

DOI: 10.11779/CJGE201506002

# 土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法

章为民, 顾行文, 王芳, 王年香

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 主要进行两方面的研究: ①进行了土的回弹试验研究。用两种制备土样, 进行了加卸荷循环试验研究。通过试验, 研究了固结系数/回弹系数在试验过程中的变化规律。通过试验证实, 固结系数与回弹系数不是一个固定的常数, 是一个以加卸荷过程为周期循环重复变化的过程因子。研究比较了吸水回弹与吸气回弹对试验结果的影响, 结果表明, 吸水和吸气对回弹的影响不大。②研究探讨了变 $C_v$ 固结/回弹计算方法, 进行了两种重塑土的加卸荷循环全过程比对和两种原状土卸荷全过程比对, 理论计算与试验吻合很好, 证实了变 $C_v$ 变形过程计算方法用于固结/回弹变形计算的科学性与合理性, 证明回弹是固结的逆过程。

**关键词:** 卸荷回弹; 变 $C_v$ 方法; 固结系数; 过程因子; 过程模拟

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)06-0979-09

**作者简介:** 章为民(1959-), 男, 江苏连云港人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事岩土工程和岩土力学方面的科研工作。E-mail: wmzhang@nhri.cn。

## Swelling tests on soils and simulation method for unloading-swelling process

ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, WANG Fang, WANG Nian-xiang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The time-rate of swelling is investigated. The variation of the consolidation coefficient in swelling process and the similarity between absorbing water and absorbing air during the process are studied through experiments. The test results show that the coefficient of consolidation keeps changing in both processes of the consolidation and swelling, ranging up to 3 orders of magnitude. The coefficient of consolidation is not a fixed parameter but a process factor which repeats in each loading and unloading. The feasibility of applying the nonlinear consolidation theory in swelling process is studied. The time-varying  $C_v$  method for consolidation and swelling is proposed, and the parameters can be obtained by fitting the experimental results. The settlement and swelling deformation obtained by the proposed method are in good agreement with the experimental results in both loading and unloading processes.

**Key words:** unloading swelling; time-varying  $C_v$  method; coefficient of consolidation; process factor; process simulation

## 0 前 言

随着中国大规模的城市建设, 深开挖、深基坑工程大量增加, 人们发现, 大量的基坑回弹变形实测值与理论计算有较大的差距, 理论计算结果往往数倍于实测值。基坑开挖是一个复杂的时空效应问题, 空间效应与荷载变化、应力重分布有关, 涉及土的强度与稳定问题。时间效应则主要与土的回弹过程有关, 由于瞬时回弹量值较大且回弹的研究相对较少, 以致一些设计人员往往认为土的回弹是一个快速完成、与时间无关的过程, 把最终回弹作为当前回弹来处理, 这或许是回弹计算误差大的主要原因之一。此外, 没有合适的计算分析方法, 目前, 相关设计规范中还没有回弹时间过程的设计计算方法, 事实上, 在基础性的各类土工试验标准中也只有回弹模量的试验方法, 没

有回弹过程的试验方法。

土的回弹是固结压缩的逆过程, 回弹过程应当是与固结过程类似的一个时间的过程。Mesri等<sup>[1]</sup>用改进的可测孔压的压缩仪和等向固结仪, 进行了大量的超固结土回弹试验研究, 得到了许多有价值的结果, 证实土的回弹过程是一个时间的过程。李建民等<sup>[2]</sup>进行了黏性土、淤泥及淤泥质土等多种原状土及重塑砂土的回弹变形试验, 结果显示, 在不同的固结压力下, 最后一两级卸荷时回弹变形量最大且的滞后性最为明显, 且这种变形的滞后性淤泥及淤泥质土最大, 黏性土次之, 砂土最小。刘国彬等<sup>[3]</sup>把基坑底土体的隆起看作一个流变过程, 利用三轴流变仪, 模拟基坑开挖

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379132)

收稿日期: 2014-09-10

时坑底土体的应力路径,进行了卸载流变试验。师旭超等<sup>[4]</sup>进行了软黏土卸荷回弹吸水试验,研究了回弹变形与吸水量的关系,试验表明,在主回弹阶段,土样的回弹体积等于吸入的孔隙水体积。

在回弹变形的计算方法方面,由于没有考虑回弹的时间过程,许多设计方法基本按照最终回弹的计算原理,用折减应力的办法进行计算。折减应力使力的平衡被破坏,而且折减系数基本是经验性的,使计算分析预测与实测结果相差巨大。Mesri等<sup>[1]</sup>认为由于渗透速率的有限性、土颗粒的重新排列、土体岩化黏接力的逐渐丧失、土体非连续性逐渐扩展以及化学的作用等可能的回弹机理过程都是时间的过程,土的回弹必然是一个时间过程。通过试验与Terzaghi理论的对比, Mesri等认为Terzaghi理论在初始回弹量的60%以内时,尚可以正确地模拟回弹变形曲线的形状,但当回弹量超过60%以后,回弹变形曲线的形状则由次回弹特性控制。尽管部分形状相似, Mesri等发现,试验的回弹速率与Terzaghi理论相差很大,相差15到30倍以上。他认为采用有限变形的非线性固结理论是解决上述问题的手段,并建议在 $e - \lg p$ 关系中增加 $\lg t$ 项以模拟次回弹效应。李玉岐等<sup>[5]</sup>认为回弹与土体中的负超静孔压消散有关。

本文的研究主要包括两部分内容:①进行了土的回弹试验研究。用两种制备土样,进行了加卸荷循环试验研究。通过试验,研究了固结系数、回弹系数在试验过程中的变化规律。通过试验证实,固结系数与回弹系数不是一个固定的常数,是一个以加卸荷为周期循环重复变化的过程因子;研究比较了吸水回弹与吸气回弹对试验结果的影响,结果表明,吸水与吸气对回弹的影响不大。②建议了一个固结/回弹变形过程的计算方法,进行了两种重塑土的加卸荷循环全过程比对和两种原状土卸荷全过程比对,理论计算与试验吻合很好,证实了变 $C_v$ 计算方法用于固结/回弹变形计算的科学性与合理性,证明回弹是固结的逆过程。

## 1 加卸荷试验

### 1.1 试验简介

试验采用南京某科技公司研制生产的新型全自动高压固结仪(见图1),该设备采用大流量高比例电气稳压系统,直接电气转换,超高速大流量,反应速度快,加荷稳定时间 $\leq 1$  s。固结压力稳定,量程3200 kPa,压力误差 $\leq 1.0\%$ 。该固结仪采用气压加载,加载过程平稳,对试验的影响小,试验质量显著提高。试验全过程电脑控制,自动完成加卸荷及数据采集,数据采集精度0.001 mm。

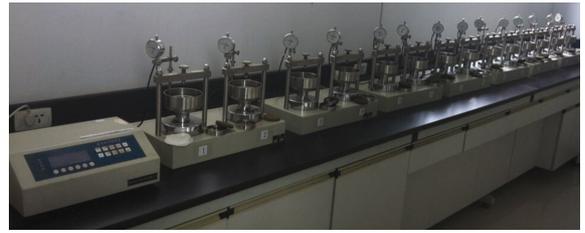


图1 全自动高压固结仪

Fig. 1 Automatic high-pressure oedometer

新型全自动高压固结仪与传统杠杆式固结仪相比,克服了传统固结仪的振动、冲击、晃动、偏心等人为因素对试验的影响;减小了工作强度;数据采集时间统一,准确可靠,避免了人工计时、读数带来的误差。

试验程序。试验采用分级加卸荷方法,每组土样的荷载程序为100, 200, 400, 800, 1600, 800, 400, 200, 100, 0 kPa,每一级加卸荷均持续24 h,其间按照设定的时间间隔采集变形读数。卸载试验过程与加载试验过程<sup>[8]</sup>完全一致。为了减小侧壁的摩擦影响,试验前在环刀内壁涂抹了硅脂以减小摩擦力。

试验目的。加卸荷循环试验,通过加卸荷的完整过程,研究加卸荷过程中的固结系数、回弹系数特性,验证理论方法。吸水回弹和吸气回弹试验,比较吸水与吸气对回弹过程的影响。

试验土样为重塑土,土样指标见表1。土样高度为2 cm,土样直径79.8 mm。为了保证试验的可靠性,每组试验均进行了重复的备份性试验。

表1 试验用重塑土物理指标

Table 1 Soil properties

土样	$w$ /%	$\rho_d$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$G_s$	$e$	颗粒含量/%		
					>0.075	0.075~	<0.005
					cm	0.005 cm	cm
#1	28.3	1.55	2.76	0.781	18.0	55.7	26.3
#2	21.3	1.70	2.70	0.588	17.5	74.6	7.9

### 1.2 几个基本试验结果与概念

将回弹作为固结的逆过程,因此,固结理论的基本方程以及基本方程的解都适用于回弹过程,无须另行定义其他的变量,只需把固结过程的定义扩展为固结回弹过程,超静孔压扩展为超静孔压与吸力等。固结度则扩展为回弹度与固结度:

$$U_t = \frac{S_t}{S_\infty}, \quad (1)$$

式中, $U_t$ 是 $t$ 时刻的回弹度/固结度, $S_t$ 是 $t$ 时刻的变形, $S_\infty$ 是最终变形。在固结过程中表示固结度,回弹过程则为回弹度。

图2,3分别是#1土样和#2土样的试验加卸荷过程

线, 图2 (a)、3 (a) 是变形与时间的过程线, 图2 (b)、3 (b) 是回弹度/固结度的过程线。为便于比较, 把固结与回弹过程画在一起。首先, 回弹的量值, 可以看到即使与最大的固结变形相比, 回弹也是不可忽略的。其次, 可以看到, 无论卸荷量的大小、卸荷次序的先后, 卸荷回弹过程与加载固结过程类似, 都是时间变化的过程, 没有回弹能很快完成的迹象。从回弹度/固结度过程线 (图2 (b)、3 (b)) 可以看到, 多数回弹线落在固结线 (加载800~1600 kPa) 的下方, 说明回弹不仅不能快速完成, 甚至比熟知的固结过程还要慢。因此认为回弹过程能够很快完成是缺乏依据的, 在进行回弹计算分析时应当考虑回弹的时间过程。

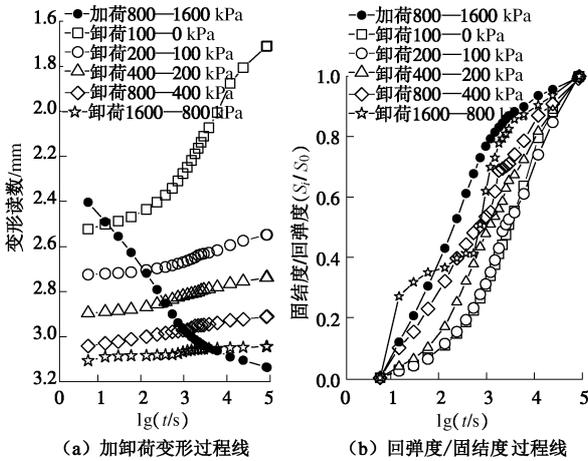


图 2 沉降、回弹时间过程线 (#1 土样)

Fig. 2 Consolidation and swelling processes of sample No. 1

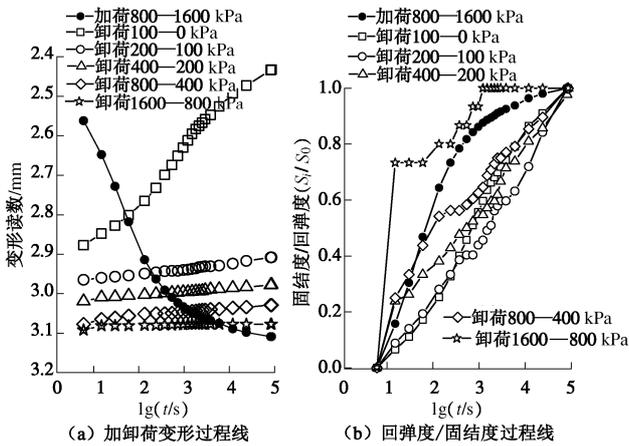


图 3 沉降、回弹时间过程线 (#2 土样)

Fig. 3 Consolidation and swelling processes of sample No. 2

图4是荷载与最终变形关系的试验结果, 即所谓的  $e - \lg p$  曲线。在理论研究中可以按照不同时间的荷载与变形绘制出不同时间的  $e - \lg p$  曲线。而在工程研究的多数情况下, 除非特别声明,  $e - \lg p$  曲线一般是根据图2 (a)、3 (a) 曲线终点得到, 表示的是荷载与最终变形之间的极限关系, 并非即时的荷载变形关系。因此, 从理论上说, 根据  $e - \lg p$  曲线计算得到的是最终变形, 用  $e - \lg p$  关系计算得不到即时变形。

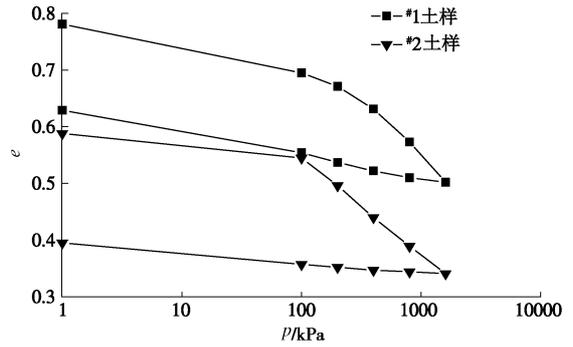


图 4 荷载与最终变形的关系

Fig. 4 Load-settlement curves

### 2 回弹变形的计算方法

Terzaghi 在讨论土的回弹机理时认为, 荷载  $p$  卸除的瞬间会在土体内产生一个与  $p$  大小相同作用相反的膨胀势, (如膨胀势得不到发挥, 便会在土体内产生吸力), 膨胀势(吸力)使土体内外产生孔隙水压力差, 压力差使外部的的水渗入土内, 直到压力差消失<sup>[1]</sup>。因此回弹过程是水气的吸入过程, 时间则取决于外部水气的吸入速度。参照文献[4]的试验表明, 土的回弹体积等于吸入水的体积, 证实了 Terzaghi 回弹吸水的猜测。

Terzaghi 固结理论虽然能够合理地解释固结过程的基本机理, 但也存在一些问题, 如 Terzaghi 固结理论假定  $k, m_v, C_v$  为常数, 无法准确合理地再现固结试验的时间过程, 现场实测的沉降速率与 Terzaghi 理论预测结果相差过大, 土的固结系数分散性很大难以确定, 依据钻孔取样取得的固结系数也常常难以得到合理可靠的固结沉降过程等, 而以压缩固结试验为原型而建立的固结模型理论却难以合理地还原固结试验的时间过程, 成为该理论的一个短板。本文遵从 Terzaghi 的固结回弹机理, 把回弹作为固结的逆过程, 并建议了一个变  $C_v$  的计算方法用于回弹变形计算, 取得令人满意的效果。下面简要介绍变  $C_v$  的计算方法。

Terzaghi固结理论解通常可写成如下形式:

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} e^{-\frac{(2m+1)^2 \pi^2 C_v t}{4 H^2}} \quad (2)$$

式 (2) 是一个无法求和的无穷级数, 实际应用时在理论上必定存在截断误差, 关键是确定误差是否符合要求, 表 2 给出了 Terzaghi 无穷级数第一项与真值的误差, 可以看到该级数的收敛速度非常快,  $T_v$  越大误差越小, 当  $T_v$  大于 0.1 时, 误差小于 3%, 当  $T_v$  大于 0.3, 误差小于 0.02%。这一结果表明, 在多数情况下, 取用无穷级数的第一项, 精度满足要求。

表 2 Terzaghi 无穷级数解第一项相对误差

Table 2 Relative errors of 1<sup>st</sup> item of Terzaghi's infinite series solutions

$T_v$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5
误差/%	12	2.8	0.21	0.018	0.00018

如果用表 2 控制精度, 式 (2) 可以写为<sup>[6-7]</sup>,

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 C_v t}{4 H^2}}, \quad (3)$$

由 (3) 可以得到

$$C_v = \frac{4 H^2}{\pi^2 t} \ln \left( \frac{8}{\pi^2 (1 - U_t)} \right). \quad (4)$$

对于固结回弹试验而言, (4) 式中的  $U_t$ ,  $H$ ,  $t$  是已知的,  $U_t$  的定义见式 (1)。这样就可以根据 (4) 直接得出试验过程中的  $C_v$ 。

根据式 (4) 由试验反演得到的  $C_v$  值见图 5, 6, 图中舍去了加载瞬时截断误差大的试验点, 试验值的理论截断误差, 仍可用表 2 来表示。

根据试验结果, 采用下式来拟合  $C_v$  的变化关系:

$$C_v = b + \frac{a - b}{1 + \left( \frac{t}{t_0} \right)^n}. \quad (5)$$

式中  $a$  为  $t=0$  时的初始  $C_{v0}$ ;  $b$  为  $t=\infty$  时的最终  $C_{v\infty}$ ;  $t=t_0$  时,  $C_v=(a+b)/2$ , 是曲线的特征点;  $n$  为系数。参数  $a$ ,  $b$ ,  $t_0$ ,  $n$  可以通过拟合试验得到。

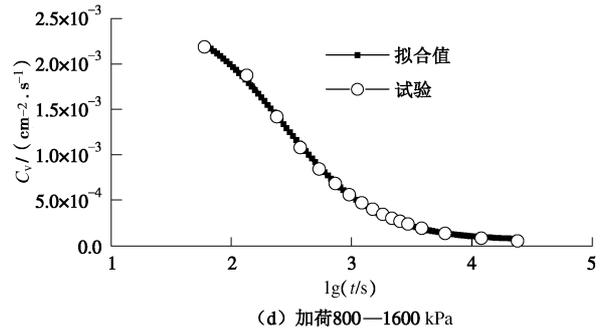
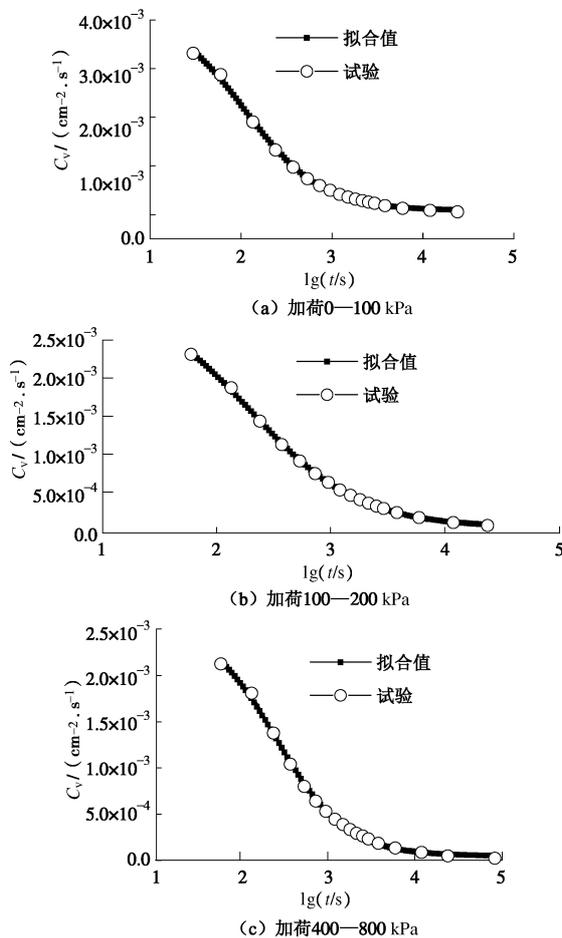


图 5 固结过程中的  $C_v$  变化与拟合 (#2 土样)

Fig. 5 Fitting curves of  $C_v$  (consolidation process of sample No. 2)

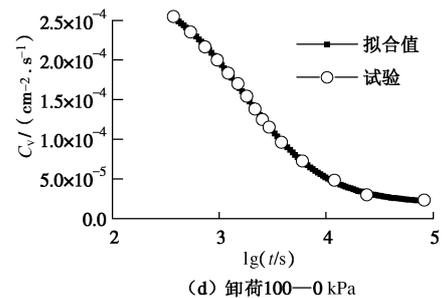
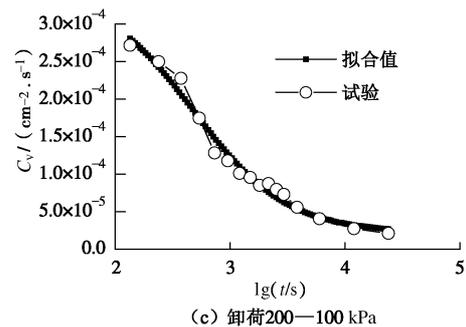
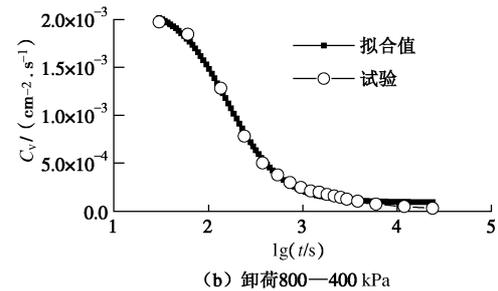
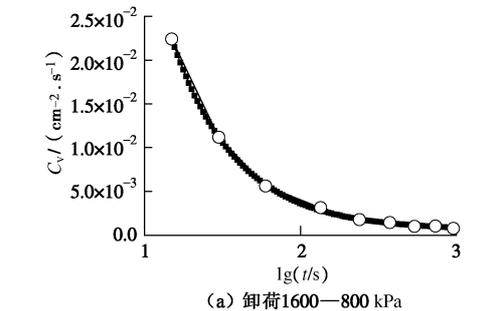


图 6 回弹过程中的  $C_v$  变化与拟合 (#2 土样)

Fig. 6 Fitting curves of  $C_v$  (swelling process of sample No. 2)

有了计算参数, 便得到了固结/回弹过程的  $C_v$ , 将变化的  $C_v$  代回式 (2) 可得到固结/回弹的时间过程。本计算方法与传统 Terzaghi 固结理论计算方法的差别是变化  $C_v$  与常数  $C_v$ 。

### 3 固结与回弹试验分析

#### 3.1 $C_v$ 与时间的关系

图 5, 6 分别给出了加荷固结和卸荷回弹过程中  $C_v$  的试验结果和式 (5) 的拟合计算结果。从图 5, 6 中可以看到, 固结过程和卸荷回弹过程  $C_v$  的变化规律基本相同, 式 (5) 很好地表现了试验结果的变化关系。无论是加载固结过程还是卸荷回弹过程可以用同一公式计算且均很好地与试验吻合, 表明固结与回弹过程内在规律的一致性。

图 7, 8 给出了两种土样不同压力增量条件下的  $C_v$  变化过程试验点, 图 7 (a)、8 (a) 是卸荷过程, 图 7 (b)、8 (b) 是加荷过程。由于图中试验点的精度符合表 2, 多数情况下由式 (3) 产生的最大误差 < 3%, 已远小于试验本身的误差。试验结果的精度取决于试验本身的精度, 与式 (3) 的截断误差无关。

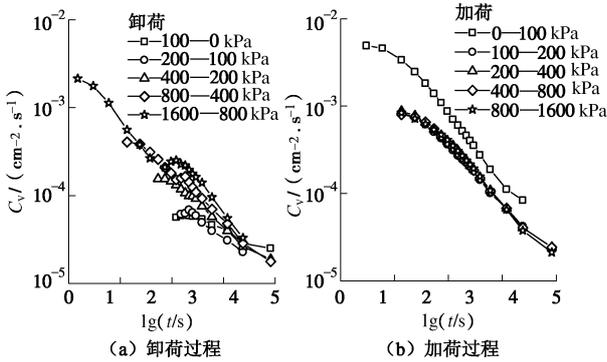


图 7 不同压力增量下的  $C_v$  变化过程 (#1 土样)

Fig. 7  $C_v$ -time relations under different loads (sample No. 1)

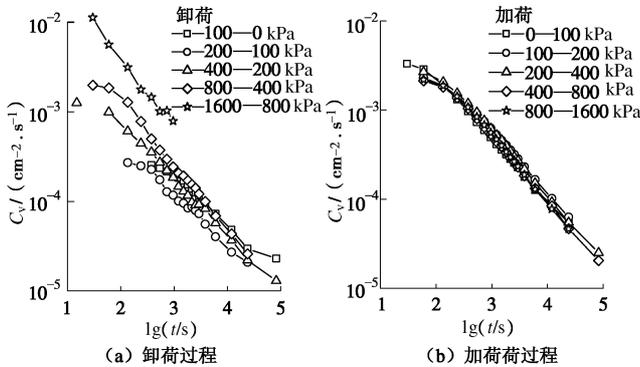


图 8 不同压力增量下的  $C_v$  变化过程 (#2 土样)

Fig. 8  $C_v$ -time relations under different loads (sample No. 2)

从试验结果可以发现: ①在加荷过程与卸荷过程中,  $C_v$  的变化范围跨过 3 个数量级区间, 表明  $C_v$  不

会是常数; ②在加荷、卸荷过程中,  $C_v$  是重复循环变化的, 在每级荷载的条件下, 变化过程基本类似, 表现出明显的以加载过程为周期的重复性, 说明  $C_v$  是一个随过程变化的过程因子, 不是一个常参数; ③卸荷过程与加荷过程  $C_v$  的变化规律基本类似, 说明卸荷回弹与加荷固结具有相同的力学机理与属性, 说明把卸荷回弹作为固结的逆过程是合理的; ④在加荷和卸荷过程中,  $C_v$  有归一性的趋势, 且加荷过程的归一性明显好于卸荷过程, 渗透性大的土 (土样 2) 好于渗透性小的土 (土样 1)。

#### 3.2 $C_v$ 与变形的关系

图 9, 10 是固结和回弹过程中  $C_v$  与变形的关系, 图中应变用对数应变表示,  $\epsilon = \lg(h_0/h_t)$ ,  $h_0$  加载前土样高度,  $h_t$  试验中的土样高度, 以压缩为正。可以看到:

①固结与回弹表现出两种不同的变化关系, 固结过程  $C_v$  与荷载增量有关, 回弹过程则与前四级荷载增量关系不大; ②  $C_v$  随变形的增加均呈减小趋势; ③回弹的最后一级, 回弹变形最大, 与文献 [2] 的结果一致; ④  $C_v$  在与变形的关系中同样表现了重复循环变化的特性。

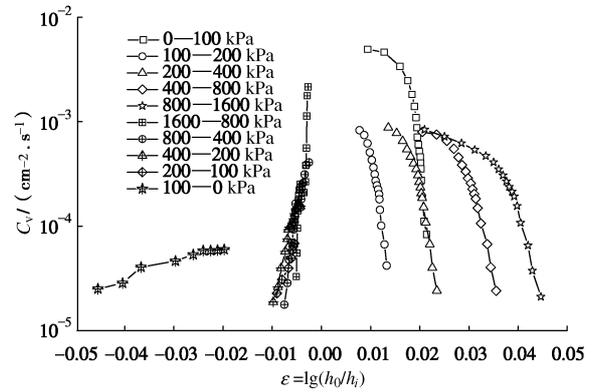


图 9  $C_v$  与变形的关系 (#1 土样)

Fig. 9  $C_v$ -strain relations under different loads (sample No. 1)

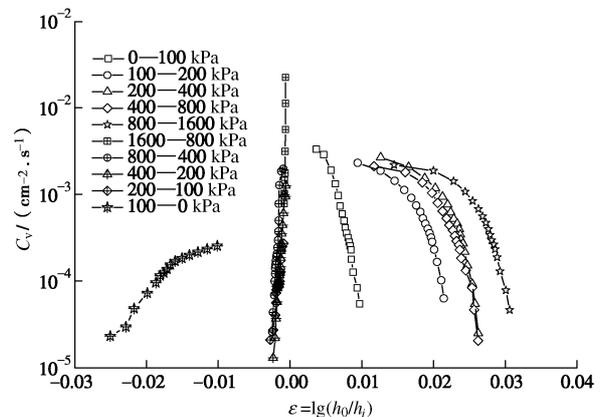


图 10  $C_v$  与变形的关系 (#2 土样)

Fig. 10  $C_v$ -strain relations under different loads (sample No. 2)

综合以上的试验结果，从 $C_v$ 的基本定义分析， $C_v$ 是渗透系数与变形系数两个变化量的比值，两个特定变量的比按照某一规律变化是合理的，而保持常数则不合常理。Davis等<sup>[9]</sup>、Barden<sup>[10]</sup>、Gibson等<sup>[11]</sup>等在研究非线性小应变固结模型和有限应变固结模型时分别假定了渗透系数与变形、变形系数与变形的关系，以上的试验结果提示，合理地确定渗透系数与变形系数两者之间的相互关系也应是非线性固结模型的基本考量之一。

### 3.3 吸气回弹与吸水回弹

图11给出了#2土样吸气回弹与吸水回弹的试验结果。图11中三角图标向下表示固结沉降，向上表示回弹。可以看到：①图中每组试验均进行了相同条件的重复平行对比试验，结果表明，试验的重复性较好，证明了试验结果的可靠性；②吸气回弹和吸水回弹的过程线基本重合，差别不大，这似乎表明回弹过程中是吸气还是吸水对回弹过程的影响不大；③除了1600—800 kPa的回弹快于800—1600 kPa的固结以外，其他在荷载增量相同的条件下，回弹过程都慢于压缩固结过程。

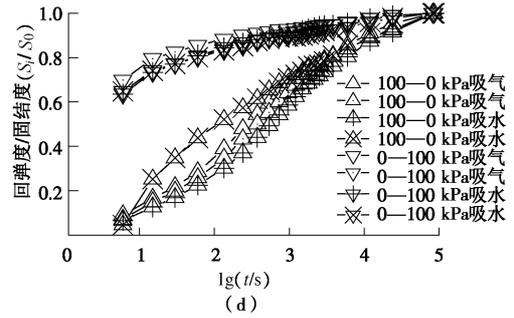
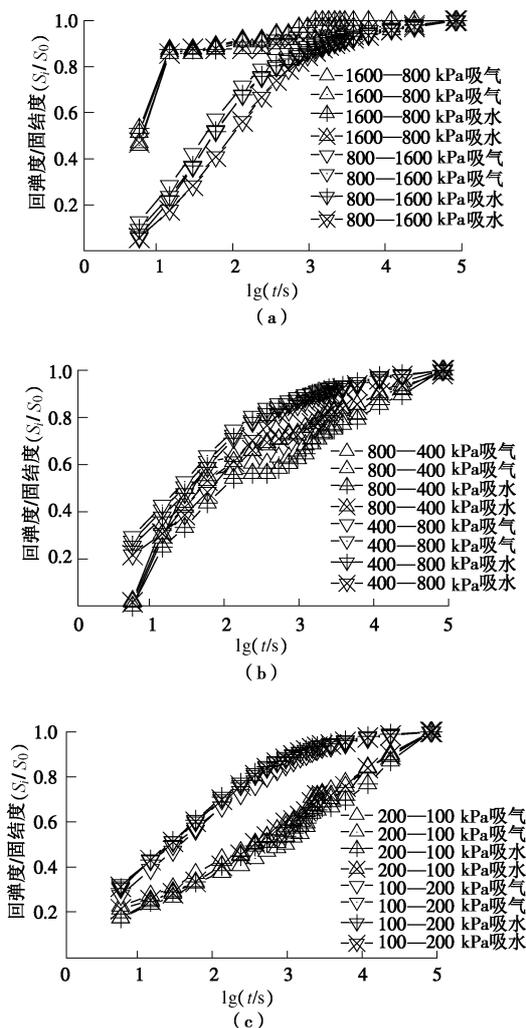


图 11 #2 土样的吸气与吸水回弹过程线

Fig. 11 Water and air absorption swelling processes (sample No. 2)

### 4 固结回弹计算与试验的对比

图 12, 13 是试验回弹过程与理论计算的比较，图中 Terzaghi 方法是采用固定  $C_v$  方法计算得到的结果，计算的  $C_v$  值，如直接采用试验室值（平方根法）则与试验相差甚远，图中的  $C_v$  是以最接近试验结果为原则，经过反复调试优化确定的。图 12 (a)、13 (a) 为回弹试验全程图，图 12 (b)、13 (b) 是前 3000 s 的试验结果。结果清晰地显示了本文变  $C_v$  方法的优越性，变  $C_v$  方法计算结果与试验基本吻合，而 Terzaghi 固定  $C_v$  方法则无法准确合理地反映试验过程。

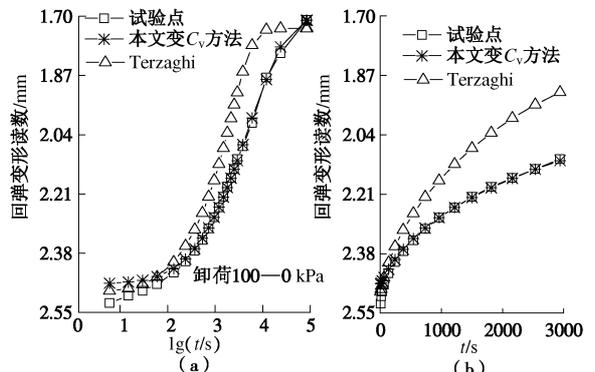


图 12 变  $C_v$  方法与 Terzaghi 方法的对比 (#1 土样)

Fig. 12 Time-varying  $C_v$  method vs Terzaghi's method (sample No. 1)

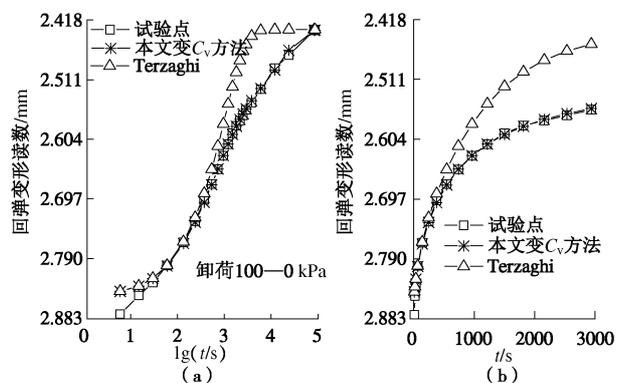


图 13 变  $C_v$  方法与 Terzaghi 方法的对比 (#2 土样)

Fig. 13 Time-varying  $C_v$  method vs Terzaghi's method (sample No. 2)

图 14, 15 分别是#1 土样、#2 土样的计算结果与固结试验沉降过程线的对比。试验数据和计算参数见附录中表 3 和附表 4。可以看到, 计算结果的绝大部分与试验过程线重合, 误差主要出现在瞬时沉降和渗流未稳定的加载初始阶段 (100 s 以前), 证明了变  $C_v$  计算方法的科学性与正确性。

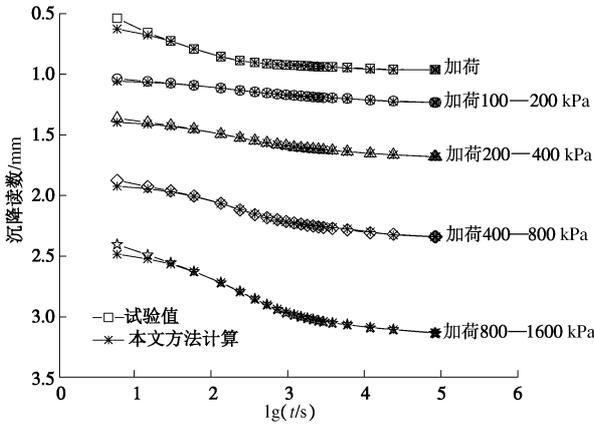


图 14 固结沉降变形与计算结果的对比 (#1 土样)

Fig. 14 Time-varying  $C_v$  method vs experiments (consolidation, No. 1 sample)

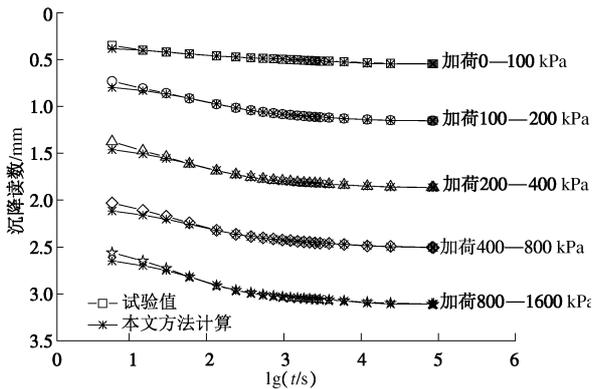


图 15 固结沉降变形与计算结果的对比 (#2 土样)

Fig. 15 Time-varying  $C_v$  method vs experiments (consolidation, sample No. 2)

图 16, 17 是计算得到的回弹过程与试验结果的对比。可以看出, 计算得到的全部回弹过程与试验结果都有很好的一致性。

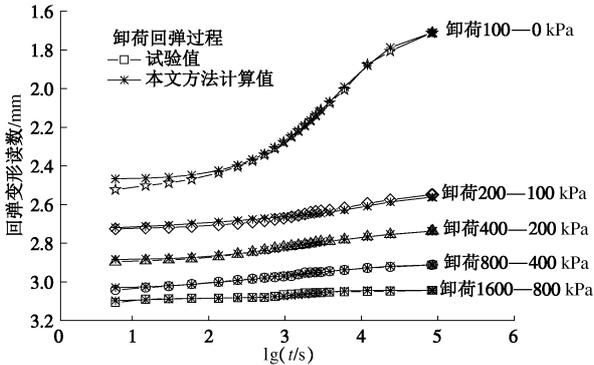


图 16 回弹过程线与计算结果的对比 (#1 土样)

Fig. 16 Time-varying  $C_v$  method vs experiments (swelling, sample No. 1)

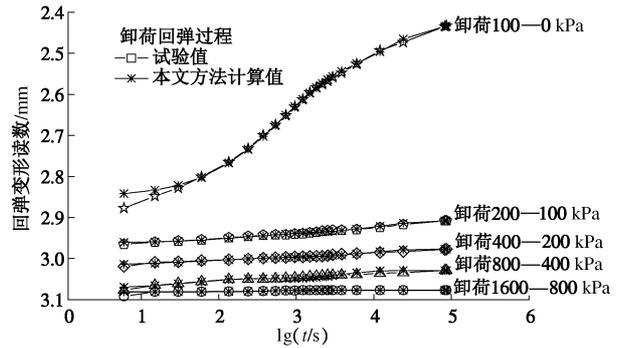


图 17 回弹过程线与计算结果的对比 (#2 土样)

Fig. 17 Time-varying  $C_v$  method vs experiments (swelling, sample No. 2)

图 18, 19 是本文方法的计算结果与参考文献[2]试验结果的对比。试验土样为钻孔获取的原状土样, 图 18 为淤泥质土, 密度为  $1.71 \text{ g/cm}^3$ , 含水率为 61.8%, 液限 58%, 孔隙比 1.39。图 19 为黏土, 密度  $1.99 \text{ g/cm}^3$ , 含水率为 21.8%, 塑性指数 17.4, 孔隙比 0.685。试验的其他情况见参考文献[2]。可以看到, 本文方法的计算结果与各级回弹试验结果, 均很好地吻合一致。

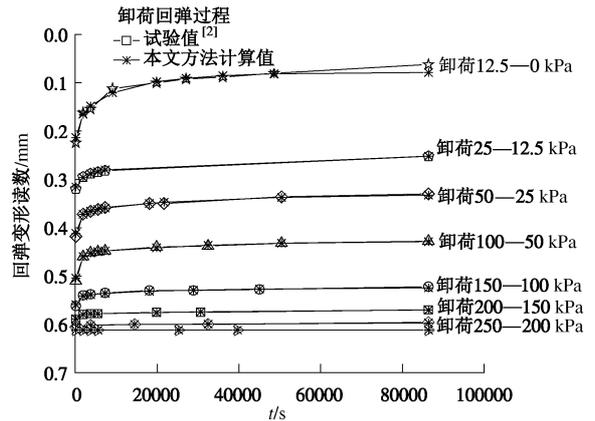


图 18 原状淤泥质黏土回弹过程线<sup>[2]</sup>与计算结果的对比  
Fig. 18 Time-varying  $C_v$  method vs. experiments (swelling, undisturbed mud clay)

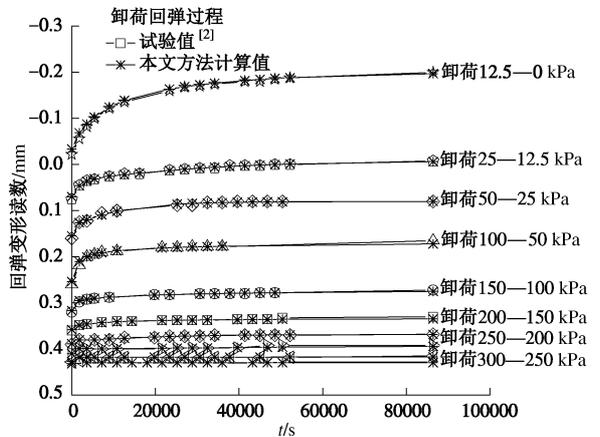


图 19 原状黏土回弹过程线<sup>[2]</sup>与计算结果的对比

Fig. 19 Time-varying  $C_v$  method vs experiments (swelling, undisturbed clay)

## 5 结 论

(1) 通过加卸荷全过程试验结果的对比, 本文变  $C_v$  方法与试验结果吻合很好, 证明回弹过程是固结的逆过程, 固结理论适用于回弹过程。

(2) 本文一方面通过试验证实  $C_v$  是变化的; 另一方面证实用变  $C_v$  的方法可以很好地再现试验的固结过程与回弹过程。通过以上两个方面工作, 证明固结过程和回弹过程中的固结系数/回弹系数是变化的, Terzaghi 常数  $C_v$  假定不合理, 常数  $C_v$  假定是造成计算结果偏差的主要原因。

(3) 试验结果表明固结系数与回弹系数不是一个固定的参数, 是一个以加卸荷过程为周期循环重复变化的过程因子。

(4) 变  $C_v$  固结/回弹理论的基础是 Terzaghi 的固结模型。试验结果表明, 该方法并不适用于主固结/主回弹之前稳定渗流未形成的瞬时沉降/回弹阶段。

**致 谢:** 研究过程中, 中国建筑科学研究院李建民博士、滕延京教授提供了图 18、19 的试验数据, 特此致谢。

### 参考文献:

- [1] MESRI G, ULLRICH C R, CHOI Y K. The rate of swelling of overconsolidated clays subjected to unloading[J]. Géotechnique, 1978, **28**(3): 281 - 307.
- [2] 李建民, 滕延京. 从不同土的室内压缩回弹试验分析基坑开挖回弹变形的特征[J]. 建筑科学, 2011, **27**(1): 72 - 77. (LI Jian-min, TENG Yan-jing. Researching for the character of rebound deformation of foundation pit excavation by compression and resilience test of different sorts of soil[J]. Building Science, 2011, **27**(1): 72 - 77. (in Chinese))
- [3] 刘国彬, 贾付波. 基坑回弹时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 1): 3041 - 3044. (LIU Guo-bin, JIA Fu-bo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3041 - 3044. (in Chinese))
- [4] 师旭超, 韩 阳. 卸荷作用下软黏土回弹吸水试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 733 - 736. (SHI Xu-chao, HAN Yang. Water absorption test of soft clay after rebound under unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 733 - 736. (in Chinese))
- [5] 李玉岐, 魏 婕, 谢康和. 负孔压消散对抗底的回弹影响研究[J]. 长江科学院院报, 2005, **22**(4): 53 - 55. (LI Yu-qi, WEI Jie, XIE Kang-he. Study on influence of dissipation of negative pore water pressure on heave of pit base[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, **22**(4): 53 - 55. (in Chinese))
- [6] 武汉水利电力学院土力学教研组. 土力学地基与基础[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961: 174 - 174. (Soil Mechanics Teaching and Research Group, Wuhan Institute of Water Conservancy and Electric Power. Soil mechanics and foundation[M]. Beijing: China Industry Press, 1961: 174 - 174. (in Chinese))
- [7] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. (GONG Xiao-nan. Advanced soil mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996. (in Chinese))
- [8] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese)).
- [9] DAVIS E H, RAYMOND G P. A non-linear theory of consolidation[J]. Géotechnique, 1965, **15**(2): 161 - 173.
- [10] BARDEN L. Consolidation of clay with non-linear viscosity[J]. Géotechnique, 1965, **15**(2): 345 - 362.
- [11] GIBSON R E, ENGLAND G L, HUSSEY M J L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers[J]. Géotechnique, 1967, **17**(3): 261 - 267

附录:

表 3 #1 土样试验数据及计算参数 (土样初始高度 2 cm,  $e_0=0.781$ )

Table 3 Test data and parameters of sample No. 1 (initial height=2 cm,  $e_0=0.781$ )

$t$ /s	固结变形读数/mm					回弹变形读数/mm				
	0—100 kPa	100—200 kPa	200—400 kPa	400—800 kPa	800—1600 kPa	1600—800 kPa	800—400 kPa	400—200 kPa	200—100 kPa	100—0 kPa
6	0.539	1.038	1.362	1.876	2.404	3.107	3.042	2.896	2.725	2.523
15	0.659	1.06	1.398	1.926	2.491	3.090	3.029	2.890	2.721	2.502
30	0.726	1.074	1.422	1.962	2.555	3.087	3.022	2.886	2.718	2.488
60	0.793	1.092	1.453	2.005	2.627	3.085	3.012	2.88	2.714	2.469
135	0.856	1.115	1.494	2.065	2.719	3.084	3.000	2.869	2.705	2.436
240	0.888	1.134	1.526	2.118	2.791	3.082	2.990	2.856	2.698	2.404
375	0.904	1.147	1.549	2.157	2.852	3.081	2.984	2.845	2.691	2.373
540	0.914	1.156	1.566	2.183	2.900	3.081	2.979	2.836	2.684	2.342
735	0.920	1.164	1.580	2.200	2.939	3.075	2.976	2.827	2.676	2.309
960	0.924	1.170	1.591	2.214	2.967	3.068	2.972	2.820	2.670	2.277
1215	0.926	1.175	1.602	2.227	2.985	3.063	2.970	2.815	2.663	2.248
1500	0.930	1.179	1.609	2.235	3.001	3.061	2.961	2.811	2.656	2.218
1815	0.933	1.184	1.613	2.246	3.013	3.058	2.952	2.807	2.649	2.189
2160	0.937	1.189	1.618	2.252	3.023	3.057	2.951	2.803	2.639	2.164
2535	0.939	1.192	1.621	2.259	3.033	3.056	2.950	2.796	2.635	2.138
2940	0.940	1.194	1.625	2.264	3.041	3.055	2.949	2.792	2.632	2.110
3840	0.941	1.196	1.63	2.272	3.051	3.053	2.945	2.789	2.628	2.073
6000	0.945	1.201	1.639	2.284	3.063	3.052	2.939	2.781	2.617	2.006
12000	0.953	1.214	1.654	2.307	3.090	3.050	2.928	2.766	2.594	1.876
24000	0.962	1.222	1.664	2.320	3.105	3.048	2.923	2.755	2.575	1.806
82800	0.964	1.233	1.681	2.340	3.135	3.044	2.912	2.738	2.548	1.712
86400	0.964	1.233	1.682	2.341	3.137	3.044	2.911	2.737	2.548	1.710
计算参数										
$a$	0.00557	0.00107	0.00113	$9.37 \times 10^{-4}$	0.00106	0.00258	$6.49 \times 10^{-4}$	$1.90 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-3}$	$6.47 \times 10^{-5}$
$b$	$1.02 \times 10^{-4}$	$2.89 \times 10^{-5}$	$1.68 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-5}$	$7.24 \times 10^{-6}$	$1.48 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-5}$	$1.64 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$	$2.33 \times 10^{-5}$
$t_0$	194.6943	476.4359	499.4115	692.6816	553.8095	46.47256	299.2367	2154.605	42.80268	8028.827
$n$	1.14744	1.0081	0.96847	1.15337	0.9246	1.4083	0.75356	1.13003	0.74071	1.44748

表 4 #2 土样试验数据及试验参数 (土样初始高度 2 cm,  $e_0=0.588$ )

Table 4 Test data and parameters of sample No. 2 (initial height=2 cm,  $e_0=0.588$ )

$t$ /s	固结变形读数/mm					回弹变形读数/mm				
	0—100 kPa	100—200 kPa	200—400 kPa	400—800 kPa	800—1600 kPa	1600—800 kPa	800—400 kPa	400—200 kPa	200—100 kPa	100—0 kPa
6	0.348	0.731	1.375	2.03	2.562	3.092	3.077	3.019	2.965	2.877
15	0.401	0.808	1.474	2.109	2.648	3.081	3.065	3.009	2.960	2.848
30	0.421	0.858	1.540	2.172	2.728	3.081	3.061	3.008	2.957	2.828
60	0.442	0.915	1.613	2.243	2.818	3.081	3.056	3.005	2.954	2.801
135	0.462	0.977	1.686	2.322	2.914	3.080	3.051	3.003	2.949	2.765
240	0.474	1.015	1.728	2.365	2.963	3.080	3.050	3.001	2.946	2.732
375	0.482	1.041	1.755	2.389	2.991	3.079	3.050	2.999	2.943	2.699
540	0.487	1.060	1.774	2.403	3.009	3.079	3.049	2.998	2.942	2.674
735	0.493	1.073	1.787	2.415	3.023	3.078	3.048	2.997	2.942	2.651
960	0.498	1.084	1.795	2.425	3.033	3.078	3.047	2.996	2.940	2.630
1215	0.501	1.091	1.803	2.432	3.041	3.077	3.046	2.996	2.939	2.612
1500	0.505	1.098	1.812	2.441	3.047	3.077	3.044	2.995	2.937	2.595
1815	0.509	1.104	1.817	2.446	3.051	3.077	3.043	2.994	2.936	2.583
2160	0.512	1.109	1.820	2.450	3.055	3.077	3.042	2.994	2.933	2.575
2535	0.515	1.113	1.822	2.456	3.060	3.077	3.041	2.993	2.932	2.567
2940	0.517	1.116	1.827	2.458	3.063	3.077	3.041	2.991	2.931	2.558
3840	0.518	1.121	1.831	2.462	3.068	3.077	3.040	2.989	2.931	2.547
6000	0.523	1.129	1.838	2.473	3.075	3.077	3.039	2.988	2.929	2.526
12000	0.534	1.140	1.851	2.489	3.089	3.077	3.036	2.985	2.924	2.493
24000	0.541	1.147	1.858	2.494	3.098	3.077	3.034	2.983	2.917	2.473
82800	0.547	1.153	1.866	2.504	3.109	3.077	3.029	2.978	2.908	2.434
86400	0.547	1.153	1.867	2.506	3.109	3.077	3.029	2.977	2.908	2.433
计算参数										
$a$	0.00416	0.003	0.00367	0.00353	0.00254	10.65303	0.00216	0.00145	$3.45 \times 10^{-4}$	$2.95 \times 10^{-4}$
$b$	$8.10 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-5}$	$2.18 \times 10^{-5}$	$1.98 \times 10^{-5}$	$5.61 \times 10^{-5}$	$6.01 \times 10^{-4}$	$8.96 \times 10^{-5}$	$3.03 \times 10^{-5}$	$2.21 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-5}$
$t_0$	112.8904	212.8246	167.0513	139.9494	285.4716	0.03892	161.6421	105.8394	487.3105	1707.883
$n$	1.04236	0.9223	0.91633	0.90965	1.12745	1.0397	1.53169	0.99062	1.07912	1.13633