

# 重塑 $Q_3$ 黄土 $K_0$ 三轴蠕变特性的试验研究

范涛, 顾强康, 刘少博, 姚志华, 朱思迪

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** [目的] 研究陕西省延安地区重塑  $Q_3$  黄土高填方工程的后期沉降变形特性, 为高填方工程的设计、施工提供一定的技术和理论支撑。[方法] 通过改进  $K_0$  三轴蠕变仪, 对所取黄土进行了不同压实度、不同含水量、不同竖向应力下的室内土的静止侧压力系数  $K_0$  三轴固结排水蠕变试验。[结果] 重塑  $Q_3$  黄土具有明显的蠕变特性, 在低应力条件下, 呈现出典型的衰减蠕变; 在  $K_0$  条件下, 随着含水量增大、竖向应力的增大, 压实度的减小, 蠕变呈增强趋势, 蠕变变形量增大; 在低水平应力的条件下, 土体所受侧向应力与竖向应力成线性关系。[结论] 建立了重塑  $Q_3$  黄土关于竖向应力的自定义蠕变模型, 通过试验数据拟合获得了模型参数, 所建模型能很好地描述延安地区重塑  $Q_3$  黄土的蠕变特性。

**关键词:** 重塑  $Q_3$  黄土;  $K_0$  三轴蠕变试验; 蠕变特性; 蠕变模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)03-0056-06

**中图分类号:** TU444

**文献参数:** 范涛, 顾强康, 刘少博, 等. 重塑  $Q_3$  黄土  $K_0$  三轴蠕变特性的试验研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 56-61. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.011

## Experimental Study on $K_0$ Triaxial Creep Properties of Remolded $Q_3$ Loess

FAN Tao, GU Qiankang, LIU Shaobo, YAO Zhihua, ZHU Sidi

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the late settlement of high filled project in Yan'an District of Shaanxi Province in order to provide technological and theoretic support for the design and construction of high filled project. [Methods] A variety of laboratory consolidated drained static lateral pressure coefficient  $K_0$  triaxial creep tests were conducted under different water content, compacted degree and vertical stress by using a re-fitted  $K_0$  triaxial creepmeter. [Results] The remolded  $Q_3$  loess had an obvious creep properties, and it showed a typical attenuation creep under low stress level. Creep phenomenon showed an increase trend and the deformation of creep enlarged, with higher water content, higher pressure stress and smaller compacted degree. Under low stress level, there was a linear relationship between lateral stress and vertical stress. [Conclusion] Based on the tested data, a user-defined creep model of remolded  $Q_3$  loess about vertical stress was established, and characteristic parameters were obtained by fitting test data. The established model can well describe the properties of remolded  $Q_3$  loess in Yan'an District.

**Keywords:** remolded  $Q_3$  loess;  $K_0$  triaxial creep test; creep characteristics; creep model

在骨架应力的作用下, 土颗粒表面吸附水(气)具有粘滞性, 从而使颗粒的重新排列和骨架体的错动具有时间效应, 即土的流变性。蠕变是其重要的形式之一, 绝大多数土体都具有一定的蠕变性, 黄土也不例外<sup>[1-2]</sup>。大量工程实践证明, 蠕变性是黄土的一个重要特征, 是影响工程全周期寿命的重要因素。因此, 对黄土进行蠕变试验方法改进、蠕变特性、蠕变理论研究有着重要的工程实际意义。

王鹏程等<sup>[3-4]</sup>通过对加卸载条件下黄土三轴蠕变

特性的研究, 探究了黄土黏弹塑性的基本规律。王松鹤等<sup>[5-7]</sup>通过一系列室内三轴剪切蠕变试验, 系统地分析了时间、偏应力水平对应变速率的影响, 且进行了原状、重塑、饱和黄土的蠕变特性对比, 建立了适用于杨凌地区黄土的蠕变本构模型。陈中伟等<sup>[8-9]</sup>对重塑黄土蠕变特性进行了试验研究。赵宪民等<sup>[10]</sup>通过试验分析了含水率、围压对延安地区  $Q_2$  黄土的影响, 并依据时间建立了考虑瞬时损伤的黄土蠕变本构模型。目前关于黄土三轴蠕变试验特性研究的较多,

在特性分析、经验蠕变模型研究方面也取得了一些成果,但关于  $K_0$  固结条件下的蠕变特性研究较少。

殷宗泽<sup>[11]</sup>认为:只有在有效应力保持恒定条件下,获得的土体蠕变模型才能反映有效应力与应变、时间的关系。且中国黄土分布范围广,地区差异性大,探究的蠕变特性以及蠕变模型不具有共性。由此,本文针对陕西延安机场改扩建工程黄土填方工程,拟通过对土的静止侧压力系数  $K_0$  三轴蠕变仪改进来实现对大面积填土体实际状态的模拟,利用橡胶膜来有效减少侧向摩擦力对试验效果的影响,探讨  $K_0$  固结条件下,含水率、压实度、竖向应力对重塑  $Q_3$  黄土蠕变的影响规律,建立适用于填方黄土固结的蠕变模型,以期为延安填方工程设计和施工提供依据和参考。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 试验土样

本文选取延安机场高填方地基处理工程黄土,其属于  $Q_3$  黄土,按照《公路土工试验工程》测得塑限为 18.4%,液限为 28.0%,塑性指数为 7.6。土体的颗粒相对密度为 2.70,通过击实试验得到最大干密度和最优含水率分别为  $1.88 \text{ g/cm}^3$ , 13.0%。

### 1.2 试验方法

试验仪器采用自行改进,依托西安亚星土木仪器有限公司生产的  $K_0$  三轴蠕变仪。仪器由加压部分,控制部分,数据采集部分组成(图 1)。由高压气泵通过反力架对试验施加竖向应力,能够实现瞬时加压,避免应力延迟,且能实现电脑自行控制;通过机电百分表对竖向变形数据进行采集,压力变送器对侧压力进行采集,通过阿尔法采集卡对数据集成;利用标定后的精密压力控制系统实现分级加载,由电脑控制中心实现  $K_0$  三轴蠕变试验方案的总控制。

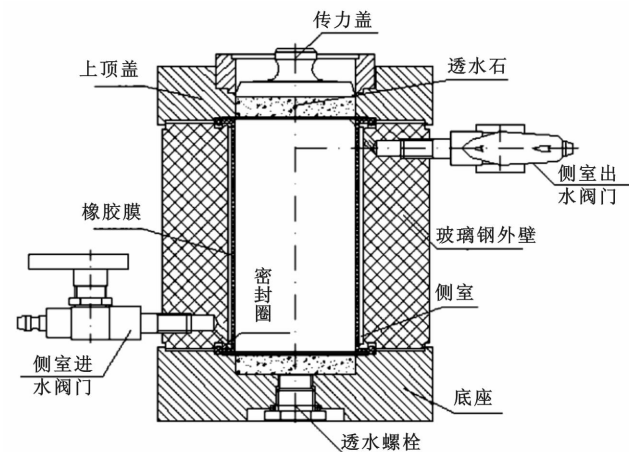


图 1  $K_0$  三轴蠕变仪剖面图

仪器研制的最大亮点在于通过构建侧向压力室和改进竖向传力杆来保证土体蠕变过程中不产生侧向变形,又实现了对侧压力进行测量;有效减少了侧向摩擦力对试验的影响,实现了对大面积填筑土体受力状态的模拟,能更贴近于工程填土实际。

### 1.3 试验方案

本试验的研究内容为:延安机场黄土蠕变变形与竖向应力,含水率,压实度的关系以及固结历史对蠕变的影响。试验采用重塑样,依据工程实际需要,控制其压实度为 90%, 93%, 95%, 含水率控制为 10.0%, 11.5%, 13.0%, 14.5%, 16.0% 共 5 个等级。直接在仪器中制成各等级试样,每组 3 个试样,共计 15 组试验。根据土体在自然条件下初始应力状态以及结合土体在实际工程中的应力状态,对试样进行 12.5 kPa 预压, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa 这 7 级荷载下的室内  $K_0$  固结三轴排水蠕变试验。

依照工程实际,试样由黄土碾碎、过筛、风干后,击实而成。试样尺寸为圆柱形  $50 \text{ cm}^2 \times 12 \text{ cm}$ ,试样的荷载加载方式为分级加载,以在每级荷载作用下, 24 h 作为蠕变稳定标准,且每 1 h 的变形量不超过 0.005 mm 时,开始下一级荷载的加载。试验记录时刻为: 3 s, 6 s, 15 s, 1 min, 2.25 min, 4 min, 6.25 min, 9 min, 12.25 min, 16 min, 20.25 min, 25 min, 30.25 min, 36 min, 42.25 min, 49 min, 60 min, 75 min, 90 min, 120 min, 之后每隔 0.5 h 记录 1 次数据。而本试验为自动采集,将采集频率设置为每 3S 采集 1 次,最后再由 Matlab 软件进行数据的筛选。实验室采用空调控温,保持室内温度在  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 2 结果与分析

试验采用分级加载的方式,利用“陈氏加载法”对试验资料进行整理分析,探究竖向应力、含水率、压实度以及侧压力变化对黄土蠕变的影响。

### 2.1 侧压力变化分析

$K_0$  三轴蠕变仪的优点就在于能够比较直观地模拟出填土过程中水平应力随着竖向应力增大的过程,不需要控制围压,这一点与实际填土过程中,侧向应力变化是比较接近的,随着填土层的高度增加,土体所受的侧向应力逐渐增大。 $K_0$  三轴蠕变试验是通过假定水是不可压缩的,在压力室充满水,然后逐渐加载,随着土体的变形会挤压压力室中的水,使水产生侧向压力。且随着荷载的增大,土体的变形越来越大,会使得压力室所受的围压越来越大。试验中通过压力变送器测得的围压—时间关系曲线(如图 2 所示)。

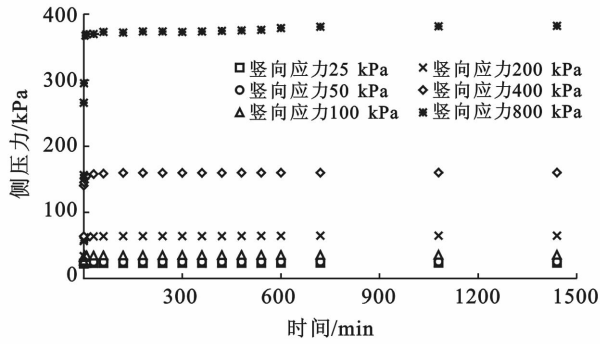


图 2 不同竖向应力下侧压力与时间关系

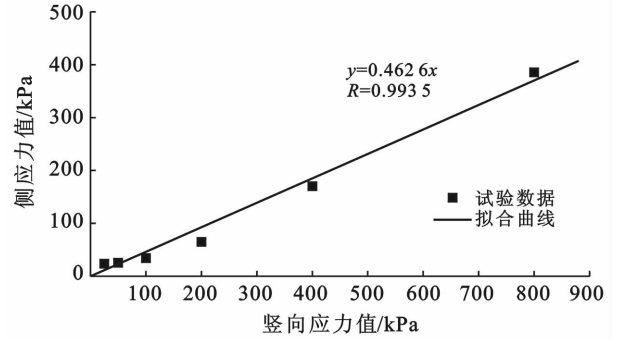


图 3 侧向应力随竖向应力的变化

(1) 在压应力较小时,土体产生的侧向应力较小;这是因为低应力条件下,土体的变形主要是压密阶段,主要由孔隙水和气体的排出引起。在压应力较大时,随着竖向荷载的逐级翻倍增大,土体所受围压也逐级增大。

(2) 由于加载方式是气压加载,能够实现瞬时加载,而土体的变形需要一个过程,所以每一级荷载施加的开始阶段,土体所受的侧向应力逐渐增大,但在前 15 min 以内,就达到一个稳定值。而后随着蠕变量的增大缓慢地增大。这也从另一个方面反映出,土体后期的蠕变速率越来越小而趋于稳定。为分析稳定后侧向应力与竖向应力的关系,取每级荷载作用下的侧向应力稳定值为纵坐标,竖向应力作为横坐标,绘制出侧向应力随竖向应力的变化曲线(图 3)。

由于所施加的荷载不大,依据数据曲线的走向,可以近似的采用线性拟合,得出稳定时侧向应力与竖向应力间的关系:

$$\sigma_3 = 0.462\sigma_1 \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ ——竖向应力; $\sigma_3$ ——侧向应力。

从图 3 可以看出,自行设计的  $K_0$  三轴蠕变仪满足了试验要求。

### 2.2 竖向应力影响分析

为了研究竖向应力对黄土蠕变的影响,在控制压实度为 90% 情况下选取 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa 这 6 个等级下荷载对土样进行加载,分析得出其在  $K_0$  三轴蠕变数据并分别绘制加载曲线(如图 4 所示)。

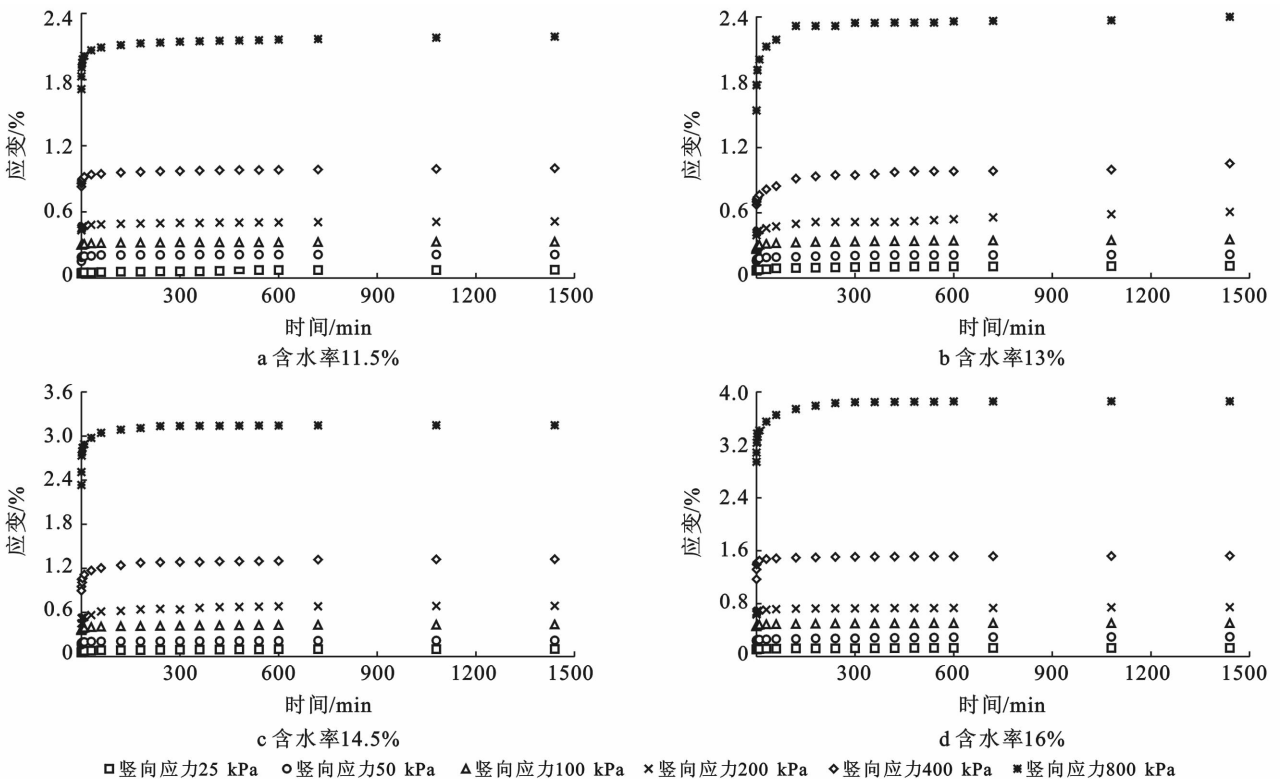


图 4 不同轴向应力下应变与时间关系

从图 4 可以看出:在  $K_0$  试验条件下,随着竖向应力的增大,土体的蠕变变形量越来越大。荷载作用到土体上,先产生瞬时变形,然后变形逐渐稳定,最后达到一个稳定值。随着荷载的增大,瞬时变形越来越大,稳定所需要的时间也越来越长。这是因为,在荷载作用的过程,首先孔隙中的气体和孔隙中的自由水易于被挤出,随着竖向荷载的增大,产生摩擦阻力,结合水膜与土体颗粒间摩擦阻力被克服,土体颗粒间发生错动,使得孔隙水和气体的排出受到阻碍,从而产生变形延迟,宏观表现为蠕变状态持续时间变长。

当竖向应力小于一定水平时,蠕变先呈现衰减的趋势,然后再进入等速蠕变阶段,土体重新达到稳定。

这是因为本次试验不同于常规的三轴蠕变试验,不进行专门的围压控制,完全模拟不同深度的填土受力,土体侧向不发生变形,围压随着竖向应力的增大而增大,阻碍土体的竖向变形,所以当竖向应力越来越大,土体瞬时位移会引起围压的较大变化,从而使蠕变速率降低。

### 2.3 含水率影响分析

为了反映含水率对黄土蠕变的影响,在控制压实度为 90% 情况下选取 10%, 11.5%, 13%, 14.5%, 16% 这 5 个水平对土样进行试验,分析含水率对  $K_0$  状态下黄土的蠕变特性的影响,得到的试验结果经处理后如图 5 所示。

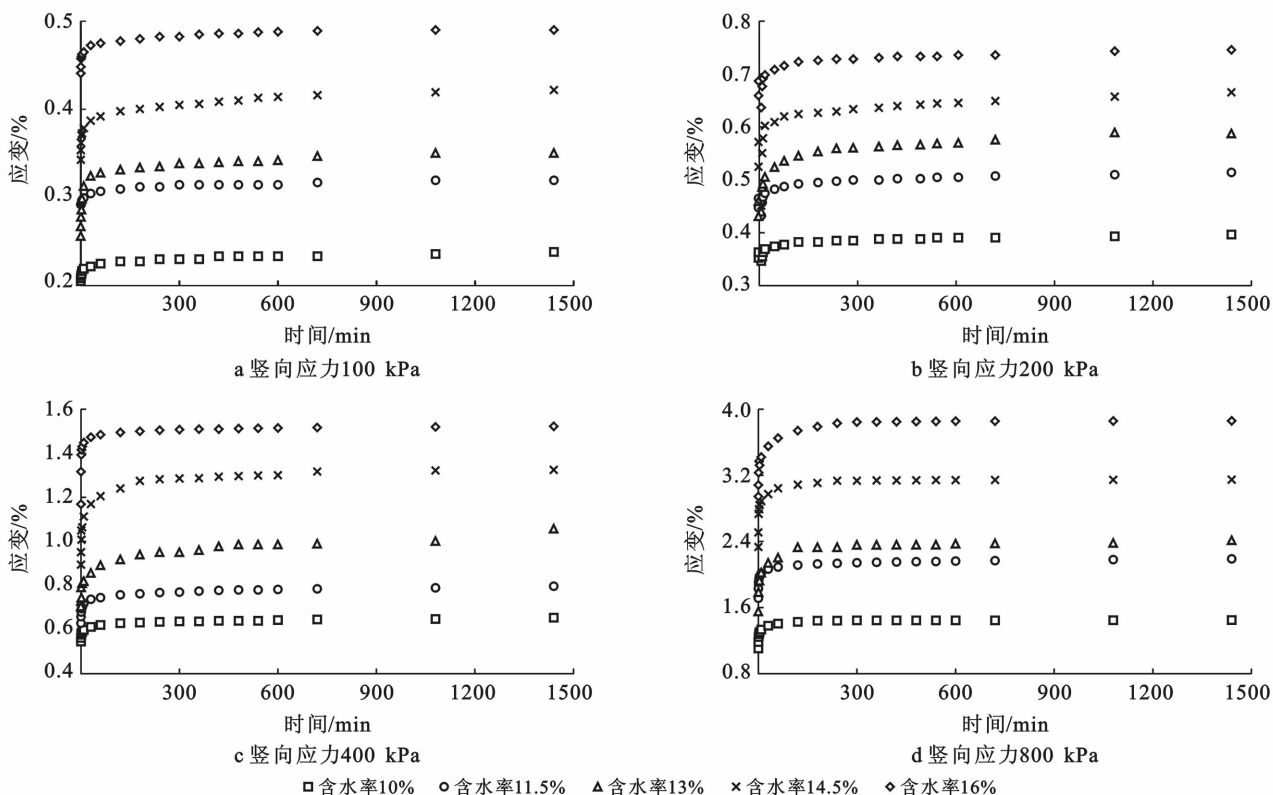


图 5 不同含水率下轴向应变与时间关系

从图 5 对比分析可以得出:  $K_0$  状态下,随着含水率的增大,试样的蠕变量逐渐增大,并且其达到稳定的时间也逐渐增大。土体中水的存在形式为结合水和自由水,随着含水率的增大,结合水和自由水的量都有所增加,结合水膜厚度越来越大,减小了土颗粒之间的吸引力,而自由水的增加减小了土颗粒之间的摩擦力,这都导致相同的荷载作用下含水率大的土体的变形增大。而土体变形变大后,其围压也随之增长,围压约束了土体的变形,导致其稳定时间增加。

### 2.4 压实度影响分析

为研究压实度对延安机场黄土蠕变的影响规律,

本文在工程采取的压实度附近取了 3 个压实度分别为 0.9, 0.93, 0.95, 进行了  $K_0$  三轴蠕变试验,经处理后其蠕变曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出:在  $K_0$  状态下,当土样的压实度逐渐增大时,其蠕变量逐渐减小,蠕变达到稳定所需要的时间也随之增大。压实度增大,则土样内部空隙变小,土颗粒之间的距离减小,在平衡的过程中土颗粒与结合水之间摩擦接触面增大,导致要产生很小的蠕变量,就会需要较大摩擦力来平衡外界压力,所以随着压实度的增大,土体蠕变量减小;在平衡的过程中,随着压实度增大,阻力越大,所以变形趋势越缓。

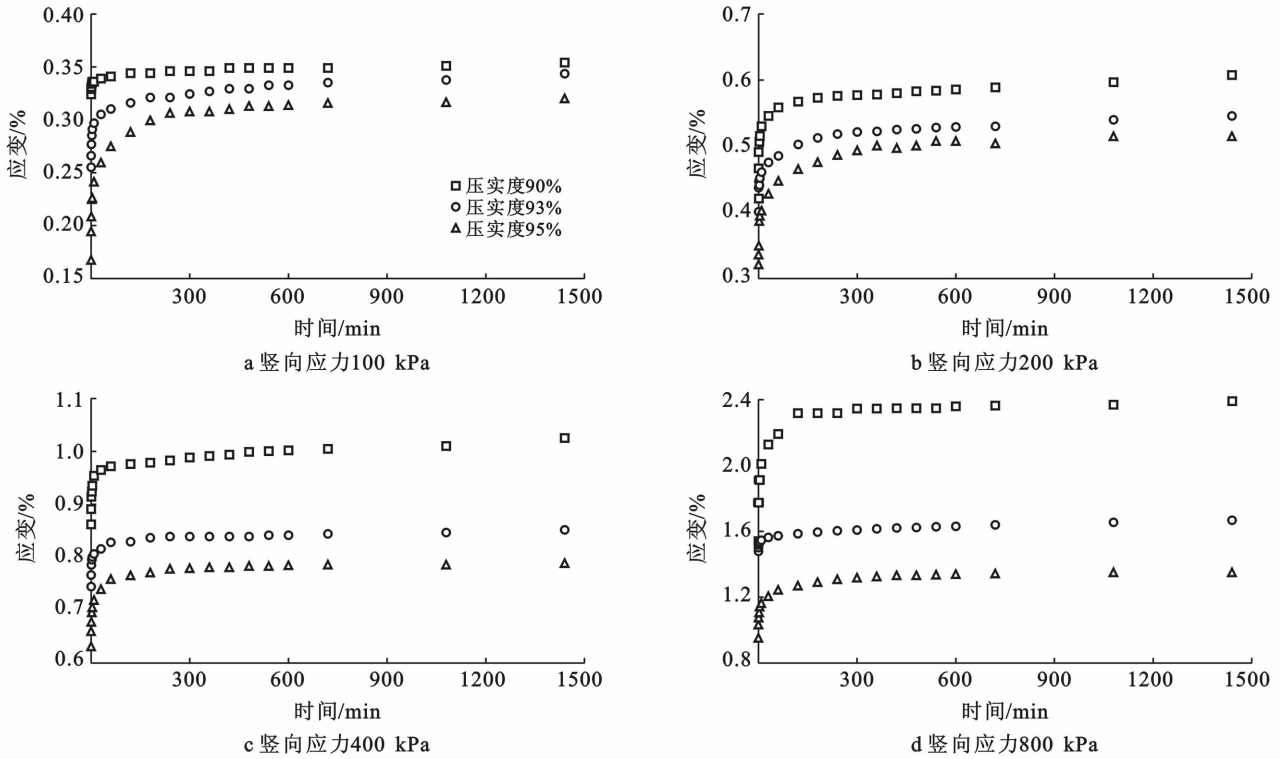


图 6 不同压实度下轴向应变与时间关系

### 3 蠕变模型的建立

依据实际工程,本文以含水率为 13%,压实度为 95%,高度为 12 cm 的试样试验数据为依据,建立贴近工程实际的蠕变模型。C C 维亚洛夫<sup>[12]</sup>认为,可以采用指数函数、幂函数或双曲线函数来描述应力应变等时关系;可以分别采用幂函数、指数函数、对数函数或双曲线函数来描述应变与时间之间的关系。经过试算验证,本文选定幂函数来描述应力应变关系,选用双曲线函数表示应变与时间之间的关系。则可建立如下蠕变模型表达式:

$$\epsilon = \frac{B}{T_1} (\sigma_1 - \sigma_3)^n \frac{t}{t + T_2/T_1} \quad (2)$$

令  $A = B/T_1$ ,  $T = T_2/T_1$ , 则式(2)可以写成:

$$\epsilon = A(\sigma_1 - \sigma_3)^n t / (t + T) \quad (3)$$

公式(3)即为简化的自定义蠕变模型。观察可知:需要确定的参数有 3 个,  $A$ ,  $n$  和  $T$ 。

(1) 参数  $T$  确定。在一定应力水平下,土体蠕变稳定时,取  $t \rightarrow \infty$  时,则  $\epsilon \rightarrow \epsilon_\infty$

$$\epsilon_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \{A(\sigma_1 - \sigma_3)^n [t / (t + T)]\} = A(\sigma_1 - \sigma_3)^n \quad (4)$$

带入式(3)变形得:

$$\epsilon = \epsilon_\infty t / (T + t) \quad (5)$$

变形得:

$$t / \epsilon = t / \epsilon_\infty + T / \epsilon_\infty \quad (6)$$

令  $Y = t / \epsilon$ ,  $X = t$ ,  $a = 1 / \epsilon_\infty$ ,  $b = T / \epsilon_\infty$ , 则式(6)

变为:

$$Y = aX + b \quad (7)$$

依据试验数据,作不同竖向应力下的  $Y, X$  值,作  $Y-X$  的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可见,各级应力下的  $Y-X$  曲线呈线性,所以分别进行线性拟合,得不同应力作用下的斜率  $a$  和截距  $b$ 。由  $T = b/a$ , 从而可以得各级荷载下的  $T$ , 平均值为  $T = 13.283$ 。

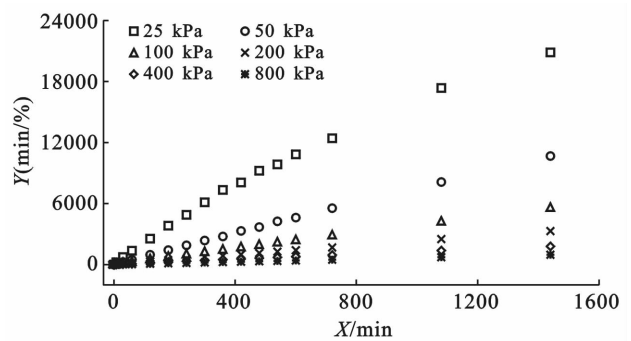


图 7 Y 与 X 关系

(2) 参数  $n$  和  $T$  确定。对式(4)两端同时取对数,得:

$$\ln \epsilon_\infty = \ln A + n \ln (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

由式(8)知:  $\ln A$  和  $n$  分别是  $\ln \epsilon_\infty$  和  $\ln (\sigma_1 - \sigma_3)$  关系曲线的截距和斜率。由上文求得各级竖向应力下的  $a$  值,可以得各级应力下的  $\epsilon_\infty = 1/a$  值为:  $-2.701, -2.014, -1.353, -0.232, 0.399$ 。绘制  $\ln \epsilon_\infty - \ln (\sigma_1 - \sigma_3)$  关系曲线(如图 8 所示)。

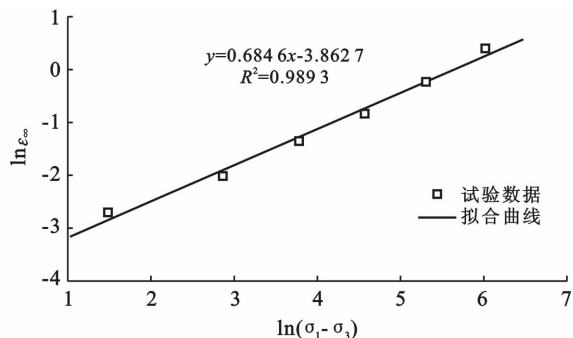
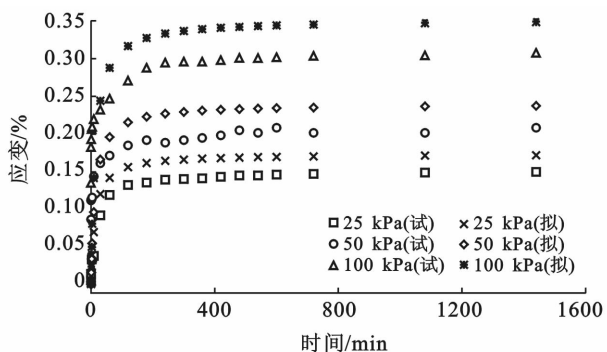


图 8  $\ln \varepsilon_{\infty}$  与  $\ln(\sigma_1 - \sigma_3)$  的关系

发现基本呈线性, 通过线性拟合, 得截距  $\ln A = -3.8627$ , 斜率  $n = 0.6846$ , 进一步求得  $A =$



0.021 011 193, 由此得蠕变方程的表达式:

$$\varepsilon = 0.021\ 011(\sigma_1 - \sigma_3)^{0.684\ 6} \frac{t}{t + 13.283} \quad (9)$$

将式(1)代入上式(9)得:

$$\varepsilon = 0.021(0.537\ 4\sigma_1)^{0.684} \frac{t}{t + 13.283} \quad (10)$$

采用含水率 13%, 压实度 95%, 高度为 12 cm 的试验数据与模型拟合数据作图对比(如图 9 所示)。

由图 9 可以看出, 模型拟合数据与试验数据比较接近, 且未来发展趋势基本相同, 所建模型能够较好地描述该地区重塑黄土的蠕变特性。因此, 能够为高填方工程的工后沉降变形监测提供理论支持, 具有较大的工程实际意义。

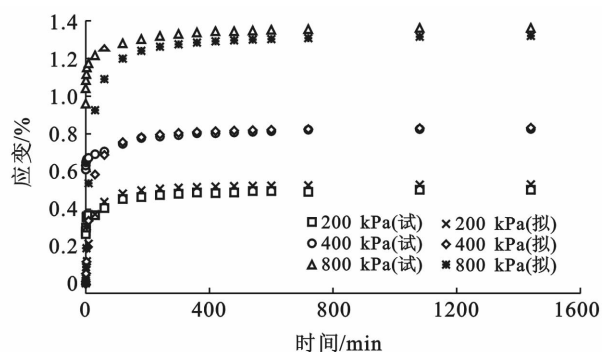


图 9 蠕变试验值与拟合值对比

## 4 结论

(1) 随着土样所受竖向荷载的增大, 土样产生的瞬时变形逐渐增大, 所需稳定时间逐渐变大, 土样的稳定蠕变量基本呈指数或者幂函数形式增长; 在固定荷载的作用下, 土体先发生衰减蠕变, 再发生等速蠕变, 最后进入等速的稳定蠕变阶段; 随着含水率的增大, 土样的稳定蠕变量逐渐增大; 当压实度增大时, 土样的最终蠕变量减小; 在低水平应力的条件下, 土体所受侧向应力与竖向应力成线性关系。

(2) 通过分析试验数据, 提出了采用反函数表示应力与时间之间的关系, 采用幂函数描述应力应变关系, 建立了适用于延安地区重塑  $Q_3$  黄土含水率为 13%, 压实度为 95% 蠕变模型, 该模型具有拟合高, 参数少且易获得, 能够较好地反映延安地区黄土的蠕变规律, 可以为延安机场高填方工程工后沉降以及安全预警提供一定的指导意见。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.

[2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.  
 [3] 王鹏程, 骆亚生, 张希栋, 等. 分级加卸载条件下  $Q_3$  黄土三轴蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1237-1242.  
 [4] 杜英. 黄土蠕变室内试验分析[J]. 中南公路工程, 2005, 30(3): 23-24.  
 [5] 王松鹤, 骆亚生. 黄土三轴剪切蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1633-1637.  
 [6] 王松鹤, 骆亚生. 复杂应力下黄土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 43-47.  
 [7] 王松鹤, 骆亚生, 李炎. 黄土固结蠕变特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 643-647.  
 [8] 王鹏程, 骆亚生, 胡连信, 等. 重塑黄土三轴蠕变特性研究及模型分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1627-1632.  
 [9] 陈中伟, 张吉雄, 茅献彪, 等. 充填黄土压缩蠕变特性与湿陷性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 54-59.  
 [10] 赵宪民, 段钊, 何青峰, 等. 延安  $Q_2$  黄土三轴蠕变特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(11): 77-81.  
 [11] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.  
 [12] [苏]C 维尼亚洛夫. 土力学的流变原理[M]. 杜余培, 译. 北京: 科学技术出版社, 1987.