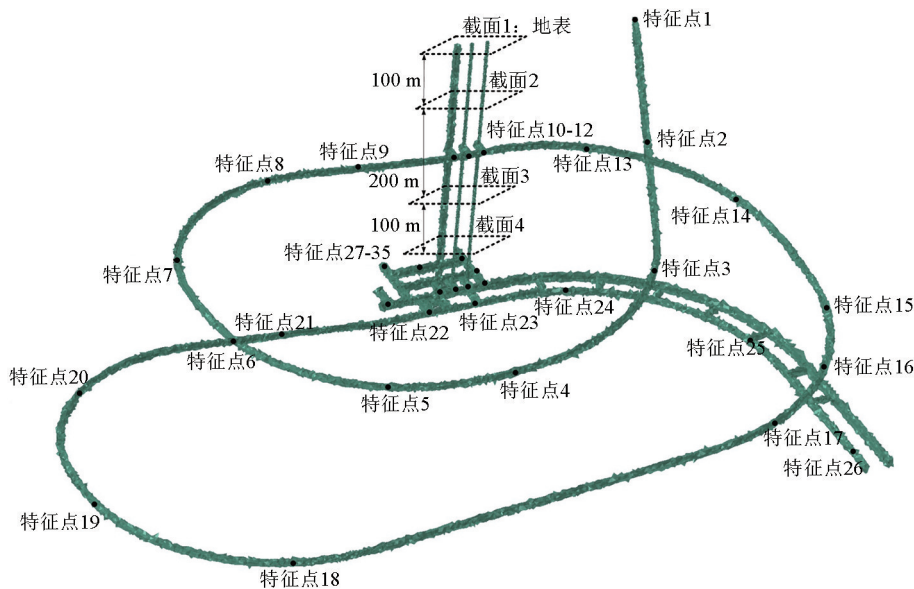


图 8 模型区域岩体—地下结构体系分析选取的特征点及对应的节点编号
Fig.8 Feature points and corresponding node numbers selected in the analysis of the rock mass-underground structure system in the model area

7.0 级地震动作用下, y 方向上竖井顶部测点在频段采集范围内振动的振幅出现双峰值现象,且其二阶频率较 x 方向上顶部测点第二幅值峰值对应的频率低。 z 方向上,各测点振动幅值最大值比 x 、 y 方向都大,且各频段内主要频率清晰分布较均匀。在 6.5 级地震动作用下,各竖井顶部测点的傅里叶谱高频成分增大。在 7.0 级地震动作用下,竖井顶部测点仅在 10~15 Hz 频段内有一个振动幅值最大值。为了研究岩体力学参数对测点傅里叶谱的影响,将 C1 与 C4、C10 与 C14 分别进行对比发现:随着岩体力学参数的弱化,在地震加速度较小时,各测点加速度频谱的 5~12 Hz 频段振动幅值显著减小;位于 -240 m 辅助试验水平以浅时,测点的振幅最大值基本符合先增大后减小的规律,振幅最大值对应的频率随岩体弱化越来越低;而位于 -240 m 辅助试验水平以深的测点振幅最大值随岩体弱化逐渐减

小。

分别对比 C1 与 C6、C3 与 C5、C12 与 C14、C10 与 C15,结果显示:岩体力学参数越小,各测点的振幅最大值越小;且岩体波速参数对地震加速度的大小较敏感,加速度幅值越大,振幅的变化范围越大。通过比较发现:地震动作用下斜坡道是否穿越 F29-1 断层对竖井高度方向上各测点的加速度反应影响不显著。

2.4 斜坡道峰值加速度放大系数

6.5 级和 7.0 级地震动作用下斜坡道峰值加速度放大系数见表 5、表 6,测点编号如图 8 所示。由表可知,随着输入地震动峰值加速度增大,相同测点位置加速度放大系数变化并不显著,这与岩体地下实验室所在的地质环境相关。整体来看,地下实验室本身相对于地震动波长(约为 300 m)对地震动的响应差异并不大,不同震级作用下地下实验室的不

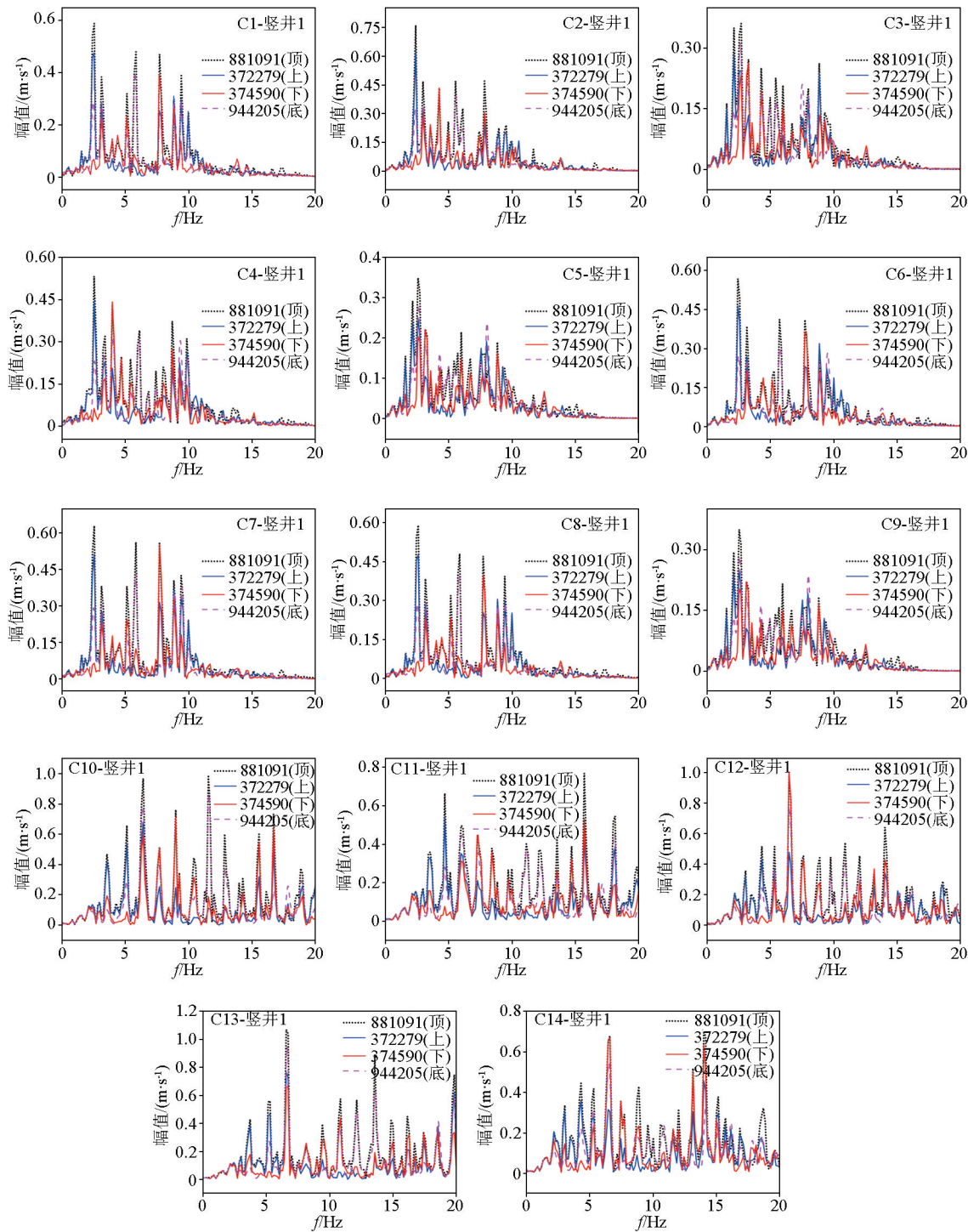


图9 不同工况(C1~C14)地下震动传播的谱特性
Fig.9 Spectrum characteristics of ground motion propagation under different working conditions from C1 to C14

表5 6.5级地震动作用下工况C8下斜坡道放大系数

Table 5 Working condition C8 down ramp amplification factor with 6.5 magnitude earthquake

方向	测点编号									
	特征点 1	特征点 2	特征点 3	特征点 4	特征点 5	特征点 6	特征点 7	特征点 8	特征点 13	特征点 14
x	1.58	1.25	0.64	0.51	0.96	0.93	1.16	0.95	0.74	0.85
y	1.33	0.82	0.52	0.52	0.82	0.92	0.84	0.84	1.07	0.91
z	2.23	1.62	1.29	1.02	1.04	0.95	1.05	1.39	1.27	1.19
方向	测点编号									
	特征点 16	特征点 17	特征点 18	特征点 19	特征点 20	特征点 22	特征点 24	特征点 25	特征点 26	
x	0.45	0.48	0.86	0.63	0.87	1.18	1.19	1.05	0.50	
y	0.51	0.57	0.70	0.48	0.89	0.87	0.83	1.08	0.54	
z	0.80	0.82	0.97	0.80	1.39	1.54	1.67	1.88	0.86	

表 6 7.0 级地震动作用下工况 C17 下斜坡道放大系数

Table 6 Working condition C17 down ramp amplification factor with 7.0 magnitude earthquake

方向	特征点									
	特征点 1	特征点 2	特征点 3	特征点 4	特征点 5	特征点 6	特征点 7	特征点 8	特征点 13	特征点 14
x	1.52	1.17	0.70	0.50	0.73	0.74	1.07	1.00	0.99	0.93
y	1.94	1.07	0.68	0.60	1.22	1.48	1.46	1.37	1.20	1.21
z	2.10	1.56	1.08	0.73	0.89	0.97	1.48	1.45	1.40	1.00
方向	特征点									
	特征点 16	特征点 17	特征点 18	特征点 19	特征点 20	特征点 22	特征点 24	特征点 25	特征点 26	
x	0.51	0.58	0.93	0.68	1.18	0.94	0.87	0.98	0.61	
y	0.58	0.53	1.03	1.05	1.17	1.36	1.49	1.07	0.68	
z	0.74	0.77	1.07	0.69	1.14	1.40	1.37	1.48	0.63	

同响应主要源于不同地震动的频率组构差异性。同一工况下,斜坡道顶部加速度反应最大,斜坡道靠近竖井一侧及底部斜坡道与构筑物相连接处加速度反应均较大,峰值加速度整体空间分布呈现在斜坡道顶部、靠近竖井一侧及底部与构筑物连接处。

3 结论

本文采用有限断层法得出位置基岩地震动,根据现有资料实现基岩面以下的地下实验室精细化建模,通过地震动输入实现地震过程的情景再现,并获取地震动传播及位移响应等特性。采用时域有限元方法开展了花岗岩硬基岩场区地下实验室的大尺度、区域性有限元模拟,工作涉及到无限域有限化、目标材料动力特性、大体系精细化建模、高精度数值算法等方面。通过开展目标区域的地震动模拟及有限元计算可以得出地下实验室地震动响应,主要结论如下:

1) 因研究区发震构造(旧井断裂)距离目标场址有一定距离,传统的地震动衰减关系预测方法难以考虑近场可能存在的有限断层效应、破裂方向性效应和上盘效应等近场震源效应,本文采用随机有限断层法,通过考虑发震断层的震源破裂过程和断层几何产状,可以有效地考虑上述近场震源效应。

2) 模拟得到的旧井断裂发生 6.5 级地震时,估计目标场址的地震动持时大约在 6~9 s 之间,水平向谱加速度大约在 132~679 gal 之间;发生 7.0 级地震时,估计目标场址的地震动持时大约在 13~14 s 之间,水平向 PGA 大约在 444~749 gal 之间。研究结果说明,目标场址场地类型为花岗岩硬基岩场地时,地下洞室群的加速度反应谱中高频部分发育明显。

3) 因局部软化带的存在,花岗岩硬基岩场地的地下实验室竖井各方向加速度放大系数均存在差异,体现出明显的空间分布特征,各方向放大系数在 1.5~2.0 区间,并与输入地震动和软化带的材料属

性相关。地下实验室巷道结构不同位置加速度分布空间效应显著,软化带对应地表峰值加速度富集明显,工程中应规避此区域,但是否穿越断层对地下洞室群的加速度反应空间分布影响较小。

参考文献(References):

- [1] Kickmaier W, Mckinley I. A review of research carried out in European rock laboratories[J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 176(1/2): 75-81.
- [2] Zhang C L, Wang J, Su R. Concepts and tests for disposal of radioactive waste in deep geological formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 750e68.
- [3] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801-802.
Wang J, Chen W M, Su R, et al. Geology disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801-812.
- [4] Wang J. High-level radioactive waste disposal in China: Update 2010[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2010, 2(1): 1-11.
- [5] Uenishi K, Sakurai S. Characteristic of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai Underground Station [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(6): 813-822.
- [6] Tsinidis G, Silva F D, Snastaspoulou I, et al. Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 5: 99.
- [7] 张雨霆, 肖明, 李玉姝. 汶川地震对映秀湾水电站地下厂房的震害影响及动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 3663-3671.
Zhang Y T, Xiao M, Li Y J. Effect of earthquake on earthquake damage and dynamic response analysis of underground powerhouse of Yingxiuwan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 3663-3671.
- [8] 杜修力, 蒋家卫, 许紫刚, 等. 浅埋矩形框架地铁车站结构抗震性能指标标定研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 111-119, 128.
Du X L, Jiang J W, Xu Z G, et al. Study on quantification of seismic performance index for rectangular frame subway station structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 111-119, 128.

- [9] 刘晶波,王文晖,赵冬冬,等.复杂断面地下结构地震反应分析的整体式反应位移法[J].土木工程学报,2014,47(1):134-142.
- Liu J B, Wang W G, Zhao D D, et al. Integral response deformation method in seismic analysis of complex section underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 134-142.
- [10] Yuan Y, Yu H T, Chen Z Y. Evaluation of seismic calculation methods for shallow-buried frame structures in soft soil [J]. Journal of Vibration & Shock, 2009, 28(8): 50-56.
- [11] Zhang H Y, Zhao C, Chen S, et al. Seismic performance of underground subway station with sliding between column and longitudinal beam-Science Direct [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 102: 103439.
- [12] 何川,耿萍.强震活动断裂带铁路隧道建设面临的挑战与对策[J].中国铁路,2020,702(12):65-72.
- He C, Geng P. Challenges and countermeasures of railway tunnel construction in macroseismic active fault zone[J]. China Railway, 2020, 702(12): 65-72.
- [13] 崔臻,盛谦,冷先伦,等.地下洞室地震动力响应的岩体结构控制效应[J].岩土力学,2018,39(5):274-287.
- Cui Z, Sheng Q, Leng X L, et al. Control effect of large geological discontinuity on seismic response and stability of underground rock caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 274-287.
- [14] Hashash Y M A., Park D, Yao J I C. Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunn. Undergr. Space Technol, 2005, 20(5): 435-441.
- [15] Coigliano M, Scandella L, Lai C G, et al. Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: A case study in Southern Italy[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(4): 975-995.
- [16] Wang J, Chen L, Su R, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- [17] Ungless R F. An infinite finite element [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1973.
- [18] Bettess P. More on infinite element [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 15(11): 1613-1626.
- [19] Beer G, Meek J L. Infinite domain element [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1981, 17(1): 43-52.
- [20] 陈继峰,赵翠萍,杨立明.甘肃地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究[J].地震,2010,30(1):125-130.
- Chen J F, Zhao C P, Yang L M. Q values of S wave inelastic attenuation in Gansu Region [J]. Earthquake, 2010, 30(1): 125-130.
- [21] 陈继峰,杨立明.甘肃地区震源参数的相关性研究[J].地震地磁观测与研究,2011,32(1):10-14.
- Chen J F, Yang L M. Study on source parameters and its similar relationship of earthquakes occurred in Gansu region [J]. Seismological and geomagnetic observation and research, 2011, 32(1): 10-14.

Seismic response characteristics of the cavern group of the Beishan underground research laboratory for the geological disposal of high-level radioactive waste

YUN Long^{1,2}, CHEN Su³, FU Lei⁴, ZHUANG Hai-Yang⁵, WANG Ju^{1,2}

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100024; 4. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

Abstract: The Hexi Corridor and northern Qilian region, adjacent to the Beishan underground research laboratory (URL) for the geological disposal of high-level radioactive waste, exhibit complex seismic environments characterized by frequent strong earthquakes. The Beishan URL, featuring a complex underground structure consisting of three vertical shafts and a spiral ramp, displays significant large-scale spatial distribution characteristics. Investigating the seismic response characteristics of the underground structure group holds great engineering significance for the subsequent assessment of crustal stability at the site. Based on the design of the URL, along with existing physical and mechanical parameters of surrounding rocks, this study established a fine-scale three-dimensional finite element model of the rock mass-underground structure system. Using this model, this study investigated the impacts of key faults on the near-field seismic safety of the URL. The results indicate that traditional seismic attenuation relationships are difficult to consider near-source effects, such as finite fault effects, fracturing directivity effects, and hanging wall effects. In contrast, the stochastic finite-fault method can effectively consider these near-field ground shaking characteristics. The target site exhibits hard granite bedrock, and the response spectra of the earthquakes induced by near-field seismogenic faults, received at the site, display pronounced high-frequency components. Furthermore, the ground shaking of the underground cavern group, caused by the irregular structure of the URL, presents significant spatial variability, with the rock mass softening zone exhibiting a notable accumulation of peak ground acceleration. This zone should be avoided in engineering applications. This study offers a basis for seismic safety analysis for the future site selection and evaluation of the disposal repositories of high-level radioactive waste.

Key words: underground research laboratory for the disposal of high-level radioactive waste; ground shaking; fault; seismic response; numerical simulation