

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.001

反复等向加卸载路径下粉质黏土变形特性研究

陈勇¹, 隆海鹏¹, 曹玲¹, CHAN Dave^{1,2}

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌 443002;
2. Alberta大学土木与环境工程系, Edmonton, AB T6G 2W2)

摘要: 黏土的变形特性与应力路径密切相关, 直接影响到相关工程的安全性。针对三峡库岸某路基边坡粉质黏土, 采用应力路径控制试验系统, 开展了两组等向固结应力状态下反复多次的加卸载试验, 揭示了土体的体积变形发展规律, 发现再固结过程呈现为一条先平缓后变陡的曲线, 说明前期固结压力范围内的再加载也会产生不可恢复的塑性变形, 且变形速率随加卸载循环次数逐渐减小。最后, 结合试验曲线特点, 建立了土体再固结系数与加卸载次数及应力状态相关的数学模型, 能够较好的模拟反复等向加卸载条件下土样的体变特征, 且可预测土体经历更多次加卸载循环中的次固结过程, 为土体的持续塑性变形分析和预测提供参考。

关键词: 反复加卸载; 再固结系数; 应力路径; 数学模型

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0145-07

Cyclic Response and Modeling of Saturated Silty Clay Due to Repeated Isotropic Loading and Unloading

CHEN Yong¹, LONG Haipeng¹, CAO Ling¹, CHAN Dave^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Three Gorges University, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, AB T6G 2W2, Canada)

Abstract: The deformation characteristics of clay are closely related to the stress path, which affects the safety of related projects directly. Aiming at the silty clay from a embankment slope beside Three Gorges Reservoir, two groups of repeated isotropic loading-unloading tests are completed by stress path controlling equipment, which reveals the cyclic response of soil volumetric deformation. The re-loading processes can be described as curves of first gentle and then steep, which induces unrecoverable plastic deformations even when the stresses are in the range of pre-consolidated pressure, and the deformation rate decreases gradually with the increase of loading-unloading cycles. Then, on the basis of the characteristics of test curves, a mathematical model is established to describe the relationship of re-consolidation coefficients with the cycle number and the stress state. The presented model can simulate the volumetric cyclic response due to repeated isotropic loading and unloading and predict the deformation developments due to more reloading cycle. Moreover, the calculation results can also pro-

* 收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409149)、中国地质调查局项目(DD20190716)资助

作者简介: 陈勇(1980-), 男, 教授, 博士, 博导。主要从事土的本构关系及库岸边坡稳定性分析等方面的研究。

Email: cyonger@126.com

vide references for analyzing and predicting the continuous plastic deformation well.

Keywords: repeated loading-unloading; coefficient of re-consolidation; stress path; mathematic model

引言

随着我国城乡一体化的发展,大量的道路、公园及单层工业厂房等修建于黏土基础之上。受城市地下水位的周期性变动,如泰国曼谷、日本东京、中国台湾、上海和天津等地,建筑设施的安全持续遭受着地面沉降的威胁^[1-5]。尽管很多国家和地区采取多种措施限制地下水的开采,然而自然环境的变化导致地下水位的周期性变动,仍然会诱发不可恢复的地面沉降。类似的,城市道路基础施工中会进行超载预压,地基黏土层在运行期也会持续承受着前期压力范围内的反复卸载和再加载作用,采用传统的简单弹塑性模型认为土体的回弹和再压缩是弹性的,不能准确描述土体的不可恢复变形。因此,上述应力路径下黏土的变形机制需要进一步研究和认识,从而有效指导地面沉降的准确预测。

国内外关于反复加卸载对地面沉降影响的研究,大多基于比奥固结理论和渗流场-应力场-位移场的耦合模型开展数值模拟^[5-7],考虑土体的非线性特征及渗流与应力的相互作用,使土体变形过程的刻画更切合实际,但上述模型并没有考虑周期性加卸载对土体的变形特性参数如弹性模量、压缩系数、固结系数等的影响。章为民等^[8]基于固结仪开展土的卸荷回弹试验研究,认识到固结系数与回弹系数不是一个固定的参数、而是一个以加卸荷过程为周期循环重复变化的过程因子;R. Butterfield针对黏土一维再压缩过程的试验结果,认为再压缩模量与应力状态具有相关性,并建立了描述模型^[9];S. Apichat等^[10]试验研究了反复一维加卸载作用下土体变形特性发展规律,并建立再压缩系数的数学模型以预测日本 saga 平原的地面沉降问题。姚仰平^[11]在建立 UH 模型时,也认识到超固结土再压缩曲线的斜率介于正常压缩线斜率与回弹线斜率之间。

事实上,边坡和路基土体的应力状态并不满足 K_0 应力状态,地下水位的升降对竖向和侧向压力的加卸载作用是等值的,因此,等向固结应力状态下反复多次的加卸载试验及建立土体再固结系数与

加卸载次数及应力状态相关的数学模型,是本文的研究侧重点,有望为土体的持续塑性变形计算和分析提供参考。

1 试验设备和方案

试验设备为英国 GDS 公司生产的应力路径三轴试验系统,该系统由压力控制器、压力室、数据采集板及控制软件组成,精度高、易控制,是目前国际上最先进的土工仪器之一。

试验土样取自三峡库岸某路基边坡,呈浅黄色,取样处原始埋藏深度约 15 m,如图 1 所示。土样初始干密度为 1.49 g/cm^3 、比重为 2.739;结合筛析法与密度计法开展颗粒级配分析,其中土样粒径在 1 mm 以下的含量接近 95%,小于 0.075 mm 的细粒含量约为 82%,由此推知,土样细粒成分较多;采用液限塑限联合法测定液限为 43.86、塑限为 26.98,根据塑性指数及细粒含量判定该土样为粉质黏土。筛分取 2 mm 以下烘干土颗粒,加水后密封静置 24 h 后,削土制成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试样,置入装样环后进行抽真空饱和,两组试样的初始物理状态指标见表 1。

根据试样埋藏深度、前期预压荷载及运行期实际交通荷载,确定本研究的固结压力范围,试验方案分为三个步骤:(1)在三轴仪中对两组试样完成反压饱和,随后分别逐级固结至 400 和 800 kPa 的最



图 1 边坡开挖处原状土样

Fig.1 The undisturbed samples excavated from the slope

表 1 试样初始物理状态指标

Table 1 The initial physical state of samples

试样 编号	含水率/ %	土体相 对密度	密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	饱和度/ %
1	36.97	2.739	1.810	1.072	94.43
2	38.02	2.739	1.803	1.096	94.98

大有效围压以完成初次加载,再分别逐级卸载有效围压至 50 kPa 和 100 kPa,以此作为第一次加卸载循环;(2)然后对两个试样分别在 50~400 kPa 和 100~800 kPa 进行有效固结压力的加载和卸载试验,根据试样变形发展规律确定加卸载循环次数,本次试验在完成 4 次循环后停止;(3)最后再逐级增大固结压力至其超过前期的最大有效围压,以研究继续加载时土体的变形特性。试验中,精确测量各级压力下土体的排水和吸水情况,以此计算土体各阶段的体积变形和孔隙比变化。

2 试验结果和分析

2.1 本研究的两组试验成果

由于黏土在后续等向加卸载过程中孔隙体积的变化,明显小于初次加载过程,为反映这些差距,将第一次加卸载与后续有加卸载过程分开列图表示。图 2 为不同等向固结压力作用下两组试样初次加卸载过程的 $v-\ln p'$ 关系曲线,其中比容 $v=1+e$ 、有效平均应力 $p'=(\sigma'_1+2\cdot\sigma'_3)/3$ 。可知:(1)两组重塑土样的固结曲线都有转折,固结屈服应力都在 30 kPa 左右;(2)土体经历第一次加卸载过程后,在最低压力时的孔隙比减小幅度近 20%,说明土体发生了明显的不可恢复的塑性变形,且塑性变形的幅

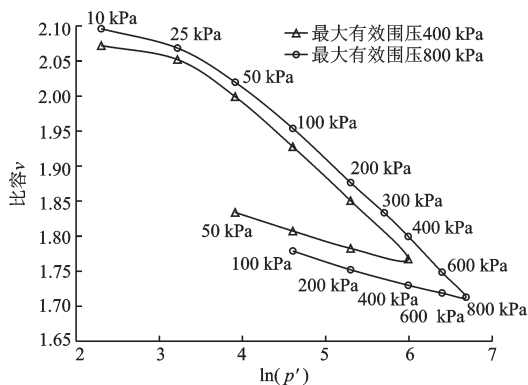


图 2 初次加卸载过程的 $v-\ln p'$ 关系

Fig.2 Consolidation curve of first loading and unloading

值比弹性变形更大;(3)所列两组不同压力范围的重塑土样,其固结及回弹过程线基本平行, $v-\ln p'$ 固结曲线斜率平均值 $\lambda=0.115$,回弹曲线斜率平均值 $\kappa=0.0293$ 。

两组黏土试样在第 2~4 次加卸载的变形规律,如图 3 所示,有效围压范围分别为 50~400 kPa、100~800 kPa。可知:(1)两组试样在每次加卸载循环过程中,卸载曲线比加载曲线位置略低,即相同压力下孔隙比略有减小,说明在最大有效压力范围内的多次加卸载也会造成土体发生塑性变形;(2)每次加卸载循环中,回弹过程接近直线,但再固结过程是一条先平缓后变陡的曲线,曲线斜率不再是常数;(3)比较最低固结压力对应的孔隙变化,发现每个循环造成的孔隙比减小量在逐渐减小,说明加卸载造成的塑性变形随循环次数呈逐渐减小的趋势;(4)完成 4 次加卸载循环后,最后一步再加载过程中,当压力超过前期最大有效压力时,固结线斜率明显增大,与初次加载线斜率基本一致。

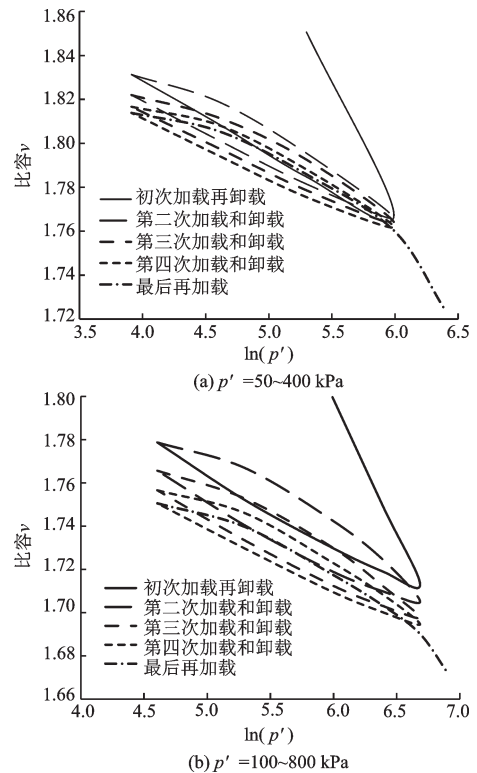


图 3 反复加卸载过程的 $v-\ln p'$ 关系

Fig.3 Consolidation curve of repeated reloading and unloading

上述现象可总结为:在前期最大压力范围内,相同压力下,土体的孔隙率随着加卸载循环次数的增大逐渐降低,且变化幅度呈逐渐减缓的趋势。根

据已有关于土体孔隙分布的测试和研究成果^[12-13],分析出现上述现象的内在原因是:土体的初始孔隙是由大小不同的孔隙组成的,初次加载固结使得大孔隙首先被压缩而减小,在卸载回弹时大孔隙并不能完全恢复原状而形成中等孔隙,从而造成土体表现为较大的塑性变形;而之后的再加载和回弹过程,使中等孔隙的体积先被压缩又部分的回弹,每一次中等孔隙向小孔隙发展的过程,就是土体持续呈减缓趋势出现塑性变形的过程,也是颗粒不断调整重新排列的过程。

2.2 文献试验成果

文献[10]针对原状 Ariake 黏土试样,完成了四个加卸载循环的一维固结试验,有效竖向压力在 40~310 kPa 内变化, $v-\ln p'$ 固结曲线斜率平均值 $\lambda=0.176$, 回弹曲线斜率平均值 $\kappa=0.0115$ 。试验结果如图 4 所示。

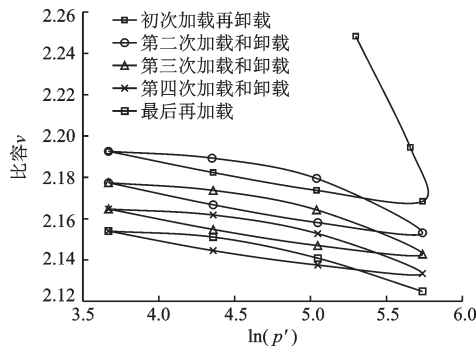


图 4 Ariake 黏土的反复加卸载试验成果

Fig.4 Repeated intermeditated unloading-reloading paths using undisturbed Ariake clay samples

根据试验结果发现,随着加卸载循环次数的增加,土体呈现出持续增大的塑性变形,与本文试验现象一致,且体积变化更大。其内在原因是:原状黏土主要受微观结构的控制,初次加载造成了土体结构的明显破坏,而反复加卸载形成的持续塑性变形也是由于破坏效应引起的^[10]。

3 数学模型的构建

3.1 构建模型的假设与要求

为进一步优化对反复加卸载作用下土体变形特性的模拟和预测,根据试验成果,可认为超过屈服应力后的初次加载过程线在一定压力范围内为直线,并假设所有回弹过程均为完全弹性。该数学

模型至少还应满足以下几个要求:

(1)再加载过程用曲线描述,且与应力状态相关;

(2)每一次再加载和回弹过程完成后,土体应能呈现新的塑性变形;

(3)上述塑性变形随着循环次数而逐渐减小,因此模型参数应与循环次数建立联系;

(4)不同压力范围内的加卸载作用下,塑性变形并不相同,模型参数应与加卸载压力范围有关。

3.2 模型的构建

剑桥模型中对正常等向固结曲线的数学描述为:

$$(v - v_0) = -\lambda(\ln p' - \ln p'_0)$$

$$\text{或} \quad dv = -\lambda dp'/p' \quad (1)$$

该式为半对数坐标系下的表述,其中: v_0 、 p'_0 为起始点对应的比容和有效固结应力, λ 为固结线斜率。

将本文研究的反复“等向加卸载”试验过程绘制于双自然对数坐标下,如图 5 所示,则各阶段的关系曲线可描述为:

$$(\ln v - \ln v_0) = -\lambda'(\ln p' - \ln p'_0)$$

$$\text{或} \quad dv/v = -\lambda' dp'/p' \quad (2)$$

式中, λ' 为双自然对数坐标中固结线在压力 p' 对应点处的斜率,均取其绝对值。反复加卸载过程中, λ'_1 、 λ'_s 分别代表初始固结加载段和卸载段的斜率,均为常数;再加载过程为曲线描述, λ' 为该曲线任意点的斜率,曲线起始点和终点的斜率分别表示为 λ'_e 、 λ'_r ,存在 $\lambda'_e \geq \lambda' \geq \lambda'_r$ 。

在等向固结试验中,定义此时体积压缩系数 m 为土体在无侧限条件下体积应变(压缩为正)与有效应力增量的比值,即:

$$m = d\epsilon_v/dp' \quad \text{或} \quad m \cdot dp' = -dv/v \quad (3)$$

联合(2)式得:

$$m \cdot p' = \lambda' \quad \text{或} \quad \ln m = -\ln p' + \ln \lambda' \quad (4)$$

由(4)式, $\ln m$ 与 $\ln p'$ 形成斜率为 -1 的直线,且有 $\lambda'_1 > \lambda'_e > \lambda'_s > \lambda'_r$,如图 5 所示。本研究中,试样的初次加卸载过程表现为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 2' \rightarrow 3$,第二次加卸载循环 $3' \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 5' \rightarrow 6$,其中点 x 与点 x' 对应的固结

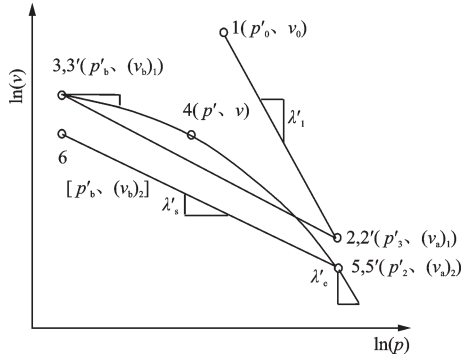


图5 双自然对数坐标下试验曲线及斜率的定义

Fig.5 The schematic curve and definition of λ' symbols in the $\ln(v) \sim \ln(p)$ plot

压力相同。3'、4、5 分别代表第二次加载过程的起点、中间任意点、终点,具有如下关系:

$$\begin{aligned} \tan\theta = k &= (\ln m_a - \ln m_b) / (\ln p'_a - \ln p'_b) \\ &= (\ln m - \ln m_b) / (\ln p' - \ln p'_b) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, p'_b 、 p' 、 p'_a 分别对应第二次加载过程起点、任意点和终点的压力; m_b 、 m 、 m_a 是对应上述点上的体积压缩系数。再根据(4)式及各点处的不同斜率可得 $m_b \cdot p'_b = \lambda'_r$, $m_a \cdot p'_a = \lambda'_e$, 代入式(5), 可知:

$$\begin{aligned} k + 1 &= (\ln \lambda'_e - \ln \lambda'_r) / (\ln p'_a - \ln p'_b) \\ &= (\ln \lambda' - \ln \lambda'_r) / (\ln p' - \ln p'_b) \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(4)和(5), 加载线上任意点的积压缩系数也可表示为:

$$\begin{aligned} \ln m &= k \cdot (\ln p' - \ln p'_b) + \ln m_b \\ &= k \cdot \ln p' + \ln \lambda'_r - (\alpha + 1) \ln p'_b \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)求导并结合式(3), 体积应变可表示为:

$$d\epsilon_v = -dv/v = m \cdot dp' = \lambda'_r (p')^k / (p'_b)^{k+1} \cdot dp' \quad (8)$$

上式两边求导并以 (p'_b, v_b) 为起点, 可得再加载曲线上任意点的比容为:

$$v = \exp \left\{ \frac{\lambda'_r}{k+1} \left[1 - \left(\frac{p'}{p'_b} \right)^{k+1} \right] \right\} \cdot v_b \quad (9)$$

根据式(2)可得初次加载直线的表达式为:

$$v/v_0 = (p'_0/p')^{\lambda'_1} \quad (10)$$

式中, (p'_0, v_0) 为初次加载线的起点, 当 $p' = p'_a$ 时, $v = (v_a)_1$, 曲线到达初次加载终点。

同理, 可得所有弹性卸载直线的表达式:

$$v = v_a \cdot (p'_a/p')^{\lambda'_s} \quad (11)$$

式中, (p'_a, v_a) 为卸载过程线的起点。

由此可得模拟反复加卸载作用的数学模型为:

$$v = \begin{cases} v_0 \cdot (p'_0/p')^{\lambda'_1} & \text{初次加载段} \\ (v_a)_1 \cdot (p'_a/p')^{\lambda'_s} & \text{初次卸载段} \\ \exp \left\{ \frac{(\lambda'_r)_n}{k+1} \left[1 - \left(\frac{p'}{p'_b} \right)^{k+1} \right] \right\} \cdot (v_b)_n & \text{再加载段} \\ (v_a)_n \cdot (p'_a/p')^{\lambda'_s} & \text{再卸载段} \end{cases} \quad (12)$$

式中, v, p' 为当前点对应的比容和有效固结应力; $v_0, p'_0, p'_b, \lambda'_0, \lambda'_s, \lambda'_e$ 均已定义, $(v_b)_n, (v_a)_n$ 分别代表第 n 次加载曲线起点 b 和终点 a 对应的比容, $k+1$ 可由起点和终点的斜率 $(\lambda'_r)_n, (\lambda'_e)_n$ 根据式(6)确定。每个阶段的终点值作为下一个阶段的起点值。

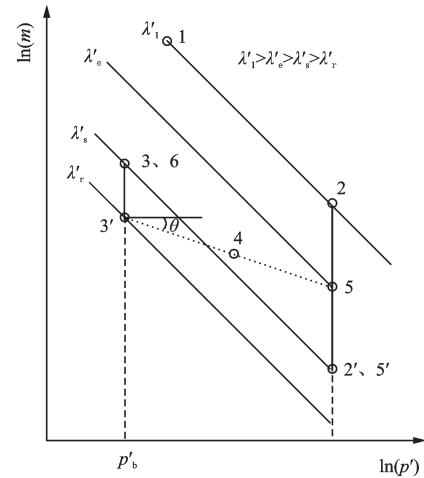


图6 $\ln(m) \sim \ln(p)$ 坐标系中的反复加卸载应力路径

Fig.6 The stress path of repeated loading-unloading in the $\ln(m) \sim \ln(p)$ plan

4 模型的验证和应用

根据本项研究和 S.Apichat 等^[10] 的试验结果, 可将如图 3、4 所示的多次加卸载过程曲线, 绘制于 $\ln(v) \sim \ln(p)$ 双对数坐标中: 初次加载斜率为 λ'_1 , 卸载线斜率为 λ'_s , 并对 4 次再加载过程线拟合, 得到各加载曲线起点和终点的斜率 $(\lambda'_r)_n, (\lambda'_e)_n$ 。运用 Matlab 编程拟合功能, 得到模型参数见表 2。

详细分析图 3、4 中加载曲线的发展及表 2 中 $(\lambda'_r)_n, (\lambda'_e)_n$ 的规律, 发现随着反复加载次数 n 的增大, 加载曲线的曲度逐渐变缓, 即起点斜率 $(\lambda'_r)_n$ 逐渐增大, 终点斜率 $(\lambda'_e)_n$ 逐渐减小。

假设 n 足够大时, 再固结曲线逐渐发展为与回弹线基本重合, 即 $(\lambda'_r)_{n \rightarrow \infty} \approx \lambda'_s, (\lambda'_e)_{n \rightarrow \infty} \approx \lambda'_s$ 。结合上述规律建立 $(\lambda'_r)_n, (\lambda'_e)_n$ 的表达式为:

表2 加卸载试验的模型参数

Table 2 Model parameters of repeated loading-unloading tests

试样参数	本文试验		A. Suddeepong ^[10]	
	试样(a)	试样(b)	Ariake 黏土	
v_0	1.930 6	1.954	2.248	
p'_0/kPa	100	100	200	
p'_b/kPa	50	100	40	
p'_a/kPa	400	800	310	
初次加载	λ'_1	0.062 6	0.063 1	0.081 9
	λ'_s	0.015 6	0.016 9	0.005 12
第二次加载	$(\lambda'_r)_2$	0.006 822	0.006 045	0.002 053
	$(\lambda'_e)_2$	0.035 02	0.050 43	0.023 52
第三次加载	$(\lambda'_r)_3$	0.006 951	0.007 258	0.002 226
	$(\lambda'_e)_3$	0.030 28	0.038 33	0.019 58
第四次加载	$(\lambda'_r)_4$	0.007 062	0.007 828	0.002 411
	$(\lambda'_e)_4$	0.028 02	0.034 84	0.016 88
第五次加载	$(\lambda'_r)_5$	0.007 125	0.008 071	0.002 57
	$(\lambda'_e)_5$	0.026 21	0.031 88	0.015 03

$$\begin{aligned} (\lambda'_r)_n &= \lambda'_s - A \cdot e^{B \cdot \sqrt{n}} \\ (\lambda'_e)_n &= \lambda'_s + C \cdot e^{D \cdot \sqrt{n}} \end{aligned} \quad (13)$$

采用式(13)对表2数据进行拟合,可得加载曲线起点和终点斜率的预测系数,见表3。

表3 加载曲线起点和终点斜率的预测系数

Table 3 Predictive coefficients on the slope at beginning and ending points of reloading curves

试样	预测系数	本文试验		A. Suddeepong ^[10]
		试样(a)	试样(b)	Ariake 黏土
起点	A	0.009 73	0.015 6	0.004 24
	B	-0.041 6	-0.263	-0.226
终点	C	0.053 9	0.115	0.049 5
	D	-0.750	-0.925	-0.707

根据上述拟合系数,将 $n=6、7、8$ 的值代入式(13),得到后续再加载对应的 $(\lambda'_r)_n、(\lambda'_e)_n$ 并代入公式(12),计算并预测每一步加卸载过程对应的体积变化,绘制 $v-\ln p'$ 关系曲线,并于试验实测值进行对比,以试样(b)及 Ariake 黏土为代表,如图7所示。由图可知:(1)本研究的两组试样尽管压力范围不同,由于试样是相同的,各加载和卸载线的斜率数值比较接近,而与 Ariake 黏土的对应数值差距较大;(2)该数学模型能较好地模拟多次“等向加卸载”路径下的土样体积逐渐收缩减小的过程,也可反映体积收缩的速率随加卸载次数逐渐减小的规

律;(3)根据试验测得模型参数的进一步拟合,能预测土样经历更多次加卸载循环中的次固结过程。

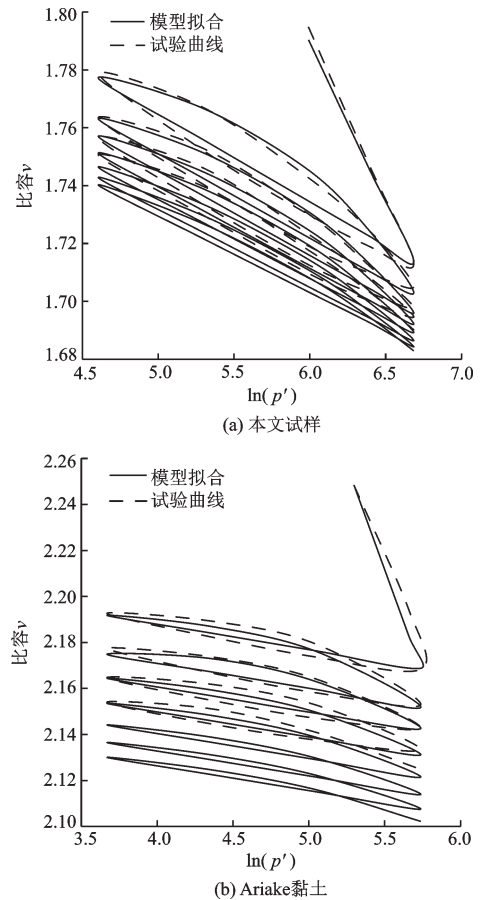


图7 试验曲线和模型预测曲线对比

Fig.7 Comparison between test curves and simulation

5 结论

在完成两组多次反复“等向加卸载”试验的基础上,结合已有试验成果,分析土样的变形特性,并建立分阶段式的预测模型,得到结论如下:

(1) 试验结果表明:通常将再压缩过程线和回弹过程线简化为斜率相同的直线,是有一定误差的;土体的再固结过程是一条先平缓后变陡的曲线,前期最大固结应力范围内的再加载也会产生塑性变形,且变形量随加卸载循环次数增大而逐渐减小。因此,在反复荷载作用下进行土体变形计算时,应考虑多次压缩过程的塑性变形。

(2) 建立的分阶段式预测模型中,再固结系数与加卸载次数及应力状态密切相关,能够较好的模拟反复“等向加卸载”路径下土体的变形发展规律,也可预测土样经历更多次加卸载循环中的次固结变形。

(3) 由于土样承受的压力值并不太高,多次等向加卸载过程,主要是造成了土中颗粒的反复重新排列,土体孔隙大小和分布不断出现变化,甚至结构发生细微损伤,致使其体积缓慢收缩,但并没有造成土体剪切或结构破坏。

鉴于次固结过程土样体变较小,上述试验研究对压力控制和排水测量的精度要求非常高,需采用较为精密的装置和精细的操作,方可获得较好的试验成果。

参考文献:

- [1] Bhattacharya A K. An analysis of land subsidence in Bangkok and Kolkata due to over-extraction of ground water[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 1 683-1 694.
- [2] Sakai A. Land subsidence due to seasonal pumping of groundwater in Saga Plain, Japan[J]. Lowland Technology International, 2001, 3(1): 24-39.
- [3] Hung W C, Hwang C, Liu J C, et al. Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan[J]. Engineering Geology, 2012, 147: 78-90.
- [4] 叶淑君,薛禹群,张云,等.上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J].岩土工程学报,2005,27(2): 140-147.
Ye Sh J, Xue Y Q, Zhang Y, et al. Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 140-147. (in Chinese)
- [5] 李文运,崔亚莉,苏晨,等.天津市地下水流-地面沉降耦合模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3): 805-813.
Li W Y, Cui Y L, Su Ch, et al. An integrated numerical groundwater and land subsidence model of Tianjin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(3): 805-813. (in Chinese)
- [6] Chai J C, Shen S L, Zhu H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai[J]. Geotechnique, 2004, 54(2): 143-147.
- [7] 骆祖江,刘金宝,李朗.第四纪松散沉积层地下水疏降与地面沉降三维全耦合数值模拟[J].岩土工程学报,2008,30(2): 193-198.
Luo Z J, Liu J B, Li L. Three-dimensional full coupling numerical simulation of groundwater dewatering and land-subsidence in quaternary loose sediments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 193-198. (in Chinese)
- [8] 章为民,顾行文,王芳,等.土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法[J].岩土工程学报,2015,37(6): 979-987.
Zhang W M, Gu X W, Wang F, et al. Swelling tests on soils and simulation method for unloading-swelling process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 979-987. (in Chinese)
- [9] Butterfield R. An improved model of soil response to load, unload and reload cycles in an oedometer [J]. Soils and Foundations, 2011, 51(2):253-263.
- [10] Suddepong A, Chai J, Shen Sh L, et al. Deformation behavior of clay under repeated one-dimensional unloading-reloading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8):1 035-1 044.
- [11] 姚仰平. UH模型系列研究[J].岩土工程学报,2015,37(2): 193-217.
Yao Y P. Advance UH model for soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 193-217. (in Chinese)
- [12] 陶高梁,张季如,庄心善,等.压缩变形影响下的土-水特征曲线及其简化表征方法[J].水利学报,2014,45(10): 1 239-1 246.
Tao G L, Zhang J R, Zhuang X Sh, et al. Influence of compression deformation on the soil-water characteristic curve and its simplified representation method [J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 45(10): 1 239-1 246. (in Chinese)
- [13] 孙德安,高游,刘文捷,等.红黏土的土水特性及其孔隙分布[J].岩土工程学报,2015,37(2): 351-356.
Sun D A, Gao Y, Liu W J, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2):351-356. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)