

水电工程岩体变形特性 研究途径初探^{*}

水电部成都勘测设计院科学研究所

杨子文

内容提要

本文通过二滩水电站的工程实例,并引用其它工程的有关资料,介绍了一种实用的现场岩体静弹性模量与岩体动力参数(声波、地震波)之间建立起的动、静对比关系。提出了如何通过这些参数来选择工程上实用的计算指标。文章最后提出了动、静对比的工作方法应采取的步骤和程序,以供参考。

前 言

二滩水电站位于雅砻江下游,距渡口市约二十公里。拟建高245米的混凝土重力拱坝,左、右岸各有一条导流隧洞,左岸坝后有地下厂房。电站装机约350万千瓦,库容63亿立方米。

坝区主要由二迭纪玄武岩和后期侵入其中的正长岩组成。玄武岩又分为蚀变玄武岩,凝灰质玄武岩和纤闪石化玄武岩三个亚类。前两者多呈大块状,后者具有明显的不均一性,其中最坏者被挤压成仅3~5厘米或1厘米的岩石块体,属镶嵌碎裂结构,其变形特性变化很大。

正长岩类,坚硬、完整属块状结构。

坝区除有近于垂直河流走向的NE30~40°、NW60°,近于平行河流走向的NW40~65°、NE65~70°两组节理和走向近于EW、S5~10°、10~30°、35~55°的缓倾角裂隙面外,未发现大的连续软弱结构面和断层。

试验从1974年开始,计进行了:室内岩块试验91组;现场岩体变形试验—承压板法(φ50.5厘米)107组,狭缝法(50×50厘米)5组,径向液压枕法(φ2.4米,段长4米)2组;现场重复式釜—中型剪(20×20厘米)440对试件,现场直剪(40×40厘米)63块。表面应力测量三个断面13个测点,现场声波(配合静力变形试验)31个测点,现场地震波(26个平洞洞壁及洞间穿透)4170米。

近一年多来又进行了一些承压板试验、直剪试验、深孔应力测量和流变试验。目前正积

^{*} 参加工作的有: 科研所雷承弟、唐时明、季良杰、杜佩莹、冯国栋; 物探队宋正中; 中国人民解放军00300部队孙泰浩以及北京水科院陈凤翔等同志。

极筹备开展地下洞室的原体观测工作和岩体力学模型试验。

一、岩石、岩体工程性质与岩体的力学属性

为了解岩石的物理力学性质，进行了一定数量的室内试验，其结果绘于图1。岩石应力~应变关系如图2所示。

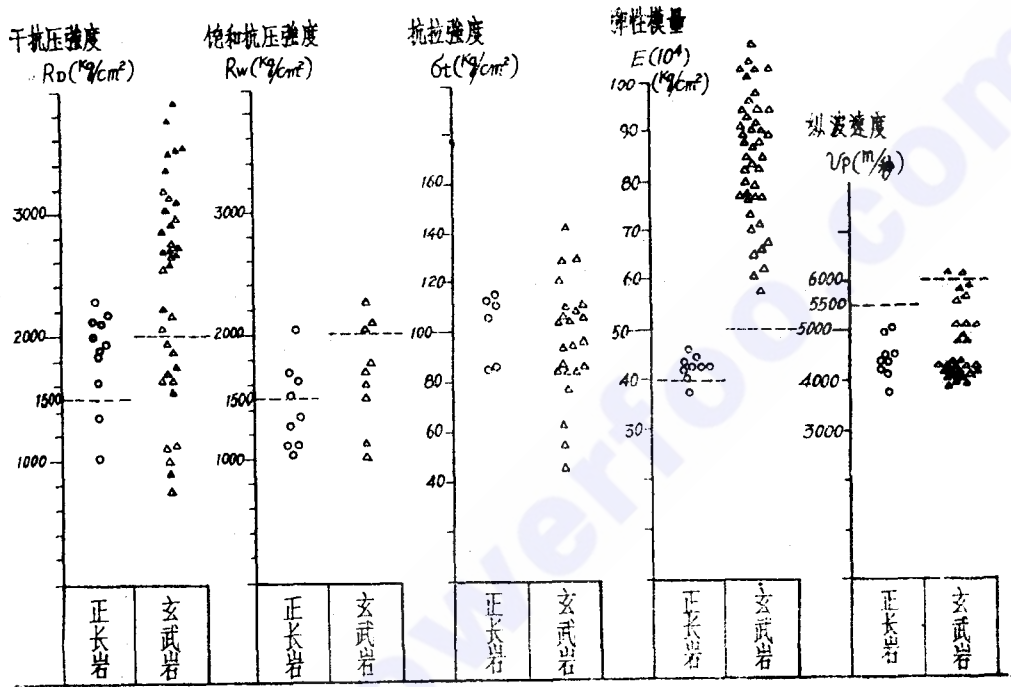


图1 岩石物理力学性指标散点图

(一) 室内岩石试验成果分析

从图1中看出，岩石的干、湿抗压强度多在1500~3000kg/cm²之间，静弹性模量多在40×10⁴kg/cm²以上。

图2所示岩石的应力~应变关系在垂直压力加到1300kg/cm²时，基本属线性关系。例如编号7—2的新鲜正长岩，法向应力为500kg/cm²时，总变形为0.114^m，弹性变形为0.1095^m，为总变形量的95.7%。

根据岩石的强度、应力~应变关系和岩石的弹性变形特性来看，完整的岩石可以看作是一种弹性材料。

上述两类岩石，按文献〔1〕的建议，其工程质量指标S用式(1)进行定量评价如下：

$$S = (R \cdot E / 20 \times 10^6)^{1/4} \quad (1)$$

式中：R—岩石饱和抗压强度

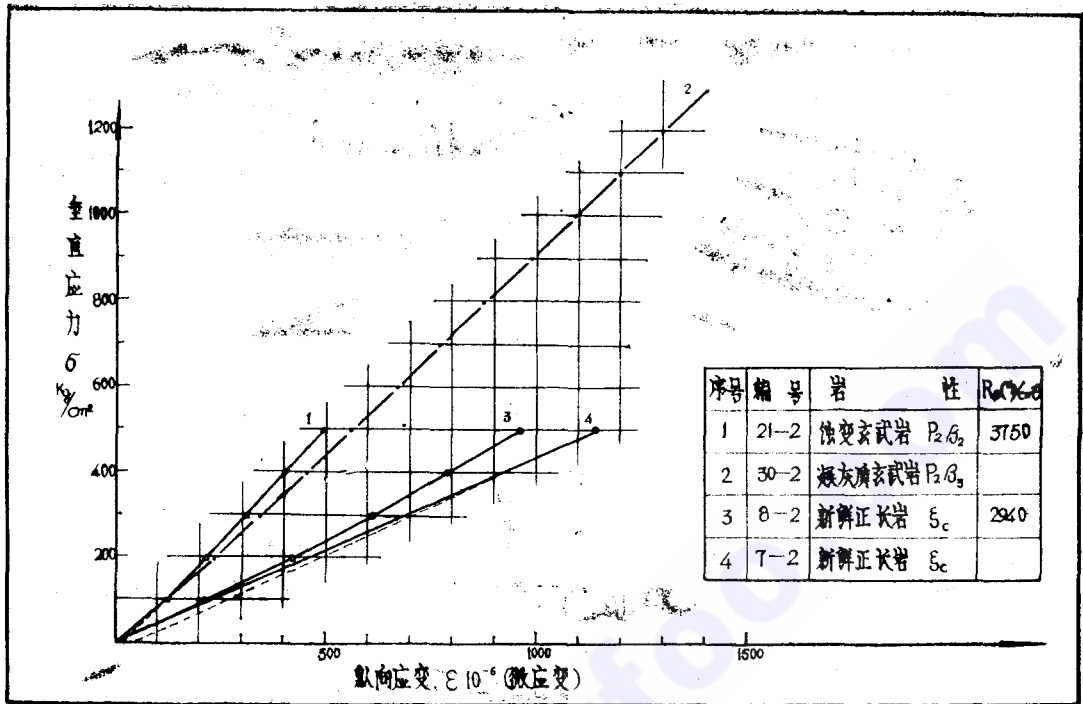


图2 岩石的应力~应变关系

E—岩石饱和弹性模量

取正长岩类 $R_n = 1500 \text{ kg/cm}^2$ $E_n = 40 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

则 $S = (1500 \times 40 \times 10^4 / 20 \times 10^6)^{\frac{1}{2}} = 5.48$

取玄武岩类 $R_n = 2000 \text{ kg/cm}^2$ $E_n = 50 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

则 $S = (2000 \times 50 \times 10^4 / 20 \times 10^6)^{\frac{1}{2}} = 7.07$

由于这两类岩石的S值均大于4，因此，它们均属于极坚硬的、工程质量优的I类岩石⁽¹⁾。

(二) 现场岩体试验成果分析

岩体变形试验，压力为 100 kg/cm^2 。试件基本饱和。

从实测122组资料的应力~变形关系来看，可归纳为四种类型⁽²⁾：

1. 陡坎型（如图3-a）：共75组，占61.5%。陡坎型应力~变形关系的原因，据分析看来与地应力有关。该工程左岸4号平洞实测地应力达 $216.3 \sim 266.9 \text{ kg/cm}^2$ （上复岩层自重应力约 26 kg/cm^2 。近一年来又进行了较多的深孔应力测试，结论认为该地区地应力量级为 200 kg/cm^2 ）³；坝区部分平洞中曾发生过岩爆；有的洞壁开挖后不久即出现开裂和裂缝；以及河床部位一些钻孔内在一定高程上反映有大量薄饼状岩芯等所提供的事实证明，坝区岩体内存在有较高的地应力，因此，无疑会影响到一些现场的试验成果。例如，4号平洞发现有岩爆现象和在洞壁开裂处进行了地应力量测，在该洞内实测的17组承压板法试验资料中陡

坎型曲线竟达14组之多，其变形模量多在 $10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 以上。从分布位置来看，这类试点多位于正长岩及其与玄武岩接触的蚀变带中，这与河床部位出现薄饼状岩芯的范围是一致的。

这类曲线若用通常的方法处理，在小压力时变形模量值往往很高，甚至达到极不合理的程度。考虑到现有的设计方法和地质、设计上使用方便，以及岩石和岩体的特征，采取了忽略小压力部分，而将其余各级压力下的应力~变形关系当作直线来处理的作法，从而得到了定常数的变形模量值。

2. 长尾型(图3-b)：这类曲线，代表坚硬、破碎的岩体变形特征。它反映出随着压力的增大，岩体裂隙压密。尾的长短与岩块之间裂隙内充填物性质和裂隙数量多少有关。这类资料共31组，占全部成果的25.4%，它们多出现在碎裂结构的岩体中。

按习惯方法处理，在小压力时，变形模量值又往往很小，随着压力的增大，模量值亦增加，当达到一定压力值后，逐渐趋于稳定。

在实际建坝过程中，随着坝高的增加，岩体被逐渐压密。因此，应考虑能代表岩体经过压密后的应力~变形那部分曲线，而不应包括小压力在内的全部关系曲线。故此可忽略小压力部分，将以后各级压力下的应力~变形关系曲线当作直线来处理，从而也获得了常数值的变形模量。

上述变形模量值大多数在 $5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 以下，其中在 $0.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 以下者又占31组的45%，将近一半。这类成果反映了碎裂岩体极不均一的变形特性。

3. 直线(或近似直线)型)图

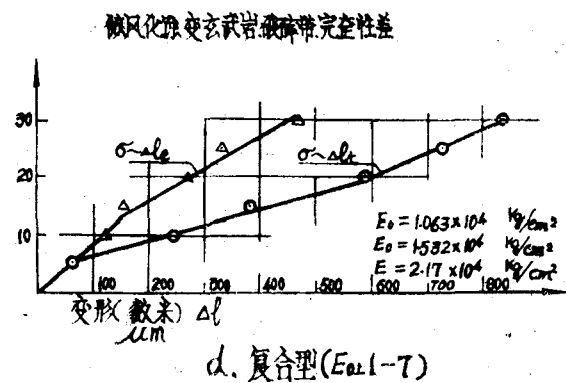
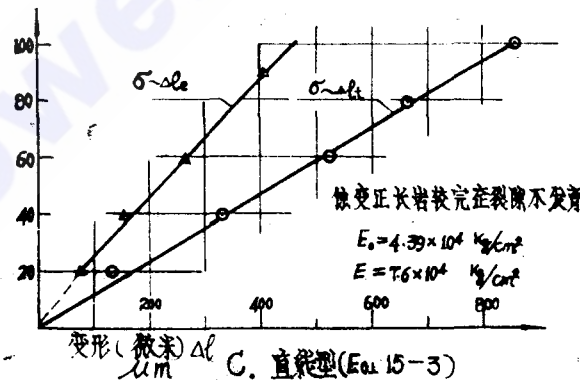
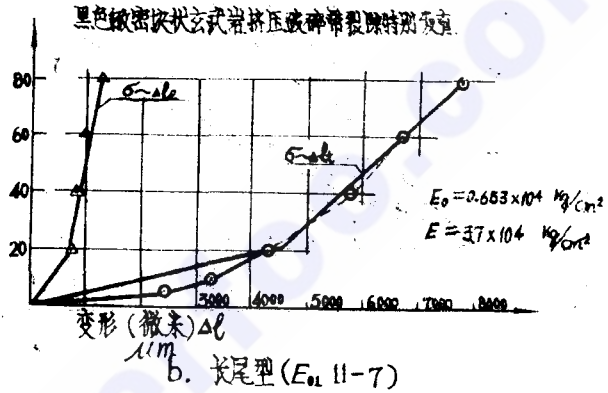
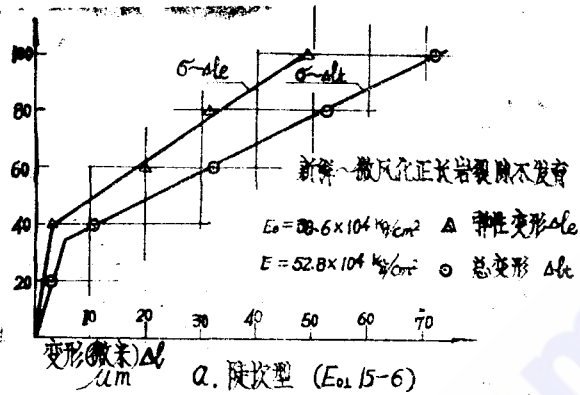


图3 岩体应力变形~关系

3—c)：这类应力~变形关系曲线共有8组资料，占6.5%，其变形模量为一常数。

4. 复合型(图3—d)：这种应力~变形关系曲线是图3—a、图3—b、图3—c三种曲线按不同组合方式组成的复合型曲线，仅6.0%左右。可根据实际情况，进行分析研究后，忽略小压力部分，当作直线或折线来处理。

将岩体现场实测的应力~变形关系曲线进行简化处理，这从工程角度看是允许的，也是方便的。但有两个前提：(1)岩体现场实测的应力~变形关系除小压力部分外，均具有直线的性质，说明岩体属弹性或准弹性介质；(2)岩石本身的应力~应变关系也具有弹性或准弹性介质的性质，否则将会带来较大的误差。对于明显的曲线似宜取各级荷载下的割线模量作为岩体的变形模量较为合适。

根据前面的分析，该工程的两大岩类的室内物理力学性质是很好的，均属于岩质坚硬、岩石工程性质优良的I类岩石。从现场122组实测的应力~变形关系来看，该工程的岩体变形曲线，主要是陡坎型，其次为长尾型，少量为直线型和复合型。陡坎型代表坚硬完整的块状结构岩体，而长尾型则是坚硬破碎岩体的反映。

(三) 岩体的力学属性

现场岩体变形试验的变形模量 E_0 和弹性模量 E 之间的关系，实为岩体总变形 Δl 和同级压力下岩体的弹性变形 Δl_e 的关系。

$$\text{即： } E_0/E = \Delta l_e/\Delta l \quad (2)$$

当岩体接近弹性介质时， $\Delta l_e \approx \Delta l$ ，这时 $E_0 \approx E$ ，即变形模量接近弹性模量。

将同一试件中的实测 E_0 与 E 值分别点绘于图4中，得到 E_0 与 E 的相关关系。

据 $\Delta l_e/\Delta l$ 比值的大小，可以大致看出岩体的力学属性。结合二滩工程的实际情况，初步将岩体划分为如下四类：

$\Delta l_e/\Delta l > 75\%$ ， $E_0/E = 0.75 \sim 1.0$ 岩体属弹性介质；

$\Delta l_e/\Delta l = 50 \sim 75\%$ ， $E_0/E = 0.5 \sim 0.75$ 岩体属准弹性介质；

$\Delta l_e/\Delta l = 25 \sim 50\%$ ， $E_0/E = 0.25 \sim 0.5$ 岩体属弹—塑介质；

$\Delta l_e/\Delta l < 25\%$ ， $E_0/E < 0.25$ 岩体属塑性介质。

图4还可以看出：

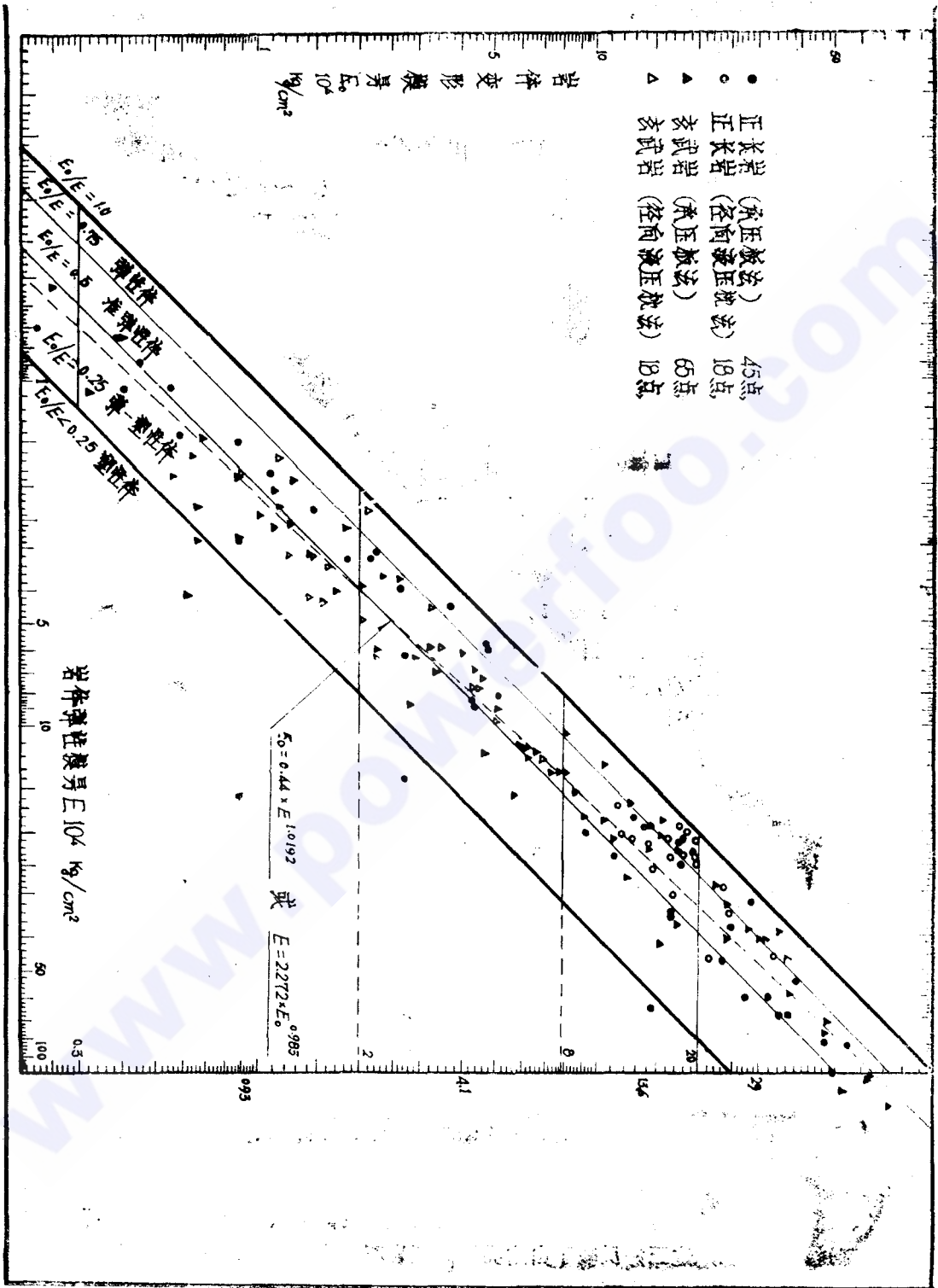
1. 实测的146组(包括径向液压枕法和新增的资料)成果多集中在图中的弹性区和准弹性区。这再次证明该工程的岩体多具有弹性或近似弹性介质的性质。图中的斜虚线为岩体的特征线。该线从图中下部的弹—塑区向上逐渐进入准弹性区和弹性区。

2. 有近40组资料($E_0 < 3 \times 10 \text{kg/cm}^2$)分布在弹塑区，占28%；个别少数点落在塑性区；其余100组资料都集中于弹性区和准弹性区，这说明将该工程的岩体当作弹性介质来看待是可以的。

3. 正长岩类和玄武岩类的试点之间，并没有明显的差异，它们多相间穿插出现。这说明由这两类岩石组成的岩体，从其工程属性上来看，并没有什么本质上的差别。

4. 随着 E_0 值的降低，代表岩体特征性的直线有从弹性区、准弹性区进入弹—塑性区向塑性区过渡的趋势，这正好反映了由这类极坚硬岩石组成的岩体、从完整过渡到具有裂隙、然后进入破碎带的渐变特征。

图 4 岩体变形模量和弹性模量关系



根据二滩现场实测146组资料绘制的 $E_0 \sim E$ 关系,可以得出如下的经验公式:

$$E_0 = 0.44 \times E^{1.0192} \quad (3)$$

不少工程的实践表明,这种经验公式具有明显的地区性,系不均匀介质所具有的特征。一般说,只有两个工程岩体的工程性质相近,即它们的S和M值都相近时,这种引用和对比才是合理的。

建立 E_0/E 关系的目,除用于岩体工程属性判别之外,更重要的是为进一步建立动、静对比关系作准备。因为用 E_0 和动弹模量 E_d 建立关系虽然方便,但往往不易为人们所接受,因此,以与 E_0 有关系的 E 和 E_d 建立关系较为合适。

二、利用动静对比关系〔2〕研究岩体变形特征

大家知道:现场承压板法试验影响岩体的范围仅约 $0.02m^3$,且影响深度通常也只有 $0.8 \sim 1.0m$;狭缝法的影响范围还要小;钻孔弹模可以在一定深度的岩体内进行,但也只能影响孔周很小范围的岩体;径向液压枕法涉及的岩体可达约 $50m^3$,深度达 $2 \sim 3m$ 。而对广大空间岩体是无法直接进行静力测试的。另一方面,不论哪种静力法试验,不论其影响范围大小如何,它们所能代表的、仅是所进行试验的那一小部分岩体。对于上述范围以外的广大空间岩体的特性,人们是不可能直接去获得的。在有限试点的基础上,再结合大范围内经济有效的动力测试,建立岩体力学属性的相关关系,是解决建筑物所涉及较大范围岩体变形特性的一种较好途径。

本文根据几个工程在这方面所做工作的成果,提出如下的一些看法,借以引玉。

(一) 岩石、岩体声波测试

1. 岩石的声波测试

岩石纵波速度 V 可用(1)取样在室内测定;(2)现场选取无裂隙的完整岩块测定这两种方法取得。

在无实测 V 值时,对具体工程作相对比较来讲,也可用现场岩体声波的最大纵波速 V_{jmax} 来代替。

测定岩块纵波速度的目的,在于定量评价岩体的好坏,进而建立动、静对比关系。

2. 岩体声波测试

为建立动、静对比关系而进行的岩体声波测试,参照第二次全国声波会议的建议,结合二滩工程的具体情况,作法如下:

(1)斜孔法(图5-a)

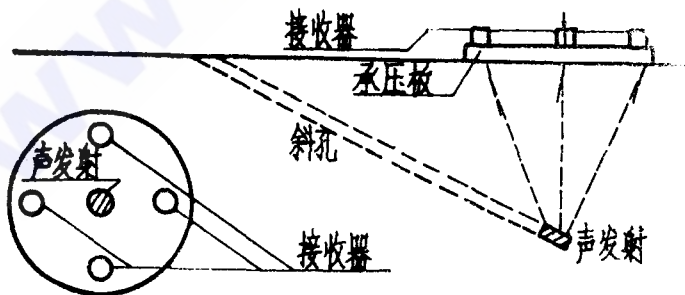


图5-a、斜孔法声发射与接收器布置示意图

经二滩和铜街子两工程测试实践表明(下面引用湖南院的资料也用此法),此法的不足之处在于斜孔的角度不易控制,且在破碎岩体中声发射元件易被卡住。

(2) 直孔法 (图 5—b)

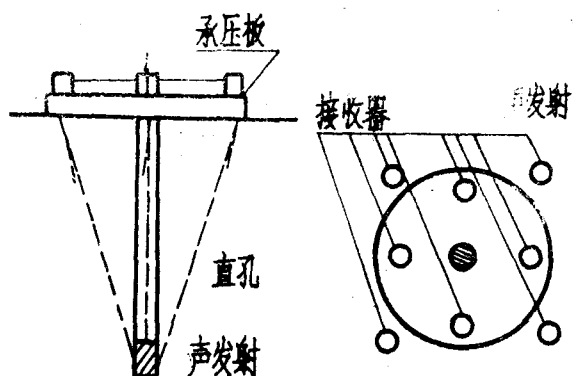


图 5—b、直孔法声发射与接收器布置示意图

此法可在现场变形试验之后进行。即取出承压板后,在试点中心部位打孔至75mm深处,在试件表面均匀置放4~8支波速接收元件,将声发射探头放入孔底,同时读取4~8个数据,取平均值计算 V_p 。这种方式更符合于实际,且易于打孔。

对于狭缝法、大扁千斤顶法、径向液压枕法、钻孔弹模法等,原则上仍是使穿透岩体的 V_p 值的方向尽可能与受力方向平行,使测出的 V_p 值能与静力法测出的 E_c 值相对应,以便建立起较

符合于实际的相关关系。

(二) 岩体的地震波测试

对大范围、大体积的岩体,由于声波发射能量所限,只能用地震波的方法对它进行穿透。测定岩体纵波速度值,以评价大范围岩体的完整程度。

上述两种方法各有用途,它们可以起到相互补充、彼此印证的目的。

二滩工地利用地震波法进行了如下的工作:

1. 在左右岸26个平洞进行了洞壁连续表面波速的测定,间距为2m,总测点长度为4170m。

2. 在左右两岸平洞之间,沿水平和垂直方向进行了大量的、能反映较深部位原状岩体特征的穿透波速。

由于静力变形模量基本上是在洞壁表层进行的,而我们的目的又在于推求较深部位岩体的变形特性,所以表面的连续波速和较深处的穿透波速对建立动、静对比关系都是需要的。

(三) 岩体工程质量指标M

为便于比较与较为合理的评价和解释某一岩体的工程质量的优劣,在文献〔1〕中曾提出了使用岩体工程质量指标M的建议:

$$M = S \times K_1 \times K_r \times K_f \quad (4)$$

式中: K_r —岩体完整性系数 = $\frac{V_p}{v_p}$

V_p —岩体纵波速度 m/s

v_p —岩石纵波速度 m/s

K_f —风化系数

K_1 —软化系数

根据二滩工程的具体情况M值的表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \text{正长岩类} \quad M &= 5.48 \times (V_l/5500)^3 \\ \text{玄武岩类} \quad M &= 7.07 \times (V_l/6000)^3 \end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{正长岩类} \quad M &= 5.48 \times (V_l/5500)^3 \\ \text{玄武岩类} \quad M &= 7.07 \times (V_l/6000)^3 \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

对于岩性单一的、可以直接用 V 值来评价岩体的好坏,如岩体由多种岩性组成时,为评价岩体的好坏,以用M值为好。

(四) 建立动、静对比关系的途径⁽²⁾

为建立实用的动、静对比的关系,在二滩工程采用了三种途径:

1. 声波法的动、静对比关系

声波法的动、静对比,是先进行静力法试验,测出小范围内岩体的变形模量 E_0 和弹性模量 E ,然后用斜孔法或直孔法测出该岩体的声波纵波速度 V_l ,算出岩体的M值。据此在双对数或半对数坐标上绘制如图6所示的 $E_0 \sim M$ 关系。如此对具体岩体同时进行动力法和静力法之后建立起的关系是可靠的。

使用时,对欲评价其工程质量好坏的某一岩体,用声波法实测出它的岩体纵波速度值之后,从上述的关系图中,即可查出与该M值相应的 E_0 值,此值即可认为是岩体的变形模量,再经综合研究和分析之后,考虑地质条件和水工建筑(结构)物的工作条件,稍作调整,即可作为设计上的计算指标使用。此法的不足之处,是被研究的岩体范围有限。

2. 地震波法的动、静对比关系

多年来,在国内很多工程中,都进行过大量的现场变形模量试验和现场平洞内、平洞之间的地震波速测试。为了充分利用这些现有的资料,加以总结归纳,从中获得各类岩体动、静弹模的相关关系,并探索一种实用的近似方法是可取的。

我们通过试验、物探、地质三结合的方式,利用二滩已有的洞壁连续波速 V_{P1} 、平洞之间的穿透波速 V_{P2} 和平洞内进行的112组现场变形模量试验成果,经过分析研究和处理之后,建立起一种近似的实用关系。

经地质、物探、设计和试验现场共同分析,并商定用岩体分级的办法对波速进行初期处理。做法是既考虑洞壁连续波,也注意到平洞之间的穿透波。并认为连续波代表表层岩体经扰动后的情况;而穿透波能反映岩体深部原岩状态。同时对波速从 V_{P1} 到 V_{P2} 的变化采取分级过渡的形式,并将岩体划分为五级,同时将 E_0 值和 E 值也相应划分为五级,找出与此相适应的计算 V_l 值的公式,列表如表1。

具体作法是,在平洞中进行 E_0 试验处的 V_l 值,须根据 E_0 值的大小来确定其计算式。例如,洞内某测点实测 E_0 为 $20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$,则与其相应的 $V_l = [(V_{P1}^2 + V_{P2}^2)/2]^{1/2}$;如 E_0 为 $0.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$,则 $V_l = V_{P1}$; E_0 为 $50 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$,则 $V_l = V_{P2}$ 。

将经过上述处理并算出岩体的M值之后的成对 E_0 、M值,点绘在双对数坐标上,即可建立起如图7所示的 $E_0 \sim M$ 关系。

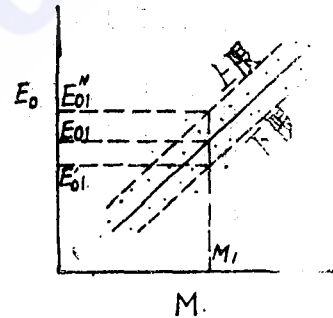


图6 岩体 $E_0 \sim M$ 关系图

表 1

相应 V_p 值计算表

波 速 V	V_{t1} ($V_{t1} \times V_{t2}$) ^{1/2}	$(\frac{V_{t1} + V_{t2}}{2})$	$(\frac{V_{t1}^2 + V_{t2}^2}{2})$ ^{1/2}	V_{P2}	
变形模量 $E_0 \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$	< 0.9	(0.9~4)	(4~14)	(14~29)	>29
弹性模量 $E \cdot 10^4 \text{ kg/cm}^2$	< 2	(2~8)	(8~24)	(24~48)	>48

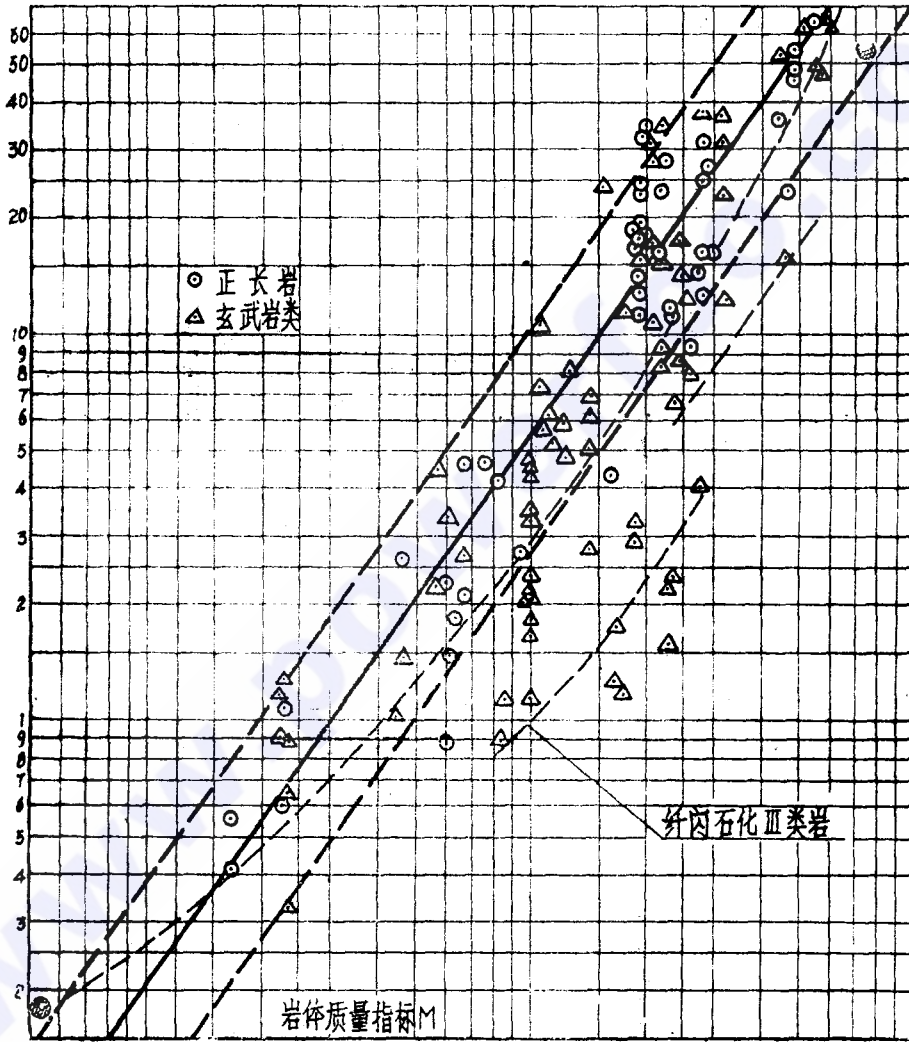


图 7 变形模量 E_0 和岩体质量指标 M 关系图

地震波法和静力法之间，严格讲要建立二者之间的准确数学关系式是困难的。然而，要建立工程上实用的动、静对比关系是可能的，也是非常需要的，这也正是指导我们进行这种

探索的主导思想。

建立地震波法动、静关系对比的依据是下述两个假定：

(1) 当岩体工程质量从坏 → 好变化时，与其相应的变形模量值 E_0 也将从小 → 大变化。假设两者之间具有某种内在的联系。

岩体工程质量的好坏，以 M 来表示，则可以建立起 E_0 和 E 之间有一定的关系) 和 M 之间的关系，即：

$$E = a_1 \times M^{b_1} \quad (6)$$

(2) 当岩体工程质量从坏 → 好变化时，与其相应的地震波在该岩体内传播的速度 V_p 值将从小 → 大变化，也就是说该岩体的动弹性模量 E_d 将从小 → 大变化。

在此，仍以 M 来表示岩体的好坏，则又可得出：
$$E_d = a_2 \times M^{b_2} \quad (7)$$

对于同一岩体，它的 M 值是相等的，即：

$$(E/a_1)^{1/b_1} = (E_d/a_2)^{1/b_2} \quad (8)$$

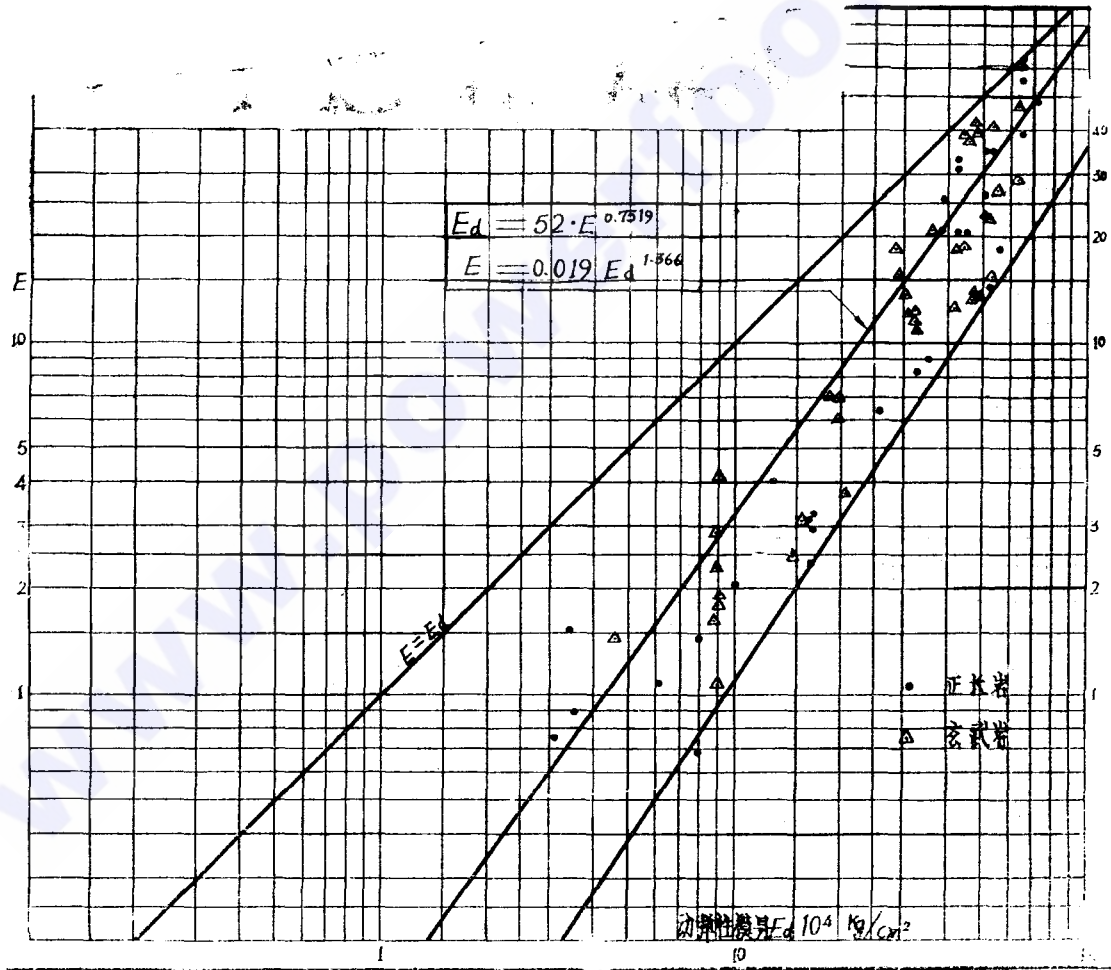


图 8 实测的地震波法动弹性模量与现场静弹性模量的关系图

用 $B = b_1/b_2$, $A = (a_1/a_2)^{1/1.2}$

则 $E = A \times E^B$, 从图 8 知 $A \approx 0.019$, $B = 1.366$ 。

对二滩工程实测的静弹性模量 E 和动弹性模量 E_d 之间的经验关系式如下：

$$E = 0.019 E_d^{1.366} \quad (9)$$

3. 声波—地震波法的动静对比关系

由于声波法测定岩体的范围有限，靠声波法与静力法建立起的 $E_0 \sim V_p$ 等各种关系要直接使用到大范围的岩体上，目前还有困难。而在现有技术条件下，要建立地震波法的直接动静对比还不易办到。为解决这个矛盾，较合理的方法是利用前面用声波法建立起的 $M \sim E_0$ 关系，把大范围的地震波和小范围的声波法相结合，作为一种解决工程上的岩体变形参数的途径，这种实测的 $M \sim E_0$ 关系如图 9 所示。

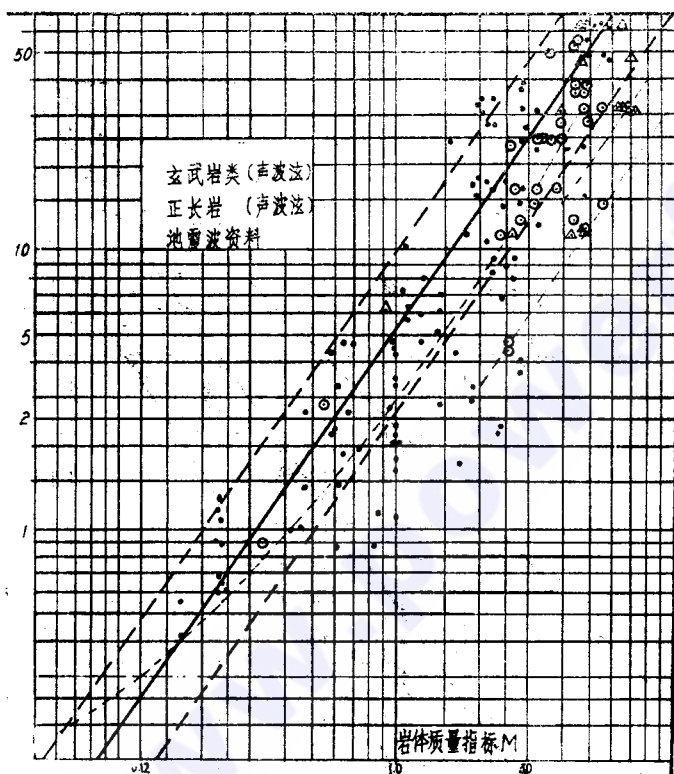


图 9 声波法的 $M \sim E_0$ 关系

的一些计算指标就容易解决了。

这种 E_0 值是基于实测的基础上提出并经认真分析讨论后确定的，而不是单凭经验提出再经协商确定的数据，因此是可信的。

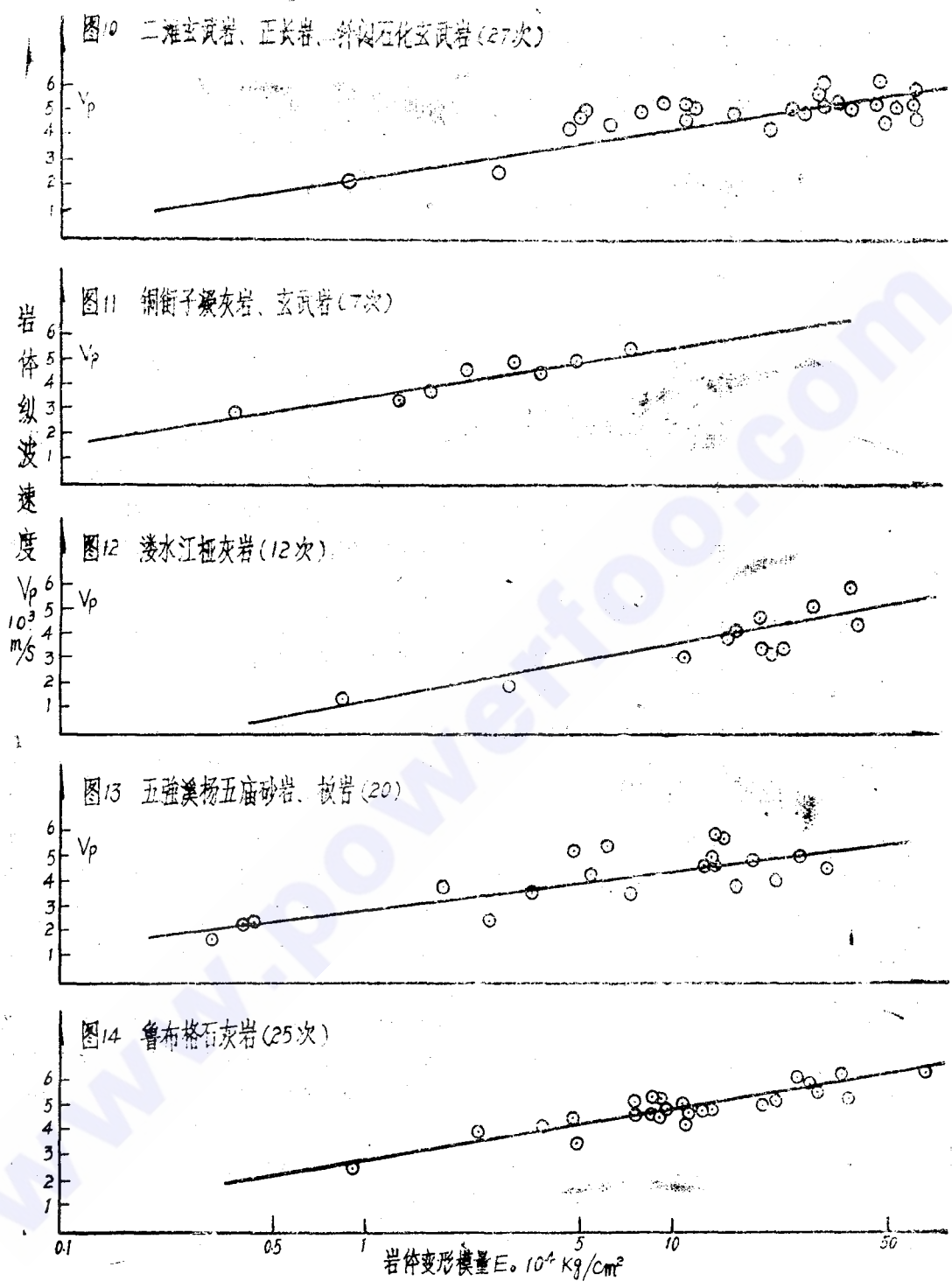
(五) 实测的动、静对比关系

在二滩和铜街子水电站都进行过这种工作，在此也引用了湖南省水电院的资料⁽⁴⁾。

这种结合的前提，是认为地震波法测定的岩体完整性系数 K_{vse} 和声波法测定的岩体完整性系数 K_{vso} 相近或相等，即：

$$(V_p/v_p)^2_{sc} = (V_p/v_p)^2_{sc} \quad (10)$$

具体作法是，建立起上述声波法的 $M \sim E_0$ 关系之后，对欲评价的岩体部位，用地震波法测定的 K_{vse} 值，算出 M 值，从声波法的 $M \sim E_0$ 图中查出相应的 E_0 值备用。例如二滩左岸拱座第三拱圈部位岩体，用地震波法实测的平均纵波速度为 5200m/s，算出它的 M 为 4.11，从图 9 中查得变形模量值的下限为 $20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 。据此计入地质、试验、设计等方面情况后，经过讨论分析即可定出一个为设计该拱圈所需的岩体变形模量 E_0 。（建议使用值为 $20 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ）。事实上，有了这种 M 值之后，岩体



1. 二滩水电站实测的声波法动静对比关系如图10。
2. 铜街子水电站实测的声波法动静对比关系如图11。
3. 湖南溁水江坝电站实测的声波法动静对比关系如图12。

4. 湖南五强溪杨五庙砂岩、板岩声波法动、静对比如图13。
5. 鲁布格石灰岩声波法动、静对比如图14。
6. 二滩水电站地震波法动静对比关系见图9。

三、岩体工程质量指标M及各种动、静参数在工程中的应用

(一) 工作方法和步骤

岩石现场测试工作，早在五十年代已在水利水电部门开展起来，进行了数量可观的现场岩体变形试验。可惜这些资料未能得到系统的统计分析和总结。回顾二十多年来的作法，我们在岩石力学测试方面的工作方法和步骤是值得认真加以研究的。

从国外大型水电工程中岩石力学所起的作用来看，工作方法是重要的。以二滩工程为例，到目前为止，已进行现场变形模量试验近160组。这个数量即使在国外，也是少见的。可是，即使作了这么多的现场试验，若不认真总结经验，探索经济实用的试验途径，仍按传统方法去做，对于这样巨大规模的工程来说，仍然是难于解决工程中出现的岩石力学问题的。

办法和出路在哪里？从工程实用角度来看，利用地震波和声波测试与现场变形模量试验相结合的手段，建立动、静对比关系，实践证明是行之有效的出路之一。

为了更好的开展这项工作，其方法是：

1. 对工程岩体进行初步的工程地质分类，为弄清岩石力学问题打下基础。
2. 在对岩体的工程地质情况有一个初步了解之后，利用全部平洞和钻孔开展地震波的测试工作。一方面沿平洞洞壁、竖井井壁、钻孔不同深度部位进行岩壁连续波速测试；另一方面沿平洞之间、钻孔之间进行穿透波速测定。据此，通过波速值的比较，了解整个工程岩体的相对好坏。根据工程的需要，按波速值的大小，将岩体划分为优、良、中、差、坏等五级，并尽可能在各种地质图中用等波速线、或等M值线圈划出各级岩体的大致范围。这种相对定量划分的工作，对推进地质工作深入印证和补充初步的工程地质分类；试验开展现场测试；设计方案选择；考虑施工方法等都是非常有用的。

3. 根据地震波速研究的结果，开展现场静力测试工作，其中尤其是岩体变形试验。作法是根据波速值的大小，将岩体划分为五级之后，对每一级岩体，选出好、中、坏三种代表性的岩体进行E₀试验。一般情况下，每种岩体选一组试验。对于重要的工程，或工程中的重要部位，或地质条件比较复杂的岩体，可选二组或三组。

对选好的试点，应取样进行室内声波纵波速度和抗压强度、弹性模量等指标的测定。按规程的要求制备试件和进行现场E₀值和声波法V_p值的测定。

4. 对于单一岩性的岩体，可用V_p或K_v和E₀或E建立动静关系。对于多岩性组成的岩体用M值与E₀或E建立关系。

为了了解有关部位岩体质量的好坏，须利用地震波法测定出它们的岩体纵波速度V_p值。根据实测的V_p值和岩石的工程质量指标S、风化系数K_y、软化系数K_R⁽¹⁾等，算出该岩体的M值，从声波法建立起的E₀~V_p或E₀~M关系图中，选用相应的E₀值。

对于修建在岩基上的大型水电工程来说，与工程有密切关系的岩体部位是：重力坝各个坝段，从基础开挖高程至相当于坝高1.0~1.5倍深度范围内的岩体；拱坝两岸拱座不同高程的拱座岩体，从拱座部位开始起算，沿合力方向测试深度为1.0~1.5倍拱宽；地下工程沿轴线向外三倍洞跨范围内所涉及的岩体等。

(二) 相似模拟概念在动静对比中的应用

为了弄清上述这些工程部位岩体在受力后的变形特性，单靠静力法试验是无法解决的。这时须建立一种“相似模拟”的概念和利用上述的方法来解决这种被称之为“岩体综合弹性模量”的计算指标，这种“相似模拟”的概念如图15所示。

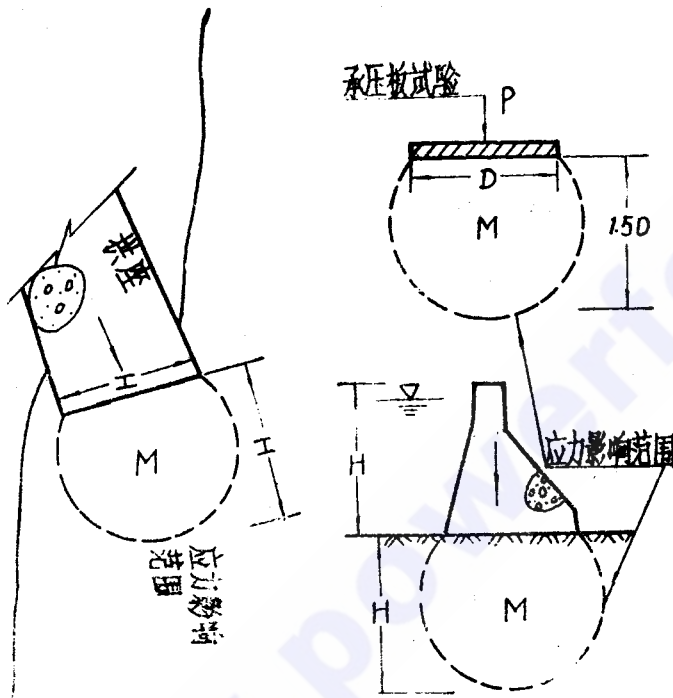


图15—a 拱座工作状态 图15—b 重力坝工作状态

设承压板法在某局部岩体部位实测的变形模量 E_0 。值为 $21 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ ，同时测出它的声波速度及岩石的风化程度、水的影响程度以及岩石的工程质量指标 S 值之后，算出该岩体的 M 值为3.1。在现场用地震波法对大坝下直至深度为一倍坝高处的岩体进行纵波速度值的测定，得出平均的 V_p 值，且据实测的岩体风化程度、水的影响程度、岩石质量的好坏等，计算出该岩体的 M 为3.0。再根据岩体的工程指标相近或相等、则岩体的工程性质亦相近或相等的观点⁽¹⁾，则它们的岩体变形特性亦相近或相等。据此，从该工程已建立起的 $M \sim E$ (声波法)关系图中查出当 $M = 3.0$ 时，该坝段下的岩体的

E_0 。值约为 $20 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ 。这就是“相似模拟”的概念。可以看出，从这种概念出发，不论用什么方法在现场进行岩体变形试验，只要同时设法测出该小范围内岩体的声波纵波速度值 V_p ，就可据以建立该工程岩体的 $E_0 \sim V_p$ 或 $E_0 \sim M$ 关系。根据 $E_0 \sim V_p$ 、 $E_0 \sim M$ 关系，就可较有把握地定出这些重要部位岩体的变形特征值以及与其有关的一些指标。

(三) 岩体工程质量指标 M 和动静对比关系在工程中的应用

根据上述的指导思想和工作方法，可以看出进行现场变形模量试验的目的，不仅仅是测出这些小范围岩体的变形模量 E_0 和弹性模量 E ，而且需同时测出与进行 E_0 试验时受力方向一致的声波纵波速度 V_p ，以及室内岩石单轴抗压强度 R 和弹性模量 E ，从而建立起该工程岩体的 $E_0 \sim V_p$ 、 $E_0 \sim M$ 等关系曲线。

利用平洞和钻孔实测的各工程部位岩体的 V_p 值或 M 值, 在地质平面图上对岩体工程量的好坏进行分区。如有可能, 应同时绘制平面图、剖面图, 平切面图并在图上用 V_p 、 E_c 值或 M 值对岩体进行分区。这种结合地质条件, 结合工程部位, 用试验实测的 V_p 值或 M 值区分出的有定量指标的工程地质图, 对于地质、试验、设计和施工都是很有实用价值的。根据这类附件, 即可判断和看出工程各有关部位岩体的相对好坏, 据此给出与 V_p 值或 M 值相适应的一些岩体变形参数、强度指标和确定坝基(或拱肩)的深度等。

为了检验采用地震波法、声波法和静力法建立起的这种动静对比关系在实际工程中的应用的效果, 可以在岩体内部埋设量测岩体受力情况和变形大小的各种测量元件, 根据工程施工和运转期间观测到的应力和变形值的大小, 反算出有关部位岩体在原型工作状态下的实际弹性模量。将这种反算出的实际模量和设计时采用的计算指标以及试验实测的结果进行比较, 即可估价这种工作方法的实际意义, 这对于总结完整的经验, 指导今后的勘测设计工作具有十分重要的意义。

结 束 语

本文提出的方法, 仅在少数工程试用, 还需进一步予以检验和论证。但从使用情况看, 与一般的分析判断是比较吻合的。为改变通常的经验估计逐步走向定量分析开拓了新的前景, 用根据实测建立起的动静对比关系, 给出相应岩体的变形特性指标来帮助我们判断岩体工程质量的好坏, 这比凭经验协商确定的参数前进了一步。

该法在二滩工程运用的结果是可取的, 宜继续下去。

在动静对比中, 用地震波法和声波法相结合是经济实用、行之有效的方法, 为加快水电建设的前期工作创造了必要的条件。

进行本工作方法的重要一环, 是对岩体要进行工程分级。从工程的观点来看, 这种分级是必不可少的, 在不久的将来, 定会引起地质、设计、试验以及施工方面的重视。

参 考 文 献

1. 水利水电工程岩石试验规程(试行) 水利部、电力部 1980. 12.
2. 关于二滩工程岩体变形试验资料整理情况的几点说明 电力部成都院料研所 1979. 11.
3. 二滩水电站初步设计中间审查会汇报材料 中国人民解放军00300部队 1980. 9.
4. 江垓Ⅱ坝线动静结合测试多层岩体的变形参数 湖南省水电院试验室 1980. 10.
5. 某坝址岩体动、静模量对比试验研究 电力部昆明院料研所 1981. 6.
6. 沅水五强溪水利枢纽杨五庙坝址岩体声波法试验报告
电力部中南院料研所 1981. 6