

浙江三门核电站岩石动力学特性参数的试验与分析

李愿军

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

[摘要] 分析了地震荷载下的岩石动力学特性和试验研究方法,采用 RDT-10000 型岩石高压三轴仪进行了岩石动力学试验,给出了浙江三门核电站推荐厂址凝灰岩、凝灰质砂岩、霏细斑岩、流纹斑岩的动态弹性模量、泊松比、剪切模量和轴向动载的三轴抗压强度值。这些参数已经应用于可行性研究报告和抗震设计中。

[关键词] 核岛;岩石动力学;试验

[中图分类号] TD313 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)02-0027-05

1 前言

根据我国核安全法规的相关要求,核反应堆的厂址除不允许有能动断层在核岛附近通过外,还要求详细调查地基的地震稳定性和地震动作用下的基岩完整性。在设计剖面中要充分考虑核电厂设施和结构与地下材料的相互作用在结构和地下材料中所引起的应力。关于地下材料(土和岩石),其主要任务是在具有足够安全裕度的静荷载和动荷载状态下形成和保持一定程度的稳定性。规定中还进一步强调,地震荷载是最重要的动荷载,所以他们是唯一被核安全导则要求进行研究的动荷载^[1,2]。

2 地震荷载下的岩体动力特性

岩石动力学是岩石力学发展的一个重要分支。岩体动荷载分类多以不同荷载作用时内部应变率变化的范围而确定,包括大于 $10^4/s$ 的高应变率,也包括小于 $10^{-10}/s$ 的极低应变率(见表 1)。

工程上最为关注的震动源有两类,一类是地震造成的,另一类是由人工爆破所产生。后者的能量输入是可以控制的,而地震作为极其复杂的构造作用机理尚未被充分认识,所以问题的前端往往会模糊化,“源”动力及动力波在岩体上的效应研究实际上是

笔者研究工作的基础和出发点,离开了对“源”的研究,很多现象将无法理解。为了研究岩体在不同结构和构造条件下对地震荷载的反应,就必须讨论震源的过程与本质,在时程过程中的动力强度改变和响应。宏观静态下的完整岩体在地震过程中可能会分崩剥离(多数伴随断层运动的分布现象除外)。

表 1 荷载作用方式和应变率分类

Table 1 Classification of loading types and strain rates

类型	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	荷载作用方式
极低应变率	$< 10^{-10}$	地壳变动产生的应变率
低应变率	$10^{-10} \sim 10^{-3}$	油压式试验机
中应变率	$10^{-3} \sim 10^0$ $10^1 \sim 10^3$	落锤冲击,气体活塞冲击, 水中冲击压驱动的活塞冲击, 大容量油压活塞冲击
高应变率	$10^3 \sim 10^4$ $> 10^4$	高速冲击装置(霍布金森压杆) 炸药冲击 轻气炮

我国多次强震的调查显示,震中区基岩会出现山头震裂成“开花馒头”的奇特景观。“5·12”汶川大地震在震后调查过程中发现,漩口镇蔡家杠村莲花芯山上坚硬的花岗岩在地震过程中发生爆裂,形成了近 $400 \times 10^4 m^3$ 的碎石流在不到一分钟的过程中从断裂带中喷涌而出,瞬时吞没了下游几十户的

[收稿日期] 2008-01-02

[基金项目] 三峡库区三期地质灾害防治重大科研项目专项经费资助(SXKY3-5)

[作者简介] 李愿军(1952-),男,湖北大悟县人,武汉大学土木建筑工程学院教授,博士,主要从事岩土工程和地震构造方面的教学和科研工作;E-mail:cnliyuanjun@yahoo.com.cn

居民^[3]。据震后调查,类似的山崩爆裂点在震区共有16处^[4]。所以,如何评价岩体的动力稳定性及其他岩石崩解问题是一个重大而崭新的课题。

N. N. 安布腊西斯和 A. J. 小亨德朗给出了这样一个模型用以解释岩体的动力崩解现象:假设以一定波形、振幅和速度的平面波在半无限弹性固体中传播,当碰到自由表面时将产生一个符号相反的同波并与接近的波相互干涉,以便满足在表面上没有应力的条件。当这两个波相互向相反方向运动时,在距自由表面一定距离处的一瞬间相遇,并将成为等于固体抗拉强度的拉应力,于是固体完全可以被分裂,分离出来的某片固体将把波动的一部分能量带走而成为一个独立的振动体系。如果波动的应

力峰值远远大于岩石的抗拉强度,而且波的形状太陡,就会有多片相继分裂出来。当第一片分离出来之后,射来的波就会在一个新的自由面重复分裂过程,直到由于截断波所产生的应力变得很小为止。对于疏松胶结的岩石和粒状介质,在自由表面产生的不是分离而是粉碎化。由此可见,基岩表面的破坏程度与地震波的振幅、波长及接近自由表面处岩石的抗拉强度有关,也与岩体大小和岩性条件有关。一般而言,岩石的动力抗拉强度要高于其静力抗拉强度,对于灰岩其动力强度将为静力强度的4.5倍,大理岩甚至高达9倍。岩石的抗压强度也具有相同的特性(见表2、图1、图2)。

表2 动、静载荷下的岩石力学性质^[5]

Table 2 The properties of rock mechanics under static and dynamic loading

岩性	弹性模量 / $\times 10^3$ MPa			抗压强度 / $\times 10^2$ MPa			应变能 / $(\text{kg} \cdot \text{cm}) \cdot \text{cm}^{-3}$		
	E_D	E_S	E_D/E_S	S_D	S_S	S_D/S_S	W_D	W_S	W_D/W_S
石灰岩	29.4	12.8	2.3	1.53	1.01	1.3	4.2	4.0	1.1
页岩	13.4	12.6	1.1	1.52	1.14	1.3	10.1	5.1	2.0
砂岩	10.1	7.9	1.3	1.30	0.75	1.7	8.0	3.6	2.2
凝灰岩	7.0	5.1	1.4	1.03	0.43	2.4	7.9	1.9	4.2

E_D - 动弹模; E_S - 静弹模; S_D - 动抗压强度; S_S - 静抗压强度; W_D - 动应变能; W_S - 静应变能

3 岩石动力特性的研究与试验方法

岩石动力学的试验研究方法主要分为两类。一类是野外人工地震法,可获取工程区内岩体的动态参数,包括杨氏模量、泊松比、体积模量、剪切模量、速度的各向异性以及谐振频率等。第二类是室内数学物理模拟和力学试验,数学物理试验中包括动力有限元分析,分形理论和神经网络方法,动光弹仪以及空气炮碰撞实验等;力学试验主要包括实验仪器和技术,美国军事工程航道试验站于20世纪60至70年代研制成功新型岩石动态三轴高压试验装置DHT,由风动锤击载荷机驱动活塞,将可控制的动态轴向脉冲荷载传递给试件,三向试验缸的压力可随时间而变化,最大动态约束压力可达15 000磅/时($1\ 056\ \text{kg}/\text{cm}^2$)左右,最快的上升时间和衰减时间

分别为 $3\ \mu\text{s}$ 和 $20\ \mu\text{s}$ 。20世纪70至80年代,由于国防及核防护工程的需要,在陈宗基院士的指导下研制成功了RDT-10000型岩石高压动力三轴仪。RDT-10000型岩石高压动力三轴仪主要技术指标及性能如下所述,并可在动、静两种状态下完成单轴与三轴试验:a. 轴向荷载1~220 T;b. 三轴围压0~10 000 kg/cm^2 ;c. 轴向压载速率20 T/ms。

4 岩石样品的采集与试验要求

浙江三门核电站厂场区半径5 km范围内没有断层、破碎带和节理密集分布带,出露基岩完整性好^[6]。按我国核安全规范的要求,还应给出具体的地基承载力参数和动态条件下的抗震设计参数,所以,室内的岩石动、静力学参数测试工作和分析就是必不可少的。

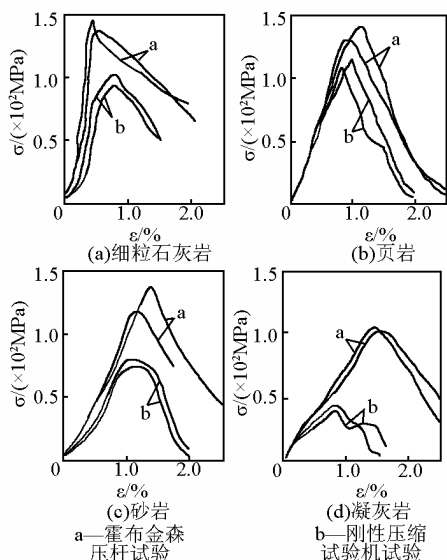


图1 动、静荷载下岩石应力—应变关系^[5]

Fig. 1 The relationship of stress - strain of rock under dynamic and static loading

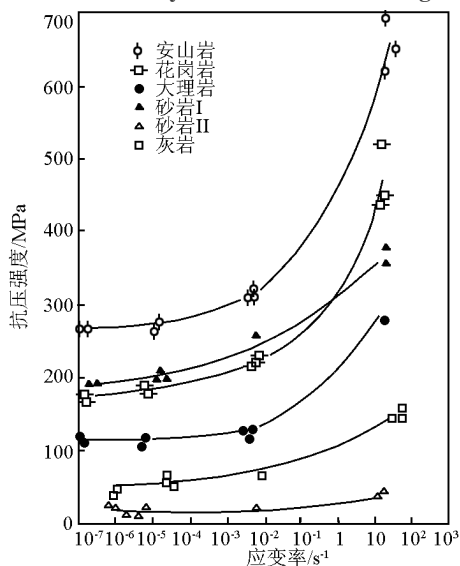


图2 不同岩石的抗压强度和应变率关系

Fig. 2 The compression strength and strain rate of different Rock

为此,笔者负责承担了核岛区基岩钻孔岩芯材料的岩石力学参数测试工作。岩石样品的采集在核岛钻孔岩芯的编录和完整性、代表性检查的基础上进行。现场共采样 18 组,试样标本 110 个,岩性包括暗灰色含砾玻屑英安质熔结凝灰岩、凝灰质细砂岩及砂岩、暗灰色凝灰质角砾岩、英安质玄武岩、霏细斑岩、深灰色凝灰质细砂岩以及流纹岩等。岩样加工严格按国际岩石力学协会推荐的方法^[7,8]：

1) 岩石样品正园柱形,其高度与直径之比为 2.0 至 3.0,样品直径比岩石内矿物颗粒平均直

径大 10 倍以上；

2) 样品两个端面平行至 0.02 mm,并与园柱轴线垂直,最大偏差不超过 0.001 弧度(大约 3.5 分,即 0.05 / 50 mm)；

3) 园柱体侧面光滑、平整,岩样的整个长度与一直线的偏差小于 0.3 mm；

4) 样品直径测量,取其上部、中部、下部 3 个地方,每个地方测量相互垂直的两个直径,以 6 个数值的平均值为样品的平均直径。样品高度测量精度在 0.1 mm 以内。

根据测试结果而获得:岩石样品容重、吸水率、饱和吸水率、干样极限抗压强度、饱和极限抗压强度、抗剪强度、结构面抗剪强度、抗拉强度、软化系数、静弹性模量、动弹性模量、动剪切模量、静泊松比、动泊松比、阻尼系数、弹性波速(V_s , V_p)等 17 种特性指标。根据工程设计试验要求,试验中除采用 RDT-10000 型岩石高压三轴仪外,试验还采用的主要技术设备有 SD-1 型超声波检测仪、岩石剪切流变仪等,在此笔者等仅就动三轴试验结果作进一步简述。

5 岩石动力三轴试验

RDT-10000 型岩石高压三轴仪可以做单轴动载压力试验和高围压单轴动载试验。在做动力三轴压缩试验时,首先确定围压,然后以不同的轴向加载速率进行试验直至破坏,以观察岩石样品在特殊动力条件下的力学特性。室内岩石样品加工后根据岩性大致分为凝灰岩、凝灰质砂岩、霏细斑岩和流纹斑岩 4 大类,试验中设围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$,轴压由动载机上动压力装置和下动压力装置的加载杆及活塞控制,轴向荷载时间由起始到峰值 $t \geq 9 \text{ ms}$ 。轴向压力测定分别在三轴室内,外采用电阻片粘贴于受力柱上以测定应变。试验过程中试件变形的测量电阻片贴在薄铜套($\delta \leq 0.2 \text{ mm}$)外,轴面上下和侧向中部对称交叉粘贴,各项测量参数均以电阻值的变化输出,并用 RSM-08A 型数据采集处理仪接收,使记录和处理数据自动化,精度和可靠性得到很大提高。

动力三轴试验包括凝灰岩样品 6 个,凝灰质砂岩 6 个,霏细斑岩 3 个,流纹斑岩 3 个,代表性样品共计 18 个,试验结果见表 3。表中除给出 4 种岩性的最大轴向应力和应变之外,还给出了动弹模 E 、动泊松比 μ 、动剪切模量 G 。

表3 动力三轴压缩试验结果

Table 3 The results of the dynamic triaxial compression tests

编号	岩类	岩样号	σ_{2max} / $\times 10MPa$	σ_{1max} / $\times 10^2 MPa$	ϵ_{1max} / $\times 10^3 \mu\epsilon$	ϵ_{2max} / $\times 10^3 \mu\epsilon$	$\frac{\dot{\sigma}_1}{\sigma_1}$ / $\times 10^4 MPa/s$	E / $\times 10^4 MPa/W$	μ	G / $\times 10^4 MPa$
S3213		A-8-7-2	2.00	5.63	9.59	2.99	7.2	6.07	0.256	2.42
S3214		C-6-3-2	2.00	4.81	8.33	3.90	7.0	6.23	0.207	2.58
S3215	凝	A-8-1-2	2.00	5.05	9.62	2.75	8.8	5.68	0.235	2.30
S3216	灰	H-6-4	2.00	4.01	6.93	1.71	7.0	6.49	0.234	2.63
S3217	岩	J-5-1-2	2.00	3.17	6.25	4.79	5.1	5.05	0.288	1.96
S3218		J-5-1-3	2.00	3.61	5.49	4.49	5.7	4.43	0.241	1.78
		平均值	2.00	4.38	7.70	3.44	6.8	5.66	0.244	2.28
S3221		E4-3-1	2.00	3.58	6.89	3.96	5.7	4.43	0.309	1.69
S3223	凝	F-6-1	2.00	3.20	7.51	2.80	5.1	5.12	0.274	2.01
S3224	灰	D-10-8-2	2.00	2.65	10.00	5.49	6.3	3.84	0.316	1.46
S3225	质	N-8-6-1	2.00	3.01	4.22	1.64	4.7	6.56	0.325	2.48
S3226	砂	N-8-5	2.00	3.24	4.93	4.20	6.8	6.07	0.269	2.39
S3227	岩	N-8-6-2	2.00	3.88	5.59	2.15	8.0	7.19	0.258	2.86
		平均值	2.00	3.26	6.52	3.37	6.1	5.54	0.292	2.15
S3241	霏	L-4-1-3	2.00	3.67	9.42	4.22	7.0	4.98	0.232	2.02
S3242	细	L-4-1-2	2.00	4.24	9.01	4.48	7.4	5.28	0.236	2.14
S3243	斑	L-4-1-1	2.00	4.12	9.16	4.62	6.4	5.11	0.232	2.07
	岩	平均值	2.00	4.01	9.20	4.44	6.9	5.12	0.233	2.08
S3251	流	Q-5-5	2.00	4.25	7.94	2.17	5.6	6.50	0.215	2.67
S3252	纹	P-4-3-3	2.00	3.32	6.41	1.29	6.0	5.68	0.156	2.46
S3253	斑	R-6-6-2	2.00	3.47	6.20	4.05	6.3	4.72	0.247	1.89
	岩	平均值	2.00	3.68	6.85	2.50	6.0	5.63	0.206	2.33

注： σ_{2max} —围压最大值； σ_{1max} —动轴压最大值； ϵ_{1max} —轴向应变最大值； ϵ_{2max} —环向应变最大值； $\frac{\dot{\sigma}_1}{\sigma_1}$ —平均轴向加载速率；

E —动弹性模； μ —动泊松比； G —动剪切模量

6 结语

通过对 18 个样品进行的岩石动力三轴试验,获得如下平均动态参数:

1) 获得动态弹性模量 E , 凝灰岩 $5.66 \times 10^4 MPa$, 凝灰质砂岩 $5.54 \times 10^4 MPa$, 霏细斑岩为 $5.12 \times 10^4 MPa$, 流纹斑岩 $5.63 \times 10^4 MPa$;

2) 获得动态泊松比 μ , 凝灰岩 0.244, 凝灰质砂岩 0.292, 霏细斑岩 0.233, 流纹斑岩 0.206;

3) 获得动态剪切模量 G , 凝灰岩 $2.28 \times 10^4 MPa$, 凝灰质砂岩 $2.15 \times 10^4 MPa$, 霏细斑岩为 $2.08 \times 10^4 MPa$, 流纹斑岩 $2.33 \times 10^4 MPa$;

4) 在围压为 $200 kg/cm^2$ 的条件下, 获得动态轴压岩石破坏最大值 σ_{1max} , 凝灰岩 $4.308 \times 10^2 MPa$, 凝灰质砂岩 $3.26 \times 10^2 MPa$, 霏细斑岩 $4.01 \times 10^2 MPa$, 流纹斑岩 $3.68 \times 10^2 MPa$ 。

对核反应堆的安全设计而言, 笔者等进行的这些试验是目前国内最为全面和严格的。笔者等很高兴地看到, 文章所提供的参数已被用于可行性研究报告并作为安全设计的依据。浙江三门核电站已经国家批准动工建设, 不久的将来就会将强大的核电输入华东电网, 为我国东部经济的可持续发展提供能源保证, 这一天正在到来。

致谢: 项目研究和试验从采样到审评, 得到了华东电力勘测设计院的大力支持和充分肯定, 特此表示感谢。

参考文献

- [1] 国家核安全局. 核电厂地基安全问题[S]
- [2] International Atomic Energy Agency. Safety aspects of the foundations of nuclear Power plants[S]
- [3] 稽少丞. 地震与中国大陆形影相随[M]. 北京: 科学出版社, 2009

- [4] 刘伊曼. 地震一年后的龙门山断裂带[J]. 瞭望东方周刊, 2009, (18):24-25
- [5] 于亚伦. 岩石动力学[M]. 北京:北京科技大学, 1990
- [6] 李愿军. 能动构造及其时间标度[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2005
- [7] International Society for Rock Mechanics. Suggested methods for determining compression strength and deformability[J]. Int J Rock Mech Min Sei, 1979, 16:137-140
- [8] International Society for Rock Mechanics. Suggested methods for determining the strength of rocks in triaxial compression[J]. Int J Rock Mech Min sci, 1980, 17:49-51

Tests and analyses for the characteristic parameters of rock dynamics in Samen Nuclear Power Plant, Zhejiang Province

Li Yuanjun

(School of Civil Architecture Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[**Abstract**] The properties of rock dynamics under the commercial nuclear reactor foundation are very important Parameters in aseismic design. The properties of rock dynamics and test method under earthquake loading are analyzed in this paper. From this, the dynamic elastic modulus, poisson' ratio, shear modulus, and triaxial pressure strength of 4 kinds of rock (tuff, tuff sandstone, felsophyre, rhyolite porphyry) have been given by using the RDT-10000 high Pressure triaxial machine. These parameters have been used in the feasibility report and the aseismic design of the Sanmen Nuclear Power Plant.

[**Key words**] nuclear island; rock dynamics; test