

软硬相间层状复杂岩体综合变形模量原位试验研究

刘彬 聂德新 张勇 李树森

(成都理工大学工程地质研究所 成都 610059)

摘要 某拟建大型电站坝基岩体为一套河湖相沉积岩,包含了砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩等多种岩性岩体。不同岩体变形参数各异,常规变形试验只能获得单一岩性岩体的变形模量,而这种软硬相间层状复杂岩体的综合变形模量是与单一岩性岩体变形模量、岩层倾角、岩层厚度多个因素相关的,如何通过试验获得这种复杂组合岩体的综合变形模量是一个重要问题。本文首先对坝址区不同岩性所占的比例进行了详细的统计,获得砂岩、粉砂岩和泥岩的厚度比为6:2.5:1.5,根据这一统计结果在坝轴线附近选择含有砂岩、粉砂岩和泥岩三种岩体的大型变形试验区,将承压板尺寸设定为200cm×37cm,承压板就能同时覆盖砂岩、粉砂岩和泥岩三种岩体,且将其厚度比确定为6:2.5:1.5。通过在承压板上施加大荷载(250余吨)将应力传至下部多层岩体,从而获得软硬相间层状复杂岩体的综合变形模量。试验结果表明坝基弱风化岩体的综合变形模量可达到7.0GPa,已经满足筑坝的要求。通过原位试验成功地论证了坝基岩体综合变形模量量值的问题。

关键词 软硬相间 层状岩体 综合变形模量 原位试验

中图分类号:TU454 **文献标识码**:A

IN-SITU TESTING OF INTEGRATED DEFORMATION MODULUS FOR COMPLICATED ROCK MASS OF SOFT AND HARD INTERLAYERS

LIU Bin NIE Dexin ZHANG Yong LI Shuseng

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract The bedrocks for a proposed large power station contain a set of river and lake facies sedimentary rocks. The rocks contain conglomerate, sandstone, siltstone and mudstone and have a variety of lithologies. Different rocks have different mass deformation parameters. Conventional deformation test can only get a single lithology of rock mass deformation modulus. The soft and hard inter-layered rock mass has an integrated deformation modulus that is a function of the single rock mass deformation moduli, the rock bidding angles, and the rock layer thicknesss. How to assess the integrated deformation modulus is an important task. At first, the paper conducts a statistic analysis on the proportion of different lithologies at dam site and obtains that the thickness ratio of the sandstone, siltstone and mudstone are 6:2.5:1.5. According to the statistics, the test area containing sandstone, siltstone and mudstone along the dam axial is selected. The bearing plate size is defined to be 200 cm in length and 37 cm in width for the in-situ test. At the same time, the bearing plate can cover the sandstone, siltstone and mudstone.

The plate can transfer the maximum applied load of 250 tons onto the underlain multi-layered rocks. As a result, the integrated deformation of the bedrock can be determined. The experimental results show that for the weak

* 收稿日期: 2009-11-05; 收到修改稿日期: 2010-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40372127).

第一作者简介: 刘彬, 主要从事工程岩土体特性方面的研究. Email: liubrs@163.com

weathered bedrock at the rock dam foundation, its integrated deformation modulus can be up to 7.0 GPa. This value meets the design requirements.

Key words Soft rock, Hard rock, Layered rock mass, Integrated deformation modulus, In-situ testing, Dam foundation

1 引言

位于中国西南部某大型水电工程的坝基岩体为一套侏罗纪河湖相沉积岩,包含了砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩等多种岩性,岩层倾角 60° 左右,走向与河流小角度相交,因此未来的混凝土重力坝将跨越不同岩性岩体。其中砾岩和砂岩为坚硬岩,粉砂岩为较硬岩,泥岩则为软岩,因此整个坝基岩体可以概化为软硬相间的复杂层状岩体。作为重力坝的坝基岩体,其变形模量至关重要,然而砾岩、砂岩具有较高的变形模量,完全能满足筑坝的要求;粉砂岩的变形模量则相对较低,对建高砣坝略显不足;泥岩的变形模量很低,不能满足筑坝要求。如何评价这种复杂组合岩体的综合变形模量是急需解决的问题。在常规的变形试验中,承压板直径一般为50cm的圆形^[1],因此现场的试验仅能获得单一岩性的变形模量,直接通过大型试验获得坝址区各类岩体的综合变形模量对于评价坝基岩体变形参数是具有重要意义的。

2 大型原位变形试验方案及与实施

考虑到未来混凝土重力坝基岩体所受荷载近似条形荷载,因此软硬相间复杂层状岩体综合变形模量的大型原位试验就要尽可能地模拟未来坝基的受力状态。所以变形试验的承压板采用矩形板。矩形承压板如果太长则影响试验的可操作性,若太短则很难保证承压板同时压住现场各类工程岩体,根据现场对层状岩体的调查,选用 $200\text{cm}\times 37\text{cm}$ 的矩形钢板作为承压板。在大型原位变形试验中,软硬相间层状岩体最终所承受的最大应力应该和将来大坝对坝基岩体产生的应力值相当。拟建电站最大坝高150余米,对坝基岩体产生的最大压应力一般在 $3\sim 4\text{MPa}$,因此层状岩体原位试验所施加的最大应力控制在 3.5MPa 左右,按矩形承压板面积换算,则相当于承压板上施加最大压力为250t左右。试验采用逐级多次循环法^[2~4],分10级加压,每级50t。由于大型试验荷载大,承压板面积较常规试验大数倍,研究者决定在坝址区露天开展试验,并解决了以下几

个关键问题:

(1)为了保证承压板有足够的刚度,避免试验中因岩性不同导致承压板不同位置位移差异太大,准备了3块 $200\text{cm}\times 37\text{cm}$ 的45号钢板,两面抛光整平。单块厚度分别为5cm、4cm和4cm,试验时将3块钢板叠置。钢板之间用很薄一层高强度的锚固浆液黏结。

(2)承压板下的荷载要近似为均布荷载,如果采用单一千斤顶施压是很难办到的,故在承压板上均匀放置5个60t以上的千斤顶同步施压。则每个千斤顶最大出力只需50t左右,大大降低了对反力装置的要求。

(3)在承压板两侧对称分别用便携式钻机钻5个2.5m深的钻孔,埋入 $\varphi 28$ 螺纹钢,再用高250mm两根工字钢并排焊接,两端中间穿孔作横梁提供反力(图1),如此即可在空旷场地实现大吨位的复杂层状岩体原位变形试验。



图1 软硬相间层状岩体大型原位变形试验装置

Fig. 1 Test apparatus of interphase soft and hard layered rock mass deformation test

在确定试验装置和实现方案之后,笔者对坝址区各类岩性所占比例开展了详细的统计,结果显示坝址区坚硬岩(砾岩和砂岩)、较硬岩(粉砂岩)和软岩(泥岩)的厚度比为 $6:2.5:1.5$ 。为了让试验区岩体更具代表性,笔者在未来砣重力坝轴线附近选择试验场所,并尽量让试验区各类岩体的厚度比接近坝址区的统计值。为了减少表部强风化岩体的清除

量,将试验场地选择在洪水期和枯水期之间的江边基岩露头上,采用爆破清除强风化岩体,然后人工平整场地,清除所用松动岩体,将承压板下的岩体表面抛光,尽可能做到水平(图2)。对试验区各岩性岩体的厚度进行统计(表1),其中砂岩只有1层,厚度为100cm;粉砂岩有两层,厚度分别为30cm和35cm;泥岩也有两层,分别厚10cm和25cm,三类岩体的厚度比为5:3.25:1.75,粉砂岩和泥岩的比例比坝址区的统计值略大。

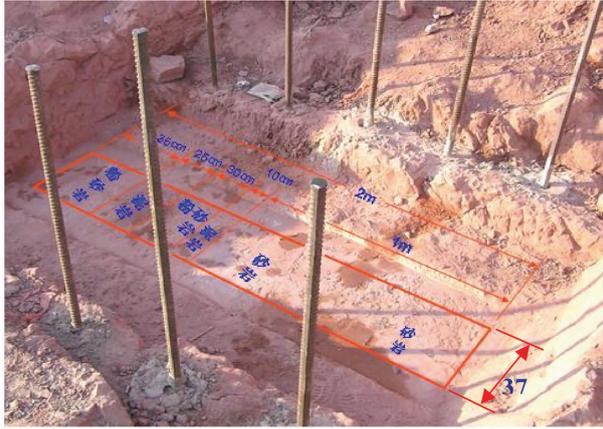


图2 层状岩体原位变形试验区岩性组成情况

Fig. 2 The rock character of layered rock mass deformation test

表1 层状岩体原位变形试验各岩性岩层厚度及比例表

Table 1 Thickness and percent of layered rock mass

岩性	层数	单层厚度/cm	试验区各岩性厚度百分数/(%)	坝基各岩性厚度百分数/(%)
砂岩	1	100	50	60
粉砂岩	2	30, 35	32.5	25
泥岩	2	10, 25	17.5	15

3 大型原位试验数据及成果分析

软硬相间层状复杂岩体的大型原位变形试验采用逐级多次循环法,分10级加压,每级增加压力25t,即每个千斤顶出力5t,按承压板面积换算为板下应力为0.33MPa。在承压板两侧边缘对称安置10个位移计测量承压板的位移,整个试验连续进行历时72h完成。试验时,每级加压后立即读数,然后每隔5min读数,取承压板上10只位移计的平均值作为岩体变形稳定的判据,当此平均值在相邻两次之间的读书差于同一级压力下第一次变形读数平均值与上一级压力下最后一次变形读数平均值差的比值小于5%,视为岩体变形稳定。根据钱伟长、叶开

源所编著的弹性力学一书中长方形面积上受均布压强的位移公式^[5]:

$$\omega_{\text{平均}} = \alpha \frac{(\lambda + 2\mu) P}{\mu(\lambda + \mu) \sqrt{A}} \quad (1)$$

式中, $\omega_{\text{平均}}$ 为板的平均位移(mm); P 为承压板上的荷载(MN); A 为承压板的面积(mm^2); α 为与矩形承压板长 a ,宽 b 相关的系数,查表2。

表2 矩形承压板受均布压强时平均位移系数表

Table 2 Average displacement coefficient of rectangular under uniform load

a/b	1.5	2	3	5	10	100
α	0.235	0.23	0.22	0.205	0.178	0.093

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

上式中, E 为承压板下岩体的变形模量(GPa); ν 为承压板下岩体的泊松比。

将式(2)和式(3)代入式(1)得:

$$\omega_{\text{平均}} = \alpha \frac{\frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} + 2\frac{E}{2(1+\nu)}}{\frac{E}{2(1+\nu)} \left[\frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} + \frac{E}{2(1+\nu)} \right]} \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

化简式4得:

$$\omega_{\text{平均}} = \alpha \frac{4(1-\nu^2) P}{E \sqrt{A}} \quad (5)$$

所以现场大型原位变形试验的表达式为:

$$E = \alpha \frac{4(1-\nu^2) P}{\omega_{\text{平均}} \sqrt{A}} \quad (6)$$

根据表2中矩形承压板长宽比(a/b)和系数 α 建立二者对应关系(图3),可见二者呈对数关系。

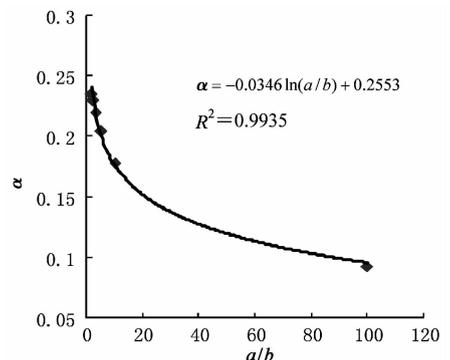


图3 矩形承压板平均位移系数与承压板长宽比相关曲线图

Fig. 3 Relation curve between average displacement coefficient and aspect ratio

将此次大型原位变形试验矩形承压板的长、宽比值(200/37)代入承压板长宽比和系数 α 的相关方程:

$$\alpha = -0.0346 \ln(a/b) + 0.2553 \quad (7)$$

计算获得本次大型原位变形试验矩形承压板平均位移系数为: $\alpha = 0.1969$ 。

坝基软硬相间复杂层状岩体大型原位变形试验

表3 软硬相间层状岩体大型原位试验数据表

Table 3 Test data of interphase soft and hard layered rock mass deformation test

第一级		第二级		第三级		第四级		第五级	
压力 /MPa	变形 /mm								
0	0	0	0.016	0	0.023	0	0.027	0	0.033
0.33	0.035	0.33	0.036	0.33	0.041	0.33	0.050	0.33	0.060
0	0.016	0.66	0.063	0.66	0.065	0.66	0.073	0.66	0.079
		0.33	0.053	0.99	0.095	0.99	0.094	0.99	0.102
		0	0.023	0.66	0.084	1.32	0.115	1.32	0.122
				0.33	0.066	0.99	0.113	1.65	0.147
				0	0.027	0.66	0.100	1.32	0.138
						0.33	0.076	0.99	0.127
						0	0.033	0.66	0.110
								0.33	0.084
								0	0.041
第六级		第七级		第八级		第九级		第十级	
压力 /MPa	变形 /mm								
0	0.041	0	0.045	0	0.050	0	0.057	0	0.067
0.33	0.065	0.33	0.070	0.33	0.076	0.33	0.087	0.33	0.094
0.66	0.092	0.66	0.099	0.66	0.103	0.66	0.113	0.66	0.124
0.99	0.111	0.99	0.121	0.99	0.124	0.99	0.137	0.99	0.152
1.32	0.132	1.32	0.137	1.32	0.141	1.32	0.159	1.32	0.180
1.65	0.149	1.65	0.155	1.65	0.159	1.65	0.179	1.65	0.199
1.98	0.174	1.98	0.179	1.98	0.184	1.98	0.199	1.98	0.219
1.65	0.168	2.31	0.205	2.31	0.208	2.31	0.219	2.31	0.235
1.32	0.156	1.98	0.199	2.64	0.232	2.64	0.239	2.64	0.249
0.99	0.143	1.65	0.187	2.31	0.226	2.97	0.257	2.97	0.265
0.66	0.120	1.32	0.176	1.98	0.216	2.64	0.253	3.3	0.293
0.33	0.093	0.99	0.156	1.66	0.204	2.31	0.243	2.97	0.287
0	0.045	0.66	0.130	1.32	0.187	1.98	0.230	2.64	0.278
		0.33	0.098	0.99	0.171	1.66	0.220	2.31	0.266
		0	0.050	0.66	0.144	1.32	0.204	1.98	0.253
				0.33	0.106	0.99	0.187	1.66	0.242
				0	0.057	0.66	0.156	1.32	0.224
						0.33	0.120	0.99	0.204
								0.66	0.173
								0.33	0.134
								0	0.075

在各级压力下岩体的变形量(表3)。表中列出共10级压力的逐次加压、退压全过程中每级压力对应的承压板平均位移量(岩体变形量)。

根据表3中的数据绘制软硬相间复杂层状岩体原位变形试验的压力—变形曲线(图4)。由表3中各级压力及对应的变形量利用式6可以计算软硬相间复杂层状岩体在各级压力下的综合变形模量值(表4)。从表中的结果可以看出,在各级压力下层状岩体的变形模量大致接近,在第3级后不同压力下的综合变形模量趋于稳定。鉴于第1级压力下岩体变形的影响因素较多,可能导致变形模量略偏低,故不纳入平均值计算。鉴于试验区较软岩和软岩的比例较坝基统计值略高,因此坝基弱下风化岩体的综合变形模量应略大于7.0GPa,大量常规变形试验表明,坝基弱下风化砂岩的变形模量在8~12GPa,低模量的粉砂岩和泥岩让坝基岩体的综合变形模量有所降低。

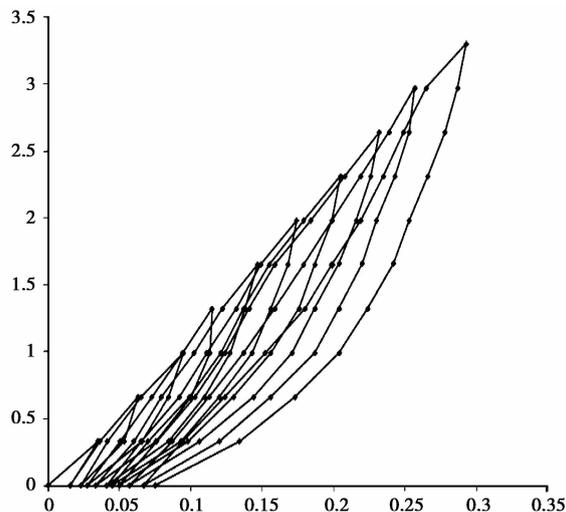


图4 软硬相间复杂层状岩体应力-变形曲线图

Fig. 4 Curve diagram of stress and deformation

表4 软硬相间层状岩体大型原位变形试验变形模量表

Table 4 Deformation modulus of interphase soft and hard layered rock mass

试验压力/MPa	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97	3.30
承压板平均位移 / $\times 10^{-3}$ mm	35	63	95	115	147	174	205	232	257	293
变形模量 E_0 /GPa	5.99	6.62	6.60	7.26	7.11	7.19	7.11	7.19	7.30	7.12
平均值 E_0 /GPa										7.06

4 结 论

通过对软硬相间层状复杂岩体综合变形模量的原位大型变形试验及成果可以得出如下结论:

(1)对于本文涉及的陡倾角软硬相间层状岩体而言,岩体的综合变形模量因较软岩和软岩的存在而比单一砂岩的变形模量低,但因岩层倾角较陡,外来荷载主要由坚硬的砂岩承担,因此岩体综合变形模量的降低并不显著。

(2)试验结果表明,坝基弱下风化岩土的综合变形模量可达到 7.0GPa,已满足筑坝要求。坝基微新岩体的综合变形模量应该高于 7.0GPa。

(3)通过本文可知,在空旷场地开展大面积、大荷载的原位变形试验是可以实现的。这一试验方法可以推广应用到其他类似工程的研究当中。

参 考 文 献

[1] 工程岩体试验方法标准(GB/T50266-99)[M]. 北京:中国标

准出版社,1993.

Standard test method for rock engineering. Beijing: Standard Publishing House of China, 1999.

[2] 李先炜编著. 岩体力学性质[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1990.

Li Xianwei. Mechanical properties of rock mass. Beijing: Coal Industry Press, 1999.

[3] 肖树芳等著. 岩体力学[M]. 北京:地质出版社, 1987.

Xiao Shufang. Mechanics of rock mass. Beijing: Geological Publishing House.

[4] 沈明荣,陈建峰编. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社, 2006.

Shen Mingrong and Chen Jianfeng. Mechanics of rock mass. Shanghai: Tongji University Press, 2006.

[5] 钱伟长,叶开源著. 弹性力学[M]. 北京:科学出版社, 1956.

Qian Weichang, Ye Kaiyuan. Mechanics of elasticity. Beijing: Science Press, 1956.

《重大地质灾害防治理论与实践》出版发行

《重大地质灾害防治理论与实践》作者:刘传正,科学出版社出版。本著是一部侧重于阐述理论思维方法及其应用的专著。她既是著者 20 余年来广泛参与我国地质灾害防治活动的经验总结,也是从事长江三峡链子崖危岩体地质论证、防治工程设计、跟踪指导施工和工程治理效果检验研究的心得。在指导思想,通过追求现场“原型观测”、“原型试验”和“原型研究”乃至“原型设计”,走向用简单的方法解决复杂的问题,力图体现从感性认识到理性思维,从特殊个性到一般共性,又从基本原理回归到特殊案例应用的技术路线。

本书包括上下两篇,初步建立了地质灾害防治工程学及其应用的基本理论方法体系。

上篇提出了地质灾害防治工程的基本理论方法体系,包括地质灾害的基本概念和基本属性、地质灾害与地质环境变化、地质灾害的调查与勘查评价、监测预警、防治工程论证与设计、地质灾害的应急响应和防灾减灾公共管理等。在理论上提出了地质灾害区域评价研究的“发育度”、“潜势度”、“危险度”和“危害度”等新概念及其分析评价方法;把采矿工程活动引发的山体开裂、崩塌和滑坡等划分为顺倾(向)型、反倾(向)型和斜倾(向)型,并分别建立了其数学力学模型;提出了地质灾害隐式统计(临界降雨量)、显式统计和动力模式区域预警原理,隐式统计和显式统计方法是 2003 年以来基于气象因素的全国地质灾害区域预警预报服务(CCTV-1)和多个省(自治区)开展类似工作的理论依据;介绍了中国第一个地质灾害监测预警试验区——四川雅安地质灾害监测预警试验区;提出了地质灾害防治工程方案论证的地质观与工程观及其工作原则(地质原则、目标原则、整体优化原则、技术原则、环境原则、社会安定原则和效益原则)和防治工程设计遵循的基本理念(现场设计、计算分析设计、综合分析设计、代偿设计、监控设计、可靠性设计和计算机辅助设计);总结了重大地质灾害应急响应的工作步骤(响应启动、调查评价、监测预警、会商定性、防控论证、决策指挥、实施检验和总结完善)和应急处置的技术路线(信息获取、分析研判、预测预警、模拟仿真、技术方案论证和风险评估与决策支持),概括出地质灾害群测群防工作的“六个自我”原则(自我识别、自我监测、自我预报、自我防范、自我应急和自我救治)和综合防灾减灾公共管理思路等。

下篇针对国家重大地质灾害防治工程——长江三峡链子崖危岩体防治工程开展了范例研究。自 1993 年以来,提出了链子崖危岩体具有南北强拉裂、东西弱拉裂和平面反时针转动的三维开裂变形破坏机制;创建了防治工程方案比选的目标函数方法,并成功的进行了链子崖危岩体地下采空区防治工程

和“七千方”锚固工程设计;针对新发现的地质条件变化开展了大尺度(1m×1m)原位岩体力学模拟试验,及时计算调整了工程设计;通过 4 年多的施工和工程竣工后多年的运行检验,特别是 2003 年以来长江三峡水库多期蓄水(长江三峡水库 135m、145m、156m 和 172m 蓄水位)的考验、稳定性校核计算和多年变形与地压监测数据分析等,得出链子崖防治工程达到正常荷载下稳定系数大于 1.30(治理前为 1.062),特殊荷载下大于 1.15,工程治理效果达到了设计目标,长江三峡链子崖危岩体防治工程是成功的。

本书可供从事地质灾害防治、工程地质、岩土工程、工程建设地质安全评价和土地利用的工程技术人员、科研人员、高等学校师生和政府官员等参考使用。

本书定价 200 元,邮费 20 元,订购请与《工程地质学报》编辑部联系

100029 北京北土城西路十九号,中国科学院地质与地球物理研究所,《工程地质学报》编辑部收

电话:82998121(兼传真)

邮箱:gcdz@mail.igcas.ac.cn

