

# 微小应变下堆石料的变形特性

## Deformation characteristics of rockfill at small strains

孔宪京, 贾革续, 邹德高, 娄树莲, 韩国城  
(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 在土工三轴试验中应用一种微小应变测试装置——局部位移计, 不仅使试验精度提高了一个量级, 即达到  $0.001\%$  ( $10^{-5}$ ), 而且能够在一次试验中的同一个试样上准确而连续地量测  $10^{-6} \sim 10^{-1}$  应变范围内的变形特性。应用这种测试新技术, 着重研究了堆石料在微小应变下各种变形模量与应变水平或应力水平之间的相关性, 得出了一些有益的结论。

**关键词:** 局部位移计; 堆石料; 微小应变; 变形模量

**中图分类号:** TU 441; TV 641

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2001)01-0032-06

**作者简介:** 孔宪京, 男, 1952年生, 博士, 大连理工大学水工结构工程博士生导师。主要从事土工建筑物与地基工程方面的研究。

KONG Xian-jing, JIA Ge-xu, ZOU De-gao, LOU Shu-lian, HAN Guo-cheng

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The local displacement transducer (LDT) represents a latest measurement technique in triaxial test. The LDT can be used to increase the precision of strain to  $0.001\%$  ( $10^{-5}$ ) and to measure the deformation characteristics accurately and continuously in a strain range from less than  $0.001\%$  to  $1\%$  in a single test. This paper studies the relationships between modulus and strain level or stress level in a small strain range. Some beneficial conclusions are obtained.

**Key words:** local deformation transducer; rockfill; small strain; deformation modulus

## 1 前言\*

土的变形特性随土体中应变的大小而非线性地变化, 在土工建筑物与地基静、动变形预测和稳定分析中, 必须了解  $10^{-6} \sim 10^{-1}$  连续应变范围内的应力应变关系及其强度特性。但是常规土工试验测试精度通常的应变测试范围是  $10^{-4} \sim 10^{-1}$ , 满足不了对土体应力-应变特性深入研究中高精度的需要。为此, 国外许多学者在三轴试验设备和测试技术方面进行了许多有益的研究, 研制成功了不少各具特色的高精度大型三轴仪。如英国学者 Burland (1982)<sup>[1]</sup> 开发的电平式应变仪 (Electrolevel gauge); 美国学者 Clayton (1989)<sup>[2]</sup> 开发的高效半导体局部应变计; 日本学者 Goto 与 Tatsuoka (1991)<sup>[3~4]</sup> 开发的局部位移计 LDT 等等。这些微小应变测试装置的问世使室内土工试验精度产生了量的飞跃, 推动了土的应力-应变关系的深入研究<sup>[5~8]</sup>, 引起国际岩土学术界的重视。日本土质工学会新制定的地基土变形特性三轴试验规范<sup>[9]</sup> 明确规定: 对应变小于  $0.1\%$  的情况下, 应采用三轴压力室 (容器) 内测力和局部位移的方法。国内这方面的研究尚不多见。为了尽快缩小与国际先进水平的差距, 更好地开展岩土力学基础研究, 笔者等于 1995 年开始研制  $500 \text{ kN}$  级高精度大型液压伺服静动两用三轴仪, 并进行了一些初步研究<sup>[10~12]</sup>。该三轴仪压力室内增设了测力传感器和局部位移计 LDT (Local Displacement Transducer), 并与

常规位移传感器配合, 能够在同一试样上准确地测定  $10^{-6} \sim 10^{-1}$  连续应变范围内试样的应力和应变。

堆石料由于具有压实性高、透水性强、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程特性, 因此广泛地应用于土石坝等土工结构工程中。为适应堤坝等土工建筑物应力与变形分析的需要, 堆石料的应力-应变关系成为岩土力学研究的重要内容, 特别是复杂应力状态下堆石料的变形与强度特性以及堆石体的静、动力变形预测方法则是工程界十分关心的重要课题。笔者等利用最新研制的高精大型液压伺服静、动两用三轴仪, 对两个实际工程面板坝的五种筑坝堆石料进行了初步试验研究, 本文仅给出堆石料在微小应变下各种变形模量与应变水平、应力水平之间的相关性, 得出了一些有益的结论。有关堆石料的强度特性和动力变形特性的内容将另文发表。

## 2 局部位移计

### 2.1 局部位移计的工作原理<sup>[3]</sup>

常规三轴仪上的位移量测系统设置在压力室 (容器) 外, 测得的轴向位移值中包含着系统误差。主要有试样上、下两端部的端垫误差 (Bedding error) 和设备各

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (59639250); 国家教育部跨世纪人才基金资助项目 (教技厅 [1997] 2)

收稿日期: 2000-07-14

部件连接处可能产生的相对位移。其中端垫误差直接导致土试样变形的不均匀性,尤其是在轴向应变小于  $0.01\%$  ( $10^{-4}$ ) 时,这种误差不可忽略。

由局部位移计 LDT(Local Displacement Transducer)测定的轴向应变,完全排除了上述系统误差。图 1 是三轴仪工作简图(其中位于试样两侧有两个 LDT)。LDT 主体是一个高弹性薄磷铜片,中央两侧共贴有 4 片电阻应变片,组成惠斯登电桥(Wheatstone bridge)结构。试验前,一对 LDT 直接垂直对称地安置在试样两侧,通过调整上下支座的位置而使局部位移计呈一定的弯曲。实验时,土样的变形(支座两端距离的变化)由传感器中央部弯曲应变的变化测定。然后平均两侧 LDT 的输出值即为测定的局部轴向应变。由于 LDT 直接安置在试样上,上下支座和试样端部有一定的距离,测定的位移值即为支座范围内试样的真实变形。

局部位移计量程是 5 mm,试样高 600 mm,直径 300 mm。当 LDT 接近量程极限时,试样轴向应变水平接近  $1\%$  ( $10^{-2}$ ),系统误差的影响可以忽略。试样的变形可以由三轴仪压力室外常规位移传感器继续监测。

另外,常规三轴仪上的测力系统设置在压力室(容器)外的作动轴上,测得的荷载值中无法排除作动轴与轴套(线轴承)之间的摩擦力。只有当轴向应变大于  $0.1\%$  时,或许可以忽略该摩擦力对轴力的影响。笔者研制的三轴仪除了保留普通三轴仪的测力系统外,在压力室内还增设了自制的测力传感器,可以直接量测试样上的力,避免了作动轴与轴套间摩擦力产生的误差(参见图 1)。

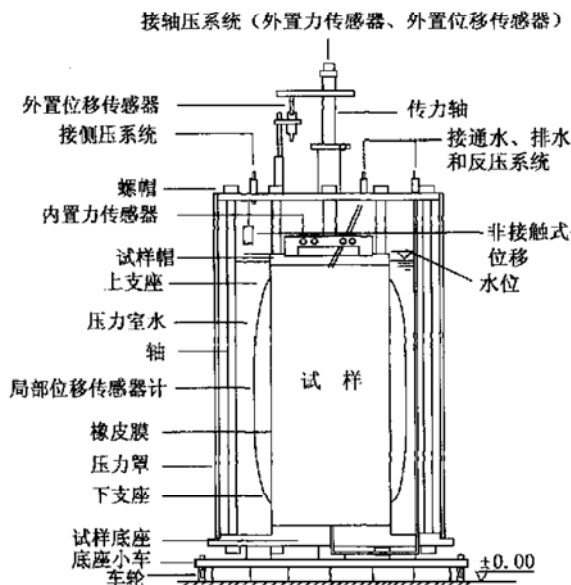


图 1 三轴仪构造简图

Fig. 1 The triaxial apparatus

## 2.2 局部位移计的标定

试样上下支座的相对位移与磷铜片表面弯曲应变的平方呈直线关系,如果磷铜片表面应变以输出电压形式来表示,按照抛物线法回归:

$$\Delta = av^2 + bv + c \quad (1)$$

式中  $\Delta$  是标定时上下支座间的距离变化;  $v$  是局部位移计变形后的输出电压。该三轴仪对所有试验数据的采集都是由微机完成的。其中左右两个局部位移计分别对应通道 9, 10。图 2(a), (b) 分别是通道 9 和 10 对应的 LDT-1 和 LDT-2 的标定曲线, 图中  $\bullet$  代表实测的标定点, 实线是回归线。

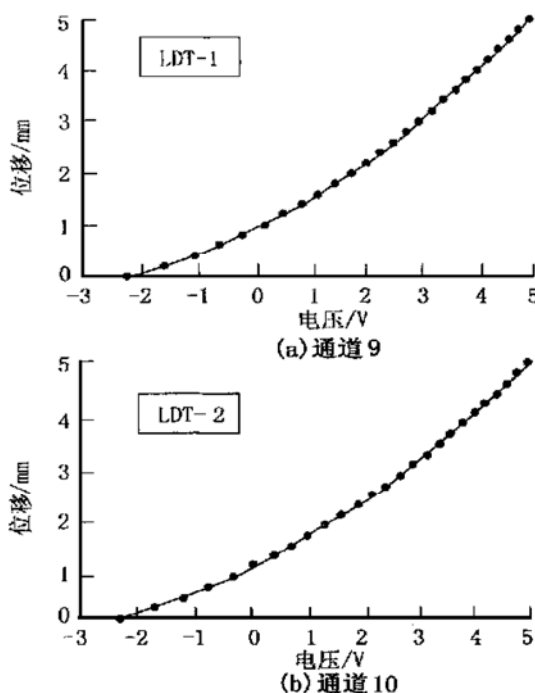


图 2 CH(9) 和 CH(10) 通道标定图

(局部位移计 LDT-1 和 LDT-2)

Fig. 2 The calibration of channel 9(LDT-1) and channel 10(LDT-2)

## 2.3 测试结果

图 3(a) ~ (d) 是该三轴仪测定的某石灰岩堆石料的偏应力  $q$  与轴向应力  $\epsilon_a$  的关系。为了便于比较, 图中同时绘出了外部位移传感器(普通三轴仪测试方法)和局部位移计测定的试验结果, 并将轴向应变从  $1\%$  逐级放大到  $0.001\%$ 。从图中可见:

(1) 用外部位移传感器的试验精度不超过  $10^{-4}$ , 而局部位移计测得的轴向应变接近  $10^{-6}$ , 使用局部位移计, 可使目前常规测试仪的测量精度提高至少一个数量级。

(2) 两种不同的方法测得的应力应变曲线存在着差别。当试样刚开始被压缩或者轴向应变较小时误差较大, 随着试样变形增大(大于  $0.1\%$ ), 二者误差减

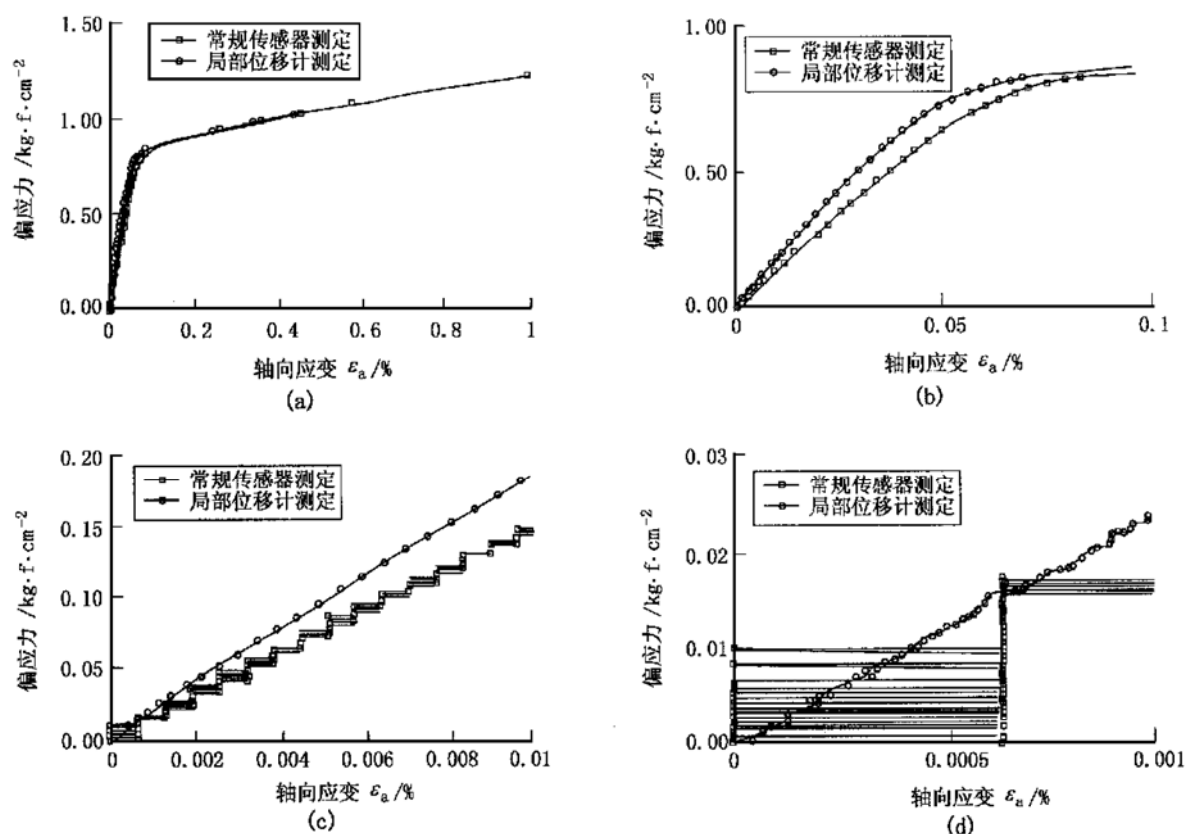


图3 同一试验中不同传感器测定的应力应变曲线

Fig. 3 Relationships between stress and strain measured conventionally and locally in the same test

小。分析其原因:一方面是因为两种传感器测试精度不同,常规位移传感器的精度远低于局部位移计,对试样微小变形的反应不够灵敏;另一方面,常规位移传感器位于三轴压力室外,通过量测作动器的位移而得到的轴向应变包含了土试样上、下端部与试样帽、底座(包括透水石)之间由于端部误差及密度不均匀等原因引起的误差。而采用局部位移计是直接设置在试样上的,且上、下两支座离试样端部有一定的距离。因此,局部位移计能够准确地量测到试样的真实变形。

### 3 变形模量的定义

土体的应力与应变分析,是土工建筑物设计中的重要内容,而模型参数(特别是变形模量)的测定和选取直接关系到分析结果的可靠性。为便于说明,本文定义的变形模量如图4所示,图中a点的变形模量分为割线模量与切线模量:

$$\text{割线模量(Secant modulus): } E_{\text{sec}} = \frac{q}{\varepsilon_a} \quad (2)$$

$$\text{切线模量(Tangent modulus): } E_{\text{tan}} = \frac{dq}{d\varepsilon_a} \quad (3)$$

式中  $q$  是偏应力,即  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ;  $\varepsilon_a$  是轴向应变;  $E_{\text{sec}}$  在微小应变时的最大值,表示为  $E_{\text{max}}$ ; 在初始应力应变关系中明显线性部分的斜率定义为初始模量  $E_{\text{ini}}$ 。当

应力应变曲线初始部分呈直线而且应变完全可恢复时,  $E_{\text{sec}} = E_{\text{tan}} = E_{\text{max}} = E_{\text{ini}}$ 。

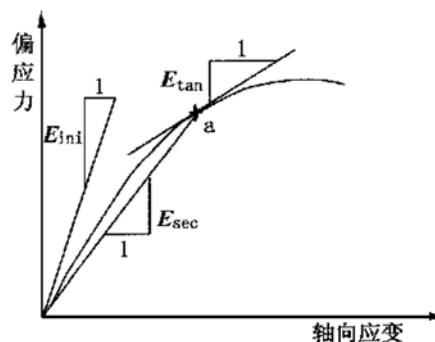


图4 变形模量定义图

Fig. 4 Definitions of different deformation modulus

### 4 变形模量的特性

针对新疆吉林台面板坝三种堆石料和贵州洪家渡面板坝两种堆石料,在高精度大型液压伺服动静两用三轴仪上,使用微小应变测试装置——局部位移计LDT和内置力传感器,对每一种堆石料都进行了三种围压(100 kPa, 300 kPa, 500 kPa)下的静力压缩固结排水试验,并着重研究了各个变形模量之间、模量与应力水平、应变水平之间的相关性。

表1给出5种坝料的试验控制干密度。

表 1 试样控制干密度

Table1 The dry density of specimens

| 试样       | 新疆吉林台 |      |      | 贵州洪家渡 |      |
|----------|-------|------|------|-------|------|
|          | 主堆石料  | 过渡料  | 垫层料  | 主堆石料  | 过渡料  |
| $\rho_d$ | 1.95  | 2.02 | 2.18 | 1.97  | 2.03 |

#### 4.1 变形模量的应变相关性

图 5、6 是吉林台主堆石料割线模量  $E_{sec}$ 、切线模量  $E_{tan}$  在不同围压  $\sigma_3$  下随轴向应变变化的关系曲线, 分别由局部位移计 LDT 和外部常规应变装置 EXT 测定。

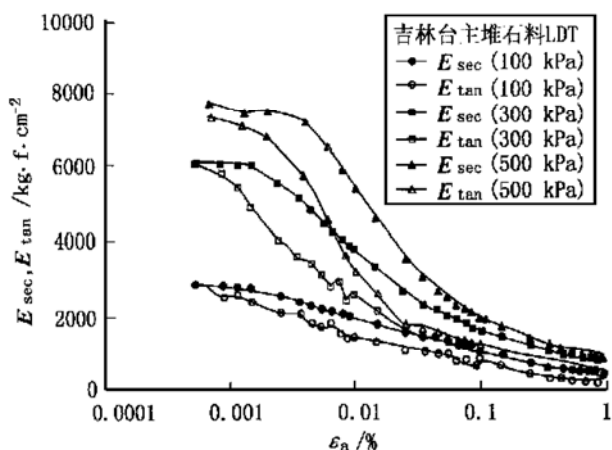


图 5 吉林台主堆石料变形模量与轴向应变关系曲线  
(局部位移计 LDT 测定)

Fig. 5 Relationships between modulus and strain level  
(Jilintai main rockfill, measured locally)

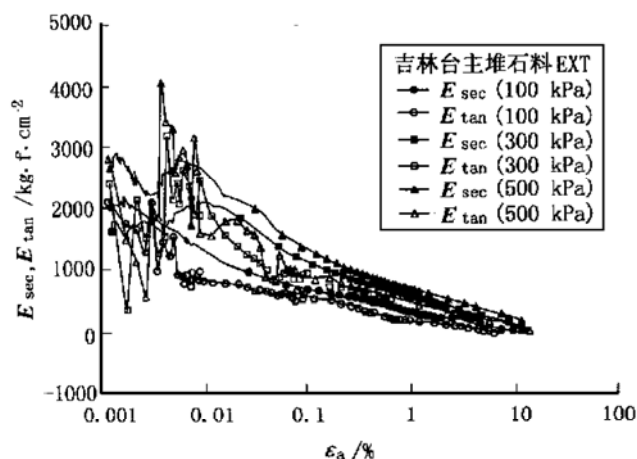


图 6 吉林台主堆石料变形模量与轴向应变关系曲线  
(外部常规位移传感器 EXT 测定)

Fig. 6 Relationships between modulus and strain level  
(Jilintai main rockfill, measured conventionally)

从图中结果可以看出:

(1) 同一围压下, 两图中的  $E_{sec}$  和  $E_{tan}$  随着轴向应变的增加而呈下降趋势。当轴向应变小于 0.001% ( $10^{-5}$  量级) 时, 割线模量和切线模量的数据点趋于一常值, 即对应于相应围压下的初始模量  $E_{ini} = E_{sec} = E_{tan} = E_{max}$ 。

(2) 当轴向应变进入非弹性区域后, 随着轴向应变的不断增加,  $E_{sec}$  和  $E_{tan}$  的值不断减小, 对应曲线上具体的一点,  $E_{sec}$  总是大于  $E_{tan}$ 。最后二者都到达各自的最小值, 其中切线模量  $E_{tan}$  趋近于 0。

(3) 在不同围压条件下的试验表明,  $E_{sec}$  和  $E_{tan}$  都随着围压值的增加而增加。即对于一定的应变水平, 高围压下的模量值总是大于低围压下的模量值。

(4) 图 6 是由外部常规位移传感器测得的实验结果。由此可见, 数据点在轴向应变小于 0.1% ( $10^{-3}$  量级) 时离散性很大, 前述的一些结论在图 6 中难以看出。这表明外部常规位移传感器在小应变范围内的精度很差。因此, 本文后续讨论中未使用这部分的试验数据。

为了定量地研究切线模量、割线模量随着应变水平衰减程度的规律, 图 7 绘出了吉林台主堆石料割线模量与切线模量的差值 ( $E_{sec} - E_{tan}$ ) 在不同围压  $\sigma_3$  下随全程轴向应变变化的关系曲线, 图中实心点由微小应变测试装置 LDT 测定, 空心点由外部常规位移传感器 EXT 测定。

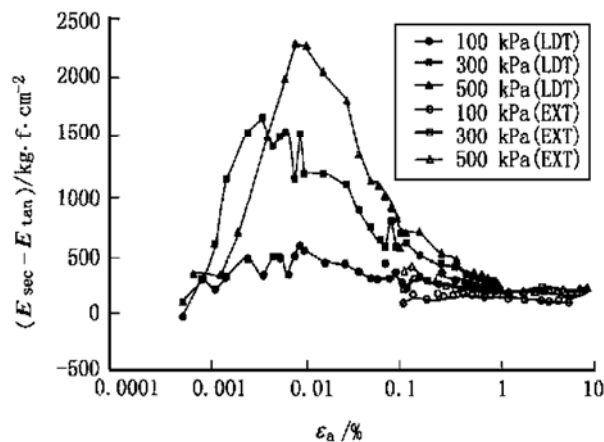


图 7 吉林台主堆石料 ( $E_{sec} - E_{tan}$ ) 与轴向应变的关系曲线

Fig. 7 Relationships between ( $E_{sec} - E_{tan}$ ) and strain level  
(Jilintai main rockfill, measured conventionally and locally)

由此可知:

(1) 当轴向应变小于 0.001% ( $10^{-5}$  量级) 时, 割线模量和切线模量的差值数据点在零值附近离散, 趋近于零。这从另外一个角度又说明了材料在线弹性范围内, 各个模量相等,  $E_{sec} = E_{tan} = E_{ini}$ 。

(2) 当应变水平进入塑性区域, 在 LDT 测定的 0.001%~1% 量程内 ( $10^{-5}$ ~ $10^{-2}$  量级), 割线模量与切线模量的差值 ( $E_{sec} - E_{tan}$ ) 呈明显的波峰形状, 而且受围压的影响, 围压增加, 起伏的程度增大。

(3) 五种筑坝堆石料, 模量差值 ( $E_{sec} - E_{tan}$ ) 几乎都在应变水平 0.01% 附近 ( $10^{-4}$  量级) 达到峰值, 这也

许可以说明当应变水平超过 0.01% 后, 堆石材料开始进入较明显的塑性变形, 切线模量显著减小。

(4) 在 0.001% ~ 1% 量程内 ( $10^{-5} \sim 10^{-2}$  量级),  $E_{\text{sec}}$  和  $E_{\text{tan}}$  逐渐变小。但在 0.001% ~ 0.01% 区域, 切线模量  $E_{\text{tan}}$  的衰减幅度要大于割线模量, 所以呈现模量差值随轴向应变的增加而增加; 在应变水平接近 0.01% 时, 即应力应变曲线的曲率达到最大值后, 模量差值随轴向应变的增加而减小, 最后在 1% 附近趋于稳定。

(5) 割线模量与切线模量的差值 ( $E_{\text{sec}} - E_{\text{tan}}$ ) 受围压的影响。当应变水平一定时, 围压高, 模量差值大。

(6) 在应变水平 1% 至破坏阶段,  $E_{\text{sec}}$  和  $E_{\text{tan}}$  逐渐变小。其中切线模量  $E_{\text{tan}}$  的衰减幅度要稍大于割线模量, 所以呈现模量差值随轴向应变的增加而增加。但是这种趋势不是十分明显, 曲线走向平缓或稍微上扬。

综合局部位移计和常规位移传感器测定的试验曲线, 割线模量与切线模量的差值 ( $E_{\text{sec}} - E_{\text{tan}}$ ) 与应变水平变化的关系特征是: 试样在线弹性范围内时 (轴向应变小于 0.001%), 差值是零, 即模量相等,  $E_{\text{sec}} = E_{\text{tan}} = E_{\text{ini}}$ ; 当应变水平进入塑性区域, 在 0.001% ~ 1% 量程内, 差值 ( $E_{\text{sec}} - E_{\text{tan}}$ ) 呈明显的波峰形状, 而且受围压的影响, 高围压时起伏的程度增加; 应变水平从 1% 至破坏阶段, 差值 ( $E_{\text{sec}} - E_{\text{tan}}$ ) 随着轴向应变的增大略有增长的趋势。

4.2 变形模量的应力相关性

图 8、9 是吉林台主堆石料割线模量比  $E_{\text{sec}}/E_{\text{max}}$ 、切线模量比  $E_{\text{tan}}/E_{\text{max}}$  在不同围压  $\sigma_3$  下随应力水平或偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  的变化关系曲线, 图 8 和图 9 分别由微小应变装置 LDT 和外部常规应变装置 EXT 测定。为了消除围压的  $\sigma_3$  影响, 对变形模量进行了归一化处理。

(1) 偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  小于 0.005 时,  $E_{\text{sec}}/E_{\text{max}}$  和  $E_{\text{tan}}/E_{\text{max}}$  的值几乎都在 1.0 左右离散。由此表明土样在线弹性范围内, 即  $E_{\text{ini}} = E_{\text{sec}} = E_{\text{tan}}$ 。

(2) 偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  在 0.005 至 0.1 之间,  $E_{\text{sec}}/E_{\text{max}}$  和  $E_{\text{tan}}/E_{\text{max}}$  均随着偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  的增大而显著降低。当  $q/q_{\text{max}} \rightarrow 1$ , 即土样接近破坏时, 切线模量  $E_{\text{tan}} \rightarrow 0$ 。

(3) 偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  大于 0.1 时, 尽管随偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  增大,  $E_{\text{sec}}/E_{\text{max}}$ 、 $E_{\text{tan}}/E_{\text{max}}$  曲线仍在继续下降, 但从趋势上看, 此时趋于平缓。

(4) 偏应力比  $q/q_{\text{max}}$  大于 0.5 时,  $E_{\text{sec}}/E_{\text{max}}$ 、 $E_{\text{tan}}/E_{\text{max}}$  的衰减明显减小。表 2 至表 6 分别列出了吉林台主堆石料、过渡料、垫层料和洪家渡主堆石料、过渡料

在不同围压下各个模量在 50% 应力水平时衰减量。(表中  $E_{50}$  代表 50% 应力水平时对应的模量值。) 从表中数据可以看出: 无论是割线模量还是切线模量, 高围压条件下的模量衰减率比低围压时的模量衰减率高, 模量衰减几乎达到或超过最大模量的 90%, 且切线模量的衰减率高于割线模量。由此可以说明, 当应力水平接近或超过 0.5 时, 堆石料有明显破碎迹象, 呈现较大的塑性变形。在高围压条件下, 上述现象尤为明显。

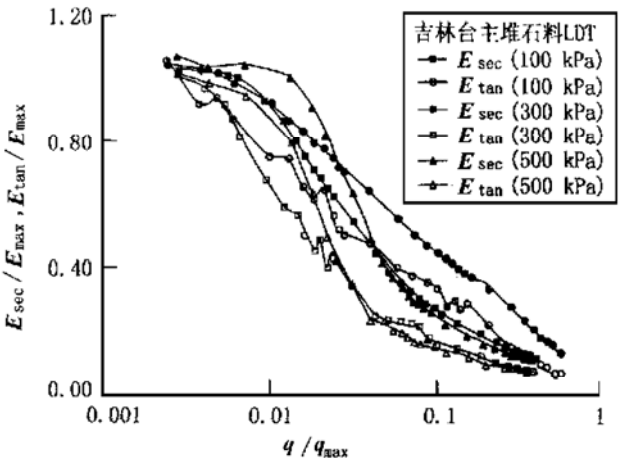


图 8 吉林台主堆石料变形模量与偏应力比关系曲线 (局部位移计 LDT 测定)

Fig. 8 Relationships between modulus and stress level (Jilintai main rockfill, measured locally)

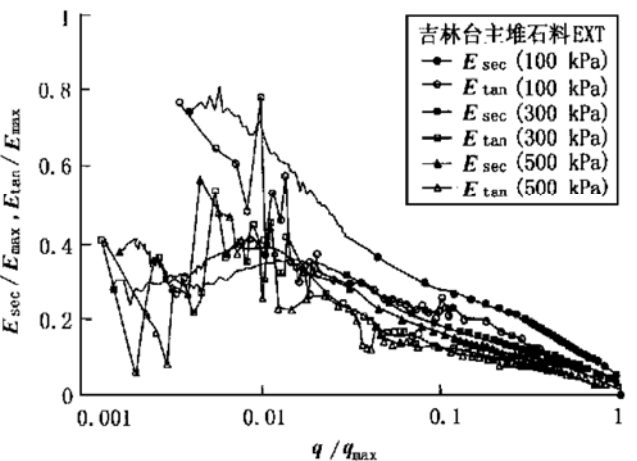


图 9 吉林台主堆石料变形模量与偏应力比关系曲线 (外部常规位移传感器 EXT 测定)

Fig. 9 Relationships between modulus and stress level (Jilintai main rockfill, measured conventionally)

表 2 变形模量衰减表 (吉林台主堆石料)

| 围 压     | $E_{\text{sec}}$        |        | $E_{\text{tan}}$        |        |
|---------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
|         | $E_{50}/E_{\text{max}}$ | 衰减量/ % | $E_{50}/E_{\text{max}}$ | 衰减量/ % |
| 500 kPa | 0.081                   | 91.9   | 0.051                   | 94.9   |
| 300 kPa | 0.084                   | 91.6   | 0.049                   | 95.1   |
| 100 kPa | 0.129                   | 87.1   | 0.076                   | 92.4   |

表 3 变形模量衰减表(吉林台过渡料)

Table 3 Attenuation of deformation modulus  
(Jilintai, transition rockfill)

| 围 压     | $E_{sec}$        |        | $E_{tan}$        |        |
|---------|------------------|--------|------------------|--------|
|         | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % |
| 500 kPa | 0.080            | 92     | 0.054            | 94.6   |
| 300 kPa | 0.090            | 91     | 0.058            | 94.2   |
| 100 kPa | 0.125            | 87.5   | 0.064            | 93.6   |

表 4 变形模量衰减表(吉林台垫层料)

Table 4 Attenuation of deformation modulus  
(Jilintai, padding rockfill)

| 围 压     | $E_{sec}$        |        | $E_{tan}$        |        |
|---------|------------------|--------|------------------|--------|
|         | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % |
| 500 kPa | 0.131            | 86.9   | 0.102            | 89.8   |
| 300 kPa | 0.123            | 87.7   | 0.089            | 91.1   |
| 100 kPa | 0.135            | 86.5   | 0.087            | 91.3   |

表 5 变形模量衰减表(洪家渡主堆石料)

Table 5 Attenuation of deformation modulus  
(Hongjiadu, main rockfill)

| 围 压     | $E_{sec}$        |        | $E_{tan}$        |        |
|---------|------------------|--------|------------------|--------|
|         | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % |
| 500 kPa | 0.08             | 92     | 0.06             | 94     |
| 300 kPa | 0.12             | 88     | 0.09             | 91     |
| 100 kPa | 0.15             | 85     | 0.10             | 90     |

表 6 变形模量衰减表(洪家渡过渡料)

Table 6 Attenuation of deformation modulus  
(Hongjiadu, transition rockfill)

| 围 压     | $E_{sec}$        |        | $E_{tan}$        |        |
|---------|------------------|--------|------------------|--------|
|         | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % | $E_{50}/E_{max}$ | 衰减量/ % |
| 500 kPa | 0.062            | 93.8   | 0.038            | 96.2   |
| 300 kPa | 0.072            | 92.8   | 0.039            | 96.1   |
| 100 kPa | 0.121            | 87.9   | 0.079            | 92.1   |

## 5 结 论

近年来,高精度微小应变测试装置的开发和研制引起了国内外许多专家学者的极大兴趣并取得了一些引人注目的成果,笔者等研制的大型液压伺服控制静动两用三轴仪引入了这一先进测试技术。测试结果表明,使用局部位移计和三轴压力室增设的内置力传感器具有很高的测试精度,使目前常规测试仪测量精度提高了至少一个数量级。

应用这一测试新技术,对堆石料的变形特性进行了初步研究。根据试验成果分析,主要得出以下结论:

(1) 试验结果分析表明,堆石料在应变水平(轴向应变  $\epsilon_a$ ) 小于 0.001% 或在应力水平(偏应力比  $q/q_{max}$ ) 小于 0.005 时具有明显的线弹性性质。

(2) 在同一应变水平下,割线模量  $E_{sec}$  总比切线模量  $E_{tan}$  高,两者之差( $E_{sec} - E_{tan}$ ) 随着轴向应变变化,而且受围压的影响;轴向应变在 0.001% ~ 1% 范围内

两者之差呈波峰状,并在 0.01% 时达到最大值。

(3) 无论是割线模量比还是切线模量比  $E_{sec}/E_{max}$  均随应力水平(偏应力比)  $q/q_{max}$  增加而减小。应力水平在 0.005 至 0.1 之间,模量比衰减显著,应力水平大于 0.1 后,衰减趋势趋于平缓,应力水平大于 0.5 后,模量衰减几乎达到或超过最大模量的 90%。试验结果还表明,高围压条件下的模量衰减率比低围压时的模量衰减率高,其主要原因是堆石料有明显破碎迹象,呈现较大的塑性变形。

## 参考文献:

- [1] Burland J B, Symes M J. A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus[ J]. Geotechnique, 1982, 32( 1): 62~ 65.
- [2] Clayton C R I, Khattrush S A, Bica A, Siddique A. The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation [ J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1989, 12( 1): 69~ 76.
- [3] Goto S, Tatsuoka F, et al. A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory[ J]. Soils and Foundations, 1991, 31( 1): 169~ 180.
- [4] Tatsuoka F, Shibuya S, Goto S, Sato T, Kong X J. Discussion on "The Use of Hall Effect Semiconductors on Geotechnical Instrumentation" by C. R. I. Clayton, et al[ J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1990, 13( 1): 63~ 65.
- [5] Tatsuoka F, Shibuya S. Deformation characteristics of soil sand rocks from field and laboratory tests[ A]. Keynote Lecture, 9th Asian Regional Conf On SMFE: Vol II[ C]. Bangkok, 1991. 101 ~ 170.
- [6] Kong X J, Tatsuoka F, et al. Effect of cyclic prestraining on deformation characteristics of a crushed sandstone[ J]. SEISAN - KENKYU, 1992, 44( 6): 16~ 26; 44( 8): 8~ 14.
- [7] Shibuya S, Tatsuoka F, Teachavorasinskun S, Kong X J, et al. Elastic deformation properties of geomaterials[ J]. Soils and Foundations, 1992, 32( 3): 26~ 46.
- [8] Shibuya S, Kong X J, et al. Deformation characteristics of gravels subjected to dynamic and static loadings[ A]. Proc of the Eight Japan Earthquake Symposium[ C]. Tokyo, 1990. 771~ 776.
- [9] 日本土質工學會基準案. 地盤材料の變形特性を求めめるための性返し三軸試験案[ J]. 土と基礎, 1994. 42( 7).
- [10] 孔宪京, 韩国城, 姜树莲, 张金库. 土工试验新技术研究[ A]. 辽宁省第二界青年学术年会论文集[ C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995. 222~ 225.
- [11] 张金库, 孔宪京, 姜树莲. 固结排水条件下粗粒料动残余变形[ A]. 第二届全国青年岩土力学与工程会议论文集, 岩土力学与工程[ C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995.
- [12] 孔宪京, 韩国城, 姜树莲, 等. 高精度大型液压伺服静、三轴仪研制报告[ R]. 大连: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 1997.