

# 土体流变特性的试验研究综述

王俊杰 朱俊高

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要** 简介土的流变现象、土流变试验的类型和常用试验仪器,并分析了流变试验的加荷方式、时间尺度效应、三轴蠕变试验中的渗漏、试验环境温度的变化等试验影响因素,指出试验仪器精度、试验历时、试验加荷方式、三轴试样的渗漏、试验环境温度的变化等对试验结果的可靠性均有较大的影响,试验研究土流变特性的重要发展方向应是微观试验与宏观试验的结合。

**关键词** 土流变学 流变试验 加荷方式 时间尺度效应 试样渗漏 温度影响

**中图分类号** :TU431 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2004)07-0105-03

流变是土的重要工程性质之一,尤其对软土和新近沉积的黏土,许多工程由于土体流变而破坏失事。随着土力学的发展,土体流变特性的研究越来越受到岩土工程界的重视。土流变学是土力学的一个分支,它研究土中应力、应变状态的形成和随时间的变化规律。要弄清土的流变特性,建立应力、应变、时间三者关系的流变本构模型及确定模型参数等都需要进行流变试验的研究。另外,土体流变特性的研究正处于发展阶段,对试验尚无现成规程供参考,因此,探讨测定土体流变特性的试验方法、试验结果的影响因素对完善试验方法、促进试验技术的提高具有一定的现实意义。

## 1 土的流变现象

从应力、变形的角度,或者说从力学的角度,土体受荷后的变形具有:非线性、弹塑性、各向异性、应变软化和流变性等特性<sup>[1]</sup>。其中流变性主要包括四种现象:①蠕变:恒定应力作用下,变形随时间而发展的过程;②应力松弛:一定应力状态下,保持土体变形不变,应力随时间而减小的过程;③长期强度:土体抗剪强度随时间而变化,即长期的强度不等于相对瞬时强度;④应变率效应:不同的加荷速率,土体表现出不同的应力、应变关系和强度特性。土的流变变形可分为压缩和剪切两大类,沉降分析中主要考虑土受压时的流变特性,即通常所称的次固结变形,强度问题则主要研究土受剪时的流变特性<sup>[2]</sup>。

土流变学的研究内容既包括宏观过程,又包括

微观过程,即既要重视研究外部力学现象,又要重视这些现象的物理实质<sup>[3]</sup>,因此,可将土流变学分为宏观流变学和微观流变学两个部分<sup>[4]</sup>。宏观流变学研究土体流变过程的外部表现,土体在外力作用下的表现与土体特性之间的关系是建立在现象学观点的基础上的。这种观点不考虑物体中产生的物理过程,而在宏观实验的基础上建立这些过程外部表现的数学描述。微观流变学研究土体流变的物理过程,土的结构、构成特性,以及土体颗粒间的相互关系等问题。研究微观过程,了解土体工程性质的内在本质,可解释宏观流变现象,对建立正确的本构关系具有重要意义。

## 2 土流变试验分类

土流变学由宏观和微观两个部分组成,土流变试验也可分为宏观和微观两个部分。目前土微观流变试验的研究比较少,而且一般仅限于“静态”方面,即借助光学或电子显微镜观察土的微观结构,然后通过分析提出土流变的微观机理,确定土中导致流变的微观结构形式,得到一些微观参数以反映土的流变特性<sup>[5]</sup>。

土宏观流变试验可分为现场的和室内的两部分。现场流变试验是在实际工程中测试土体的流变数据,如边坡位移的长期观测,地基沉降的长期观测等。室内流变试验是在实验室的流变仪器上进行的。通过宏观流变试验观测土体流变的宏观表象,为建立反映应力-应变-时间之间的关系提供依据或验证。

### 3 土流变试验及仪器

#### 3.1 蠕变试验

蠕变试验是在维持荷载不变的情况下,观测试样变形发生、发展的试验。在天然条件下,土的蠕变过程为几十年甚至几百年,但在实验室条件下的试验,只能为几个小时、几天,少数进行几个月,极少数进行数年。用于蠕变试验的仪器有:直剪仪、扭剪仪、柱剪仪、单剪仪、双剪仪、环剪仪、固结仪(用于单向固结试验)和三轴仪(与常规三轴仪相同,只是试验过程保持围压和偏应力恒定)等。

#### 3.2 应力松弛试验

应力松弛试验是施加一定外荷载,使试样产生瞬时变形后,维持变形不变,观测应力随时间而减少的试验。与蠕变试验相比具有易稳定的优点,一般在较短时间内即稳定。由于蠕变和应力松弛实际上是同一个过程(流变过程)的两种不同的表现,用于蠕变试验的仪器原则上均可进行应力松弛试验(但必须是仪器能控制变形)。常用的仪器有三轴仪、直剪仪和固结仪。

#### 3.3 长期强度试验

土体的长期强度可以用剪切类蠕变试验仪器来研究,但最好能够控制应力不变,而不是荷载不变。目前为止,有关长期强度尚存在不小的争论,有试验研究表明,土体的长期强度随时间增加而降低,而另外的研究则表明,土体的长期强度随时间增加而增加。笔者认为,长期强度的增加或降低主要与土质有关,有些土的长期强度可能降低,有些则可能增加。这是因为剪切类的试验中,随时间增加,土体中既存在使强度增加的因素即常称作的“老化(aging)”,又存在使强度减小的因素即颗粒定向排列及原颗粒间的连接在持续剪应力作用下被破坏。

黏土的单轴和三轴压缩蠕变试验表明,试样长期破坏强度一般占相对瞬时强度的 90% ~ 45%。长期强度降低的典型实例是海成的伦敦密实裂隙黏土<sup>[3]</sup>,在 13 ~ 54 a 时间内,强度降低为实验室内时长为几个小时强度的 66.5% ~ 35%。

#### 3.4 荷载率效应试验

荷载率效应(应变率效应)主要通过不同剪切速率的三轴固结不排水剪试验和等应变率的单向固结试验来研究。

在三轴试验中,应变率对强度和孔隙水应力均有影响。Graham 等<sup>[6]</sup>发现,对高塑性软黏土,应变率每提高 10 倍,不排水抗剪强度将提高 9% ~ 20%。文献<sup>[7]</sup>的研究表明,在不排水三轴压缩和伸长试验中,低应变率时的孔隙水应力均大于高应变率时的

孔隙水应力。对孔隙水应力的分布,普遍认为在剪切速率较快时,由于试样端部约束作用,试样内孔压分布不均匀,有人曾将孔压传感器安插到试样中部以消除试样的端部效应。在单向固结试验中,Graham 等<sup>[6]</sup>对 Ottawa 湖相沉降黏土的试验研究发现,应变率对压缩曲线和前期固结压力均有影响。应变率越大,有效应力越大。应变率每增加 10 倍,其前期固结应力增加 10% ~ 20%。

### 4 土流变试验的加荷方式

#### 4.1 分别加荷与分级加荷

流变试验有两种加荷方式,即分别加荷和分级加荷。分别加荷是对同一种土的多个试样,在完全相同的试验条件下,按照不同的应力水平(或应变水平)进行试验,试验所需的应力(或应变)是一次性施加的,然后维持恒定。其优点是没有前期应力历史的影响,但需一组同样的试样,难以避免结果的离散性。

分级加荷是在同一个试样上逐级施加不同的应力(或应变),其优点是只需一个试样,但上一级荷载(或应变)对下一级荷载变形(或应力松弛)可能有一定的影响。试样蠕变是从加荷开始就发生了,分级加荷中的每级荷载加荷历时内均产生蠕变变形,加荷历时越长,这种变形量将越大。

#### 4.2 排水剪切试验的加荷方式

三轴排水剪切试验是土体流变试验中常用的试验方法,试验的加荷方式对试验结果的影响较大。以黏性土的排水剪切蠕变试验为例,加荷方式总体上分为分别加荷和分级加荷。分别加荷要求荷载(或变形)一次施加并维持稳定,但由于荷载施加引起的超静孔隙水应力的消散,土样所受的有效应力实际上是在逐渐增加,而不是不变的,只有当孔隙水应力完全消散后,试样的应力状态才维持不变。从土样在孔隙水应力消散过程中发生的变形中很难区分出哪部分是蠕变变形,试验计时零点是选加荷时刻,还是孔隙水应力消散为零的时刻,似乎都不太合适。

对于分级加荷方式,各分级荷载的施加又可细分为分别加荷和分级加荷,即分级荷载一次瞬时施加和缓慢小增量逐级施加。对一次瞬时施加的情况,与前述分别加荷的情况相似;而对缓慢小增量施加分级荷载的情况,可通过调整荷载增量及加荷速率来控制加荷过程中的孔隙水应力,使加荷结束时的孔隙水应力接近零。试验计时零点可选在加荷结束时刻(笔者曾进行过一些这种加荷方式的蠕变试验<sup>[7]</sup>)。但这种加荷、计时方式忽略了在加荷历时中的蠕变变形,似乎也不太合适。

孔隙水应力的存在使得计时零点选择困难,而且,

孔隙水应力消散期间由于应力变化 对应的变形无法区分哪部分是流变引起的 哪部分又是由有效应力增加引起的. 笔者认为, 参照单向固结流变试验(次固结试验)的加荷方式可能是较为合理的, 至少目前可以这样认为. 也就是荷载一次性施加到预定的蠕变荷载, 这样 时间零点也选择在该时刻 随时间增长, 孔压消散, 然后 只研究孔压完全消散后变形的发展情况.

### 5 土流变试验的时间尺度效应

流变试验存在时间尺度问题, 不同的时间尺度, 同样的试验可能会得出不同的结论. 图 1<sup>[3, 8]</sup>是由一硅藻黏土的环剪试验( $\sigma_z = 100 \text{ kPa}$ ,  $\tau = 40 \text{ kPa}$ )结果用不同时间步长绘制的一些蠕变曲线. 曲线 G 是全过程蠕变曲线, 包括初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段, 总历时 350 d. 曲线 A、B、C、D、E 和 F 分别历时 90 s、10 min、90 min、20 h、10 d 和 100 d 的部分蠕变曲线. 由图中可见, 同一蠕变阶段的不同时间尺度曲线可能显示不同蠕变阶段曲线的特征, 如代表初始蠕变阶段的曲线 A、B、C、D 却显示了稳定蠕变阶段的曲线特征. 因此, 试验研究中选取适当的时间尺度, 对保证试验结果的正确性和节约试验时间有重要意义. 当然, 合适的试验时间尺度主要取决于土的特性, 另外, 试验人员的经验也是很重要的.

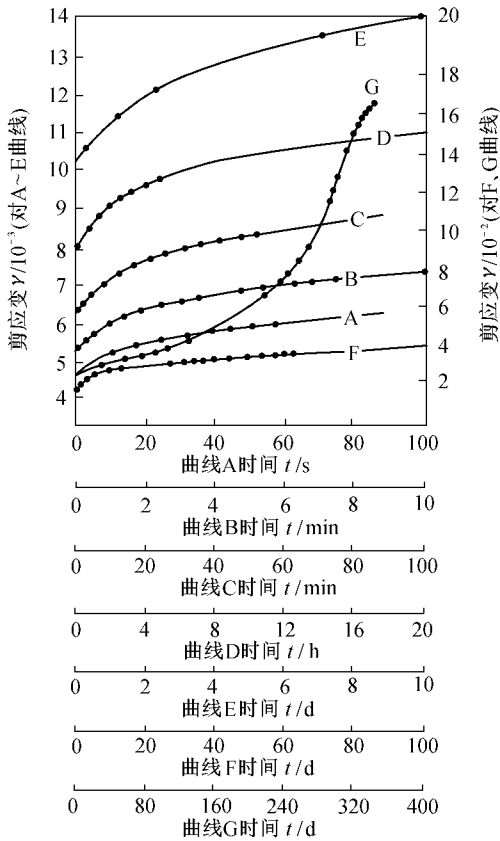


图 1 不同时间尺度蠕变曲线

## 6 影响试验结果的两个重要因素

### 6.1 三轴蠕变试验中的渗漏

土体蠕变试验历时通常较长, 三轴排水或不排水剪切试验中, 渗漏成为一个很难处理的问题.

事实上, 在历时较长的三轴试验中渗漏是很难避免的, 因为即使对于通常认为不透水的橡皮膜而言, 实际上也是可以透水的. 同时, 橡皮膜绑扎处可能会有不同程度的渗漏, 在历时较长的试验中, 渗漏量可能会达到影响试验结果的程度. 另外, 试验历时较长时, 橡皮膜可能发生老化, 进一步增加其透水性. 即使只有橡皮膜渗漏这一个渗漏因素, 长历时试验中也应加以考虑.

因此, 在三轴蠕变试验中, 采取合适的防渗漏措施是必须的. 目前, 已有学者采用下面三种方法防止或减轻这种渗漏: ①压力室充黏性较大的硅脂油<sup>[9]</sup>; ②压力室充水银<sup>[10]</sup>; ③双层橡皮膜, 膜间涂一层硅脂. 第三种方法可以和第一、二种方法联合使用. 另外, 确定合理的试验历时相当重要, 历时太长, 体积蠕变量太小, 试样的渗漏量可能达到不可忽略的程度, 使得某一时间以后的试验结果没有价值; 历时太短, 又无法获得试样蠕变的全过程曲线, 不能达到试验目的.

### 6.2 试验环境温度

温度对流变试验结果的影响包括两个方面: ①温度变化引起土体本身黏性(即流变性)的变化, 温度高, 流变性增加; ②温度的变化会改变试验仪器的精度, 尤其是电子测量系统.

Campanella 和 Mitchell<sup>[11]</sup>进行的各向等压固结试验及 Eriksson<sup>[12]</sup>对 Lulea 黏土进行的单向固结试验, 均表明随温度升高, 压缩曲线下移, 且前期固结压力减小.

Akagi 和 Komiyama<sup>[13]</sup>对重塑饱和黏土进行的等速应变固结试验表明高温(50℃和 80℃)条件下的压缩指数大于室温(20℃)条件下的. Mitchell 等<sup>[14]</sup>和 Silva 等<sup>[15]</sup>进行的三轴蠕变试验表明, 随温度的升高, 轴向应变和应变速率均增加.

一般认为, 流变试验(主要是蠕变试验)中温度会严重影响试验结果的可靠性, 试验中必须控制试验环境温度的变化. 但由于土流变试验的历时通常较长, 在整个试验过程中保持恒温是较难实现的. 通常可选择温度变化较小的场所进行试验, 条件许可时可建设恒温实验室进行试验.

## 7 结 语

a. 流变是土的基本工程性质之一, 试验是重要的研究手段. 目前, 土流变的微观试验 (下转第 123 页)

某些特征尺度范围内,用成熟的圆射流解代替非圆形喷口射流的解等等.可以说,鸭嘴阀射流研究不仅有其广阔的工程运用背景, also 具有很高的理论研究价值,值得研究者为之继续努力.

参考文献：

[ 1 ] Lee J H W ,Wilkinson ,D L , Wood I R. On the head-discharge relation of a duckbill elastomer check valve[ J ]. Journal of Hydraulic Research 2001 ,39( 6 ) 619 ~ 627 .  
[ 2 ] Lee J H W ,Karandikar J ,Horton P R. Hydraulics of "duckbill " elastomer check valves[ J ]. Journal of Hydraulic Engineering , 1998 ,124( 4 ) 394 ~ 405 .  
[ 3 ] Duer M J. Use of variable orifice "duckbill " valves for hydraulic and dilution optimization of multiport diffusers. Water Science and Technology , 38( 10 ) 277 ~ 284 .  
[ 4 ] Fischer H B ,et al. Mixing in inland and coastal waters[ M ]. New York :Academic Press ,1979. 315 ~ 389 .  
[ 5 ] 李炜. 环境水力学进展[ M ]. 武汉 :武汉水利电力大学出版社 ,1999. 1 ~ 30 .  
[ 6 ] 李炜 槐文信. 浮力射流理论及其应用[ M ]. 北京 :科学出版社 ,1997. 1 ~ 78 .

[ 7 ] Leschziner M A , Rodi W. Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence - model variation[ J ]. Journal of Fluids Engineering ,1981 ,103 ( 3 ) 352 ~ 360 .  
[ 8 ] 槐文信 杨晓亭. 横流中多孔射流浓度场的特性[ J ]. 武汉水利电力大学学报 ,1997 ,30( 5 ) :16 ~ 20 .  
[ 9 ] 唐洪武 李行伟. 鸭嘴阀扩散器紊动射流特性试验研究[ J ]. 水科学进展 ,2001 ,12( 2 ) :153 ~ 159 .  
[ 10 ] Tong Kei-wan. Hydraulics of a duckbill valve jet[ D ]. Hongkong :The University of Hongkong 2002 .  
[ 11 ] 刘成 韦鹤平 何耘. 鸭嘴阀在排海工程中的应用分析[ J ]. 给水排水 ,1999 ,25( 7 ) :19 ~ 21 .  
[ 12 ] Kuang C P ,Joseph H ,Lee W. Numerical experiments on the mixing of a duckbill valve jet[ A ]. In :Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Hydraulic[ C ]. rizona ,USA 2001 . 124 ~ 129 .  
[ 13 ] Joseph H ,Lee W ,Kuang C P ,Chan H C. The velocity field of a duckbill valve( DBV ) jet in coflow[ A ]. In :Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference[ C ],New York ,USA 2002 . 241 ~ 251 .

( 收稿日期 2004-05-17 编辑 :马敏峰 )

( 上接第 107 页 ) 研究很少,而且没有与宏观试验研究相结合. 微观试验与宏观试验相结合,在研究土体流变过程的外部表现的同时,又研究外部力学现象的物理实质,应是试验研究土流变特性的重要发展方向.

**b. 室内的宏观试验是目前研究土体流变特性的主要手段**,试验中的许多问题在试验前必须认真考虑和处理. 试验仪器的精度、试验的历时、试验的加荷方式、三轴试样的渗漏、试验环境温度的变化等对试验结果的可靠性均有较大的影响.

参考文献：

[ 1 ] 施建勇 赵维炳 陈云. 土体变形规律研究进展[ J ]. 水利水电科技进展 ,1998 ,18( 1 ) 24 ~ 26 .  
[ 2 ] 钱家欢 殷宗泽. 土工原理与计算[ M ]. 第二版. 北京 :中国水利水电出版社 ,1996. 237 .  
[ 3 ] 维亚洛夫 C C. 土力学的流变原理[ M ]. 杜余培译. 北京 :科学技术出版社 ,1987 .  
[ 4 ] 王常明. 土流变学的研究现状与趋势[ J ]. 世界地质 , 1998 ,17( 4 ) 33 ~ 37 .  
[ 5 ] 谢宁 姚海明. 土流变研究综述[ J ]. 云南工业大学学报 , 1999 ,15( 1 ) 52 ~ 56 .  
[ 6 ] Graham J ,Crooks J H A ,Bell A L. Time effect on the stress-strain behavior of natural soft clay[ J ]. Geotechnique ,1983 ,33 ( 3 ) 327 ~ 340 .  
[ 7 ] Zhu J G ,Yin J H ,Luk S T. Time-dependent stress-strain behavior of soft Hong Kong marine deposits[ J ]. Geotechnical Testing

J ,ASTM ,GTJODJ ,1999 ,22( 2 ) :112 ~ 120 .  
[ 8 ] 谢宁. 土流变试验设计及有关问题研究[ J ]. 云南工业大学学报 ,1994 ,10( 4 ) :76 ~ 82 .  
[ 9 ] Tavenas F ,Leroueil S ,Rochelle P La ,et al. Creep behavior of an undisturbed lightly overconsolidated clay[ J ]. Canadian Geotechnical J ,1978 ,15 :402 ~ 423 .  
[ 10 ] Bishop A W ,Lovenbury H T. Creep characteristics of two undisturbed clays[ A ]. Proc of the 7 th Int Conf of Soil Mechanics and Foundation Engineering[ C ]. Mexico ,1969. 29 ~ 37 .  
[ 11 ] Campanella R G ,Mitchell J K. Influence of temperature variations on soil behavior[ J ]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ,ASCE ,1968 ,94( SM3 ) :709 ~ 734 .  
[ 12 ] Eriksson L G. Temperature effects on consolidation properties of Sulphide clay[ A ]. Proc of 12 th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering[ C ]. Rio de Janeiro ,1989. 2087 ~ 2090 .  
[ 13 ] Akagi H ,Komiya K. Constant rate of strain consolidation properties of clayey soil at high temperature[ A ]. Proc of the 1995 Int Symp on Compression and Consolidation of Clayey Soils [ C ]. Hiroshima Jpn. ,1995. 3 ~ 8 .  
[ 14 ] Mitchell J K ,Campanella R G ,Singh A. Soil creep as a rate process[ J ]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division , ASCE ,1968 ,94( SM1 ) 231 ~ 253 .  
[ 15 ] Silva A J ,Brandes H G. Drained creep behavior of marine clay[ A ]. Proc of the 1996 ASCE National Convention[ C ]. Washington ,DC USA ,New York ,1996. 228 ~ 242 .

( 收稿日期 2003-12-22 编辑 :熊水斌 )