

山体地形与地质结构面对地下洞室 地震响应的影响研究

朱泽奇¹, 盛 谦¹, 陈子婧², 李建贺¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要:以大岗山水电站大型地下洞室为例, 分别构建了地下洞室体系简化模型和考虑山体地形与不利地质结构的复杂模型, 利用显式有限差分方法分析了山体地形和大型地质结构面对洞室围岩地震响应的影响, 研究地下洞室地震变形规律及响应特征。研究表明: 山形地表的反射波主要表现为 P 波作用, 地质结构面的反射、折射波主要表现为 S 波作用; 山体地形对地下洞室上部迎波面的地震响应影响要大于下部, 且上部围岩的位移与加速度响应均有一定程度的放大。地质结构面对于边墙部位洞周岩体的地震变形幅值有较大影响, 对围岩加速度的放大效应也比较显著, 但主要集中在距离结构面分布位置较近的有限范围内, 并且地质结构面对不同频率成分的地震波的影响规律不同。

关键词: 岩石力学; 大岗山水电站; 地下洞室; 山体地形; 地质结构面; 地震响应

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增 1-3509-07

Influence of mountain topographic and geological structural plane on seismic response of rock cavern

ZHU Zeqi¹, SHENG Qian¹, CHEN Zijing², LI Jianhe¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract: A simplified analysis model and complex models with consideration of the effects of topography, discontinuous geological plane were established and applied to the underground caverns of Dagangshan hydropower station under construction. The finite difference software FLAC is used for the seismic response analysis of surrounding rock mass of under ground caverns. The result shows that the mountain topography has some influences on seismic displacement and acceleration of upper surrounding rock mass, which mainly be imposed P-wave vibration loading. The effect of the weak structural plane which strengthening S-wave shear to the surrounding rock mass, is relatively remarkable on the earthquake response of caverns, and the effect zone of it is limited to vicinity of cutting surrounding rock mass. The effect regularity of the geological structural plane is different on earthquake waves with different frequency components.

Key words: rock mechanics; Dagangshan hydropower; underground cavern; mountain topography; geological structural plane; seismic response

收稿日期: 2016-04-28; **修回日期:** 2016-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057905); 国家自然科学基金面上项目(51279202, 51409263)

Supported by the National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program)(Grant No. 2015CB057905) and General Program of National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51279202 and 51409263)

作者简介: 朱泽奇(1980-), 男, 博士, 2002年毕业于西安交通大学土木工程专业, 现任副研究员, 主要从事数值岩石力学与工程和围岩稳定性方面研究工作。E-mail: zqzhu@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0442

1 引言

我国西部属高地震烈度区,已建、在建和将建的大型水利水电工程众多,这些水电工程多分布于大渡河、金沙江、雅砻江和澜沧江等流域,地形、地质条件复杂,且多采用地下式厂房^[1]。从外部来看,地下厂房洞室多布置于高山峡谷地区,这种大起伏地形对地下洞室地震稳定是利是弊,对围岩地震响应有何影响,目前相关的研究不多。从内部来看,当地下厂房穿越断层带或者节理、裂隙发育带时,地震荷载作用容易引起错动变形、局部岩体滑移和崩塌,这方面的文献报导与震害调查常见于山区隧道、城市地铁等小型隧洞。而水电站大型地下洞室结构复杂,与其他行业和水工水电工程中其他洞室工程相比,具有其特殊性^[2],一旦失稳,其破坏性更大,带来的社会经济影响也更大。因此,地形与地质条件对于围岩地震响应的影响,是当前水电站大型地下洞室动力分析与抗震设计中迫切需要解决的难题之一。

当前常用的地下工程地震响应数值分析方法主要可分为连续与非连续介质分析方法^[3]。有限元法、有限差分法可以考虑地震过程中复杂地形、非均质及非线性影响,能够深入分析围岩各部分的静动力响应,已成为岩土工程连续介质分析中的重要分析方法。李小军和卢滔^[4]基于显式有限元方法进行了地下洞室地震响应分析;陈健云等^[5-6]和李海波等^[7-8]分别采用三维有限元法和有限差分法,进行了水电站超大型地下洞室群的地震响应分析。非连续介质分析适合于求解节理岩体的动力响应,这方面的主要研究工作有,J. P. Bardet等^[9-12]应用动力离散元、离散元-边界元,对地震作用下节理岩体洞室围岩变形与破坏机制进行的分析与研究。

在地震动力计算中,地下洞室围岩地震响应需综合考虑从基岩深部向上传播地震波和被地表反射后向下传播地震波的双重影响^[13]。此外,地下洞室厂房区往往分布延伸数百至数千米的大型岩脉、软弱结构面等不利地质结构,当地震波传播至这些大型地质结构面时,还会发生反射、透射与折射等现象,相关传播机制非常复杂。目前大型地下洞室地震响应计算建模主要有2种形式:将洞室计算模型直接建模至地表^[14]或者是在岩体中截取一块区域进行分析^[15],前者将导致较大的计算量,而后者无法考虑地表反射地震波的影响。通过借鉴静力分析

中的子模型计算方法,张雨霆等^[13]提出了针对大型地下洞室地震响应分析的动力子模型法。虽然子模型截取于岩体的一个区域,但可以通过等效作用考虑地表反射地震波的影响,因此该方法对于地震动力计算有一定的优势,但在考虑地质结构面的影响时还有一定的局限性,尤其是当结构面穿越整个模型的时候。

由于上述地震动力计算中面临的难题,研究地表地形与地质结构对地下洞室地震响应影响的相关文献较少。依托大岗山水电站地下厂房洞室群,本文分别构建了地下洞室体系简化模型和考虑山体地形与地质结构面的复杂模型,利用二维显式有限差分方法分析了山体地形和地质结构面对洞室地震响应的影响,对不同计算模型下的地下洞室地震变形规律及响应特征进行对比分析,从而在地下洞室工程地震动力建模方法与影响规律方面建立了一些初步的认识。

2 工程背景

大岗山水电站地下厂房系统,其主副厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置。主厂房、主变室开挖尺寸分别为206.00 m×30.80 m×73.78 m(长×宽×高),144.00 m×18.80 m×25.10 m(长×宽×高);尾水调压室采用阻抗式,净跨度20.50~24.00 m,长130.00 m,室高75.08 m^[16]。厂区总体以II类围岩为主,局部洞段为III类围岩。规模较大的、穿过厂房洞群区的大型地质结构面主要有 β_{80} , β_{81} 辉绿岩脉。

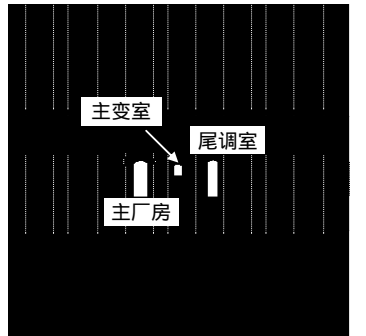
大岗山水电站工程区域地质构造及地震地质背景复杂,新构造活动较强烈,其区域构造稳定性对工程建设影响较大。电站地震烈度危险性和基岩峰值加速度可参见朱泽奇等^[16]。

3 计算模型

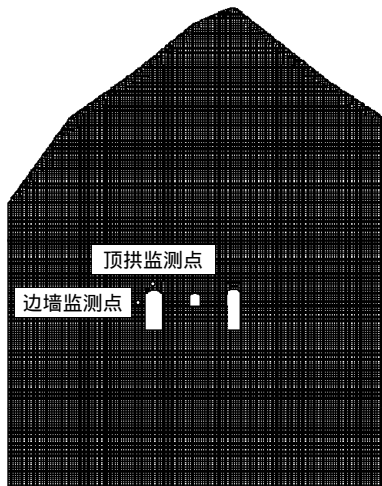
3.1 模型范围与计算条件

主厂房顶拱4[#]机组附近有 β_{80} 岩脉揭露,在主厂房施工期曾经发生过顶拱部位的局部塌方,是施工期稳定性评价重点关注的对象,也是后期地震稳定性评价中可能的隐患。本文利用有限差分程序FLAC,针对4[#]机组剖面进行地震响应计算分析,计算模型主要考虑主厂房,主变室和尾调室三大洞室。为研究水电站山体地形和大型地质结构面对洞

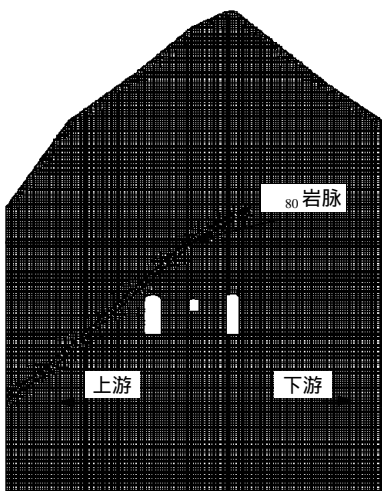
室地震响应的影响，分别建立地下洞室体系简化模型(见图 1(a))，考虑山体地形的山体模型(见图 1(b))及综合考虑地形与岩脉分布的完整模型(见图 1(c))。其中对于简化模型，其上部边界上施加有截断边界以上至地表的岩体重量外荷载。岩体均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型，厂区工程岩体主要考虑 II 类围岩。相关围岩物理力学参数见表 1。



(a) 简化模型



(b) 山体模型



(c) 完整模型

图 1 大岗山地下厂房 4#剖面地震动力计算模型

Fig.1 Dynamic numerical model of section #4 of Dagangshan underground powerhouse

表 1 岩体力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

岩性	E/GPa	ν	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
II 类	21.8	0.25	2.65×10^3	1.65	50
断层岩脉	0.3	0.39	2.2×10^3	0.10	21

由于在地震动力计算之前，要先进行洞室开挖模拟，因此本文在截取研究区域时主要还是参考静力计算中的建模方法，即洞室距截断边界的距离应大于 10~20 倍洞室跨度。目前对于动力计算的截断边界还没有形成统一的认识，因此本文中暂不考虑这一因素的影响。

3.2 边界条件和阻尼的确定

图 2 为洞群计算模型动力边界条件及地震动输入示意图^[17]。对于简化模型(见图 1(a))，其顶面和 2 个侧面设置为黏滞边界，而对于山体模型(见图 1(b))和完整模型(见图 1(c))，则只需将模型侧面设置为黏滞边界。

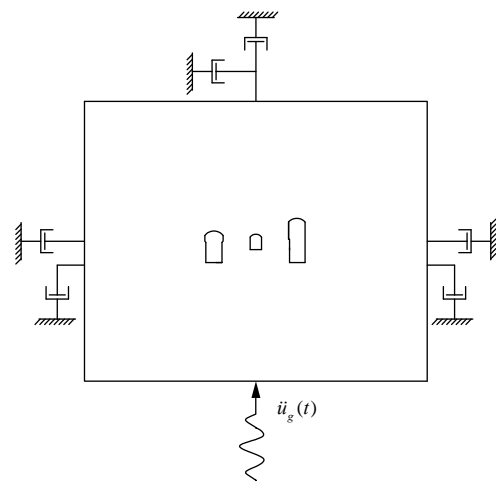


图 2 地下洞室地震响应分析示意图^[17]

Fig.2 Numerical model of seismic response analysis of the underground openings^[17]

对于超大型地下厂房的计算模型的地震响应分析，常常使用瑞利阻尼和局部阻尼。很多实例证明，利用瑞利阻尼计算得到的加速度响应规律与实际较为相符，而且其理论与常规动力分析方法类似，因此在岩土工程抗震计算中应用较广泛，它的一个较为显著的缺点是计算时间步太小，导致动力计算时间过长。局部阻尼与频率无关，这与岩土体介质的阻尼性质相符。相比瑞利阻尼，局部阻尼应用简单，无需估算频率，计算速度快，同时计算精度较高。本文中地下洞室地震响应计算采用局部阻尼，取阻

尼比 ξ 为 5%^[17]。

3.3 地震荷载的输入

假设地震波入射方向垂直于底部边界，同时考虑到地震波的剪切作用对于地下洞室影响较大，因此将在计算模型底部边界上输入的地震动设置为水平向振动的剪切波。由于工程区域缺乏现有的实测地震波数据，结合大岗山的近场特性和高抗震设防烈度，同时考虑地震波持时特性，选取日本阪神地震记录作为计算本区 50 a 超越概率 10% 的地震工况。结合工程地震学原理，通过高频滤波和基线校正后得到地震加速度时程曲线，如图 3 所示。

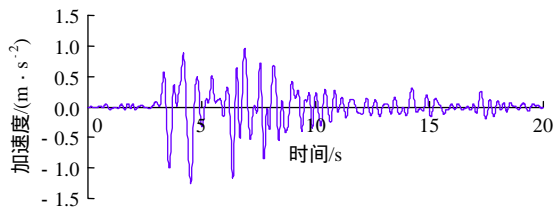


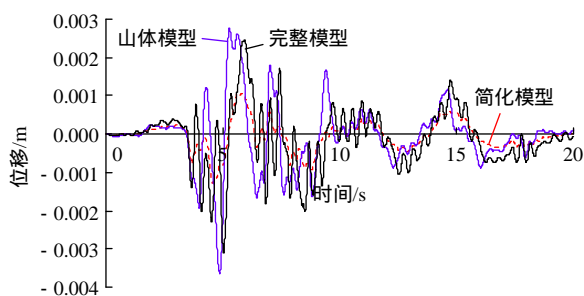
图 3 阪神主震水平向加速度时程曲线

Fig.3 Horizontal acceleration history of Kobe main shock record

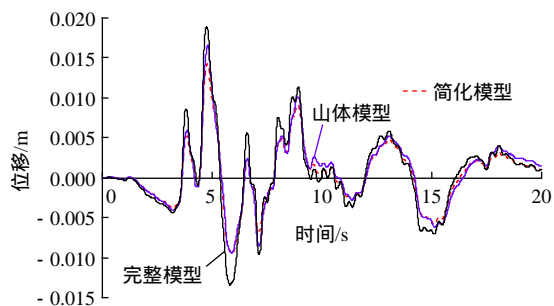
4 计算结果分析

4.1 围岩地震变形响应特征

限于篇幅，以主厂房顶拱及边墙中部监测点的计算结果作为主要分析依据。图 4 和 5 分别给出了



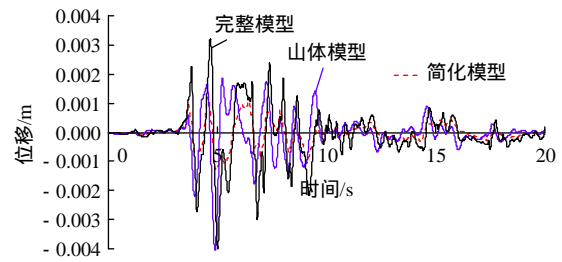
(a) 竖向位移时程曲线



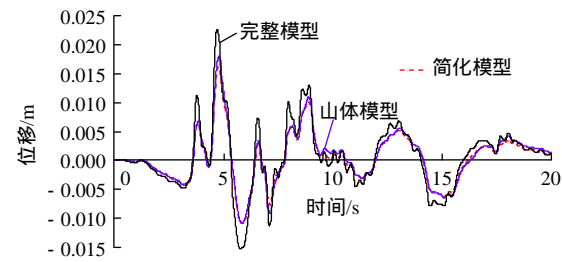
(b) 水平位移时程曲线

图 4 主厂房顶拱监测点位移时程曲线

Fig.4 Time-history curves of displacement of main powerhouse arch-crown



(a) 竖向位移时程曲线



(b) 水平位移时程曲线

图 5 主厂房边墙监测点位移时程曲线

Fig.5 Time-history curves of displacement of main powerhouse side wall

3 种计算模型条件下的主厂房顶拱竖向位移和水平位移的时程曲线。

对比简化模型与山体模型计算结果可以发现，山形的存在对顶拱和边墙的竖向位移时程影响较大，最大竖向位移由 1.0~1.5 mm 增加到 3.5~4.0 mm，而对于水平变形几乎没有影响。从曲线形态来看，由于山体表面的反射波作用，洞室顶拱和边墙的竖向位移响应时程高频成分明显增加，而水平位移响应时程曲线基本没有变化。

对比山体模型与完整模型计算结果可以看出，主厂房顶部贯穿岩脉的存在使得顶拱和边墙中部的最大水平变形增大约 5 mm，而顶拱处最大竖向变形量值略有变小，边墙中部最大竖向位移基本不变；从曲线形态来看，由于岩脉的反射、折射作用，洞室顶拱和边墙的竖向位移响应时程高频成分更加明显，水平位移响应时程高频成分有一定程度增加。

根据图 4 和 5 的分析结果，可以认为，由于山形地表的反射，地震波增强了对围岩的竖向振动作用，其形式上主要表现为 P 波，且经过地表与洞室临空面之间的反复叠加之后，P 波的高频成分增多；由于地质结构面的反射、折射，地震波增强了对围岩的水平剪切作用，其形式上主要表现为 S 波，同样地震波在结构面与临空面之间多次传播之后，其高频成分也更加明显。同时大型地质结构面对向上传播的剪切波能量有一定吸收作用，使得到达山体表面的地震波能量减小，这也是其反射波在洞室

顶拱处引起的竖向位移有所减小的原因(见图 4(a))。

为了说明地震荷载作用下的围岩变形特征、山形、地质结构面对其影响,图 6 给出了 3 种模型计算条件下主厂房洞周岩体的地震位移幅值。从图 6 可以看出,山形的存在对围岩在地震中的变形幅度有一定程度的增大,并且其对于洞室上部围岩的影响明显高于下部岩体,这是因为洞室上部开挖面相对于山体表面的反射波为迎波面,而下部开挖面为背波面,因此地表界面的反射波作用对于洞室上部围岩的地震变形影响较大;主厂房顶拱附近贯穿的地质结构面对于洞周岩体的地震变形幅值有较大影响,相较于山体模型,洞顶岩脉的存在主要对左右边墙和洞室底板的地震变形影响较大。

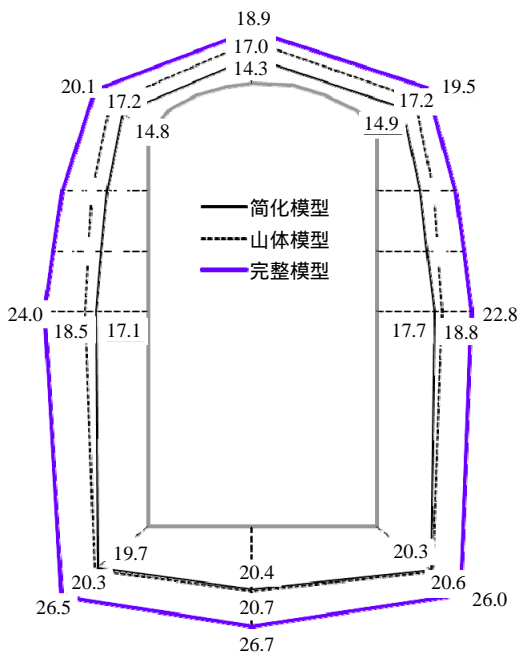


图 6 地震作用下主厂房洞围岩体位移幅值(单位: mm)
Fig.6 Displacement amplitude of main powerhouse under seismic loading(unit: mm)

4.2 围岩加速度响应

根据王 帅等^[17]的观点,实际地震波频率在 0.4 ~ 10.0 Hz 范围,由于局部阻尼的局限性及其取值的经验性,基于局部阻尼的动力计算得到的岩体加速度响应很难避免产生高频噪声,虽然高频地震波对岩体地震位移及应力结果影响较小,但对岩体加速度响应规律研究有一定影响。因此本文利用低通滤波器,将用以研究的主厂房围岩加速度响应时程中大于 10 Hz 的高频波滤去,这样做虽然会产生一定的误差,但是在 3 种计算模型的对比分析及规律研究中是适合及可行的。

底部输入的剪切波对于地下洞室围岩的主要加速度响应表现为水平方向,图 7 给出了 3 种模型计算条件下主厂房洞周岩体的水平加速度响应幅值。从图 7 可以看出:相较于简化模型,山体的存在对洞周上部岩体加速度有所放大,但影响较小,其加速度幅值与简化模型较为接近(图 7 中未给出山体模型对应的加速度幅值量值);相较于山体模型,地质结构面的存在对围岩加速度的放大效应比较显著,但主要集中在距离结构面分布位置较近的有限范围内,于大岗山水电站地下厂房,β₈₀岩脉对主厂房顶拱及上游边墙的地震响应影响较大。

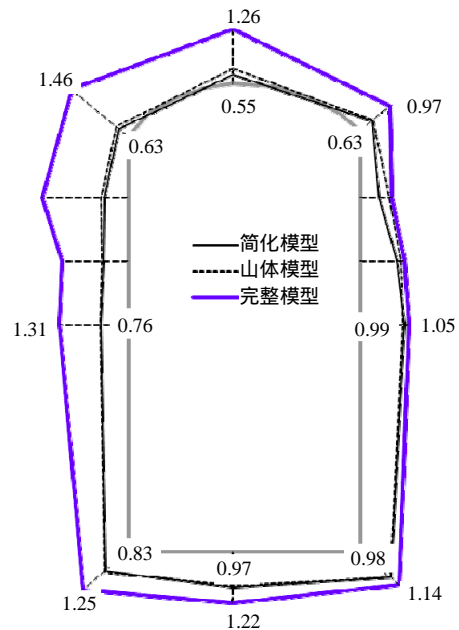


图 7 地震作用下主厂房洞围岩体水平加速度幅值(单位: m/s²)
Fig.7 Horizontal acceleration amplitude of surrounding rock mass under seismic loading(unit: m/s²)

图 8 为输入地震波加速度反应谱与主厂房上游边墙中部岩体水平加速度响应谱的对比,以此研究围岩加速度频谱特性。从图 8 可以看出,山体对于围岩加速度反应谱影响较小,地质结构面对于围岩加速度反应谱影响较大。相较于输入地震波,基于简化模型和山体模型计算得到的围岩加速度响应在 0.4 ~ 10.0 Hz 频段均有不同程度的减小,这是由于洞室空腔的存在,导致从底部输入剪切波发生散射与绕射,到达边墙中部时地震波会有所减小。从图 7 中可以看出,完整模型中主厂房上游边墙中部岩体加速度响应是放大的,但从图 8 中可以看出,并不是所有频段地震波都被放大,由于地质结构面对地震波的吸收作用和结构面界面处的反射作用,

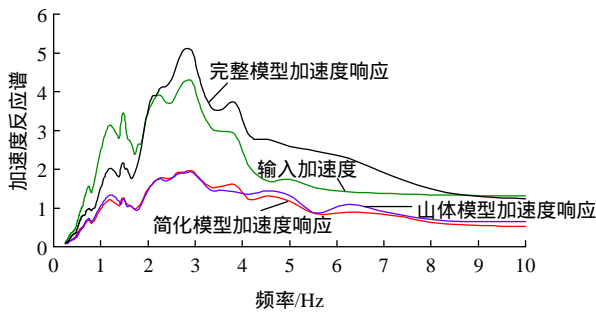


图8 主厂房上游边墙中部水平向加速度反应谱

Fig.8 Horizontal acceleration response spectrum curves of middle side wall of main powerhouse

使得受其影响较大的上游边墙中部的加速度响应，相较于输入地震波在小于 2 Hz 频段有一定程度减小，而在 2~10 Hz 频段均有所放大，这表明对于不同的频率成分，地质结构面对地震波的影响规律是不同的。

5 结 论

以大岗山水电站工程为背景，分别构建了地下洞室体系简化模型和考虑山体地形与地质结构面的复杂模型，利用显式有限差分方法，分析了山体地形和地质结构面对洞室地震响应的影响，研究了地下洞室地震变形规律及响应特征，得到了以下主要结论：

(1) 山形地表的反射波主要表现为 P 波，且经过地表与洞室临空面之间的反复叠加之后，形成了高频 P 波；地质结构面的反射、折射波主要表现为 S 波，且地震波在结构面与临空面之间多次传播之后，其高频成分也更加明显，同时地质结构面对于地震波能量有一定的吸收作用。

(2) 由于山形地表的反射作用，山体对地下洞室上部迎波面的地震响应影响要大于下部。山体地形导致上部围岩的位移与加速度响应均有一定程度的放大。大型地质结构面对于洞周岩体的地震变形幅值有较大影响，其中对于边墙部位岩体的水平位移影响占主要方面。地质结构面对围岩加速度的放大效应也比较显著，但主要集中在距离结构面分布位置较近的有限范围内。对于不同的频率成分，地质结构面对地震波的影响规律不同。

本文针对地形与地质因素的地下洞室地震响应影响研究，得到了一些有益的认识，对于地下洞室动力建模和抗震设计有一定的参考价值。但相关认

识是初步的，面向特定的工程输入特定的地震动，相关计算结果的普适性及其理论研究将是下一步要开展的工作。

参考文献(References)

- [1] 董学晟, 田野, 邬爱清. 水工岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004 :390 – 391.(DONG Xuesheng ,TIAN Ye ,WU Aiqing. Hydraulic rock mechanics[M]. Beijing : China Water Power Press , 2004 : 390 – 391.(in Chinese))
- [2] 卢 滔, 李小军, 李亚琦. 水工地下厂房岩体洞室地震反应问题分析[J]. 中国地震, 2008 ,24(1) :77 – 85.(LU Tao ,LI Xiaojun ,LI Yaqi. Discussion on seismic response numerical study of large scale underground rock cavern for hydropower station[J]. Earthquake Research in China , 2008 , 24(1) : 77 – 85.(in Chinese))
- [3] 陈健云, 胡志强, 林 皋. 大型地下结构三维地震响应特点研究[J]. 大连理工大学学报, 2003 , 43(3) : 344 – 348.(CHEN Jianyun , HU Zhiqiang , LIN Gao. Study of 3D seismic response characteristics of large underground structures[J]. Journal of Dalian University of Technology , 2003 , 43(3) : 344 – 348.(in Chinese))
- [4] 李小军, 卢 滔. 水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析[J]. 水力发电学报, 2009 , 28(5) : 41 – 46.(LI Xiaojun , LU Tao. Explicit finite element analysis of earthquake response for underground caverns of hydropower stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering , 2009 , 28(5) : 41 – 46.(in Chinese))
- [5] 陈健云, 胡志强, 林 皋. 超大型地下洞室群的随机地震响应分析[J]. 水利学报, 2002 , (1) : 71 – 75.(CHEN Jianyun , HU Zhiqiang , LIN Gao. Random seismic response analysis of large-scale underground caverns[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2002 , (1) : 71 – 75.(in Chinese))
- [6] 陈健云, 胡志强, 林 皋. 超大型地下洞室群的三维地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2001 , 23(4) : 494 – 498.(CHEN Jianyun , HU Zhiqiang , LIN Gao. 3D seismic response study on large scale underground group caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2001 , 23(4) : 494 – 498.(in Chinese))
- [7] 李海波, 马行东, 邵 蔚, 等. 地震波参数对地下岩体洞室位移特性的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005 , 24(增 1) : 4 627 – 4 634.(LI Haibo , MA Xingdong , SHAO Wei , et al. Influence of the earthquake parameters on the displacement of rock cavern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(Supp.1) : 4 627 – 4 634.(in Chinese))
- [8] 李海波, 马行东, 李俊如, 等. 地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2006 , 28(3) : 358 – 362.(LI

- Haibo, MA Xingdong, LI Junru, et al. Study on influence factors of rock cavern displacement under earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 358–362.(in Chinese)
- [9] Jean-Pierre Bardet, SCOTT R F. Seismic stability of fracture rock masses with the distinct element method[C]// 26th U. S. Symp. Rock Mech. [S. l.]: [s. n.], 1985: 139–149.
- [10] 陶连金, 张倬元, 傅小敏, 等. 在地震荷载作用下的节理岩体地下洞室围岩稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 32–40.(TAO Lianjin, ZHANG Zhuoyuan, FU Xiaomin, et al. Stability analysis of surrounding rockmass of underground excavation rock mass under seismic load[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1): 32–40.(in Chinese))
- [11] 张丽华, 陶连金, 李晓霖. 节理岩体地下洞室群的地震动力响应分析[J]. 世界地震工程, 2002, 18(2): 158–162.(ZHANG Lihua, TAO Lianjin, LI Xiaolin. Dynamic response analysis of large underground excavations in jointed rock[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(2): 158–162.(in Chinese))
- [12] 金峰, 王光纶, 贾伟伟. 离散元-边界元动力耦合模型在地下结构动力分析中的应用[J]. 水利学报, 2001, (2): 24–28.(JIN Feng, WANG Guanglun, JIA Weiwei. Application of distinct element-boundary element coupling model in underground structure dynamic analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (2): 24–28.(in Chinese))
- [13] 张雨霆, 肖明, 张志国. 大型地下洞室群地震响应的动力子模型法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 2): 3 392–3 400.(ZHANG Yuting, XIAO Ming, ZHANG Zhiguo. Dynamic sub-model method of earthquake response analysis of large-scale underground caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.2): 3 392–3 400.(in Chinese))
- [14] 王如宾, 徐卫亚, 石崇, 等. 高地震烈度区岩体地下洞室动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 568–575.(WANG Rubin, XU Weiya, SHI Chong, et al. Dynamic response analysis of rock underground caverns in highly seismic region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 568–575.(in Chinese))
- [15] 隋斌, 朱维申, 李晓静. 地震荷载作用下大型地下洞室群的动态响应模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1 877–1 882.(SUI Bin, ZHU Weishen, LI Xiaojing. Simulation on dynamic response of large underground opening complex under seismic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1 877–1 882.(in Chinese))
- [16] 朱泽奇, 盛谦, 冷先伦, 等. 大型地下洞室群关键块体地震响应分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 2): 254–259.(ZHU Zeqi, SHENG Qian, LENG Xianlun, et al. Study of seismic response of key block in large underground opening group[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.2): 254–259.(in Chinese))
- [17] 王帅, 盛谦, 朱泽奇, 等. 地震荷载作用下地下洞室不利地质结构塌落机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2 897–2 902.(WANG Shuai, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study of collapse mechanism of underground caverns with unfavorable geological structures under seismic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2 897–2 902.(in Chinese))