

钻孔弹模法在某核岛岩体力学特性中的应用研究*

王玉玲

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院 广州 510663)

摘要 钻孔试验法的最大优点是可测试深部岩体力学参数(变形模量或弹性模量),为工程支护设计、工程安全性评价提供最为不可缺少的参数。本文结合某核岛工程,介绍了钻孔弹模法在岩体力学特性的工程应用。研究表明:该方法能够反映岩体结构特征,测试获得的压力变形曲线符合实际,规律性良好。在低压力段,变形发展很快,压力与变形曲线呈非线性;在中压力段,钻孔弹模计的承压板在不断输出增大的压力下与孔壁岩体达到全接触,裂隙闭合,压力与变形曲线接近线性;在高压力段以上,压力与变形曲线在经历了低压力段非线性,中压力段接近线性后最终呈线性。考虑到岩体本身结构质量变化,弹性模量与变形模量会随深度发生一定的变化。经进一步分析核岛岩体变形模量或弹性模量可知,微风化至新鲜的花岗岩岩体各向异性不明显,部分受裂隙和结构面切割影响的测段岩体模量值小于其他测段,岩体模量比值较大,表现出较强的各向异性。最终,本文还给出了微风化至新鲜的花岗岩变形模量值 NS 向标准值为 24.02 ± 1.61 GPa, EW 向标准值为 23.92 ± 1.56 GPa,综合变形模量标准值为 23.97 ± 1.10 GPa;弹性模量值 NS 向标准值为 45.15 ± 2.58 GPa; EW 向标准值为 44.25 ± 2.57 GPa;综合弹性模量标准值为 44.70 ± 1.79 GPa。

关键词 岩体 力学特性 钻孔弹模法 变形模量

中图分类号: TU459 文献标识码: A

BORING ELASTIC MODULUS METHOD FOR ROCK MASS MECHANICAL CHARACTERISTICS AT NUCLEAR ISLAND

WANG Yuling

(Guangdong Electric Power Design Institute CEEC, Guangzhou 510663)

Abstract The biggest advantage of drill test method is to obtain the rock mechanics characteristics such as deformation modulus and elastic modulus. They are the crucial parameters for engineering support design and engineering safety evaluation. This paper is based on a nuclear island construction project. It uses the boring elastic modulus method for rock mass mechanics characteristic. It finds that the method is good to reflect the rock mass structure characteristic and the stress-strain curve of test has a relative good regularity. The curve can be described as follows. In low pressure stage, the stress-strain curve is non-linear relation with a quick deformation. In medium pressure stage, it needs a certain pressure to force the drill wall and bearing plates of boring elastic modulus equipment to contact completely when the pressure increases and cracks close. In high pressure stage, the stress-strain curve is a linear relation. Meanwhile, with the influence of rock mass structure itself, the deformation modulus and elastic modulus vary at different depths. In a further study on the deformation modulus and elastic modulus at nuclear island, it is known that the anisotropy is not evident in granite ranging from weak weathering to fresh. However,

* 收稿日期: 2012-08-03; 收到修改稿日期: 2012-12-03.

作者简介: 王玉玲, 主要从事岩土工程和地质工程检测工作. Email: 762721690@qq.com

some of the test section affected by cracks and joint cutting can show relative low rock mass modulus, bigger rock modulus ratio and stronger in anisotropy. Finally, this paper provides the rock mass modulus in weak weathering to fresh conditions as follows. At the weak weathering condition. The standard value of NS deformation modulus is 24.02 ± 1.61 GPa; the standard value of EW deformation modulus is 23.92 ± 1.56 GPa and the comprehensive value of deformation modulus is 23.97 ± 1.10 GPa. At the fresh condition, the standard value of NS elastic modulus is 45.15 ± 2.58 GPa; the standard value of EW elastic modulus is 44.25 ± 2.57 GPa and the comprehensive value of elastic modulus is 44.70 ± 1.79 GPa.

Key words Rock mass, Mechanical characteristic, Boring Elastic Modulus Method, Deformation modulus

1 引言

在工程支护设计、工程安全性评价中,岩体的力学性质,比如弹性模量和变形模量,是不可或缺的关键指标。由于岩体结构和岩块的矿物质成分的复杂性,使得实际测试获得的同一类岩体的弹性模量和变形模量值相差较大。长期以来世界各国发展了大量的研究方法和相应的测试技术,旨在尽可能接近工程岩体模量“真值”的近似测试结果,通常划分为动力法和静力法^[1~6]。

动力法主要根据声波和地震波在岩体中的传播规律构建模型,探讨声波和地震波传播参数与岩体模量(弹性模量和变形模量)的关系。动力法具有高效,便捷,低成本和大规模大范围开展测量等优点,但实测值高于静力法测值^[7~10]。

静力法中钻孔弹模法的优点可以归纳为:(1)测点处岩体基本上保持原状。由于采用钻孔手段,开挖和试件制备对测点岩体的影响很小;(2)结果具有代表性。测试周期短、成本低,因此可以广泛布置测试点;(3)深部岩体力学参数(变形模量或弹性模量)可测。测试采用钻孔千斤顶向岩体孔壁施加径向压力,根据孔径变化计算岩体的变形模量或弹性模量,这是静力法钻孔弹模法的最大优点^[11~13]。本文结合某核岛地基工程,介绍钻孔弹模法在岩体力学特性的应用研究。

2 工程地质概况

某核电站厂址区范围内出露的地层仅为第四系,出露面积 1.02 km^2 , 占厂址区陆域总面积的 26.84%。厂址区侵入岩发育,出露面积约 2.78 km^2 , 约占厂址区陆域面积的 73.16%。根据岩性特征、侵入关系和厂址附近范围及区域范围地质调查成果,厂址区侵入岩可划分两个岩石单位:晚侏

罗世第一阶段第二期侵入二长花岗岩、晚白垩世第一阶段第一期侵入二长花岗岩。

厂址在大地构造上位于华南褶皱系(I级)粤北、粤东北-粤中拗陷带(II级),该拗陷带可进一步划分为粤北拗陷、粤中拗陷及永梅-惠阳拗陷等3个3级构造单元,厂址位于粤中拗陷的南部。厂址附近区内的构造总体上以北东向构造为主,次为北西向构造,此外还有零星出露的东西向及南北向构造,它们相互切割、复合,构成了本区构造的基本格架。主要的构造形迹包括褶皱及断裂等。

厂址区内的岩脉发育,经统计共有各类岩脉125条,有中基性、酸性、碱性岩脉,其中石英脉(q)88条、细粒花岗岩脉(γ)16条、伟晶岩脉(ρ)14条(团)、花岗斑岩脉($\gamma\pi$)2条、霏细岩脉(v)2条、闪长岩脉(δ)2条、细晶岩脉(τ)1条。绝大多数岩脉呈北东东和近东西向展布,个别为北西向和北北东向,与密集节理带和断裂方向基本一致。

3 钻孔弹模测试原理、仪器和步骤

3.1 测试原理

钻孔弹模测试是采用根据 Goodman 钻孔千斤顶原理设计而成的钻孔弹模计进行。除了传统的加压系统、位移量测系统,钻孔弹模计还研发装备了压力量测系统。测试时,加压系统不断输出变化的压力,它们来源于4个千斤顶活塞推动2块刚性承压板全接触钻孔壁岩体并施加对称的条带载荷;承压板上的位移测量系统会记录下加载过程中钻孔孔壁岩体的径向变形;压力量测是由活塞上的测力计测定^[14,15]。双向测试(平行水平面和垂直水平面)岩体模量值可在水平孔进行,垂直孔只做水平向岩体模量值测试。

根据式(1)计算不同压力变形曲线下测试部位岩体的弹性模量或变形模量:

$$E = \alpha \times \beta \times D \times R^*(\nu, \beta) \times \frac{\Delta P}{\Delta D} \quad (1)$$

式中, α 为考虑三维影响修正系数; β 为活塞测力计压力值修正系数; D 为钻孔直径(mm); ΔD 为径向变形(mm); $R^*(\nu, \beta)$ 为与岩体泊松比和承压板宽度或接触孔壁时圆周角大小相关, $R^*(0.25, 150) = 2.547$; ΔP 为压力增量(MPa)。

通常根据压力变形曲线计算钻孔岩体的弹性模量时, 压力增量(ΔP)和径向变形(ΔD)取高压线性段增量值; 计算变形模量时, 压力增量(ΔP)和径向变形(ΔD)取低压段变化量值^[7]。

3.2 测试仪器及布置

测试采用 BJE110 和 BJE91 钻孔弹模计, 仪器克服了输出压力低及承压面受力不均等缺陷。它还同时具有孔壁岩体与承压块耦合更好、孔壁压力分布更均匀; 仪器输出压力更高、位移传感器精度和灵敏度更高等优点。

厂址区共布置 5 个钻孔弹模测试孔, 即 EI01 孔、EI02 孔、EI03 孔、EI05 孔和 EI06 孔。在 EI01 孔、EI02 孔、EI03 孔 6 个高程的 NS 和 EW 向分别进行了钻孔弹模测试, 测试成果分别见表 2~表 4。

表 1 各测试孔试验点数
Table 1 Test points of each hole

试验部位	孔号	试验数量/点
厂址区	EI01	12
	EI02	12
	EI03	12
	EI05	6
	EI06	6
合计	5 孔	48

由于孔内反水带有砂粒, 砂粒进入测试仪器内, 造成仪器无法收回, 在 EI06 孔的 -20m、-30m 和 -40m(高程) 3 个测点以及 EI05 孔的 -3m、-6m、-10m 的 3 个测点 NS 和 EW 向分别进行了钻孔弹模测试。

3.3 测试步骤

钻孔弹模测试工作参照《水利水电工程岩石实验规程》(SL264-2001)、《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)、国际岩石力学实验建议方法(ISRM Suggested Methods)的具体要求进行^[7]:

- (1) 参照规范连接好仪器, 检查完好性;
- (2) 仪器放置到预定深度测点, 施加压力值

(5MPa) 确保承压板接触孔壁, 记录压力和位移初始读数;

(3) 根据设计要求和岩体强度确定测试最大压力, 分为 7~8 级;

(4) 加压过程为 1MPa、2MPa、3MPa、4MPa、5MPa、10MPa、15MPa、20MPa、25MPa、30MPa、35MPa、40MPa、45MPa; 卸荷过程为 45MPa、35MPa、25MPa、15MPa、10MPa、5MPa、1MPa、0MPa;

(5) 按照规范, 卸压时, 最低压力应回归至初始压力;

每完成一个测试点, 移至下一个测试点前, 需将弹模仪压回至最小尺寸。

4 成果分析

4.1 数据处理原则

各测试孔所有测段岩体均为微风化至新鲜的花岗岩。根据钻孔弹模试验成果的压力与变形关系曲线(图 1、图 2)可见, 在低压力段附近(9MPa 以下), 变形发展迅速, 压力与变形曲线呈非线性; 在中压力段(9~19MPa), 钻孔弹模计的承压板在不断输出增大的压力下与孔壁岩体达到全接触, 裂隙闭合, 压力与变形曲线接近线性; 在高压力段(19MPa)以上, 压力与变形曲线在经历了低压力段非线性, 中压力段接近线性后最终呈线性。

数据处理一般按照以下原则进行(也可以根据曲线形态确定): 小于 4MPa 的压力段定义为 E_1 , 数据处理中不予考虑; 4~19MPa 压力段的割线模量定义为变形模量 E_2 ; 19MPa 以上压力段的割线模量定义为弹性模量 E_3 。

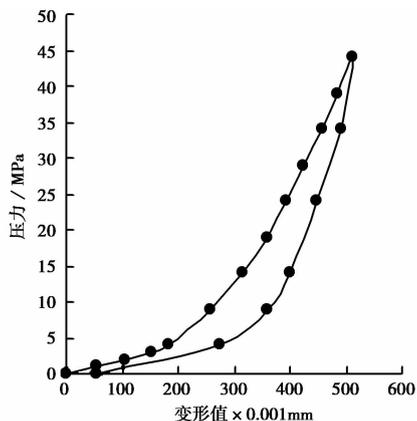


图 1 EI01 孔 68.89m NS 向测点压力变形曲线
Fig. 1 NS stress-strain curve of depth 68.89m in EI01

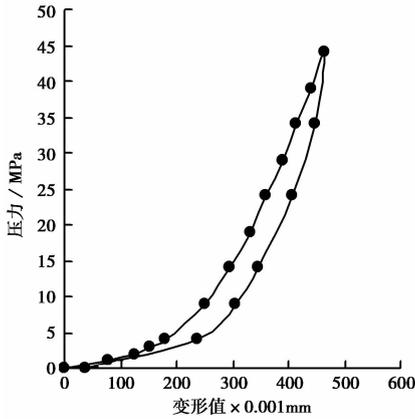


图2 EI03孔85.34m NS向测点压力变形曲线

Fig. 2 NS stress-strain curve of depth 85.34m in EI03

4.2 数据分析

4.2.1 EI01孔

根据表2, 6个测试点NS向岩体变形模量在5.81~28.93GPa之间, 平均为23.85GPa; EW向岩体变形模量在5.74~28.76GPa之间, 平均为24.41GPa。NS向岩体弹性模量在7.56~54.64GPa之间, 平均为44.32GPa; EW向岩体弹性模量在7.33~52.36GPa之间, 平均为44.51GPa。

不同深度NS向与EW向岩体变形模量比值为0.88~1.03, 平均值为0.98; 不同深度的NS向与EW向岩体弹性模量比值为0.94~1.04, 平均值为1.00。因此, 两个方向岩体模量值差异小, 岩体各向异性不明显。

由于存在裂隙和节理, 53.89m测点为中粒斑状花岗岩, 灰白色、浅肉红色, 岩芯较破碎(图3); 118.89m测点为中粒斑状花岗岩, 灰白色、浅肉红色, 岩芯较破碎, 岩质坚硬(图4)。EI01测试孔测点岩体弹性模量及变形模量与测试孔深度的关系见图5。53.89m、118.89m测段岩体模量值小于其他测段; 同时, 两个方向岩体模量比值较大, 表现出较强的各向异性, 其他测点处岩体各向异性不明显。

4.2.2 EI02孔

根据表3, 6个测试点NS向岩体变形模量18.89~31.83GPa之间, 平均为25.18GPa; EW向岩体变形模量在18.13~32.12GPa之间, 平均为24.21GPa。NS向岩体弹性模量在39.06~53.77GPa之间, 平均为48.34GPa; EW向岩体弹性模量在29.54~55.11GPa之间, 平均为45.02GPa。

表2 EI01孔钻孔弹模测试结果表

Table 2 Test results of boring elastic modulus in EI01

测点编号	测点深度/m	测点高程/m	测点方向 NS		测点方向 EW		E_2 (NS)	E_3 (NS)
			E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa		
EI01-1	53.89	-3	5.81	7.56	5.74	7.33	1.01	1.03
EI01-2	58.89	-8	23.85	45.88	24.14	46.02	0.99	1.00
EI01-3	68.89	-18	22.19	43.77	23.01	41.97	0.96	1.04
EI01-4	78.89	-28	28.93	54.64	28.76	52.36	1.01	1.04
EI01-5	98.89	-48	24.94	43.24	24.29	46.02	1.03	0.94
EI01-6	118.89	-68	19.34	34.10	21.86	36.18	0.88	0.94
平均			23.85	44.32	24.41	44.51	0.98	1.00



图3 53.89m测点岩芯照片

Fig. 3 Drill core photo in depth 53.89m



图4 118.89m测点岩芯照片

Fig. 4 Drill core photo in depth 118.89m

表3 EI02 孔钻孔弹模测试结果表

Table 3 Test results of boring elastic modulus in EI02

测点编号	测点深度/m	测点高程/m	测点方向 NS		测点方向 EW		E_2 (NS)	E_3 (NS)
			E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 (EW)	E_3 (EW)
EI02-1	60.05	-3	19.93	47.34	22.61	55.11	0.88	0.86
EI02-2	65.05	-8	30.83	52.21	28.93	54.20	1.07	0.96
EI02-3	75.05	-18	18.89	39.06	20.18	39.50	0.94	0.99
EI02-4	85.05	-28	31.83	45.72	32.12	45.92	0.99	1.00
EI02-5	105.05	-48	22.99	53.77	18.13	29.54	1.27	1.82
EI02-6	125.05	-68	26.63	51.96	23.28	45.86	1.14	1.13
平均			25.18	48.34	24.21	45.02	1.04	1.07

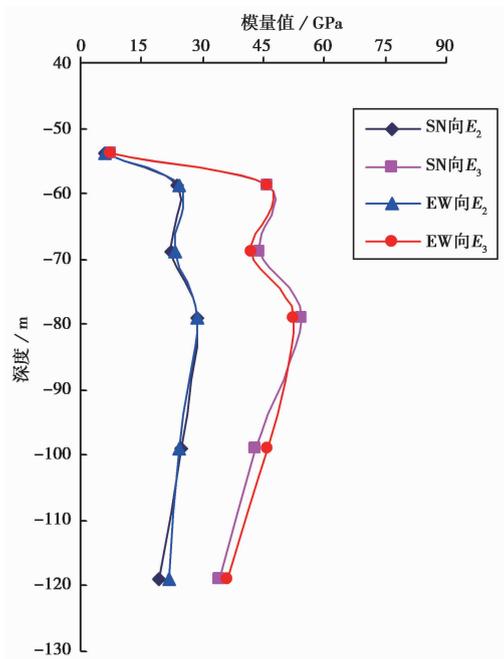


图5 EI01 孔模量值与深度关系曲线

Fig. 5 EI01 boring elastic modulus curve at different depths

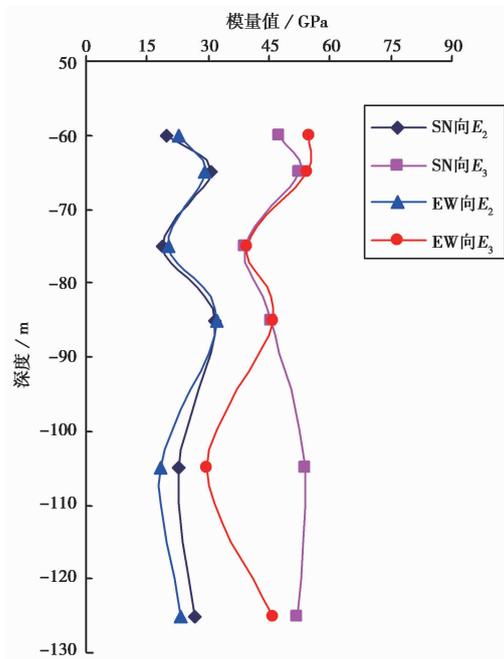


图6 EI02 孔模量值与深度关系曲线

Fig. 6 EI02 boring elastic modulus curve at different depths

EI02 测试孔的测点岩体弹性模量及变形模量与测试孔深度的关系见图 6。不同深度 NS 向与 EW 向岩体变形模量比值为 0.88 ~ 1.27 之间,平均值为 1.04; NS 向与 EW 向岩体弹性模量比值为 0.86 ~ 1.82 之间,平均值为 1.07。由于裂隙和结构面切割,孔深 60.05m、75.05m 和 105.05m 测段岩体模量值小于其他测段;同时,测点处两个方向岩体模量比值较大,表现出较强的各向异性,其他测点处岩体各向异性不明显。具体的,60.05m 测点为中粒斑状花岗岩,灰白色、浅肉红色,岩芯短柱状,有裂隙(图 7);75.05m 测点为中粒斑状花岗岩,灰白色、浅肉红色,岩芯短柱状,有裂隙,岩质坚硬(图 8);105.05m 测点为中粒斑状花岗岩,灰白色、浅肉红色,岩芯短柱状,有裂隙,岩质坚硬(图 9)。

4.3.3 EI03 孔

表 4 中,6 个测试点 NS 向岩体变形模量在 19.26 ~ 26.96GPa 之间,平均为 23.07GPa;EW 向岩体变形模量在 15.80 ~ 26.95GPa 之间,平均为 21.70GPa。NS 向岩体弹性模量在 27.07 ~ 52.30GPa 之间,平均为 43.04GPa;EW 向岩体弹性模量在 33.12 ~ 55.57GPa,平均为 42.17GPa。

EI03 测试孔测点岩体弹性模量及变形模量与测试孔深度的关系见图 10。不同深度 NS 向与 EW 向岩体变形模量比值为 0.92 ~ 1.30,平均值为 1.06;NS 向与 EW 向岩体弹性模量比值为 0.81 ~ 1.36,平均值为 1.02。因此,两个方向岩体模量值差异小,岩体各向异性不明显。由于裂隙和结构面切割,孔深 60.34m 测段岩体模量值小于其他测段;同时,测点处两个方向岩体模量比值较大,表现出较



图7 60.05m 测点岩芯照片

Fig. 7 Drill core photo in depth 60.05m



图8 75.05m 测点岩芯照片

Fig. 8 Drill core photo in depth 75.05m



图9 105.05m 测点岩芯照片

Fig. 9 Drill core photo in depth 105.05m

表4 EI03 孔钻孔弹模测试结果表

Table 4 Test results of boring elastic modulus in EI03

测点编号	测点深度/m	测点高程/m	测点方向 NS		测点方向 EW		E_2 (NS)	E_3 (NS)
			E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 (EW)	E_3 (EW)
EI03-1	60.34	-3	19.26	39.45	20.85	41.97	0.92	0.94
EI03-2	65.34	-8	26.96	44.93	26.95	46.51	1.00	0.97
EI03-3	75.34	-18	25.51	52.30	26.23	55.57	0.97	0.94
EI03-4	85.34	-28	25.84	49.60	20.82	42.58	1.24	1.16
EI03-5	105.34	-48	20.28	27.07	19.58	33.29	1.04	0.81
EI03-6	125.34	-68	20.56	44.90	15.80	33.12	1.30	1.36
平均			23.07	43.04	21.70	42.17	1.06	1.02

强的各向异性,其他测点处岩体各向异性不明显。具体的,60.34m 测点为中粒斑状花岗岩,灰白色、浅肉红色,岩芯柱状,岩体有一定程度的风化(图12)。

4.3.4 EI05 孔、EI06 孔

将 EI05 孔、EI06 孔的测试成果进行统一分析。在表5中,6个测试点 NS 向岩体变形模量在 15.56 ~ 29.48GPa 之间,平均为 23.93GPa,EW 向岩体变形模量在 19.05 ~ 30.29GPa 之间,平均为 25.43GPa;NS 向岩体弹性模量在 34.95 ~ 56.97GPa 之间,平均为 44.73GPa,EW 向岩体弹性模量在 38.31 ~ 52.46GPa 之间,平均为 45.35GPa。

EI05、EI06 测试孔测点岩体弹性模量及变形模量与测试孔深度的关系见图11。不同深度 NS 向与

EW 向岩体变形模量比值为 0.82 ~ 1.01,平均值为 0.94;NS 向与 EW 向岩体弹性模量比值为 0.88 ~ 1.09,平均值为 0.99。因此,两个方向岩体模量值差异不大,岩体各向异性不明显。由于裂隙和结构面切割,孔深 49.03m 测段岩体模量值小于其他测段;同时,测点处两个方向岩体模量比值较大,表现出较强的各向异性,其他测点处岩体各向异性不明显。具体的,49.03m 测点为中粒斑状花岗岩,灰白色、浅肉红色,岩芯柱状,有裂隙,岩质坚硬(图13)。

4.4 综合分析

表6为5个测试孔的测试数据的综合分析结果,考虑到 EI01 孔 53.89m 处岩体模量值较低,统计分析时将 53.89m 测段的数据剔除。

表 5 EI05 孔、EI06 孔钻孔弹模测试结果表

Table 5 Test results of boring elastic modulus in EI05 and EI06

测点编号	测点深度/m	测点高程/m	测点方向 NS		测点方向 EW		E_2 (NS)	E_3 (NS)
			E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 (EW)	E_3 (EW)
EI05-1	42.03	-3	28.32	48.06	30.03	51.11	0.94	0.94
EI05-2	45.03	-6	15.56	44.45	19.05	41.93	0.82	1.06
EI05-3	49.03	-10	18.21	34.95	21.02	38.31	0.87	0.91
EI06-1	51.48	-20	29.48	56.97	30.29	52.46	0.97	1.09
EI06-2	61.48	-30	28.99	45.05	28.81	43.87	1.01	1.03
EI06-3	71.48	-40	23.02	38.93	23.38	44.44	0.98	0.88
平均			23.93	44.73	25.43	45.35	0.94	0.99

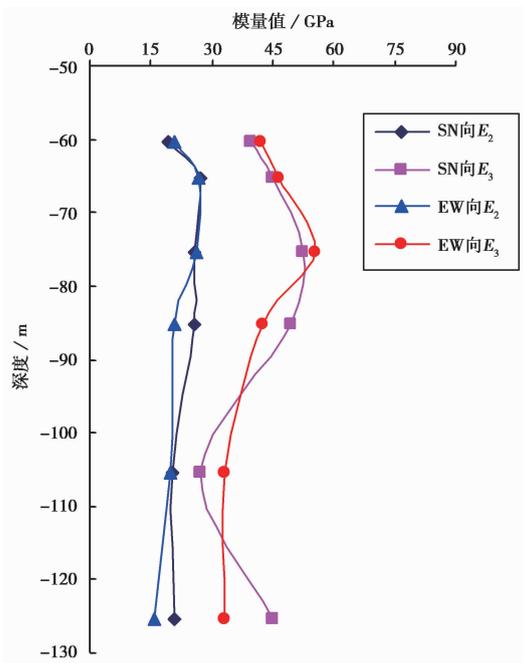


图 10 EI03 孔模量值与深度的分布关系曲线

Fig. 10 EI03 boring elastic modulus curve at different depths

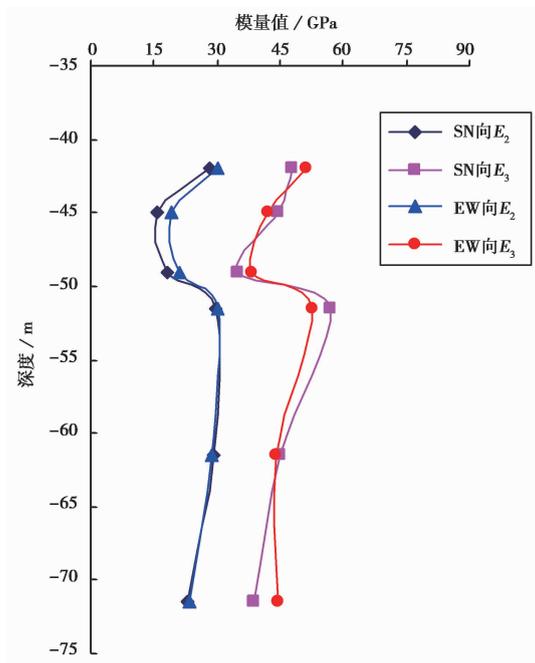


图 11 EI05、EI06 孔模量值与深度关系图

Fig. 11 EI05 and EI06 boring elastic modulus curve at different depths



图 12 60.34m 测点岩芯照片

Fig. 12 Drill core photo in depth 60.34m



图 13 49.03m 测点岩芯照片

Fig. 13 Drill core photo in depth 49.03m

表6 岩体模量统计结果

Table 6 Statistical results of rock modulus

项目	测点方向 NS		测点方向 EW		综合值	
	E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa
最大值	30.83	56.97	32.12	55.11	32.12	56.97
最小值	15.56	27.07	15.80	29.54	15.56	27.07
平均值(f_m)	24.02	45.15	23.92	44.25	23.97	44.70
标准差(σ)	4.43	7.08	4.29	7.05	4.36	7.08
变异系数 δ	0.18	0.16	0.18	0.16	0.18	0.16
统计数	23	23	23	23	46	46
标准值(Φ_m)	24.02±1.61	45.15±2.58	23.92±1.56	44.25±2.57	23.97±1.10	44.70±1.79

根据表6, 23个测试点NS向岩体变形模量在15.56~30.83GPa之间, 平均为24.02GPa, 标准值24.02±1.61GPa; EW向岩体变形模量在15.80~32.12GPa, 平均为23.92GPa, 标准值23.92±1.56GPa。NS向岩体弹性模量在27.07~56.97GPa之间, 平均为45.15GPa, 标准值45.15±2.58GPa; EW向岩体弹性模量在29.54~55.11GPa, 平均为44.25GPa, 标准值44.25±2.57GPa。忽略岩体的方向性, 岩体变形模量综合值在15.56~32.12GPa之间, 平均为23.97GPa, 标准值23.97±1.10GPa; 岩体弹性模量综合值在27.07~56.97GPa之间, 平均为44.70GPa, 标准值44.70±1.79GPa。

5 结论

(1) 钻孔弹模测试成果反映了岩体结构特征, 测试压力变形曲线规律性良好;

(2) 根据压力与变形关系曲线: 在低压力段附近(9MPa以下), 变形发展很快, 压力与变形曲线呈非线性; 在中压力段(9~19MPa), 钻孔弹模计的承压板在不断输出增大的压力下与孔壁岩体达到全接触, 裂隙闭合, 压力与变形曲线接近线性; 在高压力段(19MPa)以上, 压力与变形曲线在经历了低压力段非线性, 中压力段接近线性后最终呈线性。

(3) 微风化至新鲜的花岗岩变形模量值NS向 E_2 标准值为24.02±1.61GPa, EW向 E_2 标准值为23.92±1.56GPa, 综合变形模量值 E_2 标准值为23.97±1.10GPa; 弹性模量值NS向 E_3 标准值为45.15±2.58GPa; EW向 E_3 标准值为44.25±2.57GPa; 综合弹性模量值 E_3 标准值为44.70±1.79GPa;

(4) 受岩体本身结构质量的影响, 变形模量与弹性模量随深度有一定变化;

(5) 部分受裂隙和结构面切割影响的测段岩体模量值小于其他测段; 同时, 测点处两个方向岩体模量比值较大, 表现出较强的各向异性;

(6) 测试结果表明, 微风化至新鲜的花岗岩岩体各向异性不明显。

参 考 文 献

- [1] Goodman RE, Van TK and Heuze FE. Measurement of rock deformability in boreholes. Proc. 10th Symp. Rock Mech., Texas: Univ. Texas, Austin, 1968, 523~555.
- [2] Francois E. Heuze: Suggested method for estimating the in-situ modulus of deformation of rock using the NX-bore-hole Jack. ASTM. Geotechnical Journal GTJODJ, 1984, 7(4): 205~210.
- [3] International Society of Rock Mechanics. Suggested method for deformability determination by using a stiff dilatometer. Intern. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr, 1996, 33(4): 735~741.
- [4] 杜时贵, 王思敬. 岩石质量定量描述研究现状及趋向[J]. 工程地质学报, 1998, 6(3): 230~237.
Du Shigui, Wang Sijing. Review and trend of quantifying rock quality. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(3): 230~237.
- [5] 周佰海, 李光煜. 测定岩体变形特性的BJ-110钻孔弹模计[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(4): 12~23.
Zhou Baihai, Li Guangyu. A modified borehole jack. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(4): 12~23.
- [6] 张政辉, 蔡美峰. 岩石的卸荷力学特性及其对地应力测量的影响[J]. 矿冶, 2001, 10(3): 6~10.
Zhang Zhenghui, Cai Meifeng. Mechanics properties of a rock in-stress relief and their influences on in-situ stress measurement. Mining and Metallurgy, 2001, 10(3): 6~10.
- [7] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rockmechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2002.
- [8] 符文熹, 聂德新. 岩体变形参数渐变取值模型及工程应用[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 198~203.

- Fu Wenxi, Nie Dexin. Application of progressively changing rock mass deformation parameters to rock mass engineering. *Journal of Engineering Geology*, 2002, **10**(2): 198 ~ 203.
- [9] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(1): 53 ~ 60.
- You Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's modulus of rocks specimen. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(1): 53 ~ 60.
- [10] 刘允芳, 刘元坤. 围压试验在空心包体式应变计地应力测量中的作用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(23): 3932 ~ 3937.
- Liu Yunfang, Liu Yuankun. Function of confining pressure test on hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(23): 3932 ~ 3937.
- [11] 张永兴. 岩石力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- Zhang Yongxing. *Rock mechanics*. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- [12] 张志刚, 乔春生. 改进的节理岩体变形模量经验确定方法及其工程应用[J]. *工程地质学报*, 2006, **14**(2): 233 ~ 238.
- Zhang Zhigang, Qiao Chunsheng. Improved empirical method for determination of deformation modulus of jointed rock masses and its application in engineering. *Journal of Engineering Geology*, 2006, **14**(2): 233 ~ 238.
- [13] 刘元坤, 尹健民, 艾凯, 李永松. 钻孔弹模法在三峡工程岩体力学特性中的应用研究[J]. *长江科学院院报*, 2008, **25**(5): 29 ~ 36.
- Liu Yuankun, Yin Jianmin, Ai Kai, Li Yongsong. Boring elastic modulus method's application in studying rock mass mechanical characteristics of TGP. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, **25**(5): 29 ~ 36.
- [14] Harrison JP, Hudson JA. *工程岩石力学*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Harrison JP, Hudson JA. *Engineering Rock Mechanics*. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] 赖勇. 围压对杨氏模量的影响分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2009, **28**(2): 246 ~ 249.
- Lai Yong. Effect analysis of confining pressure on Young's modulus. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Nature Science)*, 2009, **28**(2): 246 ~ 249.