

东南亚某国 X-2 水电坝址区岩体工程力学参数特性研究

陈万业¹, 董兰凤²

(1. 中水顾问集团 西北工程勘察院, 兰州 730050; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000)

摘 要:在地质勘探资料的基础上,对 X-2 水电工程坝址区主要出露的玄武岩、砂岩、黏土岩的工程特性进行了深入的研究,得出准确的岩体力学参数,为工程设计提供了科学依据。

关键词:X-2 水电工程;水文地质条件;岩体力学参数

中图分类号:TV741

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2007)05-0298-04

The Research on Engineering Geological Properties of Rockmass in X-2 Power Station, Southeast Asia

CHEN Wan-ye¹, DONG Lan-feng²

(1. Engineering Investigation, Research Institute, Northwest Designation Academy of National Electric Power Company, Lanzhou 730050, China;

2. College of civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The research is based on rockmass engineering geological properties of Hawaiite, malmstone and clay rock in X-2 power station, Southeast Asia, the engineering geological properties of rockmass are obtained, which provides scientific basis for engineering design.

Key words: X-2 power station; hydrogeological conditions; engineering geological properties of rockmass

东南亚某国 X-2 水电工程的开发论证研究工作始于 1995 年,1998 年 NORAD 公司完成了该工程的可行性研究报告。由于受各方面条件的影响,直到 2003 年才由我国水电技术人员补充技术勘探工作。在对 X-2 水电工程研究过程中,通过大量的实验资料,结合现场调查和宏观判断,类比国内外相似岩体特性及工程经验,对建基岩体玄武岩的物理力学性质和工程特性做出了全面详细评价和论证,不仅为工程设计提供了科学依据,而且为正确概算工程造价和评估工程效益奠定了基础。为促使这一国际合作项目与我国顺利签约并 2005 年正式开工建设做出了贡献。

1 X-2 水电工程概况

X-2 水电站位于东南亚某国南部 Xeset 河上,是跨流域引水补给发电工程,由两部分组成,即由 H-T 河向 Xeset 河补充流量后,在 Xeset 河上修建拦水坝,再通过约 1 600 m 长的引水渠道、6 830 m 长的压力引水隧洞形成经济合理的发电水头发电。X-2 水电工程设计坝高 24 m,由重力式混凝土溢流坝和黏土心墙副坝构成,有效库容 8 万 m³,总装机容量 2×38 MW。

2 区域地质概况

2.1 区域地质与地貌

工程区位于 Boloven 高原的中部,是 Khorat 盆地的东沿,属于中生代大陆亚盆地。盆地东边以 Xekong 河及 Salavan 褶皱带为界,以东地区主要为隆起的古生代岩体,南部

以古生代基岩区为界,西边则为 Khorat 盆地,地形较为平缓。盆地高程介于 1 200~1 500 m 之间,多有陡坡,地表植被茂密。

工程区山脊走向 NW-SE 向,山脊最大高程 1 500 m 左右,由砂岩及泥岩组成;玄武岩覆盖区相对较为平缓,主要位于 Boloven 高原的中心部位,向四周以 10~20° 的角度倾斜。受岩性组合特征和地质构造面的控制,在玄武岩组成的河谷或溪流中,常有 2~5 m 的瀑布出现;而由砂岩及泥岩构成的河床,瀑布出现频率较小,但落差相对较大,常超过 10 m 以上(参见图 1,2)。

2.2 地层岩性

本区出露的岩层主要有中生代的沉积岩(包括 T1-2, J1-2, J3, K1, K2)上第三系到第四系的玄武岩及第四系松散堆积物。中生代泥砂岩中发育舒缓的背斜或向斜,构成了 Boloven 高原的基底,在 Boloven 高原的东侧及其它一些地区,亦有较大面积出露,形成了突出的山脊。主要位于 Boloven 高原中心的玄武岩,在岩性上属于碱性橄榄石群,在火山口及环火山口岩浆多有气孔,气孔表部被其它矿物充填。由于受岩浆冷却收缩的影响,玄武岩中垂直裂隙较发育,形成了矩形或垂直柱状的块体。这种类型的岩石在 X-2 坝址区及 H-T 水电坝址区出露较广(参见图 3,4)。

2.3 区域水文地质条件

本区地表水的排泄受地形与河(溪)流的控制;地下水主

收稿日期:2006-05-15

作者简介:陈万业(1968—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事地质工程、岩土力学研究。

要为赋存于玄武岩中的基岩裂隙水和赋存于覆盖层(主要是河流冲积层、洪积层等)中的孔隙性潜水,受大气降雨补给,排泄于河流中。具多孔性结构的玄武岩为该区主要含水层,溪流大多从 Q2-3 玄武岩中流出,流经古老厚层玄武岩后,最

终汇入 S-D 河和 XeKong 河。玄武岩中的地下水位主要受相对不透水的砂岩及泥岩限制,总体受侵蚀基准面控制。地下水埋深在枯水季节为地面以下 20~35 m,雨季则较浅。

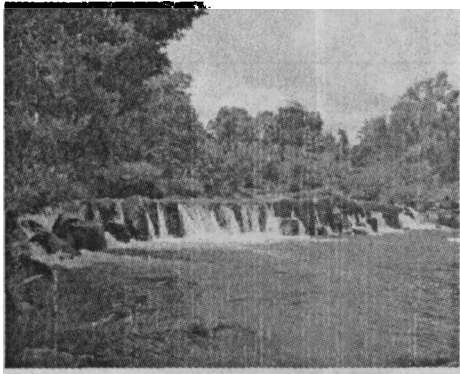


图 1 X-2 坝址下游约 400 m 处玄武岩河床瀑布(高 3~4 m)



图 2 X-1 厂房下游约 1 km 处砂岩夹黏土岩河床瀑布(高 10 m)

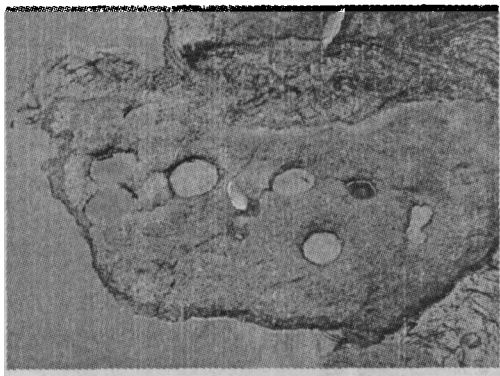


图 3 玄武岩冷凝空隙被水冲刷成“蜂窝”状

2.4 区域构造特征

本区现今的构造格局形成于早第三系地壳强烈上升时期,侏罗纪及白垩纪地层受到侵蚀,在晚第三纪和早第四纪,由于陆相火山间歇性喷发,产生了大量玄武岩流。

根据区域地质图分析,本地区有几条大的构造带,主要包括 Saravane 褶皱带,Indosinian 褶皱带,Phu-phon 剪切带及断层。

(1)Saravane 褶皱带构成了 Khorat 盆地的东部边界,褶皱带轴向为 NW-SE 方向,与之伴生的断层为 Himalagan 扭曲断层。该断层主要以 NW-SE 向沿褶皱带延伸,断层在走向上并不连续,呈阶梯状排列,与褶皱带轴向相交,相交的方向为 NW-SE 和 EW 向,并渐变为 NE-SW 向。该褶皱带在 SE 方向较复杂,两翼倾角较陡。

(2)Phu-phon 剪切带的分布从 Nakadao 地区向东延伸至 Savannak 和 Pakse 盆地,可能在 Alao、Taveuay、Taoy 等地形成了逆冲的 Himalayan 背斜。

此外,在 Xekong 城有一 NW-SE 向背斜延伸至 Boloven 高原;在 Pakxon 地区,晚第三系到第四系玄武岩中发现较大的沿 NNW 向延伸的断层(裂隙),可能与扭曲断层穿过 Boloven 高原有关。

2.5 地震危险性

本区地震危险性评价在 1985 年 X-1 水电站设计时已经

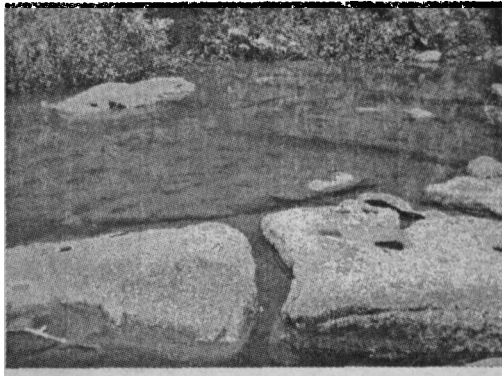


图 4 玄武岩被垂直裂隙切割成块状

做了论证研究,鉴于 X-2 水电工程区与 X-1 相距很近,X-2 厂房与 X-1 库尾相接,隶属于同一构造单元。综合分析认为,X-1 水电站地震分析成果可用于 X-2 水电站工程设计,即工程区的地震动峰值加速度为 0.07 g,年发生概率为 0.001,地震动峰值加速度标准偏差大约为 0.001 g。由于本工程的最大坝高仅 24 m,库容不大,厂房规模较小,地震动峰值加速度 0.07 g,相当于重现期为 1 000 a 的地震,此标准高于中国现行规范标准(重现期 500 a),可以保证工程未来抗震安全的。

3 岩体物理力学性质研究

3.1 矿物组成

根据岩相鉴定结果,玄武岩的矿物组成主要为斜长石 35%~40%,辉石 25%~30%,蚀变矿物(玻璃质绿泥石) 20%~25%,橄榄石 10%~15%,金属矿物很少。砂岩及黏土岩的岩相鉴定结果表明,岩石骨架颗粒的矿物成分以石英为主,含量为 45%~60%,斜长石含量为 2%~5%,钾长石含量与斜长石基本相当,白云母含量较少,砂岩及黏土岩以铁质胶结为主,胶结物中 Fe(OH)₂ 含量一般为 25%~35%,石英含量 3%~10%,方解石含量<5%,金属矿物很少,少数样品胶结物中含有氟化物。

3.2 物理性质

表 1 汇总了工程区玄武岩和砂岩所有钻孔试样的物理性质室内试验成果。除干密度和比重变异性很小外,其它指标的变异性都很大,变异系数都大于 0.4,基本上没有统计意义。分析认为,干密度和比重主要与岩石质量和体积有关,岩石质

量又远大于空气或水的质量,而岩石中固体颗粒所占体积远远大于空隙(含空气或水)体积,所以它们对岩体中空隙的敏感性相对较小;其它指标都主要与岩体中空隙密切相关,试验结果一方面可能与取样层位、试样制备及试验过程有关,另一方面也说明岩体本身结构差异还是比较大的。

表 1 岩石物理性质统计分析

岩性	试验组数	测试指标	范围值	平均值	标准差	变异系数	岩性	试验组数	测试指标	范围值	平均值	标准差	变异系数
玄武岩	10	饱和含水量/%	0.36~8.0	2.38	2.24	0.94	砂岩	24	饱和含水量/%	0.56~4.35	1.31	0.84	0.64
		干密度/(g·cm ⁻³)	2.3~2.86	2.68	0.17	0.064			干密度/(g·cm ⁻³)	2.61~2.82	2.66	0.2	0.08
		比重/(g·cm ⁻³)	2.82~2.89	2.85	0.045	0.015			比重/(g·cm ⁻³)	2.68~2.89	2.76	0.07	0.025
		孔隙比	0.01~0.097	0.067	0.064	0.95			孔隙比	0.011~0.117	0.036	0.023	0.64
		吸水率/%	0.09~2.1	0.769	0.69	0.89			吸水率/%	0.08~1.78	0.48	0.37	0.77
		饱和吸水率/%	0.34~7.2	2.06	2.03	0.99			饱和吸水率/%	0.37~4.05	1.17	0.778	0.67

注:所有岩体物理力学性质试验由 NIDRI 就试验项目、内容、取样地点及方法等提出具体要求,由 HEC1 公司完成现场取样及试验任务。

表 2 岩石强度试验成果

岩性	取样位置	钻孔	取样深度/ m	单轴抗压强度/MPa		软化系数	弹性模量 E/ 10 ⁴ MPa	泊松比	抗拉强度/MPa	
				干	饱和				干	饱和
玄武岩	坝轴线	CD01	19.5~19.9	15.7	14.2	0.7	4.74	0.352	1.52	1.36
			26.0~27.0	25.7	19.4	0.75	5.49	0.317	2.42	1.81
			39.0~40.0	85.7	78.8	0.92	8.13	0.281	7.93	7.36
			17.0~18.0	84.8	84.0	0.99	9.18	0.26	8.53	8.41
			27.1~27.6	102.8	100.8	0.98	9.86	0.284	10.37	10.12
		CD03	29.0~29.5	22.8	17.1	0.75	6.07	0.338	2.36	1.85
			38.0~38.8	1.14	0.57	0.5	6.7	0.377	0.12	0.07
			19.2~20.0	11.58	8.11	0.7	4.47	0.336	1.09	0.8
		CD05	34.3~35.0	42.47	33.4	0.8	6.81	0.307	4.16	3.27
			38~38.8	81.0	77.22	0.95	7.55	0.292	7.64	7.35
			47~48	20.0	15.71	0.78	5.13	0.326	1.92	1.49
		CD06	26~27	6.86	5.14	0.75	2.63	0.406	0.63	0.48
			48~49	65.71	61.71	0.94	8.46	0.300	6.03	5.77
			42~43	4.12	2.65	0.65	0.65	0.102	0.34	0.22
			46~47	13.59	11.16	0.82	1.19	0.265	1.46	1.21
			56~57	58.25	53.88	0.92	2.1	0.187	5.06	4.8
砂岩	引水隧洞	CD07	74~75	63.11	60.19	0.96	3.01	0.157	4.67	4.29
			16~17	21.4	18.3	0.85	1.24	0.258	2.3	1.96
			20~21	21.1	17.7	0.83	1.30	0.248	2.34	1.88
		CD08	45~46	33.7	32.0	0.95	2.30	0.231	3.74	3.48
			90~91	108.6	103.8	0.96	8.47	0.278	10.23	9.79
			18~19	34.28	29.14	0.85	2.31	0.186	2.8	2.42
		CD10	31~32	85.71	81.43	0.95	2.2	0.201	6.91	6.78
			53~54	48.57	43.71	0.90	3.09	0.162	3.47	3.17
			66~67	45.71	39.43	0.86	2.1	0.185	3.63	3.2
		CD11	12~13	34.29	31.71	0.92	2.2	0.245	3.76	3.46
			15~17	32.28	28.57	0.90	2.4	0.252	3.51	3.16
			23~25	10.57	8.57	0.80	1.89	0.265	1.17	0.95
			6~7	39.71	36.57	0.92	2.41	0.154	3.67	3.38
			13~14	34.01	32.57	0.91	2.59	0.285	3.15	2.86
	厂房	CD12	17~18	32.28	29.14	0.9	2.39	0.236	3.02	2.71
			26~28	32.86	30.57	0.92	2	0.259	2.99	2.7
			8~10	35.14	32.0	0.91	1.5	0.27	3.31	3.12
		CD13	7.2~7.7	85.14	83.43	0.98	3.5	0.157	7.4	7.07
			23~24	32.86	29.14	0.89	2.44	0.273	3.42	3.05

3.3 岩体力学性质

①单轴抗压强度试验

表 2 为工程区钻孔不同深度试样的强度试验成果。可以看出:坝址区玄武岩的饱和抗压强度空间变化规律还是比较明显,两岸浅表部一般不大于 20 MPa,介于 8~20 MPa 之间,弹性模量 44~54 GPa;深部饱和抗压强度在 80~100 MPa 之间,弹性模量 60~90 GPa;但在河床及右岸较深部位的风化夹层或裂隙密集带饱和抗压强度和弹性模量与浅表部岩体基本相当。

砂岩的饱和抗压强度除 CD08 号孔有所偏高、CD07 号孔强风化带强度偏低外,其它值基本介于 30~50 MPa 之间,弹性模量 10~30 GPa,其中,厂房部位饱和抗压强度以小于 30 MPa 者居多;洞线部位饱和抗压强度以大于 30 MPa 者居多。

岩石的软化系数无论玄武岩还是砂岩绝大多数大于 0.75,只有浅表部强全风化岩体或夹层部位岩体软化系数较小,说明岩体强度受水的影响不大。

②抗拉强度试验。抗拉强度试验结果表明(表 2),玄武岩饱和抗拉强度浅表部和夹层部位一般为 1~2 MPa,深部为 7~10 MPa。砂岩饱和抗拉强度以 1~3 MPa 居多,偏高和偏低的相对较少,试验值的偏离可能与取样位置有关。

表 3 岩石抗剪强度试验成果

岩性	深度/m	抗剪强度(干)	
		C/MPa	f
玄武岩	<20	1.2~2.5	0.69~0.71
玄武岩	20 m 以下	0.40~0.85	0.73~0.76
	29.0~29.5 (CD03)	2.5	0.76
风化夹层或裂隙 密集带岩	38.0~38.8 (CD03)	0.1	0.61
	47.0~48.0 (CD05)	2.2	0.71
平均值		4.1	0.71

③抗剪强度试验。表 3 是根据抗剪强度试验所做的统计,由于玄武岩试验组数相对较少,不同部位岩体的抗剪强度参数变化明显,并与其它力学参数的变化规律基本一致,故按照不同部位统计了试验值或范围值;砂岩的试验组数较多,试验结果也比较集中,所以统计了平均值。可以看出:

强风化玄武岩或裂隙密集带岩石(CD03 钻孔 29.0~29.5 m)的干抗剪强度 c 值普遍小于 2.5 MPa, f 值介于 0.69~0.71 之间,但有些裂隙密集带岩石(CD03 钻孔 29.0~29.5 m)的 f 值与弱-微风化岩石 f 值相当;风化夹层的

c, f 值比较低,干抗剪强度 c 值仅 0.13 MPa, f 值仅 0.61 MPa;弱-微风化岩石干抗剪强度 c 值为 4.0~8.5 MPa, f 值为 0.73~0.76。玄武岩饱和抗剪强度都有所降低, c 值降幅一般为 0.5 MPa, f 值降幅一般为 0.01。

砂岩的干抗剪强度平均值为 $c=4.13$ MPa, $f=0.71$;饱和抗剪强度相对于干抗剪强度的降幅 c 值为 0.4 MPa 左右, f 值为 0.01 左右。

3.4 膨胀性和崩解性

在引水隧洞和厂房部位不同钻孔中采取样品,对黏土岩的膨胀性和崩解性进行了室内测定。由于本区砂岩与黏土岩互层分布,虽然区域上在 650 m 高程以上砂岩呈厚~中厚层状,黏土岩夹层相对较薄,而在 530~650 m 高程之间,砂岩厚度变薄,黏土岩厚度变厚,但不同高程分布的黏土岩物质组成基本相同,试验成果没有随高程变化的规律,比较分散,仅对试验结果的平均值和范围值进行统计(表 4)。

试验结果表明,黏土岩的膨胀指标介于 1.64%~2.27%之间,平均值为 1.69%;抗崩解性指数 5.0%~8.5% (只有 CD07 号孔的一个样为 11.1),平均值为 6.19%。依据 ASTM 相关规范,膨胀指标介于 0~2%之间为非常低膨胀性,介于 2.1%~5%之间为低膨胀性;崩解性指数介于 6.1%~10%的为中等崩解,大于 10%的为严重崩解。可见,本工程区黏土岩的膨胀性很低,属非常低-低膨胀岩体,而崩解性相对较强,以中等崩解为主,极个别部位存在严重崩解黏土岩。

表 4 黏土岩膨胀性和崩解性试验成果统计

指标	范围值	平均值
膨胀指标/%	1.64~2.27	1.96
抗崩解性指数/%	5.0~8.5	6.19

4 结 语

通过地质资料分析,认为 X-2 水电工程坝基岩体为较坚硬完整的玄武岩,根据此建基岩体特征类比中国溪洛渡工程坝址玄武岩实际试验资料,岩体的承载力、弹性模量、变形模量、抗剪强度均可满足 24 m 高的混凝土坝。

参考文献:

[1] 李华晔,黄志全.溪洛渡水电站岩体力学参数合理选取研究(Ⅱ)[R].郑州:华北水利水电学院,2001.
[2] 李华晔,刘汉东.试验岩基抗滑稳定参数分析与计算[J].华北水利水电学院学报,1990,11(2):30-39.
[3] 黄志全,姜彤,刘汉东,等.工程岩体抗剪强度参数的可靠度分析[J].华北水利水电学院学,2004,25(2):36-38.