

石灰岩人工砂的动剪模量和阻尼比

俞培基 梁永霞 秦蔚琴

(水利水电科学研究院抗震所, 北京)

一、前 言

有大量文献报导过关于砂土的动剪模量和阻尼比的试验研究工作^[1-3], 所试验砂样主要是标准砂和天然砂, 所用仪器或是动三轴仪, 或是共振柱仪配合动扭剪仪。由于仪器的局限性, 要得到应变幅自 10^{-8} 至 10^{-2} 范围内的完整资料, 通常需要联合使用两种仪器。由于条件限制, 以往在国内只能以应力-应变的双曲线关系为前提整理动三轴试验资料, 以延伸应变幅的范围。近年来, 随着共振柱仪的推广, 它与动三轴仪的联合使用已受到关注^[4,5]。

本文报导了使用共振柱仪并配合动三轴仪, 研究一种石灰岩人工砂的动剪模量和阻尼比的试验结果; 讨论了固结应力、剪应变幅、先期压密和固结时间等因素的影响, 说明了这种人工砂的特性。笔者认为联合使用两种仪器, 结果是令人满意的。

二、试验砂样与试验方法

试验的鲁 I 砂是经过筛选的白云质石灰岩人工砂。其颗粒级配见表 1, 按级配定名为含少量砾的粗砂。它的矿物成分主要是碳酸盐矿物, 这是它与天然砂或标准砂的截然不同之处; 它的另一特点是颗粒都带尖锐棱角。这种砂是正在施工中的云南鲁布革堆石坝的 I 层反滤料用料。

表1 鲁 I 砂 的 级 配

粒 径 (mm)	5—2	2—0.5	0.5—0.1	<0.1
含 量 (%)	6.6	52.6	36.8	4.0

鲁 I 砂的最大与最小孔隙比分别为0.79与0.34。根据设计相对密度75%确定试样的制备干容重为 18.05kN/m^3 , 制备偏差 $\pm 0.2\text{kN/m}^3$ 。试样分五层制备, 每层单独配料以保证均匀性, 用敲击对开模振密试样, 用真空法饱和试样, 并施加反压力 196kPa 。

试验使用DTC-158-1型共振柱仪与DSZ-100型动三轴仪, 试样尺寸分别为 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 和 $\phi 38 \times 100\text{mm}$ 。试验前对仪器进行了标定。特别要提出的是, 对动三轴仪标定了仪器本身(包括量测系统的影响在内)的变形模量和阻尼比; 将仪器本身看作一个与土试样串联受力的理想粘弹体, 根据标定曲线修正实测的动三轴试验结果, 以去除仪器变形和阻尼的影响, 得出土样自身的模量和阻尼比。试验参照《美国试验与材料协会岩土工程试验标准, ASTM,

D4015-81^[6]和《水利电力部土工试验规程, 1059-79^[7]》进行。针对堆石坝反滤料的情况, 进行了干样、饱和样两大组试验, 各包括两个固结主应力比和 3—5 个侧压力, 侧压力范围 49—980 kPa。除了研究次固结效应的试验外, 其余试验的固结时间均为一小时。

共振柱试验测得的是动剪模量 G 和剪应变幅 γ , 而动三轴试验测得的是动力杨氏模量 E 和轴应变幅 ϵ 。在汇总两种试验结果时, 采用弹性力学公式, $G = 0.5E/(1 + \mu)$ 和 $\gamma = (1 + \mu)\epsilon$, 换算动三轴试验结果。式中 μ 为试样的动泊松比, 对于饱和样取 $\mu = 0.5$; 对于干样参照现场波速测试的一些有关资料, 取 $\mu = 0.3$ 。对于动三轴试验, 比较过第 1, 5, 10 周的试验结果, 发现随着荷载作用周次增加, 应变幅和阻尼比有所增大, 模量有所减小, 但是, 对于整理模量与阻尼比两者对应变的关系的影响很小。在汇总试验结果时, 统一采用了第 10 周的动三轴试验结果。

三、试验结果与讨论

(一) 最大动剪模量 $G_{\max}$ 与固结应力的关系

图 1 给出了 $G_{\max}$ (相应的剪应变幅为 2.5×10^{-3}) 与固结应力的关系。固结应力用在振动与波传播平面内作用的有效主应力的平均值 $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ 表示^[8], 它与 $G_{\max}$ 的关系可以表示为下式:

$$G_{\max} = CP_a^{1-n} \left(\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \right)^n = CP_a \left(\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2P_a} \right)^n \quad (1)$$

式中引进大气压力 P_a 使系数 C 成为无因次, P_a 与 $G_{\max}$, σ_1' 和 σ_3' 均应采用同一单位。经过回归分析得出, 对于鲁 I 砂干样 ($S_r = 0$), $C = 1345$, $n = 0.59$; 对于饱和样 ($S_r = 100\%$, 在图 1 中未绘出试点), $C = 1520$, $n = 0.56$ 。饱和样的 $G_{\max}$ 大于干样的 4—11%, 其差值随应力增大而减小, 其原因很可能是由于在饱和状态下固结时间的影响较大 (参见下文)。图 1 还表明, 固结主应力比 $K_c = 2.0$ 与 $K_c = 1.0$ 的试验结果十分相接近。

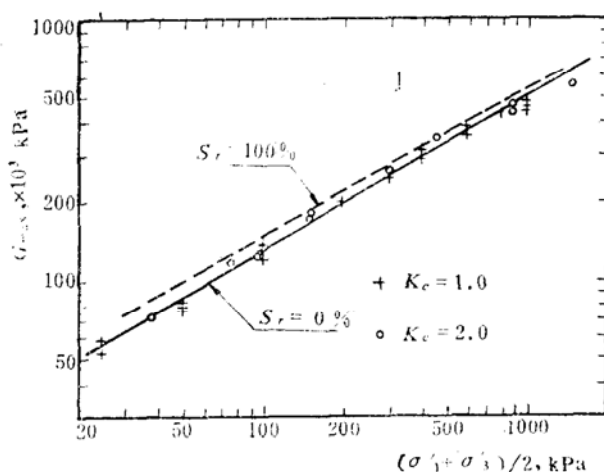


图 1 最大动剪模量与固结应力的关系

通常用于确定砂土 $G_{\max}$ 的经验公式主要有西特 (H. B. Seed) 公式^[1] 和哈定 (B. O. Hardin) 公式^[3]。这两个经验公式与鲁 I 砂试验结果的对比见图 2。两个经验公式所依据的试验资料的固结应力只达到 400 kPa 左右。在应力小于该值时, 试验值与经验公式大致相近,

虽然鲁 I 砂的矿物成分与建立经验公式所使用的标准砂的矿物成分完全不同。对于更高的应力值, 经验公式给出的值偏低。初步看来, 砂土颗粒矿物成分不同对 $G_{\max}$ 的影响似乎并不突出。需要说明的是, 这里所比较的试验结果是相应于固结时间为 60min 的情况, 由于鲁 I 砂存在明显的次固结效应, 固结时间增长将使 $G_{\max}$ 增大, 而使经验公式估算的值偏低(见下文)。

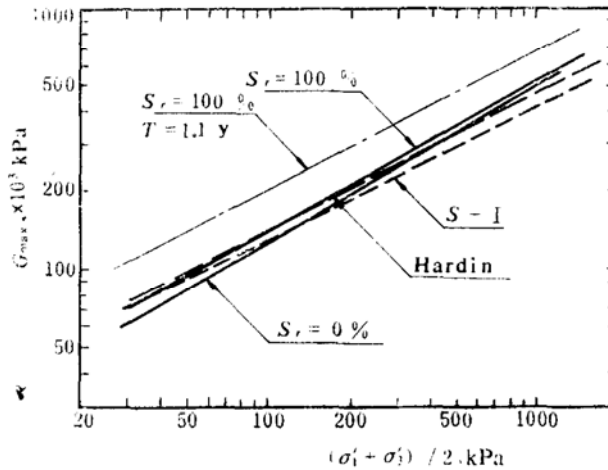


图2 试验结果与经验公式的比较

(二) 剪应变幅的影响

共振柱试验的剪应变幅范围是 10^{-6} — 10^{-3} , 动三轴试验结果经换算后的剪应变幅范围是 10^{-4} — 10^{-2} , 汇总两种试验资料, 得到鲁 I 砂的动剪模量比 $G/G_{\max}$ 与阻尼比 D 随剪应变幅 γ 变化的完整的关系, 图3给出了一组代表性的结果。图中, R.C. 表示共振柱试验, D.T. 表示动三轴试验, 两种试验结果的衔接是令人满意的。

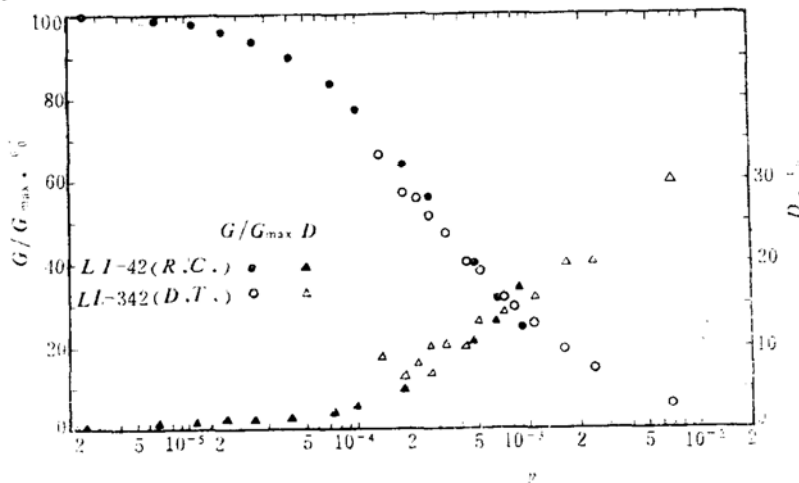


图3 两种试验结果的衔接 ($S_r = 100\%$, $K_c = 1.0$, $\sigma'_3 = 294 \text{ kPa}$)

图4给出两组共振柱试验的结果表明, 干样和饱和样的差别不大, 但是固结应力的影响却十分明显。在图中绘出的标以 S-I 的曲线是西特汇总了多种砂土的试验资料后所给出的范围值^[1]。这里, 只是一种鲁 I 砂在不同应力下的试验结果就超出了该范围。虽然哈定早就指出固结应力对动剪模量衰减曲线存在影响, 并建议引进参考剪应变 γ_r 使不同应力的试验曲线

归一化^[3],但是,可能由于固结应力的变化范围通常不大,这一影响长期以来未受到重视。直到最近西特才认为,在进行土体的精确动力反应分析时采用一组动剪模量衰减曲线是较为合适的^[2]。图4的资料表明,对于像鲁布革堆石坝这样高坝的坝料,只用一对 $G/G_{\max}$ - γ 和 D - γ 曲线来代表各种固结应力会带来较大的误差。

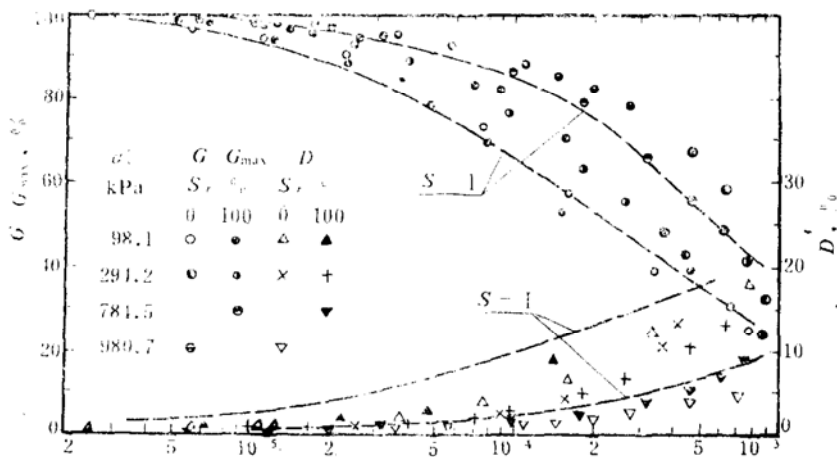


图4 两组共振柱试验结果

引进参考剪应变 γ_r 对试验结果进行了整理, γ_r 由式(2)定义^[8]。

$$\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left[\frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi' \right]^2 - \left[\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right]^2} \quad (3)$$

式中 c' 和 ϕ' 为有效强度指标,对鲁I砂取 $c' = 0$, $\phi' = 43.5^\circ$ 。图5绘出了 $K_c = 1.0$, $S_r = 100\%$ 的经过整理的资料,可见用 γ/γ_r 作为横坐标,不仅如哈定所指出的那样使 $G/G_{\max}$ 曲线得到了归一化,同时也使阻尼比曲线得到了归一化。图5中同时绘出了 $K_c = 2.0$ 的曲线(试点未绘出),主应力比 K_c 增大使两条曲线都向右移动。

哈定指出过,土的动应力-动应变关系并不符合简单双曲线关系,并建议了应用如式(4)的修正双曲线关系^[3]。

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma_h) \quad (4)$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} (1 + ae^{-b\gamma/\gamma_r}) \quad (5)$$

当式(5)中的系数 a 等于零或 b 等于无穷大时,式(4)成为习用的简单双曲线关系。用式(4)对鲁I砂的资料适线得到,当 $K_c = 1.0$ 时, $a = 1.1$, $b = 0.16$; 当 $K_c = 2.0$ 时, $a = 0.7$, $b = 0.4$ 。这些系数值表明,当考虑在完整的剪应变幅范围(10^{-5} — 10^{-2})内的试验资料时,土的应力-应变关系并不符合简单双曲线关系。如果只依据某一段应变幅范围内的试验资料,用简单双曲线关系加以延伸,则可能得出很不相同的结果,并带来较大的误差。文献[4]关于由动三轴试验结果推算的土的动压缩模量值与共振柱试验结果相差颇大的结论,从另一侧面证明了这一点。文献[3]建议的对于洁净干砂的曲线($a = 0.5$, $b = 0.16$)也在图5中绘出,标为H-D,它显著高于鲁I砂的实测曲线。

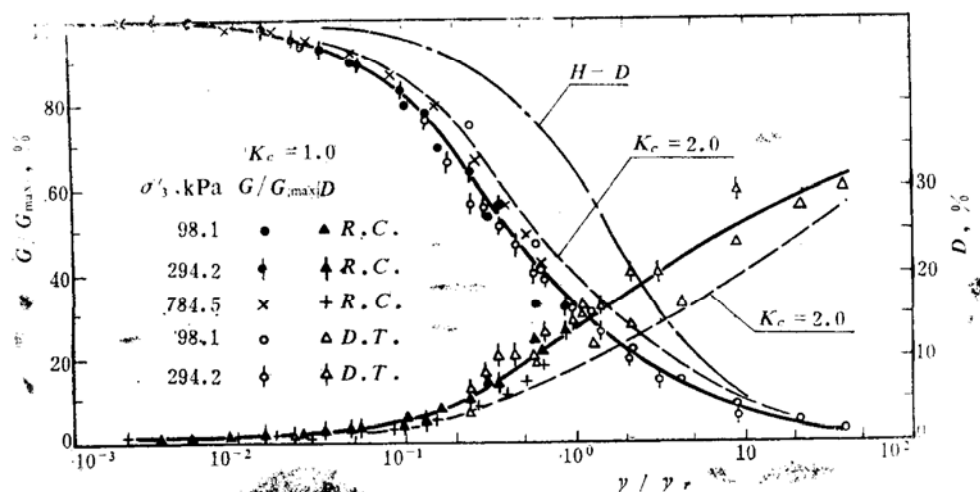
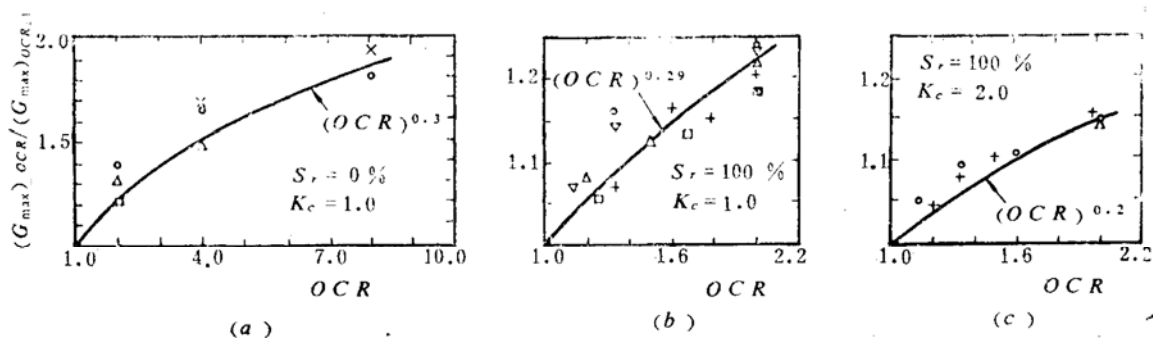


图5 归一化的动力变形特性曲线

(三) 先期压密的影响

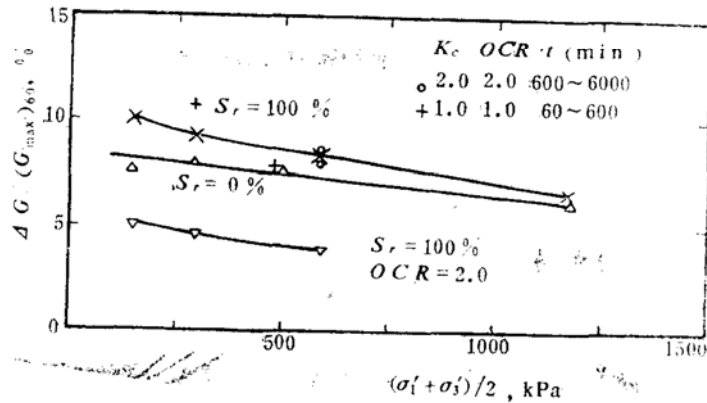
对于土石坝来说, 由于水库水位升高就会使浸润线以下的坝体处于有先期压密的状态。通常认为, 先期压密对散粒土的 $G_{\max}$ 没有影响^[3]。但是, 对于鲁 I 砂, 先期压密的影响却相当显著, 见图 6。图 6 的横坐标 OCR 为超压密比, 定义为试样历史上受到过的二维平均有效主应力的最大值与现有值之比; 纵坐标是超压密比为 OCR 时的 $G_{\max}$ 与承受同样应力条件但 OCR = 1.0 时的 $G_{\max}$ 的比值。像对于粘性土一样, 用 $(OCR)^K$ 项考虑先期压密对 $G_{\max}$ 的影响^[8], 对于鲁 I 砂得到, 当 $K_c = 1.0$ 时, $K = 0.29 - 0.30$; 当 $K_c = 2.0$ 时, $K = 0.20$ 。与粘性土的试验资料相比, 鲁 I 砂的 K 值与塑性指数为 40 左右的粘性土的 K 值相当。

图6 先期压密对 $G_{\max}$ 的影响

(四) 固结时间的影响

固结时间(或次固结效应)对 $G_{\max}$ 的影响通常用 $\Delta G / (G_{\max})_t$ 表示, $(G_{\max})_t$ 为在完成主固结后的某一时间 t (min) 的 $G_{\max}$, ΔG 为在时间 t 后每一对数循环时间 (min) 内的 $G_{\max}$ 增量, 对于洁净砂土, $\Delta G / (G_{\max})_{1000}$ 不大于 1—3 %^[9]。但是, 对于鲁 I 砂, 固结时间的影响要大得多。

以固结时间 60 min 为标准, 整理出固结时间对鲁 I 砂 $G_{\max}$ 的影响, 其结果绘于图 7。在图 7 所绘出的试点中, 除去注明的以外, 都是由 $K_c = 2.0$, 总固结时间为 600 min 的试验得出的。图 7 表明, $\Delta G / (G_{\max})_{60}$ 值随固结应力增大而减小, 变化于 10—6 %; 干样的值稍低

图7 固结时间对 $G_{\max}$ 的影响

于饱和样的值,两者的差值也随固结应力增大而减小。前文提到的干样与饱和样两者 $G_{\max}$ 的差别,看来是与固结时间影响的差别相关联的。哈定曾报导过一种通过400号筛的石英粉的试验资料^[10],它的 $\Delta G/(G_{\max})_{60}$ 值据估算约为6%(固结应力约为120kPa)。那种石英粉同鲁I砂一样是角粒的,它的粒径比鲁I砂的细得多,但固结时间的影响却不如鲁I砂的大,看来是由于两者颗粒的矿物成分不同所造成的。

在确定了固结时间对 $G_{\max}$ 的影响后,就可以考虑现场与室内固结时间的差别,以估算现场土体的 $G_{\max}$ ^[9]。经整理试验资料后得出,对于鲁I砂的饱和砂体,式(1)中的系数, $C = 1520 + 139F_A$, $n = 0.56 - 0.01F_A$; 对于干砂体, $C = 1345 + 107F_A$, $n = 0.59 - 0.007F_A$ 。这里 $F_A = \log(T/t)$, T 与 t 分别为现场与室内试验固结时间。由于 $t = 60\text{min}$, $F_A = 4$ 相当于 $T = 1.1$ 年,与这一时间相应的 $G_{\max}$ 与固结应力的关系也在图2中绘出,可见固结时间对鲁I砂 $G_{\max}$ 的影响不容忽视。

从图7还可以看到,对于超压密比 $OCR = 2.0$ 的情况,虽然固结时间自600min至6000min的 $\Delta G/(G_{\max})_{60}$ 与 $OCR = 1.0$ 时的值十分相近,但是固结时间等于60至600min的 $\Delta G/(G_{\max})_{60}$ 要比 $OCR = 1.0$ 时的值明显减小。上文所讨论的先期压密对 $G_{\max}$ 的影响都是以固结时间等于60min的试验结果为依据的。这样,随着固结时间的增加,先期压密的影响将减小。因此,从实用角度考虑,如果在考虑固结时间对 $G_{\max}$ 的影响后,不再考虑先期压密的影响,估计不致引起很大误差。

四、结 论

由上述试验结果可以得出下列结论:

1. 这种石灰岩人工砂在动力变形特性方面的特点是,固结时间和先期压密对 $G_{\max}$ 的影响显著,不容忽视。
2. 固结主应力比由1.0增加到2.0,使颗粒结构趋于稳定,表现为先期压密对 $G_{\max}$ 的影响减小,动剪模量衰减曲线和阻尼比曲线都向右移。
3. 固结应力对动剪模量衰减曲线和阻尼比曲线都有影响,引进参考剪应变 γ_r 不仅能使前者归一化,同时也使后者得到归一化。
4. 由共振柱试验实测的动剪模量和阻尼比,与由动三轴试验结果换算的值之间,可望取得令人满意的衔接。在剪应变幅自 10^{-6} 至 10^{-2} 范围内,土的动应力-动应变关系并不符合简

单双曲线关系。

5. 各种经验公式与经验曲线都有一定的局限性, 应该尽可能通过试验测定所研究土样的动剪模量和阻尼比。

参 考 文 献

- [1] Seed, H.B., and Idriss, I.M., Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC. 70-10.
- [2] Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K., Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils, Jour. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. GT 11, 1986.
- [3] Hardin, B.O., and Drnevich, V.D., Shear Modulus and Damping in Soils, Jour. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. SM7, 1972.
- [4] 石兆吉、丰万玲、张吉, 土壤动压缩模量的共振柱法测定, 岩土工程学报, 第7卷 第6期, 1985年。
- [5] 俞培基, 联合使用共振柱仪和动三轴仪测定原状粘性土的动力变形特性, 水利水电科学研究院论文集第27集, 水利电力出版社, 1987年。
- [6] ASTM Standard of the Geotechnical Engineering Test, 1982, Philadelphia, ASTM.
- [7] 中华人民共和国水利电力部土工试验规程(SDS01-79), 水利出版社, 1980年。
- [8] Yu, Peiji and Richart, F.E. Jr., Stress Ratio Effects on Shear Modulus of Dry Sands, Jour. of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. GT3, 1984.
- [9] Richart, F.E. Jr., Anderson, D.G. and Stokke, K.H., II., Predicting in Situ Strain-dependent Shear Moduli of Soil, Proc. 6th WCEE. Vol. III, 1977.
- [10] Hardin, B.O. and Richart, F.E. Jr., Elastic Wave Velocities in Granular Soils, Jour. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 89, No. SM1 1963.

本 刊 启 事

我国科技期刊已于1986年全面推行SI制。本刊曾于1980年至1985年先后三次介绍SI制及其换算关系。但目前仍有部分作者对SI制的使用不熟悉, 不适应。加之本部对稿件审阅中的疏漏, 以致在文章中出现错误。在此除向广大读者致歉外, 务请作者在执笔之前, 先要熟悉SI制的使用及其换算关系, 以免出现错误。

本刊编辑部谨启