

## 覆盖层土体最大动剪模量室内外试验比较分析

阮元成 陈宁 刘小生 常亚屏

(中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100044)

**摘要:** 通过室内大型三轴试验激光微小应变测试结果与现场波速试验测试结果的比较, 论证了在一定条件下, 最大动剪模量压力效应关系曲线可以通过室内试验获得, 也可以通过现场波速试验经换算获得, 建议在实际应用中将两者综合考虑。从而为深厚覆盖层地基上高土石坝地震动力反应分析提供更为可靠的依据, 为深厚覆盖层工程特性的进一步研究提供参考。

**关键词:** 深厚覆盖层; 最大动剪模量; 压力效应

**中图分类号:** TU411.7 **文献标识码:** A

按照土石坝抗震设计规范的要求, 在地震区特别是强震区的深厚覆盖层上修建高土石坝时, 必须进行动力反应分析, 而最大动剪模量压力效应关系曲线是进行动力反应分析所必需的资料。通常该曲线是通过室内试验获得的, 但对于现场特定应力条件下的压力效应关系曲线, 也可以通过现场波速试验经换算获得。室内试验能够利用现代高精度、高压力的大型试验设备, 控制各种应力条件(特别是坝体和坝基共同运行的复杂应力条件)对各类覆盖层土料进行不同级配、不同密度、不同饱和度的试验, 从而获得具有一定规律性的参数。现场试验则能够较为准确地反映出覆盖层工程特性的多变性和复杂性, 并且忠实于现场地基土层的原状结构性。

本文通过对实际工程坝基覆盖层的现场波速测试和室内动力试验成果的对比, 对最大动剪模量压力效应关系曲线进行了一些分析。其基本思路是: 通过室内大型三轴试验采用激光微小应变测试技术, 取得试验土料的最大动剪模量压力效应关系曲线, 同时根据室内试验资料的整理方法和现场覆盖层地基复杂多变的水文地质条件, 将现场三种波速测试方法(单孔法、跨孔法和面波法)所取得的测试资料和有关数据进行换算, 整理出相应的压力效应关系曲线, 然后对两种曲线综合分析比较, 从而获得更为合理的结果, 为覆盖层上面板堆石坝地震动力反应分析提供出更为可靠的依据。

## 1 最大动剪模量试验计算方法简述

**1.1 室内最大动剪模量试验的计算方法** 室内砂砾石料的最大动剪模量压力效应关系曲线是通过室内大型三轴试验结合激光微小应变测试技术获得的。最大动剪模量的压力效应可以用最大动剪模量 $G_{max}$ 与平均有效主应力 $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的关系来表示, 根据试验结果,  $G_{max}$ 与 $\sigma_0$ 的关系呈幂函数形式<sup>[1,2]</sup>

$$G_{max}/p_a = C(\sigma_0/p_a)^n \quad (1)$$

式中:  $p_a$ 为标准大气压力, 单位与 $G_{max}$ 、 $\sigma_0$ 相同;  $C$ 和 $n$ 分别为动剪模量系数与指数, 可由试验结果拟合得到。

收稿日期: 2003-06-29

基金项目: 国家电力公司重点科技项目(KJ00-03-24-01)

作者简介: 阮元成(1945-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事土动力学和土石坝抗震研究。

1.2 现场最大动剪模量压力效应试验的计算方法 现场最大动剪模量 $G_{\max}$ 可由现场波速试验确定的剪切波波速 $V_s$ 按下式确定

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

式中： $\rho$ 为土的质量密度，单位为 $\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ；剪切波波速 $V_s$ 的单位为 $\text{m}/\text{s}$ 。

通过对不同埋深土层的试验结果进行整理，现场试验结果亦可表示为 $G_{\max}$ 与 $\sigma'_o$ 的关系

$$G_{\max} = C_{\text{现}} P_a \left( \frac{\sigma'_o}{P_a} \right)^{n_{\text{现}}} \quad (3)$$

式中： $C_{\text{现}}$ 和 $n_{\text{现}}$ 分别为现场土层的动剪模量系数与指数，由现场试验结果拟合得到。

对坝基覆盖层， $\sigma'_o$ 可由下式确定

$$\sigma'_o = \sum_{i=1}^K (1 + k_{oi}) \gamma_i h_i / 2 \quad (4)$$

式中： $K$ 为测点以上土层数； $\gamma_i$ 为测点以上 $i$ 土层重度，对地下水以上部分取天然重度，水下部分取浮重度； $h_i$ 为测点以上 $i$ 土层的厚度； $k_{oi}$ 为 $i$ 土层侧压力系数，本文 $k_{oi}$ 的取值是：坝基中粗砂层以上的砂卵石料为0.49，坝基中粗砂层以下的砂卵石料为0.43。

## 2 覆盖层土体室内最大动剪模量压力效应的试验结果

本文研究的依托工程为新疆察汗乌苏水电站工程。该工程坝址的河床及左岸高漫滩为深厚覆盖层，覆盖层的厚度为34.0~46.0m，主要由漂石砂卵石层及含砾中粗砂层组成。按其颗粒组成、结构和物理力学性质等差异，分为上、中、下三部分，其中上部和下部为漂石砂卵石层，中部为含砾中粗砂层。根据工程地质资料<sup>[3]</sup>，坝基深厚覆盖层中的漂石砂卵石料磨圆度好，分选性差，结构紧密，以巨粒和粗粒为主，属不良级配；比重平均为2.75；天然状态密度平均值为 $2.20\text{g}/\text{cm}^3$ ，天然干密度平均值为 $2.14\text{g}/\text{cm}^3$ ，天然状态孔隙比平均值为0.282，相对密度平均值为0.85，呈密实状态；颗粒岩性主要为花岗岩、灰岩、各种熔岩、凝灰岩和变质砂岩等。

考虑到坝体主砂卵石料的岩性和颗粒级配与坝基砂卵石料相近，为了比较不同密度对压力效应的影响，将坝体主砂卵石料的试验结果一并列入比较范围。

制备试样时采用的级配模拟方法为等量替代法。按照土工试验规程规定<sup>[4]</sup>，仪器允许土料颗粒最大粒径为60mm。根据以往的研究成果，当试样的直径达到300mm以上时，试验结果较为接近现场的测试结果。以上试验土料的原颗粒级配、试样的直径为300mm时的试验模拟级配见表1，根据《土的分类标准》<sup>[5]</sup>，主砂卵石料原颗粒级配定名为混合土卵石，坝基砂卵石料原颗粒级配定名为卵石混合土。试验土料级配曲线的特征粒径值见表2，物理力学特性指标见表3。

### 表 1 试验土料的粒组级配(土料直径以 mm 计)

现场命名	规范定名	试验干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	级配类型	粒组含量(%)					
				800~300	300~60	60~20	20~2	2~0.1	<0.1
主砂卵砾石料	混合土卵石	2.190	原级配	28.5	33.5	13.9	12.0	11.1	1.0
			试验级配			50.5	37.4	11.1	1.0
坝基砂卵砾石料	卵石混合土	2.134	原级配	9.5	36.0	17.5	15.4	16.5	5.1
			试验级配			45.1	24.0	16.5	5.0

### 表 2 试验土料颗粒特征值

现场命名	级配类型	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
主砂卵砾石料	原级配	130.0	190.0	1.10	35.00	172.73	5.86
	试验级配	33.0	42.0	1.10	16.00	38.18	5.54
坝基砂卵砾石料	原级配	48.0	68.0	0.26	10.00	261.54	5.66
	试验级配	25.0	33.0	0.26	8.00	126.92	7.46

### 表 3 试验土料物理力学特性指标

现场命名	比重	试验干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙率(%)	线性有效强度指标		非线性有效强度指标	
				(°)	C /kPa	φ/(°)	φ/(°)
主砂卵砾石料	2.70	2.190	18.9	38.8	214	53.20	10.00
坝基砂卵砾石料	2.75	2.134	22.4	38.7	115	48.50	7.20

坝体主砂卵砾石料、坝基砂卵砾石料的最大动剪模量 $G_{max}$ 与平均有效主应力 $\sigma'_0$ 的关系曲线见图1, 试验结果见表4, 其钻孔的孔口高程及水位高程见表5。

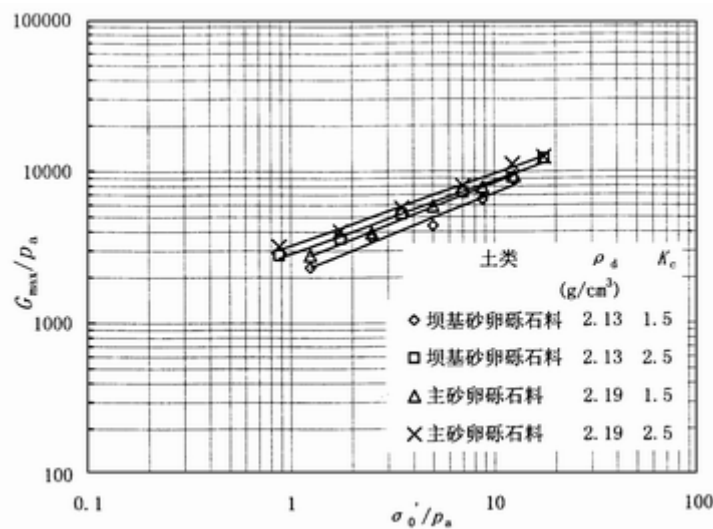


图1  $G_{max}/P_a - \sigma'_0/P_a$ 关系曲线

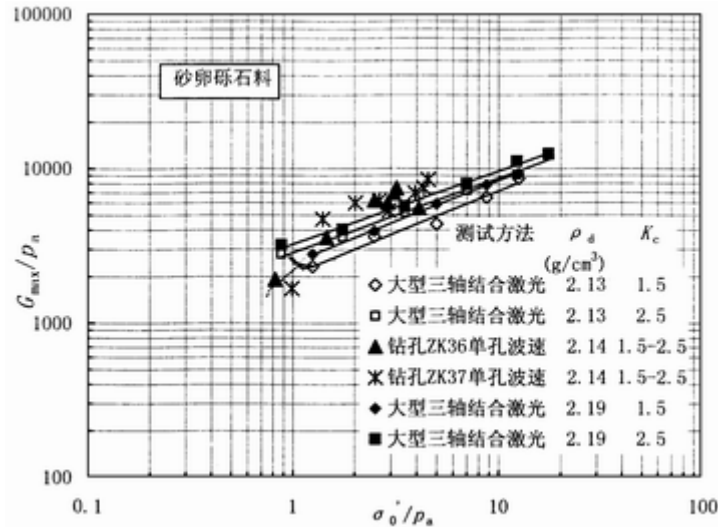


图2 单孔法试验 $G_{max}/P_0 - \sigma'_0/P_0$ 关系曲线

表4 动剪模量系数C与指数n试验

土料	干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	固结比 $K_c$	C	n
主砂卵砾石料	2.190	1.5	2438	0.538
		2.5	3050	0.502
坝基砂卵砾石料	2.134	1.5	2062	0.543
		2.5	2711	0.508

表5 钻孔孔口高程及水位高程取值表

钻孔编号	孔口高程 /m	水位高程 /m	孔深 /m
ZK36	1552.57	1544.6	40.17
ZK37	1550.87	1544.6	46.60

### 3 最大动剪模量压力效应室内外试验结果比较分析

为了较为准确地反映覆盖层土体工程特性的复杂性和原状结构性，现场经常采用三种波速测试方法——单孔法、跨孔法和面波法。本文研究对察汗乌苏水电站工程坝址区覆盖层土体分别进行室内试验以及三种现场波速试验。单孔法是对同一试验孔，在孔口设置振源，孔内不同深度处固定检波器，测出孔口振源所产生的波传到孔内不同深度处所需的时间，计算传播速度。此方法常用于地层软硬变化大和层次较少或岩基上为覆盖层的地层中。跨孔法是以一孔为激振孔，另布置2孔或3孔作检波孔，测定直达的压缩波初至和第一个直达剪切波的到达时间，计算传播速度。其常用于多层体系的地层中。面波法勘探主要利用的对象是瑞利波。按照振源形式的不同，面波法可分为稳态振动法和瞬态振动法。本项研究采用的是在瞬态振动法基础上发展起来的一种新的面波测试方法——多道瞬态面波勘探技术<sup>[6]</sup>。该技术的激振可采用锤击、落重或炸药爆炸作为振源，产生一定频率范围的瑞利波，通过布置在地面的多个拾振器将瑞利波信号记录下来，根据频谱分析，把记录中不同频率的瑞利波分离出来，得到瑞利波速度的频散曲线。再通过换算可以获得剪切波速度沿深度的变化曲线；然后，结合工程的应力条件，进一步换算得到最大动剪模量的压力效应关系曲线，从而达到工程勘察及为动力反应分析提供依据的目的。

覆盖层土体砂卵砾石料室内试验结果与现场单孔法、跨孔法和面波法试验结果比较分别见图2、图3和图4。

图2给出现场单孔法试验的结果。可以看出在 $K_c=1.5 \sim 2.5$ ,  $\rho_d=2.14\text{g/cm}^3$ 的条件下, ZK36号钻孔单孔波速测试结果显示: 在  $\sigma_0=100 \sim 200\text{kPa}$  的范围内, 所得到的 $G_{\max}$ 和室内试验结果较为接近; 当  $\sigma_0=200 \sim 400\text{kPa}$  时, 所得到的 $G_{\max}$ 高于室内试验结果; 当  $\sigma_0>400\text{kPa}$  时, 所得到的 $G_{\max}$ 值和室内试验的压力效应关系曲线相交。ZK37号钻孔单孔波速的测试结果显示: 在  $\sigma_0=100 \sim 150\text{kPa}$  的范围内, 所得到的 $G_{\max}$ 和室内试验结果较为接近; 当  $\sigma_0=150 \sim 450\text{kPa}$  时, 除了  $\sigma_0=300\text{kPa}$  的这一个测点外, 其余测点所得到的 $G_{\max}$ 值都高于室内试验结果。这两个单孔波速的测试结果表明, 由于现场土层结构、级配、密度及应力状态等因素的多变性和复杂性, 从不同部位的钻孔和不同深度的测点得到的测试结果往往会发生较大的变化, 但是,  $G_{\max}$ 随  $\sigma_0$  的增大而增大的趋势是不变的。

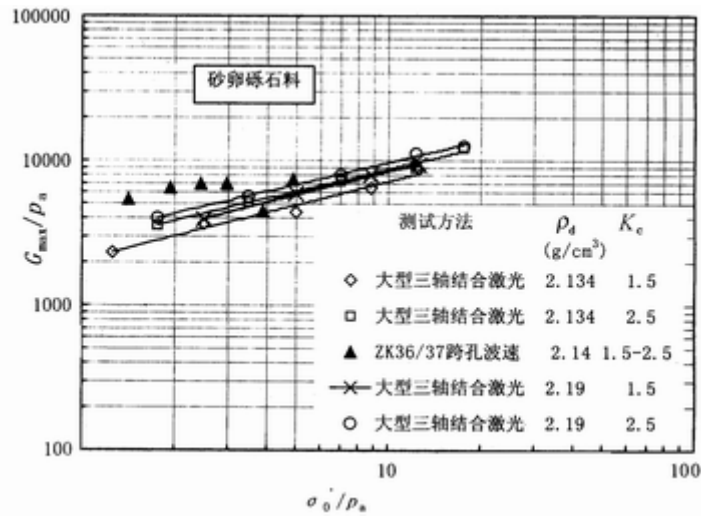


图3 孔法试验 $G_{\max}/P_a - \sigma_0/P_a$ 关系曲线

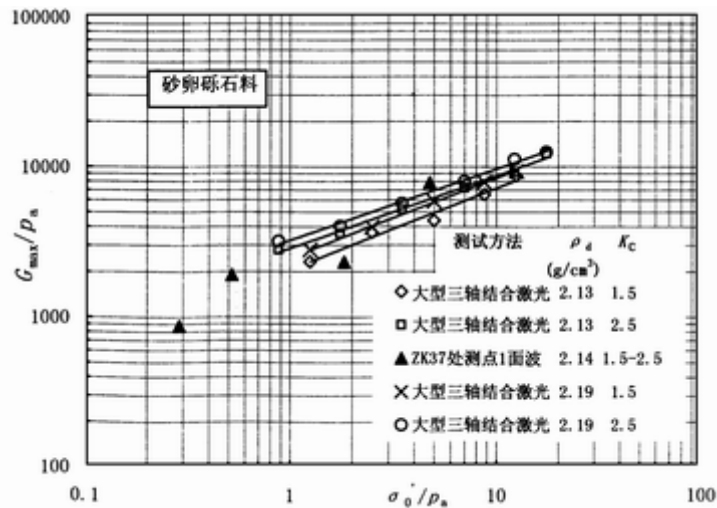


图4 波法试验 $G_{\max}/P_a - \sigma_0/P_a$ 关系曲线

图3给出ZK36和ZK37号钻孔跨孔波速试验的结果。可以看出, 在 $K_c=1.5 \sim 2.5$ ,  $\rho_d=2.14\text{g/cm}^3$ 的条件下,  $\sigma_0=400\text{kPa}$ 测点的 $G_{\max}$ 值和 $K_c=1.5$ ,  $\rho_d=2.13\text{g/cm}^3$ 的室内试验曲线相交;  $\sigma_0=500\text{kPa}$ 测点的 $G_{\max}$ 值和 $K_c=2.5$ ,  $\rho_d=2.19\text{g/cm}^3$ 的室内试验曲线相交;  $\sigma_0<300\text{kPa}$ 时, 所有测点的 $G_{\max}$ 值均稍高于室内试验曲线。这些测点的 $G_{\max}$ 值的起伏变化表明, 该场地覆盖层中影响土体 $G_{\max}$ 值的各种因素变化较大。从趋势看,  $G_{\max}$ 亦

随  $\sigma_3$  的增大而增大, 只是拟合曲线的斜率比室内试验曲线小。

图4给出在覆盖层土体中ZK37号钻孔处测点的面波法试验的结果。从图中可以看出,  $G_{max}$  随  $\sigma_3$  的增大呈现出波浪式的起伏变化, 显著地反映出覆盖层土体多变性和复杂性的特点,  $G_{max}$  随  $\sigma_3$  增大而增大的趋势和室内试验的结果基本一致。

#### 4 主要成果和讨论

由现场三种波速测试和室内试验获得的试验成果对比分析有以下结论: (1) 在较低压力下, 跨孔法得到的最大动剪模量测试结果稍高于室内试验获取的压力效应关系曲线; 而在较高压力情况下, 二者比较接近, 并随着压力的增高逐渐趋向一致。单孔法最大动剪模量的试验结果, 在较低压力下低于或接近于室内获取的压力效应关系曲线, 而在较高压力情况下, 大部分测试结果又高于室内的试验结果。面波法的试验结果, 基本上分布在室内试验结果的范围内或上下两侧。由于现场覆盖层地基工程地质条件的多变性和复杂性, 不同区域、不同部位、不同深度的测点经常会得到离散性较大的结果。但是, 现场三种波速测试方法都得出了和室内试验相同的规律, 即最大动剪模量随压力的增大而增大。(2) 现场各种波速的试验结果基本上分布在室内最大动剪模量压力效应关系曲线的附近, 因此只要合理的选择室内试验的级配、密度和应力等控制条件, 室内试验也能得出反映现场最大动剪模量大体分布趋势的结果。这表明对于深厚覆盖层土体, 在一定的条件下, 符合现场特定应力条件的压力效应关系曲线, 既可以通过室内试验获得, 也可以通过现场波速试验经过换算获得。因此在实际应用中应将这两类试验所取得的结果互相补充, 这样才可以得出更为合理的曲线和试验参数, 为动力反应分析提供更为可靠的依据。

#### 参考文献:

- [1] 阮元成. 坝体原状土的动剪模量[A]. 第三届全国土动力学学术会议论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [2] 阮元成. 渤海海底原状粘性土的动力变形特性[A]. 第四届全国土动力学学术会议论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
- [3] 国家电力公司西北勘测设计研究院, 新疆开都河察汗乌苏水电站工程. 深厚覆盖层地基上混凝土面板堆石坝关键技术研究[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 2001.
- [4] SL237-1999. 土工试验规程[S].
- [5] GBJ145-90. 土的分类标准[S].
- [6] 林万顺. 多道瞬态面波技术在水利及岩土工程勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2000, (4): 34-40.

### Comparative analysis on laboratory and field test of maximum dynamic shear modulus of overburden layers

RUAN Yuan-cheng, CHEN Ning, LIU Xiao-sheng, CHANG Ya-ping  
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 10044, China)

**Abstract:** The experimental result of maximum dynamic shear modulus by using large-scale cyclic triaxial testing machine equipped with laser strain measurement devices is compared with the field test data obtained from wave

velocity measurement. It shows that, under some specific conditions, the plot for pressure effect of maximum dynamic shear modulus obtained from experiment is approximately the same as the calculation result according to the wave velocity. It is suggested that, in practice, the adopted modulus must be determined by comprehensively considering the results obtained from experiment and field test.

**Key words:** thick overburden layer; maximum dynamic shear modulus; pressure effect