

小应变原岩状态下应力路径旋转对剪切模量的影响

张培森, 施建勇

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 以重塑土经 K_0 固结形成的试样为试验对象, 采用英国 GDS 公司生产的 STDTS+UNSAT (7 kN/1700 kPa) 型号高级应力路径三轴测试系统, 研究了在小应变范围内应力路径旋转对土体剪切模量的影响以及剪切模量随应变变化的趋势。研究表明, 在小应变范围内, 剪切模量的初始值随试验应力路径与近期应力历史间的夹角 θ 的增大而增大, 当两者完全相反时, 应力路径旋转对土体在小应变条件下的剪切模量影响最大; 完全一致时, 其影响最弱。而且, 在小应变范围内, 割线剪切模量总是大于切线剪切模量; 当剪切应变采用对数坐标表示时, 剪切模量随着剪切应变的增加而衰减, 且衰减的规律都可以表示为带有两个拐点的反 S 型曲线, 经分析验证本文所得公式 3 可以对此特性进行很好地反映; 但应力路径、应变范围不同其衰减幅度不同。

关键词: K_0 固结; 小应变; 剪切模量; 应力路径旋转; 反 S 型曲线

中图分类号: TU411.3; TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0379-05

作者简介: 张培森(1977-), 男, 山东曹县人, 工学博士, 主要从事岩土工程、地下空间开发与利用及数值计算等科研工作。E-mail: peisen_sky@163.com。

Effect of stress path circumgyration on shear modulus under small strain and initial stress state

ZHANG Pei-sen, SHI Jian-yong

(Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The test object was remolded soil after K_0 consolidation. Using advanced stress path triaxial system, STDTS+UNSAT (7 kN/1700 kPa) produced by GDS of UK, the effect of stress path circumgyration on shear modulus and the trend of shear modulus along with variation of shear strain under small strain were studied. Some conclusions were drawn. Under the condition of small strain, the initial value of shear modulus increased along with the increment of angle θ between trail stress paths and recent stress history. If the two directions were entirely reverse, the effect of stress path circumgyration on shear modulus was the largest; if they coincided completely, the effect was very feeble. At the same time, under the condition of small strain, firstly, the secant shear modulus was always larger than the tangent shear modulus. Secondly, when the logarithmic coordinates were applied to describe shear strain, the decrease of shear modulus with shear strain could be expressed by reversed S shape curve with two inflexion points, and through analyzing and validating, the deduced equation could perfectly reflect this characteristic. Finally, different stress paths and strain areas would lead to different attenuation trends.

Key words: K_0 consolidation; small strain; shear modulus; stress path circumgyration; reversed S shape

0 引言

大量现场实测数据表明, 实际工程(如地铁、基坑、地基变形等)中, 除极小一部分区域外, 岩土体应变都很小, 主要集中在 0.01%~0.3% 之间^[1-4], 而采用常规三轴测试系统难以对此小应变范围内土体特性进行精确研究^[5-6], 且此小应变区域内土体所表现出本质特性对正确预测结构周围土体变形起到至关重要的作用^[7-8]。因此, 国内外学者逐步开展了小应变条件下土体特性的研究, 由于受到国内试验仪器精度的限制, 有关研究成果多集中于国外。Atkinson^[9]研究了当前应

力方向与前期应力方向的夹角不同时, 如图 1 所示, 等 p' 、等 q 路径对超固结土体的剪切模量受前期应力历史的影响程度; Whittle 等^[10], Callisto 和 Calabresi^[11]进一步扩展了应力路径的研究, 但他们的研究忽略了极小应变和小应变部分, 所以难以描述土体在各种应力路径下全应变范围内的特性。因此为了全面反映土体在全应变范围内的本质特征, 开展多种应力路径下、小应变范围内应力路径旋转对剪切模量影响的试验研

究具有重要的工程及科研意义。

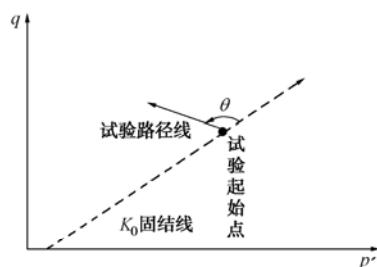


图 1 近期应力历史与试验路径间夹角的定义

Fig. 1 Definition of angle between recent stress history and trial stress path

1 试验设备及试验内容

1.1 试验设备

目前可以测试土体在小应变条件下剪切模量的方式大致分为两类：利用动态技术进行现场试验和实验室试验^[12]。现场试验主要利用瑞利波或跨孔技术测定剪切波速反算剪切模量^[13]。实验室试验仪器主要分为两种共振柱试验和配有局部位移传感器或弯曲元的三轴测试系统^[5, 14-17]，由于共振柱的试验结果分析是以土体表现为线弹性为假设基础的，因此试验结果仅在极小应变范围内适用^[18]，在非线性区域内数据的合理性值得怀疑。故本文采用英国 GDS 公司生产的 STDTS+UNSAT (7 kN/1700 kPa) 型号高级应力路径三轴测试系统（包括非饱和土测试系统）。该系统的主要优点如下：①配备先进的压力与体积控制器，使传统的三轴测试实现了加载与量测的自动化；②配备高精度的霍尔效应传感器，即通过将常规三轴试验仪器中利用压力室外部位移传感器量测土样变形的的方法改为在压力室内部将传感器直接附着于试样上的方法来测量试样的局部变形，从而消除试验时由于试样的端部约束、加载系统自身和试样与压力传感器的不良接触等产生的误差，达到更准确研究小变形条件下土体的力学行为的目的；③荷载传感器内置，保证了垂直和水平应力变化的复杂荷载能同时施加，以模拟实际的地质、施工和现场条件；④采用了特有试样帽加压方式，保证了土体在处于拉伸状态时（即轴向应力小于径向应力状态）试验得以实现。为进行小应变条件下应力路径旋转对土体剪切模量影响的试验研究提供了可靠的保证。

1.2 试样的制备

试验用土取自河海大学水工结构试验楼的深基坑，属于粉质黏土，基本物理指标为：天然含水率 26.4%，比重 2.72，孔隙比 0.766，液性指数 0.60，液限 31.4%，塑限 18.8%，干密度 1.54 g/cm^3 。

试验在恒温、恒湿条件下进行。为了避免原状土样原生结构差异性对试验结果的影响，采用重塑土样。根据设计的试样干密度算出一个土样所需的湿土重，分成 5 等份，在试样模中分 5 层压实，每层高度用套在试样模活塞上的钢环控制。试样的直径和高度分别是 39.1 mm 和 80 mm；控制干密度和初始含水率分别为 1.54 g/cm^3 和 12%。

试样饱和。通常的做法是只采用抽真空进行饱和，这样仅能处理试样中的部分气泡以及装样过程中造成的水分损失，饱和度一般达不到要求。为此，采用的方法是先进行抽真空饱和；试样装入后，先施加 20 kPa 围压并用围压控制器控制，使其保持恒定，再打开试样顶部与外界相通的阀门，使试样底部进水从顶部流出进行水头饱和，使橡皮膜与试样之间的气泡充分排出；然后再分级施加围压和反压至 200 kPa 左右，这样极大地提高了饱和度，同时避免在正式试验前就导致压力室压力过高的现象。最后经 B-检验，测得孔隙水压力系数达 0.99 以上，开始进行试验。

1.3 试验方案

本文共做 8 个不同应力路径，试验方案如表 1 所示，试验实际路径如图 2 所示。

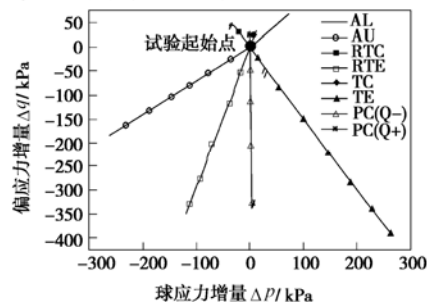


图 2 K_0 固结后在 $\Delta p - \Delta q$ 空间上的试验应力路径图

Fig. 2 Trial stress path in $\Delta p - \Delta q$ space after K_0 consolidation

本试验过程主要分为 3 个阶段：①使试样在无侧向变形的条件下进行 K_0 固结；② K_0 固结后试样进行静置；③按照设计路径进行加卸载试验。具体过程如下：将制备好的试样置于压力室中，采用该系统专用软件 GDSLAB 中的 K_0 固结模块以径向局部位移传感器控制方式、围压以 $5.6 \times 10^{-6} \text{ MPa/s}$ 的速率加荷到预设固结压力值，每个路径试验前的 K_0 值如表 1 中所示； K_0 固结完成后，为减小 K_0 固结加载对应力旋转造成蠕变影响，开始静置，待局部轴向位移传感器的应变率达到 $7 \times 10^{-8}/\text{s}$ 时^[19]，静置阶段结束；然后采用高级应力路径控制模块按设计好的应力路径进行加卸载试验。每个路径都做 3 组平行试验，试验结果表明，每组试样都有很好的可重复性，故本文仅给出每组试验中的一个结果。

表 1 GDS 试验方案
Table 1 GDS test projects

试验类型		试验说明	备注
试验路径	各路径试验前 K_0 值		
AL	0.56	轴向、径向应力以 $\eta = \Delta\sigma_r/\Delta\sigma_v = 0.52$ 同向增加	沿固结路径继续加载试验
AU	0.52	轴向、径向应力以 $\eta = \Delta\sigma_r/\Delta\sigma_v = 0.52$ 同向降低	反固结路径卸载试验
RTC	0.52	轴向应力不变、径向应力降低	简化压缩试验
RTE	0.53	径向应力不变、轴向应力降低	简化拉伸试验
TC	0.51	径向应力不变、轴向应力增加	压缩试验
TE	0.52	轴向应力不变、径向应力增加	拉伸试验
PC(Q-)	0.50	轴向、径向应力以 $\eta = \Delta\sigma_r/\Delta\sigma_v = -0.5$ 同向降低	等球应力、偏应力减小试验
PC(Q+)	0.52	轴向、径向应力以 $\eta = \Delta\sigma_r/\Delta\sigma_v = -0.5$ 同向增加	等球应力、偏应力增加试验

注：所有试验都采用应力控制，加卸载速率为 2.7×10^{-6} MPa/s。

2 结果分析

2.1 理论依据

为了便于利用试验所得到的原始数据，分析讨论在小应变条件下应力路径旋转对土体剪切模量的影响，采用的割线、切线剪切模量的计算公式如下：

$$G_{\text{sec}} = \frac{\Delta q}{3\Delta\varepsilon_s} \quad , \quad (1)$$

$$G_{\text{tan}} = \frac{dq}{3d\varepsilon_s} \quad 。 \quad (2)$$

式中 $q = \sigma_v - \sigma_r$ ； $\varepsilon_s = \frac{2(\varepsilon_v - \varepsilon_r)}{3}$ ； σ_v 为轴向应力； σ_r 为径向应力； ε_v 为轴向应变； ε_r 为径向应变。

2.2 切线与割线剪切模量的关系

图 3 描述了典型的基坑开挖主动区（RTC）及被动区（RTE）的切线剪切模量与割线剪切模量在小应变范围内的关系。从图 3 可以看出，无论是切线剪切模量还是割线剪切模量，被动区内剪切模量都总是大于主动区内的剪切模量；对任意一个应力路径而言，在小应变范围内割线剪切模量始终大于切线剪切模量，且表现出很强的非线性特性。

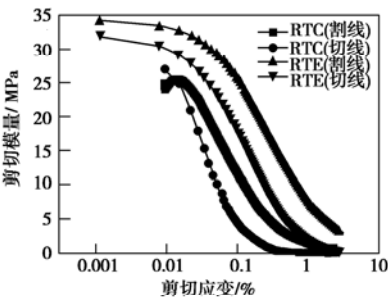


图 3 RTC、RTE 路径切线与割线剪切模量的关系图
Fig. 3 Relationship between secant and tangent shear moduli of RTC and RTE

2.3 切线剪切模量与路径旋转夹角的关系

图 4 描述了不同应力路径条件下，切线剪切模量与剪切应变之间的关系（特指外，以下所有剪切模量均为切线剪切模量）。从图 4 可以得出，无论何种应力路径，剪切模量总是随着剪切应变的增加而降低，且卸载路径所产生的剪切模量在小应变范围内总是大于加载路径所产生的剪切模量。总体而言，剪切模量的初始值随试验应力路径与近期应力历史间的夹角 θ 的增大而增大，当两者完全相反（AU 路径），即 $\theta = 180^\circ$ 时，应力路径旋转对土体在小应变条件下的剪切模量影响最大，当两者完全一致（AL 路径），即 $\theta = 0^\circ$ 时，应力路径旋转对土体在小应变条件下的剪切模量影响最小。

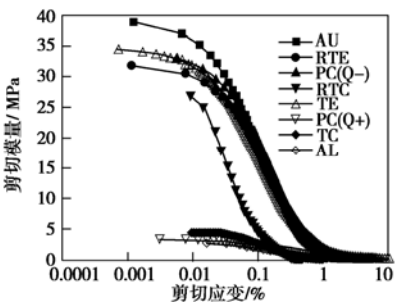


图 4 不同应力路径条件下剪切模量与剪切应变关系图
Fig. 4 Shear modulus vs shear strain under different stress paths
不同应力路径条件下，不同剪切应变水平的切线剪切模量变化规律如图 5 所示。从图 5 中可以看出，加载路径下剪切模量随剪切应变增加衰减幅度相对较小，而卸荷路径下则相对较大，具体衰减幅度值如表 2 所示。从图 4，5 及表 2 中可以看出：对于本次试验所采用的粉质黏土重塑试样，当剪切应变处于 0.001%~0.01% 之间时，其剪切模量衰减幅度相对不是很大，其对应的应力应变关系基本处于线性；当剪切应变在 0.01%~1% 之间时，剪切模量衰减幅度相对

较大, 个别路径表现出剪切模量随剪切应变增加而迅速降低, 表明土体在该应变区域内具有明显的非线性特性。从表 2 可以明显看出, 在非线性阶段 RTC 路径的剪切模量随剪切应变的衰减幅度最大。

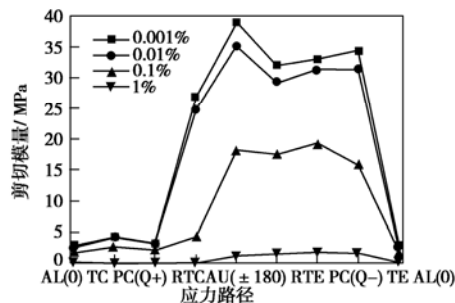


图 5 不同应变水平剪切模量变化规律

Fig. 5 Variation of shear modulus under different strain levels

表 2 不同应变水平剪切模量的衰减幅度

Table 2 Attenuation of shear modulus under different strain levels (%)

应力路径	0.001%~0.01%	0.01%~0.1%	0.1%~1%
AL	8.07524	31.25538	87.64127
TC	0.49014	37.92959	98.30477
PC(Q+)	3.36151	28.96021	96.83651
RTC	7.96633	82.42571	99.98391
AU	9.53360	48.30647	93.23527
RTE	8.68606	39.78517	90.86587
PC(Q-)	4.93982	38.49583	90.44798
TE	8.97814	49.47592	89.66206
AL	8.07524	31.25538	87.64127

2.4 切线剪切模量与剪切应变的关系

从对图 4、5 及表 2 的分析结果可以看出, 不管当前试验应力路径及近期应力历史的夹角如何, 所得到的剪切模量仅表现为初始值大小不同, 但剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律一致, 即为了更加清晰地表示试验结果, 剪切应变采用对数坐标 (log) 表示, 所有试验应力路径下剪切模量随剪切应变增加而衰减的规律都可以表示为带有两个拐点的反 S 型曲线, 经分析得出剪切模量与剪切应变之间存在的函数关系如下式所示:

$$G = G_{\max}^0 \frac{1}{1 + a \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{\text{sref}}} \right)^b} \quad (3)$$

式中 $G_{\max}^0$ 为剪切模量的初始值; ε_s 为剪切应变; a , b 分别为土体常数, 由试验确定; $\varepsilon_{\text{sref}}$ 为参考剪切应变, 具体值由土体性质决定, 针对本次试验所采用的粉质黏土, 参考剪切应变 $\varepsilon_{\text{sref}}$ 的大小为当前剪切模量为最大剪切模量的 10% 时所对应的剪切应变值。

图 6 中描述了应力路径分别为 AU、TE、RTC 以及 PC(Q+) 的试验结果和采用公式 3 所得到的理论分析结果的对比, 参数取值的具体情况如表 3 所示。从表 3 和图 6 中的对比结果可以看出采用式 3 所得到的参数拟合的相关性系数较大, 因此公式 3 能够很好地反映剪切模量随剪切应变增加而衰减的变化规律。

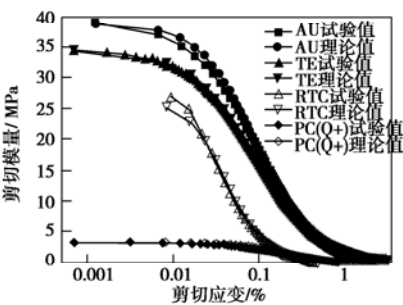


图 6 理论值与试验值对比关系

Fig. 6 Comparison between theoretical and measured values

表 3 理论分析的参数取值

Table 3 Parameters for theoretical analysis

应力路径	a	b	$\varepsilon_{\text{sref}}$	相关性系数
AU	9.20	1.34	0.475	0.997
TE	8.67	1.18	0.546	0.999
RTC	10.62	1.92	0.143	0.995
PC(Q+)	8.53	1.76	0.600	0.989

3 结 论

本文以重塑土经 K_0 固结形成的试样为对象, 研究了在小应变范围内应力路径旋转对土体剪切模量的影响以及剪切模量随应变变化的趋势, 并得出以下结论:

- (1) 利用配备有高精度局部位移传感器的 STDTTS+UNSAT (7 kN/1700 kPa) 型号高级应力路径三轴测试系统可以进行较为精确的复杂应力路径试验, 使研究小应变条件下应力路径旋转对土体剪切模量的影响成为可能。
- (2) 无论何种应力路径, 剪切模量都随着对应的剪切应变增加而衰减, 且衰减规律保持一致, 但应力路径、应变范围不同其衰减幅度不同。为了更加清晰地表示试验结果, 当剪切应变采用对数坐标 (log) 表示, 剪切模量表现出高度非线性, 且随剪切应变增加而衰减的规律都可以表示为带有两个拐点的反 S 型曲线, 经分析验证公式 3 可以对此特性进行很好的表征。
- (3) 在小应变范围内, 土体具有明显的非线性特性, 且割线剪切模量始终大于切线剪切模量。
- (4) 总体而言, 剪切模量的初始值随试验应力路径与近期应力历史间的夹角 θ 的增大而增大, 当两者

完全相反时, 应力路径旋转对土体在小应变条件下的剪切模量影响最大; 完全一致时, 其影响最弱。

参考文献:

- [1] BURLAND J B. Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**: 499 – 516.
- [2] PUZBIN A M, BURLAND J B. Non-linear model of small-strain behaviour of soils[J]. Geotechnique, 1998, **48**(2): 217 – 233.
- [3] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[C]// Proc Instn Civ Engrs Civ Engng, 1993, **2**: 27 – 41.
- [4] CLAYTON C R, KHATRUSH S A. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens[J]. Geotechnique, 1986, **36**(4): 593 – 597.
- [5] JARDINE R J, SYMES M J, BURLAND J B. The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus[J]. Geotechnique, 1984, **34**(3): 323 – 340.
- [6] SCHOLEY G K, FROST J D, LOPRESTI D C, et al. A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1994, **18**(2): 137 – 156.
- [7] JARDINE R J, POTTS D M, BURLAND J B. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction[J]. Geotechnique, 1986, **36**(3): 377 – 396.
- [8] FRANZIUS J H, POTTS D M, BURLAND J B. The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation[J]. Geotechnique, 2005, **55**(3): 189 – 199.
- [9] ATKINSON J H, RICHARDSON D, STALLEBRASS S E. Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soil[J]. Geotechnique, 1990, **40**(4): 531 – 540.
- [10] WHITTLE A J, DEGROOT D J, LADD C C, SEAH T H. Model prediction of the anisotropic behaviour of Boston blue clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(1): 199 – 224.
- [11] CALLISTO L, CALABRESI G. Mechanical behaviour of a natural soft clay[J]. Geotechnique, 1998, **48**(4): 495 – 513.
- [12] VIGGIANI G, ATKINSON J H. Stiffness of fine-grained soil at very small strains[J]. Geotechnique, 1995, **45**(2): 249 – 265.
- [13] YOSHIMI Y, RICHART F E, PRAKASH S, et al. Soil dynamics and its application to foundation engineering[C]// Proc 9th Int Conf Soil Mech, Tokyo, 1977, **2**: 605 – 650.
- [14] JOVICIC V, COOP M R, SIMIC M. Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests [J]. Geotechnique, 1996, **46**(2): 357 – 362.
- [15] SYMES M J, BURLAND, J B. Determination of local displacements on soil samples[J]. Geotechnical Testing Journal, 1984, **7**(2): 49 – 59.
- [16] PENNINGTON D S, NASH D F T, LINGS M L. Anisotropy of G_0 shear stiffness in Gault Clay[J]. Geotechnique, 1997, **47**(3): 391 – 398.
- [17] KUWANO R, CONNOLLY T M, JARDINE R J. Anisotropic stiffness measurements in a stress-path triaxial cell[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, **23**(2): 141 – 157.
- [18] ISENHOWER W M. Torsional simple shear/resonant column properties of San Francisco Bay mud[D]. Austin: University of Texas, 1979.
- [19] 张培森, 郭进军, 陈绍杰. 粉质黏土重塑试样在小应变条件下变形特征的试验[J]. 岩土测试, 2007, **26**(3): 248 – 250. (ZHANG Pei-sen, GUO Jin-jun, CHEN Shao-jie. Experiment of distortion character of remolded silty clay under small strain[J]. Rock and Mineral Analysis, 2007, **26**(3): 248 – 250. (in Chinese))