

汉佛德核废料处置场岩体原位试验和数值仿真

郑文棠¹, 石崇²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘要: 随着核电厂硬质基岩厂址资源的减少, 风化岩、半成岩、沉积岩地基和滨海平原大面积第四系覆盖层内的隐伏浅层玄武岩地基也被论证作为核电厂核安全相关物项所需的稳定地基, 其中柱状节理发育的玄武岩地基作为核电地基的适宜性鲜有研究。文章分析了美国汉佛德核废料处置场的柱状节理玄武岩的大型岩体原位试验成果、数值分析成果, 采用三维离散元软件 3DEC 和 Voronoi 图形研究了不规则柱状节理玄武岩的岩体变形模量, 计算表明: BWIP 柱状节理玄武岩的数值试验计算值与原位试验成果相吻合, 平行柱轴方向的变形模量数值解为 20.19 GPa, 原位试验值为 20 GPa。文章给出了柱状节理玄武岩工程力学性质和地基适宜性的数值分析方法, 可应用于核电厂和核废料处置场的选址中。

关键词: 核废料处置场; 原位试验; 柱状节理玄武岩; 离散元法; 数值仿真

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0073-06

In-situ Rockmass Test and Numerical Simulation of Basalt Waste Isolation Project in Handford

ZHENG Wentang¹, SHI Cong²

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: As the hard bedrock sites decreases gradually, the nuclear safety related structures of NPP has been demonstrating the foundation suitability of the weathered rock, half-diagenesis rock, sedimentary rock and the shallow buried basaltic bedrock under the wide quaternary overburden layer of costal plain, but there are few recent research on basaltic foundation suitability which columnar joints well developed. In this investigation we analyzed the in-situ colmunar basaltic rockmass test and numerical simulation results of Basalt Waste Isolation Project(BWIP) in Handford, then used the three-dimensional discrete element software 3DEC and Voronoi diagrams to calculate the deformation modulus of irregular colmunar basaltic rockmass. The results shown that the numerical simulation coincide better with the in-situ rockmass test which the numerical solution of the deformation modulus parallel to the axial direction of BWIP is 20.19 GPa while the in-situ rockmass test result is 20 GPa. This work provide some guidance for further numerical simulation on foundation suitability of colmunar basaltic rockmass which can be applied into the sitting of NPP and disposal repository.

Key words: disposal repository; in-site test; columnar basaltic rockmass; discrete element method; numerical simulation

随着核电厂硬质基岩厂址资源的减少, 三代及四代核电机型对地基条件的放宽, 核电厂大型建设工程所需的稳定地基也开始论证横向上较为均匀的风化岩、半成岩、沉积岩等地基的适宜性。目前一

些不具备基岩厂址条件的省份(如河北海兴小山核电厂址)研究了滨海平原大面积第四系覆盖区内的隐伏浅层玄武岩作为核岛地基的可能性^[1], 这种地基在《建筑抗震设计规范》中称之为“土层中的火山岩硬夹层”^[2], 一些文献称之为“第四系玄武岩层”^[3], 即第三纪以后多次喷发并夹松散地层的玄武岩硬质岩层, 分布在我国长白山—龙岗山带、大兴安岭—太行山带和东南沿海带, 是未来三代及四代核电厂厂址选址的潜在区域。笔者参与研究的广州大唐国际雷州发电厂项目, 位于广东雷州半岛,

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372275)

作者简介: 郑文棠(1981), 男, 福建尤溪人, 高级工程师, 博士, 主要从事核安全级物项抗震验算和放射性废物处置研究工作(e-mail) zhengwentang@gedi.com.cn。

其地基揭露的玄武岩夹层呈岩被状覆盖于第四纪早更新世地层之上,厚度在 10 m 左右,其地基变形模量确定和基础方案设计缺乏类似工程经验,对工程技术人员提出了新的挑战。可以预见,未来滨海平原地区探寻第四系覆盖层下的浅层玄武岩层,对核电厂选址工作显得亟为重要,而玄武岩中发育柱状节理构造对地基变形模量的影响更是鲜有人研究。本文通过查阅和翻译了国外关于柱状节理玄武岩的学术论文,以美国汉佛德核废料处置场工程为例,分析了柱状节理玄武岩的大型岩体原位试验成果、数值分析成果,并对柱状节理玄武岩工程力学性质和地基适宜性的数值分析方法进行了研究,旨在未来类似核电厂和核废料处置场选址中得以应用。

1 美国汉佛德核废料处置场工程(BWIP)

第二次世界大战期间,美国为制造核武器,开展了瞩目的曼哈顿工程。1943年,座落于美国西北部华盛顿州哥伦比亚高原的汉佛德(Handford)被选为制作原子弹的基地。二战结束后,美国自1964-1971年陆续关闭一些核反应堆,并于1972-1985年组织建设汉佛德核废料玄武岩处置场(Basalt Waste Isolation Project,后简称BWIP)^[4-5]。由于核废料处置场的主岩——玄武岩广泛发育了多层柱状节理,为科学评价这种特殊的柱状节理玄武岩作为核废料处置主岩的适宜性,由美国能源部(U.S.A. DOE)牵头,多个著名研究机构、国际咨询公司和知名高校(如劳伦斯伯克利实验室、Itasca公司、哥伦比亚大学、Rockwell公司等)参与,合作开展了大量的柱状节理玄武岩室内试验和原位试验,在评价柱状节理玄武岩变形参数、强度参数及多场耦合下的岩体长期稳定性方面,形成了详细的试验资料和技术报告,同时推动了节理岩体数值仿真技术及离散元软件UDEC和3DEC的改进和发展。

BWIP柱状节理玄武岩位于美国哥伦比亚高原,哥伦比亚高原处于太平洋板块与美洲板块交界处,历史上及现在火山活动频繁(如近几十年来喷发的圣海伦火山),形成了世界上较规模较大的大陆溢流玄武岩(哥伦比亚河玄武岩统Columbia River Basalt Group,简称CRBG),其覆盖区域达16.4万km²,体积多达17.4万km³,分布于美国华盛顿州东部、俄勒冈州北部及爱达荷州西部。据Reidel(1989)测定,CRBG形成时间为中新世,约16~6

Ma。CRBG玄武岩统中孕育了多层柱状节理玄武岩组,自地表从上而下可分为Saddle mountain玄武岩组、Wanapum玄武岩组、Grande Ronde玄武岩组、Picture Geoge玄武岩组和Imnaha玄武岩组。Moak和Wintczak(2001)^[6]、Woodmorappe和Michael(2002)^[7]、Goehring和Morris(2005)^[8]详细调查了Saddle mountain玄武岩组中的Pomona basalt flow亚层NSTF区域的柱状节理玄武岩。NSTF区域的柱状节理玄武岩可分为两类:一类为规则小型或中型柱状节理玄武岩,柱体类型以六边形为主,柱长2.4m,半径15~30cm,平均半径20cm,倾角15~20°,岩体发育水平微裂隙,平均节理间距20cm,在考虑原生和构造结构面的发育程度后,节理线密度可达13条/m以上;另一类为柱体直径较大的不规则大型块状柱状节理玄武岩,局部岩层还发育有锯齿状节理(hackly joints)和枕状节理(pillow joints)。由Pomona basalt flow亚层的玄武岩室内试验成果可知,玄武岩块的弹性模量为(83.4±8.3)GPa,泊松比 ν 为0.25±0.02,详见表1。

表1 美国哥伦比亚河玄武岩的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanics parameters of CRBG in U. S. A.

玄武岩组	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
Umatanum Flow ⁽¹⁾	212.0±106.0	11.9±6.9	71.0±20.0	0.27±0.05
Pomona Flow ⁽¹⁾	356.0±42.0	19.4±3.8	83.4±8.3	0.25±0.02
Cohasset Flow ⁽¹⁾	234.6±28.8	13.6±2.4	70.4±5.1	0.26±0.02
Miocene, OR ⁽¹⁾	169.0~219.0	26.2	/	/
Champion Mine ⁽¹⁾	230.0	26.2	61.5	/
Ahmeek Mine ⁽¹⁾	258.0~358.0	/	70.3	/
BWIP ⁽²⁾	168~364	10.0~20.0	20~100.0	0.09~0.32

注:(1)数据来自美国能源部DOE(1988);

(2)数据来自Schultz(1995)^[9]。

2 BWIP柱状节理原位试验和数值仿真

2.1 原位试验

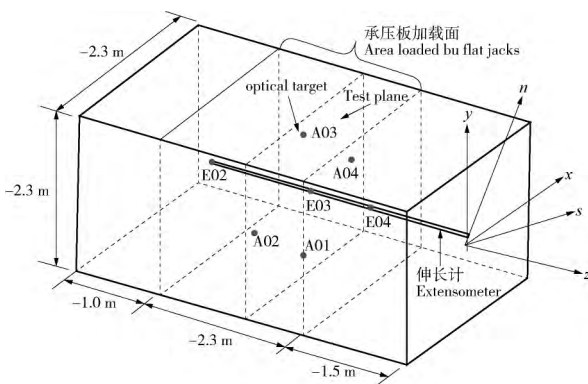
首先分析BWIP的原位试验成果和综述美国在柱状节理岩体数值仿真的研究进展,然后采用三维离散元软件3DEC进行了数值仿真和验证。

美国能源部在BWIP哥伦比亚河玄武岩统(Co-

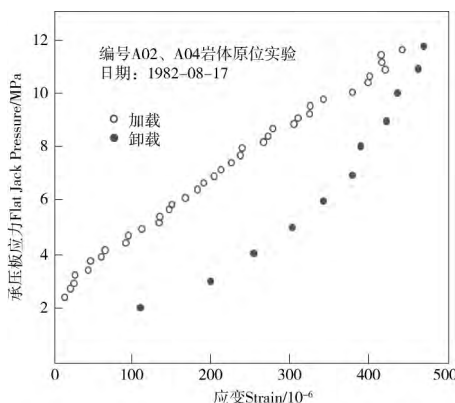
lumbia River Basalts) 开展了大型柱位承压板试验, 该试验点位置的玄武岩体柱状节理显著发育, 岩样采用排线钻孔法钻进以减小岩体扰动, 试验面(test plane) 用刚性承压板加载, 岩体的变形数据则通过安装伸长计即多点位移计(extensometer) 获得, 如图 1 所示。



(a) BWIP柱状节理玄武岩示意图



注: A01~A04为optical target测点, E02~E04为伸长计测点
(b) BWIP承压板试验示意图



注: 应力~应变曲线为block test BDMS displacements
(c) BWIP承压板试验成果

图 1 BWIP 原位试验示意图

Fig. 1 In-site test of BWIP

Brady B. H. G. 于 1985 在《国际岩石力学与采矿科学杂志》发表的论文《大型玄武岩体承压板试验的初步研究》^[10] 中分析了 BWIP 的柱状节理玄武岩承压板试验成果, 结论如下:

1) 一个完整的加载卸载循环表现为 3 个阶段: 初始加载阶段, 岩块变形, 结构面存在非线性滑移; 初始卸载回弹变形阶段, 结构面无滑移; 后继卸载滑移阶段, 结构面存在非线性滑移。加、卸载循环过程结构面非线性滑移产生滞后效应, 产生永久变形。

2) 加载过程伴生滞后特性(hysteresis effect) , 如果我们认为原位试验曲线的非线性特征来自于玄武岩的柱状节理网络, 那么这种低荷载下的高度滞后特性可认为是结构面的非线性弹性行为所致。即可认为, 柱状节理玄武岩的变形可分解为两个部分: 弹性变形(包括完整岩块和结构面) 和非弹性变形(仅发生在节理面上的滑移、转动和分离) 。

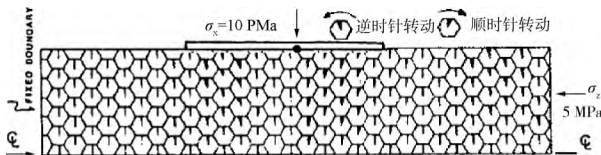
3) 只有初始卸载阶段才能抑制柱状节理的非弹性变形, 可代表柱状节理玄武岩的真实弹性变形。因此在获得柱状节理玄武岩的等效变形模量时, 应采用原位承压板试验中的初始卸载阶段曲线, 同时非弹性变形也可以单独评价。

2.2 数值仿真

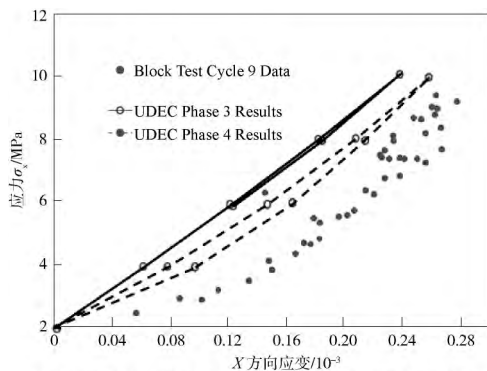
近几十年来, 许多研究者采用离散元法来对节理岩体的力学特性进行了数值模拟研究。参与 BWIP 核废料处置工程的 Itasca 公司专家 Roger D. Hart, Peter A. Cundall, Jose V. Lemos 等从 1984 年开始, 利用 UDEC 离散元软件研究了 BWIP 柱状节理玄武岩的工程力学特性和节理力学本构关系, 并于 1985 年提交了柱状节理岩体力学分析报告^[11-12]。报告分析了 BWIP 柱状节理玄武岩的原位载荷试验数据、连续屈服和滞后效应, 提出了一种新的连续屈服节理本构模型(当时取名为“修正节理本构模型”The Revised Joint Model) , 这种模型可用于模拟节理剪切中的渐进破坏行为, 已成为 UDEC/3DEC 软件中应用至今的一个非常重要的节理本构模型, 这也是离散元法在核电工程中的首例应用。至今, UDEC/3DEC 帮助手册中验证案例章节(Verification Problems) 的第 3 个案例^[13-14], 就是柱状节理玄武岩等效弹性模量数值解和解析解的对比, 详见 UDEC 手册(Cyclic loading of a specimen with a slipping crack, 命令流文件为 SLIP. dat)

和 3DEC 手册(Block with a slipping crack under cyclic loading, 命令流文件为 SLIP3D. dat) , 这个命令流反演了柱状节理玄武岩在加卸载下的力学行为, 并与 Brady B. H. G. 提出的解析解相吻合。 UDEC/3DEC 帮助手册中同时也给了平面应力下的计算值, 同样与解析解一致, 说明采用 3DEC 离散元模型来分析节理岩体的力学机制是合理精确的。其中, UDEC/3DEC 数值试验中对岩块的弹性模量取值为 88.9 GPa, 泊松比 ν 取值为 0.26, 均在 CRBG 玄武岩的变形参数取值范围内(见表 1) 。同时, Cundall 根据大量数值试验和原位试验的对比成果, 将 BWIP 核废料处置场址岩体中的柱状节理法向刚度和切向刚度取值为 220 GPa/m, 柱状节理摩擦角取值为 16° 。

UDEC/3DEC 帮助手册中对 Brady 的解析解进行了修正, 将初始卸载阶段的弹性模量取值为受柱状节理影响的等效弹性模量。



(a) 规则柱状节理玄武岩数值模型及转动变形 (六边形中楔形体的厚度代表转动量)



(b) 规则柱状节理玄武岩数值计算和原位试验对比

图 2 BWIP 柱状节理 UDEC 数值模拟结果 (Cundall, 1985)

Fig. 2 UDEC simulation results of columnar basaltic rockmass in BWIP(cited from Cundall, 1985)

Cundall 等^[11]认为柱状节理玄武岩的非线性特征都可以归结为节理网络的非线性行为所致。一般来说, 当加载压力较小时, 对大多数柱状节理来说, 柱状节理的滑动可能性较低。但以下三种情况则可能造成岩体的滞后效应及应变不均匀性: (1)

柱状节理产状和位置的不同, 可能在岩体内部的局部位置产生应力集中, 形成节理滑移的应力临界条件; (2) 个别柱状节理在整个加载阶段都产生了连续屈服和滞后效应; (3) 构造应力及二次应力场会产生局部应力集中现象。

3 不规则柱状节理的离散元模拟

然而, 我们注意到 Cundall 等认为柱状节理的转动和滑移是柱状节理玄武岩非线性行为的根本原因, 但 Cundall 等对 BWIP 的柱状节理是采用了简化的标准六边形柱面, 实际上, 玄武岩受赋存环境、地质构造等影响, 柱状节理的柱面类型不全为六边形, 国内外大量玄武岩中柱状节理柱面类型的统计表明: 即使是六边形柱面发育很好的爱尔兰巨人阶梯柱状节理, 仍然包含一些五边形和四边形柱面, BWIP 玄武岩也含有较多的五边形和四边形柱面。大部分的柱状节理玄武岩则以不规则的四边形和五边形柱面为主, 如我国西南某水电站柱状节理的柱面主要为四边形和五边形, 六边形柱面所占比例于 10%, 属于不规则柱状节理玄武岩, 因此用六边形柱状节理模拟是比较简化的。

Müller (1998)^[15], Toramaru 和 Matsumoto (2004)^[16], Goehring 和 Morris(2003 - 2007)^[17]发现具有一定湿度的面粉干化过程中, 水汽的扩散和蒸发与熔岩流中热量的扩散和析取具有类似的过程, 他们的试验表明面粉在适宜的温度下会形成稳定的与柱状节理玄武岩类似的柱状裂隙。Cole (1988)^[18]、Pieu 和 Gupta (1995, 1997)^[19-20]、Frost(2001)^[21]、Menger(2002)^[22]等发现冰块凝结中也常常形成柱状节理构造。French(1925)^[23]、Hull 和 Caddock(1999)^[24]发现了淬火金属和淬火玻璃中也伴生不规则的柱状裂隙。从数学上看, Voronoi 数学图形和柱状节理构造具有很好的几何相似性, 并在类似柱状节理物理性质研究中得到了应用。本文采用 Voronoi 图形构建柱状节理玄武岩数值模型, 并用三维离散元数值方法来分析其工程力学行为。

目前基于 Delaunay 三角形生成二维 Voronoi 图形的计算方法已经比较成熟, Delaunay 化网格还可以生成三维 Voronoi 多面体, 用于复杂构形颗粒组合破坏分析^[25]。UDEC 中也提供了一个内部命令 (Voronoi Tessellation) 可快速自动生成 Voronoi 节

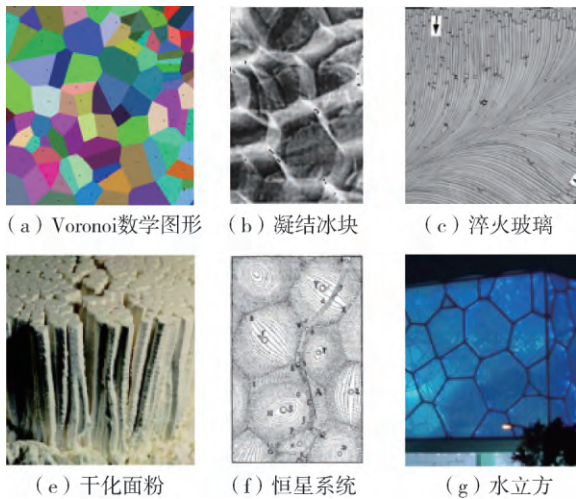


图 3 Voronoi 数学图形和自然界的柱状节理构造
Fig. 3 Voronoi diagram and natural columnar joint structures

理网络。Voronoi Tessellation 是一种将块体剖分成平均边长的随机多边形子块体的剖分方法, 经笔者验证, UDEC 生成的 Voronoi 节理, 通过编程处理可导入 AutoCAD 和 3DEC 中生成三维柱体, 如图 4 所示。

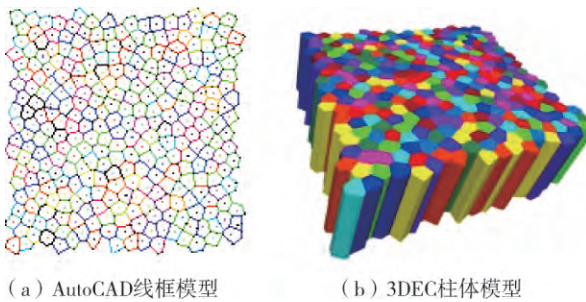


图 4 导入 3DEC 的三维 Voronoi 柱体数值模型
Fig. 4 3D Voronoi columnar model in 3DEC

基于以上方法, 可采用 3DEC 数值模拟 BWIP 不规则柱状节理玄武岩原位变形试验揭示出的滞后效应、应变分布的不均匀性及刚度的围压效应^[26]。本文对比了柱状节理倾角为 80° 的玄武岩块和实际柱状节理玄武岩的等效弹性模量计算值, 柱状节理玄武岩数值模型如图 5 所示, 柱状节理玄武岩的岩块变形和柱状节理剪切变形见图 6。

计算表明: 含单条倾角为 80° 柱状节理的玄武岩体弹性模量理论值为 73.96 GPa, 按平均柱状节理间距 $s = 0.20$ m 计算的含多条倾角为 80° 柱状节理的玄武岩体弹性模量理论值为 44.22 GPa, 柱状节理玄武岩的 3DEC 数值解为 20.19 GPa, 如图 7 所示。

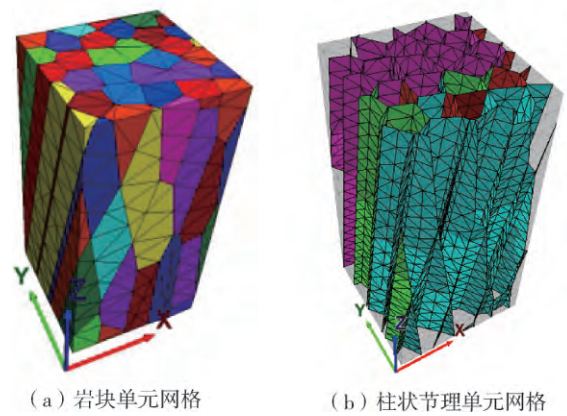


图 5 柱状节理玄武岩 3DEC 数值模型示意图
Fig. 5 3DEC model of columnar basaltic rockmass

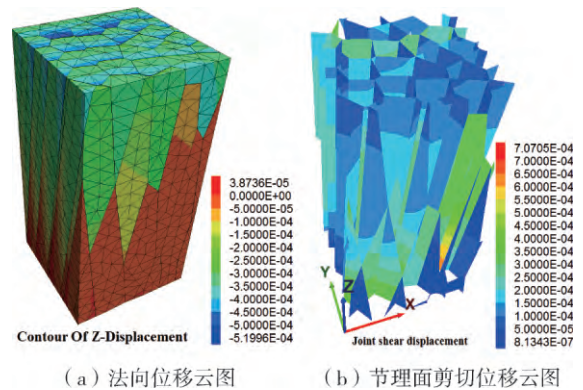


图 6 柱状节理玄武岩竖向变形和节理位移曲线
Fig. 6 3DEC model of columnar basaltic rockmass

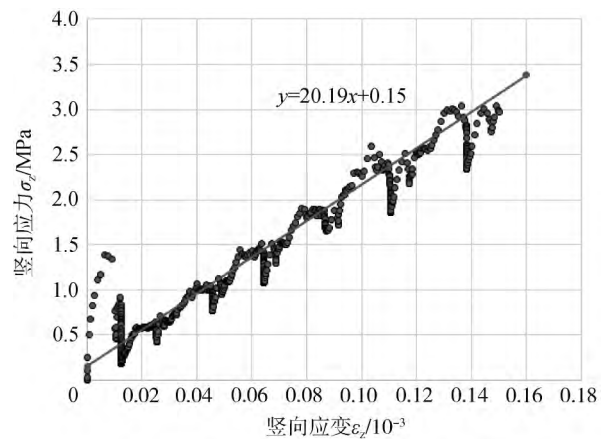


图 7 柱状节理玄武岩竖应力 - 应变关系曲线
Fig. 7 Stress - strain curve of columnar basaltic rockmass

表 2 列举了 BWIP 柱状节理玄武岩承压板原位试验成果。从已有的柱状节理玄武岩工程的承压板试验成果可知: 柱状节理玄武岩变形模量主要分布在 6.5 ~ 20.0 GPa, 平行柱轴方向变形模量为 20 GPa,

数值模拟成果与原位试验成果吻合很好。

表2 BWIP 柱状节理玄武岩岩体工程参数相关成果

成生年代	平均变形模量 E_m /GPa	C /MPa	岩体结构
Columbia River Basalt Group	10~40 20.0 ⊥ 6.5~13.5	0.6~6.0 / /	镶嵌结构

注: 符号 || 表示平行柱轴方向, ⊥ 表示垂直柱轴方向, 数据来自美国能源部 DOE(1988) 和 Schultz(1995)^[9]。

4 结论

本文分析了上世纪八十年代初美国汉福德核废料处置场原位试验和数值模拟成果, 并采用三维离散元软件 3DEC 软件和 Voronoi 数学图形构建了不规则柱状节理玄武岩数值模型, 基于 BWIP 原位试验获得的柱状节理玄武岩变形参数, 计算了 BWIP 柱状节理玄武岩的岩体变形模量, 计算表明 BWIP 柱状节理玄武岩平行柱轴方向的变形模量数值解为 20.19 GPa, 原位试验值为 20 GPa, 数值计算成果与原位试验成果具有很好的一致性。

BWIP 工程对柱状节理玄武岩体的评价, 关注的是其岩体的变形和强度参数, 而核电工程的核安全级物项地基, 水利水电工程中的坝基和坝肩岩体更关注柱状节理玄武岩的地基承载力和抗震稳定性。目前我国勘察规范对第四系玄武岩层没有规定明确的勘探原则, 使勘察工作没有充足的规范依据, 对柱状节理玄武岩的力学性质更是研究较少。本文的研究成果可让我们更好地理解柱状节理的力学行为, 为科学评估第四系玄武岩的工程力学特性提供了一种可操作性的数值分析方法。

参考文献:

- [1] 艾虎, 武永强, 焦智伟, 等. 地面高精度磁测在核电站选址中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(2): 214-217.
AI H, WU Y Q, JIAO Z W, et al. The application of ground high precision magnetic survey to the site selection of Nuclear power plant [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(2): 214-217.
- [2] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范 [S].
- [3] 杨磊, 樊耀武. 第四纪多次喷发玄武岩地区桥基勘察 [J]. 铁道勘察, 2010(3): 63-67.
YANG L, FAN Y W. Investigation of foundation for bridges at repetitious eruption basalt zone in quaternary period [J]. Railway Investigation and Surveying, 2010(3): 63-67.

- [4] SAWRUK W J, SCHMEHL R J, STRIPLING D L. Container designs for the nuclear waste repository in basalt rock [C]. Proceedings of the 1986 Joint ASME/ANS Nuclear Power Conference, 1986: 416.
- [5] DOBSON W L, KOCH D A, AKINS M J. Conceptual design of waste packages for the nuclear waste repository in basalt rock [C]. Proceedings of the 1986 Joint ASME/ANS Nuclear Power Conference, 1986: 440.
- [6] MOAK D J, Wintczak T M. Near-surface test facility. Phase I. Geologic site characterization report [R]. 2001: 234.
- [7] WOODMORAPPE J, MICHAEL J O. Field studies in the Columbia River basalt, North-west USA [J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 16(1): 103-110.
- [8] GOEHRING L, MORRIS S W. The scaling of columnar joints in basalt [J]. Journal of Geophysical Research, 2005: 1-13.
- [9] SCHULTZ R A. Relative scale and the strength and deformability of rock masses [J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18(9): 1139-1149.
- [10] BRADY B H G., CRAMER M L, HART R D. Preliminary analysis of a loading test on a large basalt block [J]. Int. J. Rock Mech., 1985, 22(5): 345-348.
- [11] CUNDALL P A, HART R D. Analysis of block test No. 1 inelastic rock mass behavior: phase 2—a characterization of joint behavior (final report) [R]. Itasca Consulting Group Report, Rockwell Hanford Operations, Subcontract SA-957, 1984.
- [12] HART R D, CUNDALL P A, CRAMER M L. Analysis of a loading test on a large basalt block in research and engineering [J]. Applications in Rock Masses, 1985(2): 759-768.
- [13] Itasca Consult Co., Ltd. Cyclic loading of a specimen with a slipping crack, verification problems [R]. UDEC Manuals, 2014.
- [14] Itasca Consult Co., Ltd. Block with a slipping crack under cyclic loading, verification problems [R]. 3DEC Manuals, 2014.
- [15] MÜLLER G. Experimental simulation of basalt columns [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 86(1-4): 93-96.
- [16] TORAMARU A, MATSUMOTO T. Columnar joint morphology and cooling rate: a starch-water mixture experiment [J]. Journal of Geophysical Research, 2004: 109.
- [17] GOEHRING L, MAHADEVAN L, MORRIS S W. The dynamic similarity between columnar joints in basalt and starch [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract # T14A-08, 2007.
- [18] COLE D M. Crack nucleation in polycrystalline ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1988, 15(1): 79.
- [19] PICU R C, GUPTA V. Crack nucleation in columnar ice due to elastic anisotropy and grain boundary sliding. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(10): 3783.

(下转第95页 Continued on Page 95)

表 3 核岛场地各工程地质分区物理力学参数

Tab. 3 The physical and mechanical parameters of the island site engineering geological division

地段	岩土层	静参数						动参数				
		重力密度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和单轴抗压强度 f_r / MPa	粘聚力 C / MPa	内摩擦角 $\Phi (^\circ)$	弹性模量 $/ \text{MPa}$	泊松比 ν	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	压缩波速 $V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	动态剪变模量 $/ \text{MPa}$	动态弹性模量 $/ \text{MPa}$	动态泊松比 ν
核岛场地	强风化夹层	20	—	0.04	22.8	610	—	* 660 1 140	* 1 210 2 200	* 1 100 3 300	* 2 800 8 700	* 0.37 0.37
		1 号核岛	Ⅲ _Y	25	14	10.8	30.3	2 730	0.27	1 800	3 200	8 000
核岛	Ⅱ _Y	27	55	18.3	42.6	7 340	0.26	2 200	3 900	13 400	34 200	0.30
		2 号核岛	Ⅲ _H ^上	23	10	6.2	22.6	1 100	0.28	1 600	2 800	6 600
核岛	Ⅲ _H ^下	25	14	10.8	30.3	2 730	0.27	1 800	3 200	8 000	20 400	0.33
		Ⅱ _H	27	55	18.3	42.6	7 340	0.26	2 200	3 900	13 400	34 200

注: * 为检层法获得的动参数; 其余动参数为跨孔波速获得。

体或岩层中传播速度除受岩石的强度影响外, 岩石的密度和岩体或岩层中节理裂隙的发育程度对剪切波速也有影响, 本核电厂址核岛区中等风化岩石的密度较高, 节理裂隙不发育。核岛区地基按深度进行分段统计, 且采取了略低的参数值作为设计输入有相对的保守性。

跨孔波速测试剖面位于强风化夹层较发育地段, 2 号核岛双跨孔剖面是核岛区中等风化层面最低, 强风化夹层最发育的地段, 以该地段的现场测试成果作为设计输入也有一定的保守性。

3.4 主要参数选用

以工程地质分区为单位进行参数统计, 主要参数见表 3。

4 结论

本文以某沉积岩核电厂址为例, 通过岩类划分、风化程度划分, 将每个核岛地基进行工程地质

单元划分, 再以每个工程地质单元为单位, 提出相对应的岩土设计参数, 并通过施工检验, 得出上述核电厂非均质地基岩土工程分析评价方法切实可行, 提出的地基设计参数合理, 从而使复杂问题简单化, 具有一定的可操作性。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 核电中长期发展规划(2005—2020 年) [L]. 2007-10-01.
- [2] 李勇. 某核电厂一期工程核岛区初步设计阶段(详测) 岩土工程勘测报告(B 版) [R]. 广州: 广东省电力设计研究院, 2009: 25-147.
- [3] 李勇, 郑文棠. 核电厂沉积岩岩基激振试验研究 [J]. 震灾防御技术, 2011, 6(1): 69-76.
- [4] GB 50021-2001, 岩土工程勘察规范(2009 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] DL/T 5093-1999. 火力发电厂岩土工程勘测资料整编技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

(责任编辑 高春萌)

(下接第 78 页 Continued from Page 78)

- [20] GUPTA V, PICU R C, BERGSTR J S. Nucleation of splitting cracks in columnar freshwater ice [J]. Acta Materialia. 1997, 45(4): 1411.
- [21] FROST H J. Mechanisms of crack nucleation in ice [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001; 68(17-18): 18-23.
- [22] MENGER F M, ZHANG H, CARAN K L, et al. Gemini-induced columnar jointing in vitreous ice. cryo-hrsem as a tool for discovering new colloidal morphologies [J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 124(7): 1140-1141.
- [23] FRENCH J W. The fracture of homogeneous media [J]. Trans.

Geol. Soc. Glasgow, 1925(17): 50-68.

- [24] HULL D, CADDOCK B. D. Simulation of prismatic cracking of cooling basalt lava flows by the drying of sol-gels [J]. Journal of Materials Science, 1999; 34(23): 5707.
- [25] OKABE A, BOOTS B, SUGIHARA K, et al. Spatial tessellations: concepts and applications of voronoi diagrams [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2000.
- [26] 石崇, 褚卫江, 郑文棠. 块体离散元数值模拟技术及工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(责任编辑 高春萌)