

地震动输入方法对深厚覆盖层上高面板堆石坝动力反应的影响

王志坚¹, 刘鸿宇², 孟涛¹, 周晨光²

(1. 新疆新华叶尔羌河流域水利水电开发有限公司, 新疆喀什 844000;

2. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 我国西部地区有很多已建、在建及拟建在深厚覆盖层上的高土石坝工程,其跨度和重量庞大,而地基刚度较小,地震时的坝-基动力相互作用问题越发受到工程界的关注,亟待开展相关研究。通过集成的黏弹性人工边界和等效节点荷载这种波动方法,计算了深厚覆盖层上高面板堆石坝的加速度反应,并与传统振动方法的计算结果进行对比;此外,讨论了采用波动方法时边界截取范围对坝体加速度反应的影响。结果表明:振动方法得到的坝体加速度反应明显高于波动方法,竖向地震动作用下表现的更加显著;水平向地震动输入时波动方法的敏感程度明显低于竖向地震动输入情况。

关键词: 深厚覆盖层;面板堆石坝;地震动输入;加速度反应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)03-0077-05

Effects of the Earthquake Input Method on the Dynamic Response of High Concrete-faced Rockfill Dams on the Deep Overburden Layer

WANG Zhijian¹, LIU Hongyu², MENG Tao¹, ZHOU Chenguang²

(1. Xinjiang Xinhua Yarkant River Basin Water Resources and Hydropower Development Co., Ltd., Kashi, Xinjiang 844000, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The acceleration response of high concrete-faced rockfill dam on deep overburden layer is calculated by using the wave analysis method which integrates viscous-spring artificial boundary and equivalent node load. The necessity of wave analysis is demonstrated by comparing the calculation results of wave analysis method and vibration analysis method. In addition, the influence of the interception range of the boundary on the wave analysis method is studied. The results show that the acceleration response of the dam obtained by the vibration analysis method is significantly higher than that obtained by the wave analysis method, and this situation is more significant under vertical ground motion input; the sensitivity of the wave analysis method under horizontal ground motion input is significantly lower than that under vertical ground motion input.

Keywords: deep overburden layer; concrete-faced rockfill dam; earthquake input; acceleration response

在我国的西部地区有很多已建、在建及拟建在深厚覆盖层上的高土石坝工程,如在建的阿尔塔什面板堆石坝(最大坝高 165 m,覆盖层最大厚度 94

m)^[1]、已建的大渡河瀑布沟心墙堆石坝(最大坝高 186 m,覆盖层最大厚度 75 m)^[2]和长河坝心墙堆石坝(最大坝高 240 m,覆盖层最大厚度 79.3 m)^[3]

收稿日期:2020-01-24

修稿日期:2020-03-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404904);国家自然科学基金项目(51779034)

作者简介:王志坚(1963—),男,新疆库尔勒人,高级工程师,主要从事水工结构与材料研究工作。E-mail:2436905025@qq.com

通讯作者:刘鸿宇(1994—),男,辽宁辽阳人,硕士研究生,研究方向为地震动输入方法。E-mail:931677584@qq.com

等。

这些高坝的跨度和重量庞大,而地基刚度较小,因此,在大坝动力反应分析中更应考虑坝-基动力相互作用,而地震动输入是这些高坝工程抗震安全性评价的首要前提^[4]。然而,传统的的地震动输入分析方法通常采用的是均匀一致输入的振动方法,建基面上各点的地震动时程一致^[5]。而对于体积和跨度庞大的高土石坝工程,其建基面各点的运动幅值和相位是存在差异的,表现出一种行波效应,传统方法既无法考虑这种行波效应,也无法模拟实际中散射能量向无限域的逸散,从而无法准确反映坝-基的动力相互作用。因此,需要选择一种更符合实际情况的能量开放的波动方法开展研究,通过对众多现有方法的对比分析,本文采用了集成黏弹性人工边界和等效节点荷载这种非一致输入的波动方法^[6],该方法物理概念清晰,已应用于拱坝、均质坝、地下工程和桥梁等工程的动力反应研究^[7-14],但由于高土石坝工程规模庞大,同时坝体堆石料和覆盖层土体具有较强的非线性,给波动方法的实现和数值计算带来诸多困难,因此,很少用于深厚覆盖层上高土石坝的动力反应研究。

本文分别采用波动方法和振动方法,计算了深厚覆盖层上高面板堆石坝的加速度反应,通过结果对比,论证了波动分析的必要性。同时,研究了采用波动方法时边界截取范围对坝体加速度反应的影响。

1 波动方法实现

本文在大连理工大学工程抗震研究所自主研发的大型岩土工程非线性有限元分析软件 GEODYNA^[15]平台集成了黏弹性人工边界和等效荷载的波动方法,开发了黏弹性人工边界界面单元(具有均匀弹簧和阻尼器的界面单元,见图 1)替代集中黏弹性人工边界^[6],集中黏弹性人工边界需要在法向和切向上分别设置单元,而且需要计算每个边界节点的代表面积,而黏弹性人工边界界面单元只需一个单元即可实现,采用的是均匀的弹簧和阻尼器,无需计算节点的代表面积,且易适应复杂边界形状;此外,只需输入地震动的加速度时程和波型及入射角度即可计算自由场反应和等效节点荷载,简化了波动分析方法的建模和荷载输入。目前已通过半圆形河谷散射问题算例验证了程序和波动方法的正确

性^[5]。

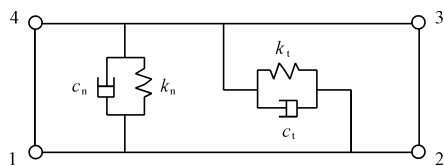


图 1 黏弹性人工边界界面单元膜

在图 1 中, c_n 、 c_t 、 k_n 、 k_t 分别为单位面积上法向、切向的阻尼系数和弹簧系数。计算表达式为:

$$k_n = \alpha_n \cdot G/r \quad (1)$$

$$k_t = \alpha_t \cdot G/r \quad (2)$$

$$c_n = \rho v_n \quad (3)$$

$$c_t = \rho v_s \quad (4)$$

式中: α_n 、 α_t 分别为法向、切向的边界系数; r 为散射源到人工边界节点的距离; G 为边界上材料的剪切模量; ρ 为质量密度; v_p 、 v_s 分别为 P 波和 S 波的波速。

通过等效节点荷载和黏弹性边界实现地震波动输入,目的在于更真实反映波场的边界应力状态,等效荷载的计算表达式为^[16]:

$$F_b = R_b^{ef} + C_b \dot{u}_b^{ef} + K_b u_b^{ef} \quad (5)$$

式中: u_b^{ef} 、 \dot{u}_b^{ef} 、 R_b^{ef} 分别为自由场在边界节点上引起的位移向量、速度向量和力向量; K_b 和 C_b 为黏弹性人工边界对边界单元刚度和阻尼的附加作用矩阵。

2 计算模型

本文针对深厚覆盖层上的高面板堆石坝开展动力反应研究,坝高为 165 m,上游坝坡为 1: 1.7,下游坝坡为 1: 1.6,覆盖层深度为 100 m。二维分析有限元网格如图 2 所示,大坝的侧边界截取范围考虑 $D=300$ m 和 $D=1\ 000$ m 两种情况。坝体堆石料和覆盖层土体取相同材料,静力分析时选用邓肯张 E-B 模型^[17],动力分析时选用等价线性模型^[18];混凝土面板单元选用线弹性模型,模型参数如表 1—表 3 所示,图 3 为土体动剪切模量与剪应变的归一化关系曲线,图 4 为等效阻尼比与剪应变之间的关系曲线。

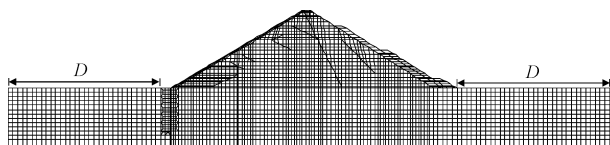


图 2 二维分析有限元网格

表1 堆石体和覆盖层静力模型参数

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	k	n	R_f	k_b	m	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$
堆石料	2302	1320	0.45	0.82	720	0.15	47.9	8
覆盖层	1400	1020	0.42	0.84	520	0.36	45.2	3

注:在静力计算中,堆石料密度选用干密度;覆盖层位于水下,故选用浮密度。

表2 堆石体和覆盖层动力模型参数

材料	K	n
堆石料	3878	0.38
覆盖层	2400	0.46

表3 混凝土面板材料参数

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	ν
2400	30	0.167

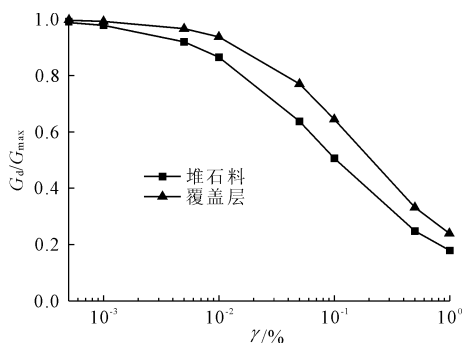


图3 归一化的动剪切模量与剪应变关系曲线

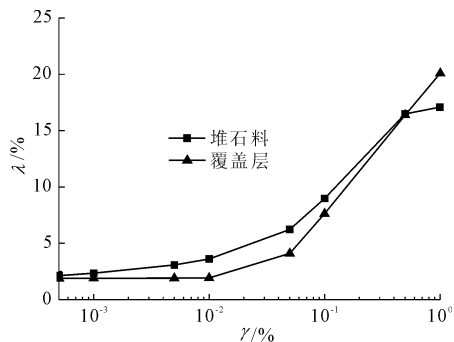


图4 等效阻尼比与剪应变关系曲线

采用波动方法和振动方法,分别讨论水平向地震动和竖向地震动输入下坝体的动力反应。同时,研究采用波动方法时大坝边界截取范围对坝体加速度反应的影响。当水平向地震动输入时,两侧边界竖向约束;当竖向地震动输入时,两侧边界水平向约束。输入的地震加速度时程选用集集地震中TCU054台站E-W分量的地震记录,加速度和速度时程如图5所示,峰值加速度调整为 3 m/s^2 。数值分析采用GEODYNA。

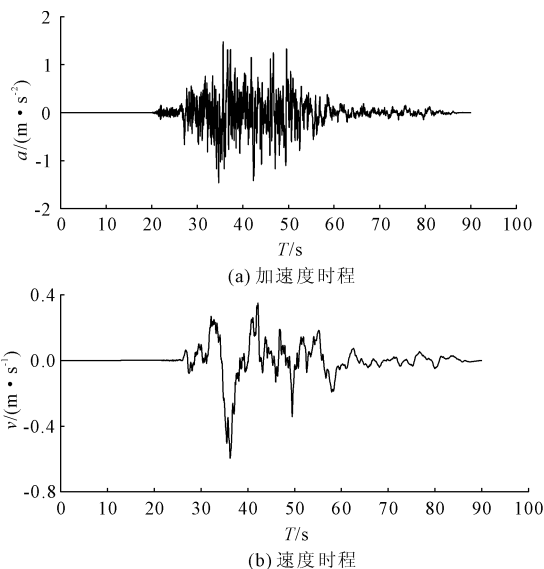


图5 地震动加速度和速度时程

3 计算结果

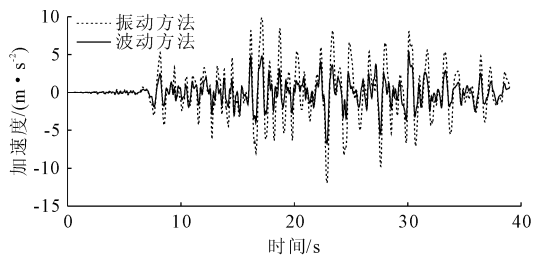
3.1 地震动输入方法的影响

波动方法和振动方法计算得到的坝顶和坝基交界处的加速度反应时程如图6和图7所示,图8给出了大坝中轴断面加速度极值沿坝高的分布。

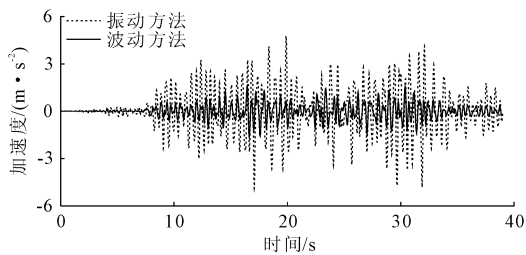
当水平向地震动输入时,波动方法得到的坝顶和坝基交界处的水平向最大加速度分别为 6.80 m/s^2 和 1.78 m/s^2 ,振动方法得到的坝顶和坝基交界处的水平向最大加速度分别为 11.95 m/s^2 和 4.17 m/s^2 。

当竖向地震动输入时,波动方法得到的坝顶和坝基交界处的竖向最大加速度分别为 1.66 m/s^2 和 0.51 m/s^2 ,振动方法得到的坝顶和坝基交界处的竖向最大加速度分别为 4.88 m/s^2 和 1.48 m/s^2 。

振动方法也包含覆盖层地基部分,在一定程度上考虑了坝-基相互作用,但因其将能量开放的波动问题简化为能量封闭的振动问题,在地震动输入机制上存在缺陷,而且外行散射波在边界处完全反射,没能考虑地基辐射阻尼作用,因此,振动方法得到的坝体加速度反应明显高于波动方法,竖向地震动作用下表现的更加显著。

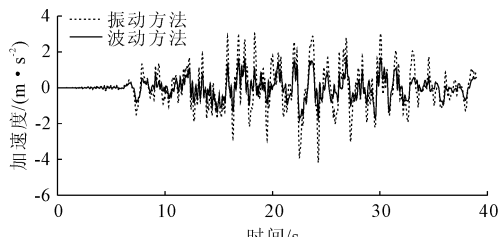


(a) 坝顶

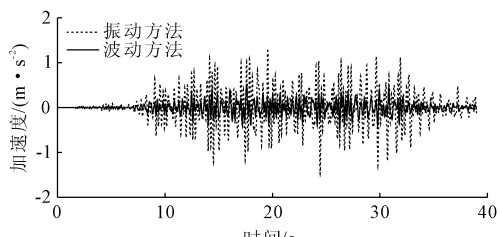


(b) 坝基交界处

图 6 水平向地震动输入时坝体加速度时程



(a) 坝顶



(b) 坝基交界处

图 7 竖向地震动输入时坝体加速度时程

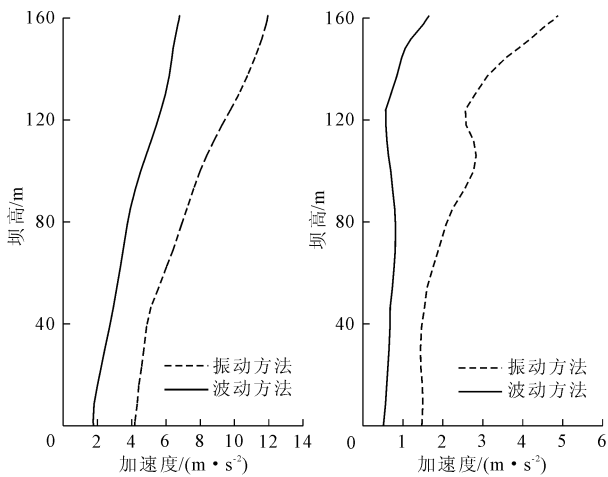
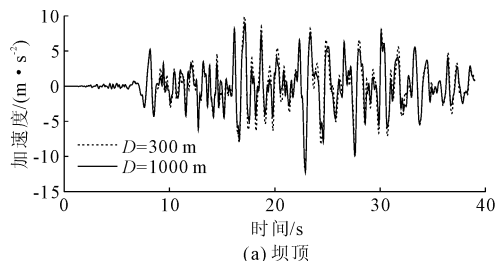
(a) 水平向地震动输入时
水平向加速度(b) 竖向地震动输入时
竖向加速度

图 8 坝体加速度极值沿高程的分布

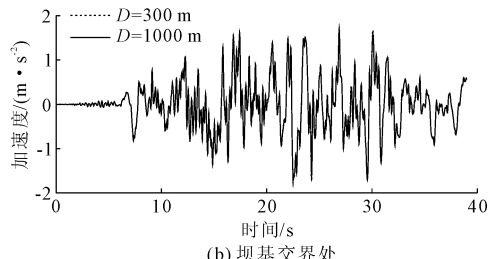
3.2 边界截取范围的影响

图 9 给出了水平向地震动输入时不同边界截取范围情况下,波动方法计算得到的坝顶和坝基交界处的水平向加速度反应时程,当边界范围 $D = 300 \text{ m}$ 时,坝顶和坝基交界处的水平向最大加速度分别为 6.80 m/s^2 和 1.78 m/s^2 ;当 $D = 1000 \text{ m}$ 时,坝顶和坝基交界处的水平向最大加速度分别为 6.75 m/s^2 和 1.75 m/s^2 。

图 10 给出了竖向地震动输入时不同边界截取范围情况下,波动方法计算得到的坝顶和坝基交界处的竖向加速度反应时程,当边界范围 $D = 300 \text{ m}$ 时,坝顶和坝基交界处的竖向最大加速度分别为 1.66 m/s^2 和 0.51 m/s^2 ;当 $D = 1000 \text{ m}$ 时,坝顶和坝基交界处的竖向最大加速度分别为 1.71 m/s^2 和 0.55 m/s^2 。

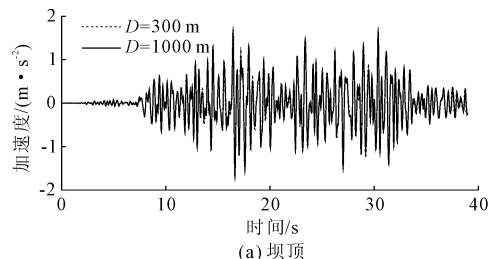


(a) 坝顶

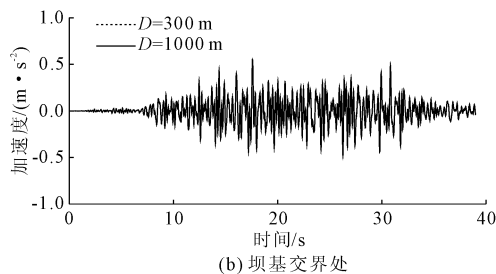


(b) 坝基交界处

图 9 水平向地震动输入时坝体加速度时程



(a) 坝顶



(b) 坝基交界处

图 10 竖向地震动输入时坝体加速度时程

图 11 给出了 5 Hz 范围以内坝顶加速度傅立叶谱,图 12 为大坝中轴断面加速度极值沿坝高的分布,根据图 12 中的数据,绘制了边界范围 $D=300\text{ m}$ 时加速度极值与 $D=1000\text{ m}$ 时的差异沿坝高的分布。

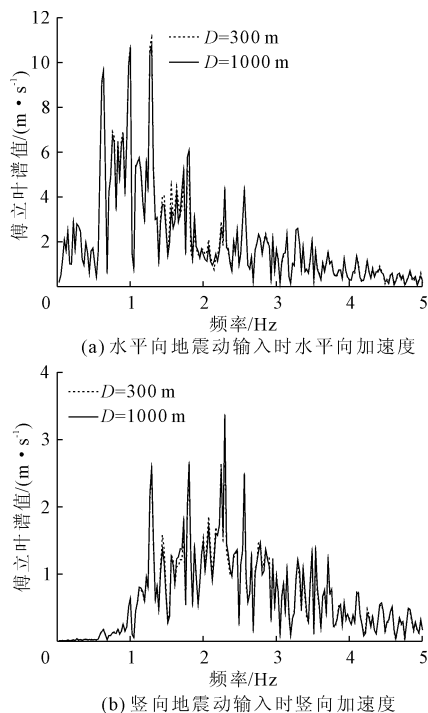


图 11 坝顶加速度傅立叶谱

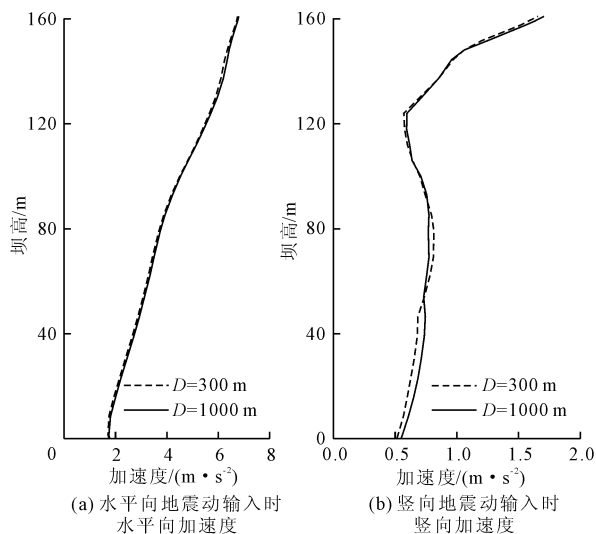


图 12 坝体加速度极值沿高程的分布

从图中的结果可以看出,覆盖层水平向的边界截取范围对波动方法的计算结果存在一定程度的影响,坝体中上部的敏感程度略低,水平向地震动输入时的敏感程度低于竖向地震动输入情况。当水平向地震动输入时,由于筑坝堆石料和覆盖层土体产生较大的动剪应变,致使材料模量降低、阻尼增大,坝

体和覆盖层吸收了较多的外行散射能量,对边界吸收能量的需求降低;而对于竖向地震动输入情况,筑坝堆石料和覆盖层土体的动剪应相对小了很多,结构自身耗能能力显著降低,对边界的依赖变强,因此侧向边界须截取更大的范围。

4 结论

合理选择地震动输入方式对评价深厚覆盖层上高土石坝的抗震安全性非常重要,本文分别采用能量开放的波动方法和能量封闭的振动方法,计算了深厚覆盖层上高面板堆石坝的动力反应,对比了两类方法下坝体加速度反应的差异;此外,研究了覆盖层水平向边界截取范围对波动方法的影响。得出了如下结论:

(1) 振动方法在地震动输入机制上存在缺陷,既无法考虑建基面各点运动的差异,也无法模拟地基辐射阻尼作用,因此,振动方法得到的坝体加速度反应误差较大,明显高于波动方法,竖向地震动作用下表现的更加显著,这将不利于准确评价高土石坝的极限抗震能力。

(2) 覆盖层水平向的边界截取范围对波动方法的计算结果存在一定程度的影响,水平向地震动输入时的敏感程度低于竖向地震动输入情况。

参考文献:

- [1] 范金勇. 阿尔塔什深厚覆盖层上高面板砂砾石堆石坝坝体变形控制设计[J]. 水利水电技术, 2016, 47(3): 29-32.
- [2] 任海军, 高元太. 阿尔塔什水利枢纽工程深厚砂砾石覆盖层混凝土防渗墙施工技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 111-115.
- [3] 曹学兴, 何蕴龙, 迟福东. 基于子模型法的高堆石坝坝基廊道抗震安全性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(6): 87-93.
- [4] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1417-1423.
- [5] 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(4): 382-389.
- [6] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-64.
- [7] 刘云贺, 张伯艳, 陈厚群. 拱坝地震输入模型中黏弹性边界与黏性边界的比较[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 758-763.

的同时提高施工便利性,获得良好的施工效果。

参考文献:

- [1] 王步翔,曹雪山.狭长深基坑支护结构设计的有限元分析[J].华东交通大学学报,2015,32(1):65-70.
- [2] 柏挺,陈仕洋,李文翔.框架逆作与顺作超大深基坑变形特性对比研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):116-120.
- [3] 孟伟波,郑钰涛,陈有亮.不同开挖方式对软土区深基坑连续墙变形的影响分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):216-220.
- [4] Xu C, Chen Q, Wang Y, et al. Dynamic deformation control of retaining structures of a deep excavation [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015,30(4):04015071.
- [5] 宋林,李昌宁,范恒秀.紧邻既有地铁车站深基坑施工开挖方案研究[J].现代隧道技术,2016,53(5):154-160.
- [6] 黄俊,徐春.FLAC^{3D}在深基坑施工方案优化中的应用[J].施工技术,2016,45(13):31-36.
- [7] 杨博维.基于FLAC^{3D}的深基坑开挖变形数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):24-28.
- [8] 程泽海,于振帅.基于FLAC^{3D}的深基坑支护三维数值模拟分析[J].浙江科技学院学报,2017,29(1):37-42.
- [9] 沈玉涛.软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):23-27.
- [10] 丁毅,邢艳如.超长、超大基坑开挖对邻近地铁结构安全影响的数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):170-175.
- [11] 程明进.复杂环境下的超深基坑工程顺逆作结合设计与实践[J].绿色建筑,2017,9(4):87-89.
- [12] 向俊宇,胡栋良,宋凯迪,等.长沙国金中心项目基坑工程顺作改顺逆结合施工调整优劣性分析[J].建筑技术,2018,49(10):12-15.
- [13] 杨鹭,李裘鹏,江建洪,等.某地铁深基坑顺逆结合开挖变形性状的实测分析[J].施工技术,2017,46(16):95-100.
- [14] Tan Y, Zhu H, Peng F, et al. Characterization of semi-top-down excavation for subway station in Shanghai soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017,68:244-261.
- [15] 公路隧道设计规范:JTG 3370.1—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.

(上接第81页)

- [8] 窦兴旺,夏颂佑,许百立.人工边界法在土石坝动力分析中的应用[J].河海大学学报,2000,28(5):72-75.
- [9] 邹德高,徐斌,孔宪京.边界条件对土石坝地震反应的影响研究[J].岩土力学,2008,29(S1):101-106.
- [10] 马行东,李海波.地震波入射方向对地下岩体洞室动态响应的初步分析[J].水力发电,2007,33(1):23-25.
- [11] 杜修力,陈维,李亮,等.斜入射条件下地下结构时域地震反应分析初步探讨[J].震灾防御技术,2007,2(3):290-296.
- [12] 刘晶波,王艳,赵冬冬.地震波斜入射时地铁盾构隧道的动力反应分析[C]//第四届全国防震减灾工程学术研讨会/第四届全国防震减灾工程学术研讨会会议论文集.福州,2009,北京:中国建筑工业出版社,2009:327-331.
- [13] 胡鸿运,周晓军,汪精河.顺层隧道地震响应的波动方法研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1373-1383.
- [14] 李炜,丁海平.考虑土-结构相互作用的大跨度斜拉桥非线性地震反应分析[J].防灾减灾工程学报,2009,29(5):555-560.
- [15] 邹德高,孔宪京. Geotechnical Dynamic Nonlinear Analysis - GEODYNA 使用说明[R].大连:大连理工大学土木水利学院工程抗震研究所,2003.
- [16] 孔宪京,屈永倩,邹德高,等.钢纤维混凝土面板堆石坝的抗震性能数值分析[J].水利学报,2016,47(7):841-849.
- [17] Dun C, JM and Chang CY. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, 1970,96(5):1629-1653.
- [18] Hardin B O, Drnevich V O. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972,98(7):667-692.