

基于饱和多孔介质 PSBFEM 的闸坝—可液化地基动力响应分析

邹德高^{1,2}, 陈楷^{1,2}, 陈涛³, 王锋⁴, 刘京茂^{1,2}, 滕晓威^{1,2}

(1. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁省大连市 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁省大连市 116024; 3. 四川华能泸定水电有限公司, 四川省成都市 610072; 4. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川省成都市 610072)

摘要:近年来我国水利工程选址地质条件复杂, 深厚覆盖层上建坝已难以避让, 闸坝抗震设计与安评的难度显著提高, 尤其对于覆盖层中存在可液化土层的情况, 有关研究较少, 不利于准确把握与评价闸坝的动力响应和抗震性能。本文引入高效四分树方法, 建立了闸坝—可液化地基体系的跨尺度分析模型, 同时采用饱和多孔介质多边形比例边界有限单元和土体广义塑性模型以模拟地基孔隙水压力的产生、扩散和消散过程, 精确地分析了体系的动力反应。结果表明: 闸坝底部土体液化程度低于上下游地基土; 闸坝呈整体向下游水平移动, 并略有向下游倾斜的趋势; 地震致使部分土体弱化, 加剧了闸坝及防渗墙的变形, 应采取适当的加固措施, 避免影响机组安全运行。本文方法更加准确地反映了实际情况, 且适应性强, 为地基抗液化措施的对比与验证研究提供了可靠的技术支持。

关键词:多边形比例边界有限元; 可液化地基; 动力响应; 弹塑性分析

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **学科代码:** 570.25 **DOI:** 10.3969/j.issn.2096-093X.2020.01.004

0 引言

随着中国水能资源开发工作不断深入, 近年来水利工程选址地质条件复杂, 深厚覆盖层上建坝难以避让^[1]。中国已建的多布、丹巴、江边、打鼓滩等闸坝结构底部均存在一定厚度的覆盖层地基土, 地震作用会导致土层弱化, 将对上部结构安全构成一定的潜在威胁。相关学者针对不同工程特点开展了研究, 如姜云龙等^[2]研究了打鼓滩闸坝的应力变形特征; 王登银等^[3]分析了闸坝静力特性和基础处理效果; 段斌等^[4]研究了闸坝基础加固处理方案, 并对比了不同方案的效果; 任苇等^[5]开展了巨厚覆盖层上高闸坝沉降控制关键技术研究, 建议了相关标准参数。王刚等^[6]基于对比应力法和动力反应分析, 进行了某闸坝地基液化判别应用。

现有的研究大多未考虑覆盖层中存在可液化土层的情况, 而地震可能诱发的覆盖层液化现象对于结构和机组的抗震安全具有更加重要的控制作用。但有关上部闸坝结构与可液化覆盖层地基土体系动力反应的研究成果还很少。

本文采用高效四分树^[7]方法建立闸坝—可液化地基体系

的跨尺度分析模型, 通过饱和多孔介质多边形比例边界有限单元^[8]联合土体广义塑性模型, 模拟地基孔隙水压力的产生、扩散和消散过程, 开展了考虑覆盖层液化的闸坝结构动力反应分析, 讨论了地基孔隙水压力、孔压比分布规律及闸坝变形模式。

1 PSBFEM 饱和土动力分析方法

多边形比例边界有限元 (PSBFEM)^[9]放松了对单元形状的限制, 具有非常好的灵活性, 且复杂边界适应能力强^{[10][11]}, 已广泛应用于动力相互作用分析^[12]、接触分析^[13]、裂纹扩展分析^[14-16]、复杂单元求解^[17]、非线性材料分析^[18-23]等方面, 理论成熟, 具有较好的应用潜力, 故本文基于前期研究, 进一步将该方法推广到饱和地基土的液化分析。

1.1 孔压场函数

多边形比例边界有限单元理论已有多篇文献给出详细介绍^{[9][10][18]}, 本文重点给出用于液化分析的关键方程, 任一点的孔压可用比例边界坐标表示见式 (1)、(2):

$$p(\xi, \eta) = N_p(\eta) p(\xi) \quad (1)$$

$$N_p(\eta) = [N_1(\eta) N_2(\eta) \cdots N_m(\eta)] \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金 (U1965206), 中央高校基本科研业务费资助 (DUT19ZD216), 华能集团科技项目资助 (HNKJ18-H25)。

式中, $N_p(\eta)$ 为环向孔压形函数; $p(\xi)$ 为假定的径向孔压插值函数, 可以通过求解控制方程为拉普拉斯方程的稳态渗流问题获得, 如式 (3) 所示:

$$E_0^p \xi^2 p(\xi)_{,\xi\xi} + (E_0^p - E_1^p + E_1^{pT}) \xi p(\xi)_{,\xi} - E_2^p p(\xi) + f(\xi) = 0 \quad (3)$$

式 (3) 为关于 ξ 的二阶非齐次常微分方程, 其中 E_0^p 、 E_1^p 、 E_2^p 为只和渗透系数和几何形状有关的系数矩阵, $f(\xi)$ 为节点流量向量。

对任一多边形, 方程 (3) 的解为式 (4):

$$p(\xi) = \Psi_p \xi^{-S_p^p} \Psi_p^{-1} p_b \\ Q(\xi) = \Psi_Q \xi^{-S_Q^p} \Psi_p^{-1} p_b \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1) 便可求得多边形内以边界节点孔压表达的孔压场函数见式 (5):

$$p(\xi, \eta) = N_p(\eta) \Psi_p \xi^{-S_p^p} \Psi_p^{-1} p_b \quad (5)$$

1.2 应变和流速转换矩阵

比例边界有限元方法中, 流速的表达式由 (6) 给出, 将 $p(\xi)$ 表达式代入可得式 (6) 所示的流速和节点孔压关系, 从而可得到式 (7) 所示的流速孔压转换矩阵 $B_p(\xi, \eta)$ 。

$$v(\xi, \eta) = B_1^p(\eta) p(\xi)_{,\xi} + \frac{1}{\xi} B_2^p(\eta) p(\xi) \quad (6)$$

$$B_p(\xi, \eta) = (-B_1^p(\eta) \Psi_p S_p^p + B_2^p(\eta) \Psi_p) \xi^{-S_p^p - I} \Psi_p^{-1} \quad (7)$$

上述理论方法已集成到大连理工大学工程抗震研究所自主开发的大型岩土工程非线性分析软件 GEODYNA^[24], 本文采用该软件开展后续计算研究。

2 闸坝与可液化地基体系的动力反应分析

2.1 计算模型

图 1 给出了闸坝与可液化地基体系的几何尺寸示意说明, 图 2 为采用四分树离散方法快速生成的有限元分析模型 (砂土层为可液化土层, A、B、C、D 为观测代表点), 其中离散最小尺寸设定为 1.0m, 最大尺寸为 8.0m, 模型共生成单元数 5975, 节点数 6363。该方法可实现网格尺寸灵活、快速跨越, 既可保证防渗墙等易发生应力集中的部件采用精细网格, 又可限制整体单元量, 节省计算资源。

2.2 计算参数

混凝土结构采用线弹性模型, 土体采用广义塑性模型, 土-结构界面采用弹塑性接触面^[25]模拟, 参数列于表 1~表 3, 考虑中间砂土层液化, 其渗透系数取为 $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 。静力计算考虑了地基土层初始应力、闸坝的分期填筑和蓄水过程。

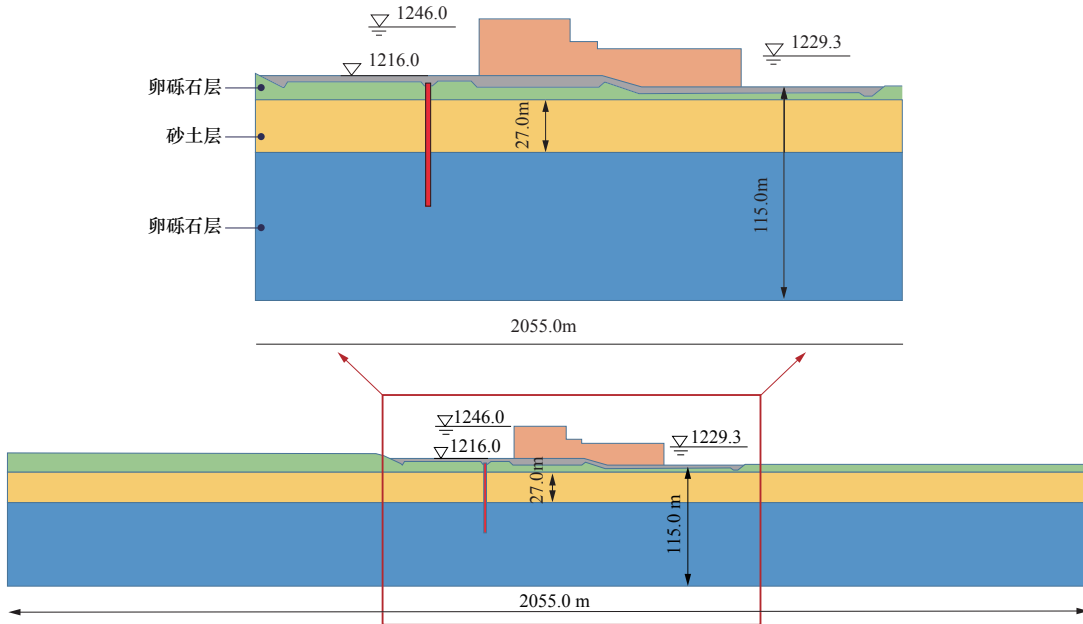


图 1 闸坝与可液化地基体系的几何尺寸信息示意说明

Figure 1 Illustration of geometric dimension information

表 1 地基土广义塑性模型参数

Table1 Generalized plastic model parameters of soil material

参数	G_0	K_0	M_g	M_f	α_f	α_g	H_0	H_{U0}	m_s	m_v	m_l	m_u	r_d	γ_{DM}	γ_u	β_0	β_1
顶部卵砾石层	800	800	1.68	1.3	0.3	0.3	800	1600	0.5	0.5	0.5	0.5	100	20	5	40	0.025
砂土层	500	500	1.38	0.45	0.25	0.4	900	3300	0.2	0.2	0.4	0.4	20	70	5	25	0.01
底部卵砾石层	1352	1785	1.6	1.5	0.46	0.1	1800	3000	0.35	0.35	0.38	0.3	120	10	10	35	0.021

表 2 广义塑性接触面参数

Table 2 Parameters of the generalized plastic interface model

D_{s0}/kPa	D_{n0}/kPa	M_c	e_r	λ	$a/\text{kPa}^{0.5}$	b	c	α	γ_d	k_m	M_f	k	H_0/kPa	f_h	t/m
1000	1500	0.88	0.0	0.091	224	0.06	3.0	0.65	0.2	0.6	0.65	0.5	8500	2.0	0.1

表 3 线弹性材料参数

Table 3 Parameters of linear model

材料	E (MPa)	μ
防渗墙	28 000	0.167
闸坝混凝土	14 000	0.167

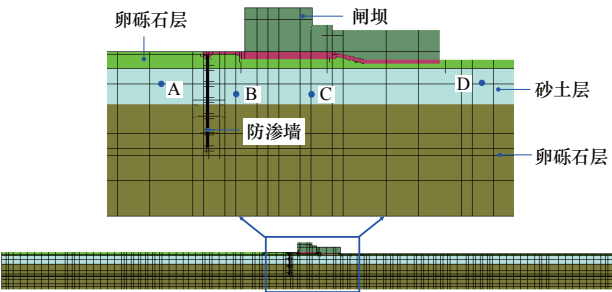


图 2 四分树离散的闸坝与可液化地基体系的有限元模型
Figure 2 Finite element model of sluice dam using quadtree

动力计算中，采用规范谱人工波，水平向峰值加速度取 0.2g，图 3 给出了时程曲线，持时长为 30s，计算时间步长取为 $\Delta t=0.005\text{s}$ 。

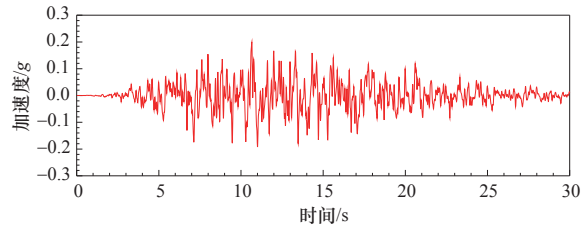


图 3 地震加速度时程曲线
Figure 3 Time history curve of seismic acceleration

2.3 计算结果分析

2.3.1 地基土液化

(1) 孔隙水压力。

图 4 给出了地震作用下土体中孔隙水压力（简称孔压）分布规律。为便于观察，本文仅给出了部分计算域的结果，随土层深度增加，孔压总体呈增大的趋势，其中最大孔压出现在闸坝下方的可液化土层底部，主要是由于闸坝的重力作用在一定程度上改变了下层土体的应力状态。

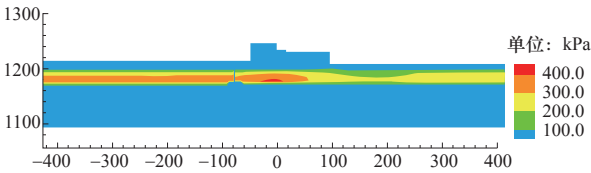


图 4 地震作用下土体中孔隙水压力分布
Figure 4 Pore water pressure distribution in soil under earthquake

图 5 列出了四个代表点处孔压在地震过程中的变化规律，可以看出，随地震时间的增加，孔压总体呈持续累积增长的趋势，当地震接近结束时孔压趋于平稳。

(2) 孔隙水压力与静力竖向应力比。

通过孔压与地基土静力竖向应力的比值来判别土体液化情况，当比值接近 1.0 时，认为液化现象明显。图 6 给出了该比值的分布云图，可以看出：防渗墙周边上游部分土体出现了较为明显的液化，闸坝底部土体液化程度稍小于上游和下游土层，主要原因是闸坝的竖向重力作用，改变了下部土层的应力状态，增加了土体竖向应力，使得孔压比数值相对偏小。

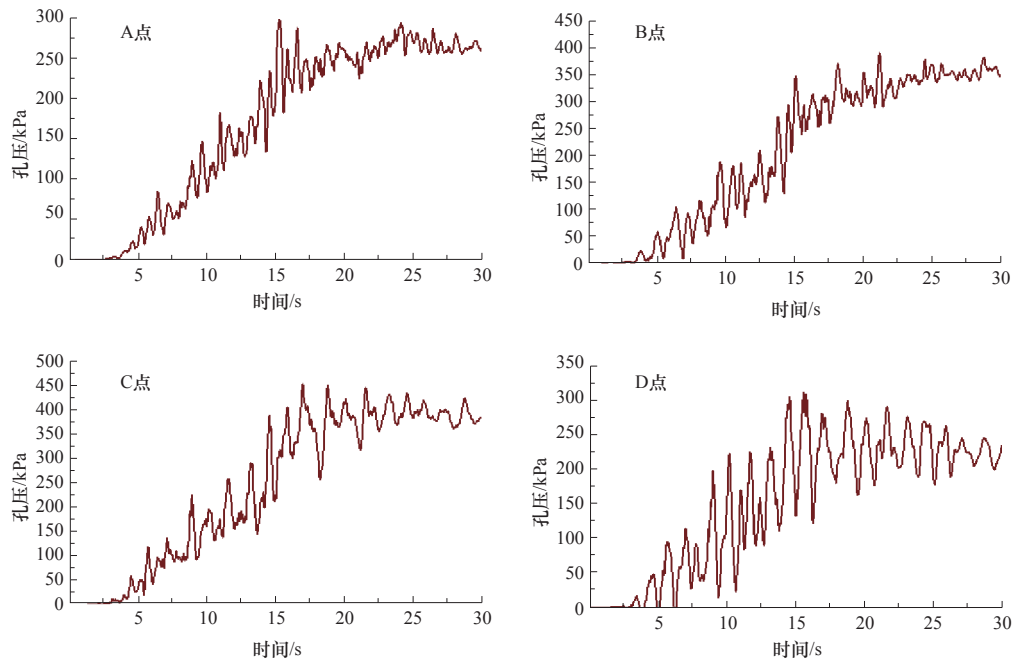


图5 代表点的孔隙水压力时程变化规律

Figure 5 Time-history variation of pore water pressure at representative points

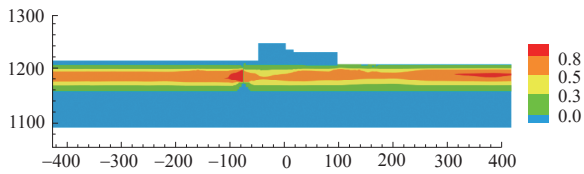


图6 孔隙水压力与静力竖向应力比分布

Figure 6 Ratio of pore water pressure and vertical stress in static

2.3.2 结构变形

(1) 整体变形。

图7给出了闸坝体系的震后网格变形图,可以看出,由于砂土层部分弱化,使得上部闸坝结构整体呈水平向下游移动,最大水平向位移为33.4cm,并伴有略微向下游倾斜的趋势。

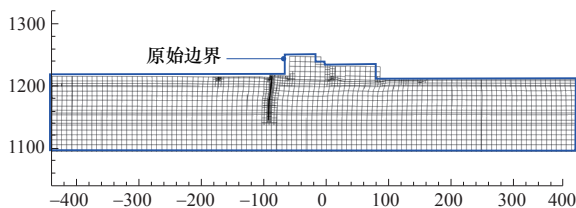


图7 震后闸坝体系整体变形(放大20倍)

Figure 7 Overall deformation of sluice dam system after earthquake (Magnify 20 times)

(2) 防渗墙变形。

图8绘制了防渗墙位移随高程变化的分布和整体变形轮廓,可以看出,结构顶部最大水平向位移为30.4cm,底部变形很小,故防渗墙受弯作用较为明显。

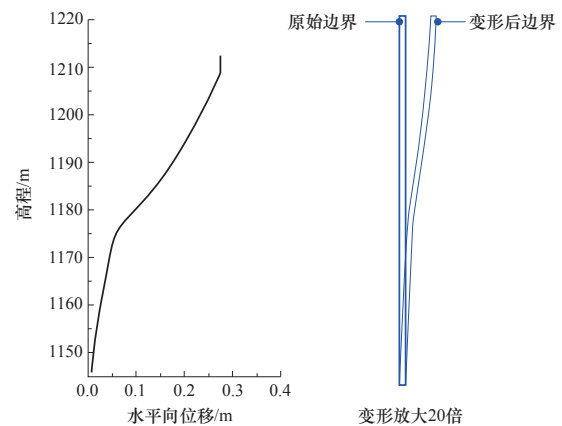


图8 震后防渗墙位移与变形

Figure 8 Displacement and deformation of cut-off wall after earthquake

3 结论

本文首先通过高效四分树方法建立了闸坝-可液化地基

体系跨尺度分析模型,而后基于土体广义塑性模型和弹塑性接触面模型,通过饱和多孔介质多边形比例边界有限单元方法,计算了覆盖层中存在可液化土层情况下闸坝的动力响应,同时模拟了地基土中孔隙水压力的产生、扩散和消散过程。计算结果表明:

(1) 闸坝底部土体液化程度低于上下游地基土,主要是由于闸坝自重的竖向作用在一定程度上改变了底部土体的应力状态。

(2) 地震致使部分土层弱化,使得闸坝整体向下游水平移动,最大变形为 33.4cm,并略有向下游倾斜的趋势;防渗墙沿水平向变形明显,顶部最大位移为 30.4cm,底部变形较小,应结合实际工程情况,采取适当的加固措施,避免影响机组安全运行。

(3) 本文方法准确,且适应性强,为地基抗液化措施的对比与验证研究提供了可靠的技术支持。同时具有较好的应用潜力,易于拓展至三维和其他复杂结构的地震响应分析。

参考文献

- [1] 汪小刚,邢义川,赵剑明,等.西部水工程中的岩土工程问题[J].岩土工程学报,2007(08):1129-1134
- [2] 姜云龙,张立勇,丁哲,等.打鼓滩水电站闸坝三维有限元变形应力分析[J].人民黄河,2016,38(04):89-93.
- [3] 王登银,张洋,徐宇,等.深厚覆盖层上高混凝土闸坝静力特性研究[J/OL].水力发电:1-7.
- [4] 段斌.深厚覆盖层上高闸坝基础加固处理方案研究[C].中国大坝工程学会,2019:828-839.
- [5] 任苇,王君利,李国英.巨厚覆盖层上高闸坝沉降控制关键技术研究与实践[J].水电与抽水蓄能,2019,5(05):36-39+51.
- [6] 王刚,魏星.考虑上部结构作用的闸坝地基液化分析[J].水力发电学报,2014,33(04):220-226.
- [7] OOIE T, MAN H, NATARAJAN S, et al. Adaptation of quadtree meshes in the scaled boundary finite element method for crack propagation modelling[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 144: 10117.
- [8] ZOU De gao, TENG Xiao wei, CHEN Kai, et al. 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.
- [9] SONG Chong min. The Scaled Boundary Finite Element Method[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2018.
- [10] 陈楷,邹德高,孔宪京,等.多边形比例边界有限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+2018.
- [11] 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.
- [12] 高毅超,徐艳杰,金峰,等.基于高阶双渐近透射边界的大坝-库水动力相互作用直接耦合分析模型[J].地球物理学报,2013,56(12):4189-4196.
- [13] 薛冰寒,林皋,胡志强,等.求解摩擦接触问题的 IGA-B 可微方程组方法[J].工程力学,2016,33(10):35-43.
- [14] 龙湘云,姜潮,韩旭,等.比例边界有限元二阶灵敏度设计及断裂力学分析[J].固体力学学报,2015,36(01):454.
- [15] 钟红,宋平平.任意裂纹面荷载作用下界面断裂分析[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(02):15157.
- [16] 刘钧玉,林皋,胡志强.裂纹面荷载作用下多裂纹应力强度因子计算[J].工程力学,2011,28(04):7-12.
- [17] ZOU De gao, CHEN Kai, KONG Xian jing, et al. 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.
- [18] CHEN Kai, ZOU De gao, KONG Xian jing, et al. A novel nonlinear solution for the polygon scaled boundary finite element method and its application to geotechnical structures. Computers and Geotechnics, 2017, 82: 20210.
- [19] CHEN Kai, ZOU De gao, KONG Xian jing. 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: 12.
- [20] CHEN Kai, ZOU De gao, KONG Xian jing, et al. An efficient nonlinear octree SBFEM and its application to complicated geotechnical structures[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 96: 226-245.
- [21] CHEN Kai, ZOU De gao, KONG Xian jing, et al. 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: 568.
- [22] ZOU De gao, CHEN Kai, KONG Xian jing, et al. An approach integrating BIM, octree and FEM-SBFEM for highly efficient modeling and seismic damage analysis of building structures[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 104: 33346.
- [23] 孔宪京,陈楷,邹德高,等.一种高效的 SBFEM-FEM 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,孔宪京,等. GEODYNA 软件用户手册[M].大连:工程抗震研究所,大连理工大学.2018.
- [25] ZOU De gao, XU Bin, KONG Xian jing, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 11122.

收稿日期: 2020-01-11 修回日期: 2020-01-21

邹德高(1973—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:高土石坝和核电厂工程抗震研究, E-mail:zoudegao@dlut.edu.cn
陈楷(1991—),男,博士(后),主要研究方向:岩土工程数值分析研究, E-mail:chenkai@diut.edu.cn

Dynamic Response Analysis of Sluice Dam-liquefiable Foundation Based on PSBFEM with Saturated Porous Media

(下转 8 页)

- and Environment Engineering II (AIP Conf.Proc.1944), Feb2 2018zhuhai, China.
- [8] 石安池,唐鸣发,周其健.金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2080-2086.
- [9] 张勇,肖平西,丁秀丽,等.高地应力条件下地下厂房洞室群围岩的变形破坏特征及措施研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):228-244.
- [10] 周垂一,陈平志,何世海,等.白鹤滩水电站巨型导流洞关键岩石力学问题与对策[J].隧道建设(中英文),2018,38(3):383-391.
- [11] 陈平志,褚卫江.基于三维数码技术的结构面表面形态特征调查[J].人民珠江,2015,36(5):131-134.
- [12] 卢波,王继敏,丁秀丽,等.锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2429-2441.
- [13] 孟国涛,陈平志,吴家耀,等.白鹤滩水电站左右岸地下厂房洞室群监测动态反馈分析研究报告[R].杭州:浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司,2014-2018.
- [14] 王成虎,黄禄渊,陈平志,等.白鹤滩高分辨率超声波成像测试成果总报告[R].中国地震局地壳应力研究所,中国电建华东勘测设计研究院有限公司,2018.

收稿日期:2019-12-13 修回日期:2020-1-11

刘宁(1981—),男,山东烟台人,工学博士,正高级工程师,
E-mail:liu_n@ecidi.com

Main Rock Mechanics Problems and Prevention Countermeasures of the Giant Underground Powerhouse of Baihetan Hydropower Station

LIU Ning^{1,2}, CHEN Pingzhi^{1,2}, CHEN Hao³, CHEN Jianlin¹, XU Jian³

(上接21页)

ZOU Degao^{1,2}, CHEN Kai^{1,2}, CHEN Tao³, WANG Feng⁴, LIU Jingmao^{1,2}, TENG Xiaowei^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Sichuan Huaneng Luding Hydropower Co., Ltd, Chengdu, SiChuan, 610072, China; 4. Chengdu survey, design and Research Institute Co., Ltd. of China Power Construction Group, Chengdu, 610072, China;)

Abstract : In recent years, the geological conditions of water conservancy project site selection are complex in China, and it is difficult to avoid dam constructed on deep overburden. The difficulty of seismic design and safety assessment of gate dam is significantly increased. Especially for the situation of liquefiable soil layer in overburden layer, the relevant research is few, which is not conducive to the evaluation of the seismic performance of the dam. In this paper, an efficient quadtree cross-scale method

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122, China; 2. HydroChina Itasca Research and Development Center, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 3. China Three Gorges Construction Management Co., Ltd, Beijing 100038, China)

Abstract : The geological conditions of Baihetan Hydropower Station project area are complex and the ground stress level is high. The underground powerhouse cavern group is a large-scale project. In the process of underground powerhouse construction, the main rock mechanics problems, such as tension shear deformation failure of weak interlayer dislocation zone, stress type failure of brittle basalt, are widely revealed. In view of the influence tunnel section of the top arch of the interlaminar cutting workshop, the pre-stressed anchor bolt, the deep support of anchor cable and the pre anchoring measures of the pre anchoring tunnel are adopted, and the joint support measures such as the pre replacement of the tunnel, the locking anchor bar and the deep anchor of the hanging wall are effective prevention and control measures. In view of the high stress fracture and prevention of brittle basalt, the strategic measures such as optimizing the axis direction of underground powerhouse cavern group and optimizing the cavern shape are comprehensively considered. The layout plan of small angle intersection between the axis of main cavern and the direction of maximum main stress is adopted. The cylinder shape of two-way arch is selected in the shape, so as to ensure that the arch curvature of cavern top is compatible with the stress arch, and a series of active prevention measures are taken. The application effectively reduces the risk of high stress failure of surrounding rock caused by high stress. The engineering practice shows that these active and passive joint control measures are reasonable and effective.

Keywords : Baihetan hydropower station; underground powerhouse cavern; interlayer shear belt; high stress fracture; preventive measures

is introduced to establish an analytical model of the dam and foundation system. The generation, diffusion and dissipation of pore water pressure are calculated by using the polygonal scaled boundary finite element method of saturated porous media and the generalized plastic model of soil, and the dynamic response of the system is analyzed accurately. The results show that the liquefaction degree of the soil at the bottom of the dam is lower than that of the foundation soil at the upstream and downstream; the dam moves horizontally downstream as a whole, and inclines slightly to the downstream. The soil is weakened due to the earthquake, resulting in an obvious deformation of the cut-off wall and the dam. Appropriate reinforcement measures should be taken to ensure the safe operation of the structures. The method in this paper reflects the actual situation more accurately and has strong adaptability, which provides reliable technical support for the comparison and verification of anti-liquefaction measures of foundation.

Keywords : polygonal SBFEM; liquefiable foundation; dynamic response; elasto-plastic analysis



特约栏目主编 | 邹德高，大连理工大学水利工程学院教授、博士生导师，担任海岸和近海工程国家重点实验室副主任、辽宁省工程防灾减灾重点实验室副主任。主要研究方向为核电厂和高土石坝工程抗震安全评价、岩土工程数值分析方法和软件开发、粗粒土动力特性和本构理论等。入选辽宁省百千万人才工程、教育部新世纪优秀人才支持计划。兼任中国大坝工程学会大坝数值模拟专业委员会副主任委员、中国核学会核安全分会核设施建构筑物安全专业委员会副理事长、中国水利学会岩土力学专业委员会副秘书长、辽宁省水利学会理事、《土木建筑与环境工程》编委等。获得国家科技进步二等奖 2 项、省部级特等和一等奖 7 项，负责和参与国家重点研发计划和国家自然科学基金重点项目等纵向课题 20 余项。出版专著 2 部，论文 SCI 收录 50 余篇、EI 收录 100 余篇。自主开发了三维高性能岩土工程有限元分析 GEODYNA 等系列软件，获软件著作权和专利 20 项。成果在 50 多个水利水电、核电等工程得到推广和应用。

深厚覆盖层上大坝抗震分析和设计关键技术

深厚覆盖层在我国及国外众多河流中均有广泛分布，特别是在我国的西南山区河流中更为突出，可达百余米甚至数百米。我国超过 82% 水能资源集中在西部地区，深厚覆盖层地基条件下建坝“难以避让”，复杂的河床覆盖层地质条件给工程设计带来较大的技术难度。

目前，强震区深厚覆盖层上大坝建设的相关经验与成果还比较缺乏，许多关键性的问题亟待研究解决。对于深厚覆盖层上的大坝工程，沉降和不均匀沉降十分明显，覆盖层与坝体的动力特性差异较大，地震作用下坝体与覆盖层之间相互作用突出，且覆盖层土体存在液化的可能性，常规的地震响应分析方法及安全评价体系已不适用于深厚覆盖层上的大坝工程。因此，基于能合理模拟坝体与覆盖层相互作用的地震动输入方法，研究覆盖层上大坝工程的地震响应特性，探讨覆盖层上大坝工程液化及稳定的分析方法，解决大坝安全评价中存在的关键技术难题，具有重要的科学意义和工程价值。

近几年来，我国科研和设计单位相继开展了深厚覆

盖层上的大坝工程在坝体坝基沉降变形、抗滑稳定、液化变形、抗震设计等方面的研究工作，取得了一系列的成果，走在世界前列。《水电与抽水蓄能》期刊聚焦我国水电水利发展的关键问题，从 2019 年下半年，特别策划了“深厚覆盖层上大坝抗震分析和设计关键技术”专题，组织专家撰写了 4 篇深厚覆盖层上大坝抗震方面的文章。这些文章包括了土石坝、闸坝的大坝-坝基相互作用、动力响应、液化变形、坝坡稳定等方面的内容。随着水电水利工程建设进一步发展，近期和将来将更多遇到在深厚覆盖层上建坝的问题，如在大渡河干支流、金沙江中上游、怒江中上游、西藏和新疆的一些河流等均存在深厚覆盖层问题。总结和发展利用深厚覆盖层建坝技术不仅能创造极强经济效益，对即将大力开发的西藏水电资源建设也具有极强的现实意义。

衷心感谢各位专家、学者对深厚覆盖层上大坝抗震分析和设计关键技术发展的大力支持，感谢《水电与抽水蓄能》期刊对本期特别策划出版，做出的细致而专业的工作。

特约栏目主编
邹德高