

压实黄土应力-应变-时间特性

程海涛,刘保健,谢永利

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为研究压实黄土应力-应变-时间的关系,对比分析了 Singh-Mitchell、Mesri、Lin-Wang 等经验模型,在甘肃省陇西 Q_3 压实黄土的室内一维固结试验基础上,利用参数变异法推导出适用于压实黄土的 Singh-Mitchell 修正模型。其中应力-应变关系与应变-时间关系都用幂次关系模拟。模型中 3 个参数物理意义明确,均可由室内一维固结试验得出,并分析了干密度与含水质量分数对参数的影响规律。研究结果表明,模型计算结果与实测结果一致,为研究压实黄土应力-应变-时间特性提供了一种新方法。

关键词:道路工程;压实黄土;应力-应变-时间;本构模型

中图分类号:U419.14 **文献标志码:**A

Stress-strain-time behavior of compacted loess

CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the stress-strain-time behavior of compacted loess, the empirical models proposed by Singh-Mitchell, Mesri and Lin-Wang are analyzed. An alternative stress-strain-time function for compacted loess is deduced in terms of one-dimensional consolidation tests based on the specimens of Q_3 loess. The relationships of stress-strain and strain-time are simulated with power functions. The model contains 3 parameters with explicit physical meanings and they can be gotten from one-dimensional consolidation tests easily. The impact of dry density and moisture content on the parameters are also analyzed. It is shown from examples that the results calculated with the model agree with that one by measurements. It provides a new method to examine stress-strain-time behavior of compacted loess. 5 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; compacted loess; stress-strain-time; constitutive model

0 引言

中国对黄土的流变特性进行了较早的研究。郭增玉^[1]研究了高湿度黄土;刘恩龙^[2]采用 Kelvin 模型、Maxwell 模型以及有限硬化元件串联模拟西安地区黄土的流变特性;马莉英^[3]以分数线性蠕变方程为

理论模型模拟了原状黄土的流变特性;吴燕开^[4]利用 Kelvin 模型并联摩擦元件、串联弹簧体组成 4 元件模型,提出了非饱和黄土加载体积流变模型。

目前,研究黄土应力-应变-时间特性多从模型理论出发,即大都是根据“模型理论”的构架,以室内试验为基础来研究的,而关于应力-应变-时间经验

收稿日期:2007-02-15

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131881214)

作者简介:程海涛(1980-),男,山东金乡人,博士研究生,E-mail:chenghaitao1991@163.com。

本构关系应用于黄土的报道还很少见^[5-7]。因此,本文将在室内试验的基础上,结合目前岩土流变的经验理论,对压实黄土应力-应变-时间特性进行研究。

1 建模的理论依据

文献[8]总结了单级常应力加载、排水与不排水三轴压缩试验成果,认为应力-应变关系采用指数关系、应变-时间关系采用幂次关系能够很好地反映土的蠕变特性

$$\epsilon = B_1 e^{\beta D} (t/t_1)^\lambda \quad (1)$$

式中: ϵ 为应变; t 为时间; t_1 为单位时间; B_1 、 β 、 λ 均为试验参数; $D = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$ 为剪应力水平; σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力。

Mesri G(1981)^[9]在Kondner双曲线模型(1963)与Singh-Mitchell指数模型(1968)基础上,提出了应力-应变呈双曲线关系、应变-时间呈幂次关系的模型

$$\epsilon = \frac{2}{(E_u/S_u)_1} \frac{D_1}{1 - (R_f)_1 D_1} \left(\frac{t}{t_1} \right)^\lambda \quad (2)$$

式中: E_u 为初始模量; S_u 为不排水剪切强度; R_f 为破坏比;下标1表示相关参数对应 t_1 时刻的值。

文献[10]在比较了Mesri与Singh-Mitchell等模型的基础上,考虑了参考时间的任意性和超固结比的影响,给出了应力-应变呈双曲线关系、应变-时间呈幂次关系的模型

$$\epsilon_{OC} = \frac{Da_r}{1 - Db_r} \left(\frac{t}{t_r} \right)^n (O_{CR})^{m_2} \quad (3)$$

式中: ϵ_{OC} 为超固结土应变; t_r 为任一时刻; O_{CR} 为超固结比; a_r 、 b_r 、 n 、 m_2 均为试验参数。

从上述几种模型可看出,应变-时间关系采用幂次关系模拟较好,而应变-应力关系则不确定。因此式(1)、式(2)、式(3)可表示为更加普通的形式

$$\epsilon = f(\sigma) t^\lambda \quad (4)$$

对式(4)两边同时除以时间并对数化可得

$$\epsilon/t = f(\sigma) t^{\lambda-1} \quad (5)$$

$$\ln \frac{\epsilon}{t} = \ln f(\sigma) + (\lambda - 1) \ln t \quad (6)$$

式中: σ 为应力。

式(6)显然同 $\ln \epsilon$ 与 $\ln t$ 的关系一样,也呈直线关系。这说明研究 ϵ/t 与 t 的关系和研究 ϵ 与 t 的关系是等价的。由于试验中求取应变速率是很困难的,且结果并不准确,因此研究 ϵ/t 与 t 的关系更加方便。本文在式(5)、式(6)的基础上,从 ϵ/t 与 t 的关系入手,研究压实黄土应力-应变-时间特性。

2 试验方案及成果分析

试验用土取自甘肃定西土家湾隧道西侧,属于典型的陇西 Q_3 黄土,土呈褐黄色,硬塑状态。土样采用人工制样,干密度 ρ_d 分别采用1.4、1.5、1.6、1.7 g/cm³,含水质量分数 ω 采用9.2%、12.1%、16.6%和饱和状态来进行控制。在一维固结仪中采用分级加载方式进行试验。

试验曲线如图1所示。从图1可以看出,各级应力水平下应变随着时间的增加而增加,并且逐渐趋于平缓,不会出现破坏现象,属于衰减型。

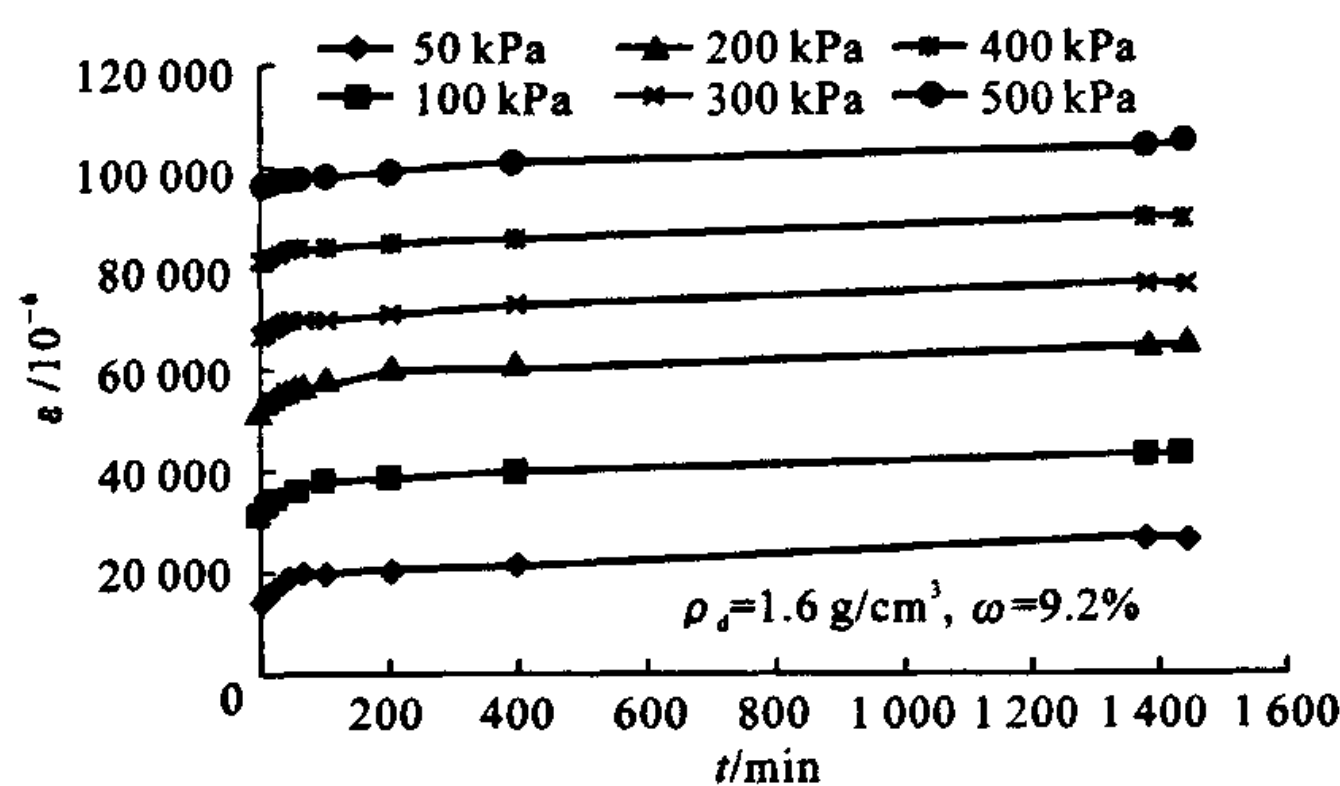
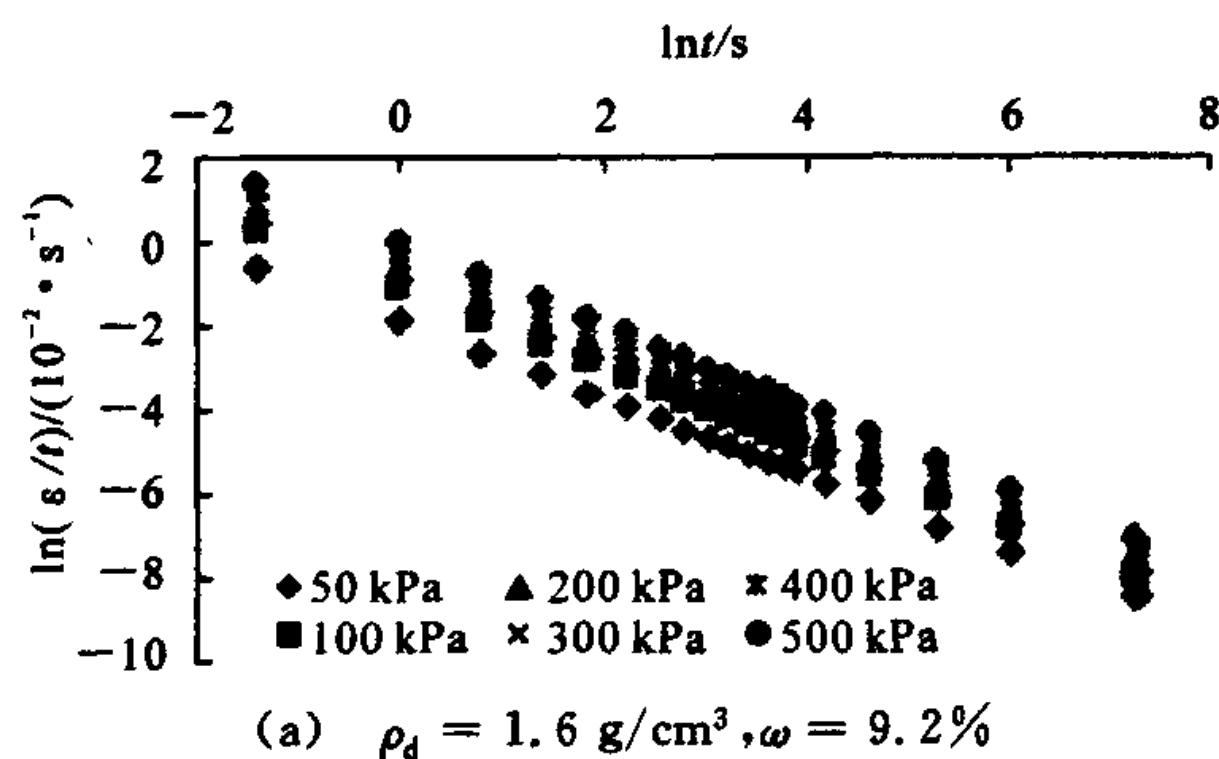
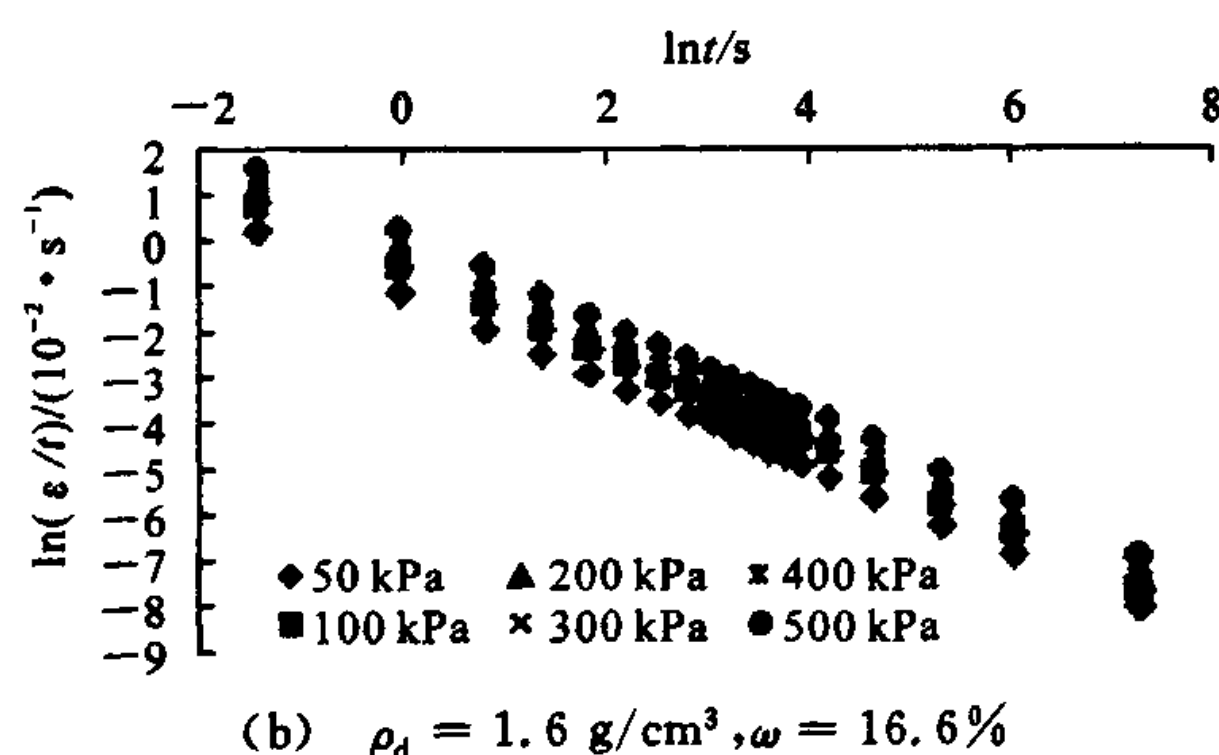


图1 ϵ 与 t 的关系曲线

图2为 ϵ/t 与 t 的双对数关系图,可以看出,在任一应力水平下, $\ln(\epsilon/t)$ 与 $\ln t$ 呈良好的线性关系。



(a) $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3, \omega = 9.2\%$



(b) $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3, \omega = 16.6\%$

图2 $\ln(\epsilon/t)$ 与 $\ln t$ 的关系曲线

3 本构模型及其参数

3.1 建立模型

根据图2所示, ϵ/t 与 t 关系可表示为

$$\ln(\epsilon/t) = G + (\lambda - 1) \ln t \quad (7)$$

式中: ϵ/t 为割线应变速率; G 为图2中直线在

$\ln(\epsilon/t)$ 轴上的截距, 物理意义为单位时刻 ($t = 1$ min) 割线应变速率对数 ($\ln \epsilon_{t=1}$) 是应力 σ 的函数; $\lambda - 1$ 为图 2 中直线斜率的绝对值, 表示 $\ln(\epsilon/t)$ 随 $\ln t$ 的衰减速率。

从图 3 可以看出, G 随应力 σ 的增加而增加, 呈较好的对数关系

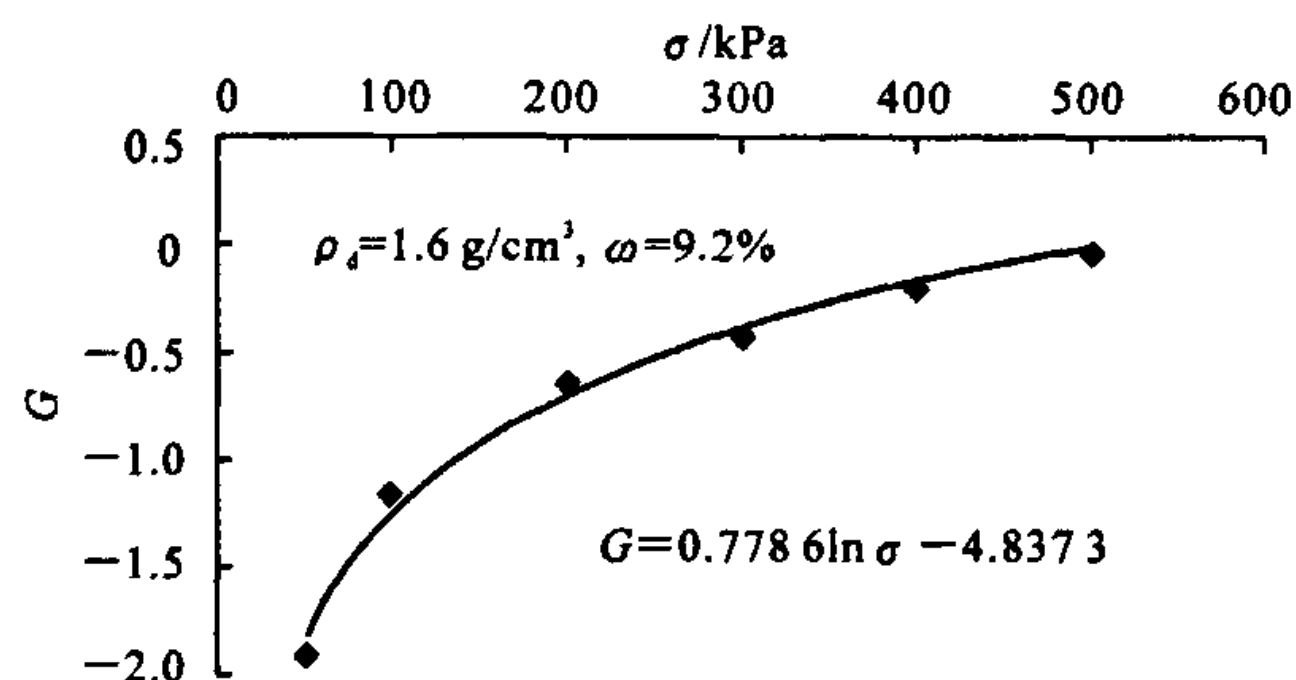


图 3 G 与 σ 的关系曲线

$$G = \ln f(\sigma) = Q \ln \sigma + R \quad (8)$$

把式(8)代入式(7), 即得到式(9)

$$\ln(\epsilon/t) = Q \ln \sigma + R + (\lambda - 1) \ln t \quad (9)$$

整理得

$$\epsilon = f(\sigma) t^\lambda = e^R \sigma^Q t^\lambda \quad (10)$$

式中: Q, R 均为试验参数。

式(10)即为压实黄土应力-应变-时间本构方程, 含有 3 个参数 Q, R, λ 。

3.2 模型参数

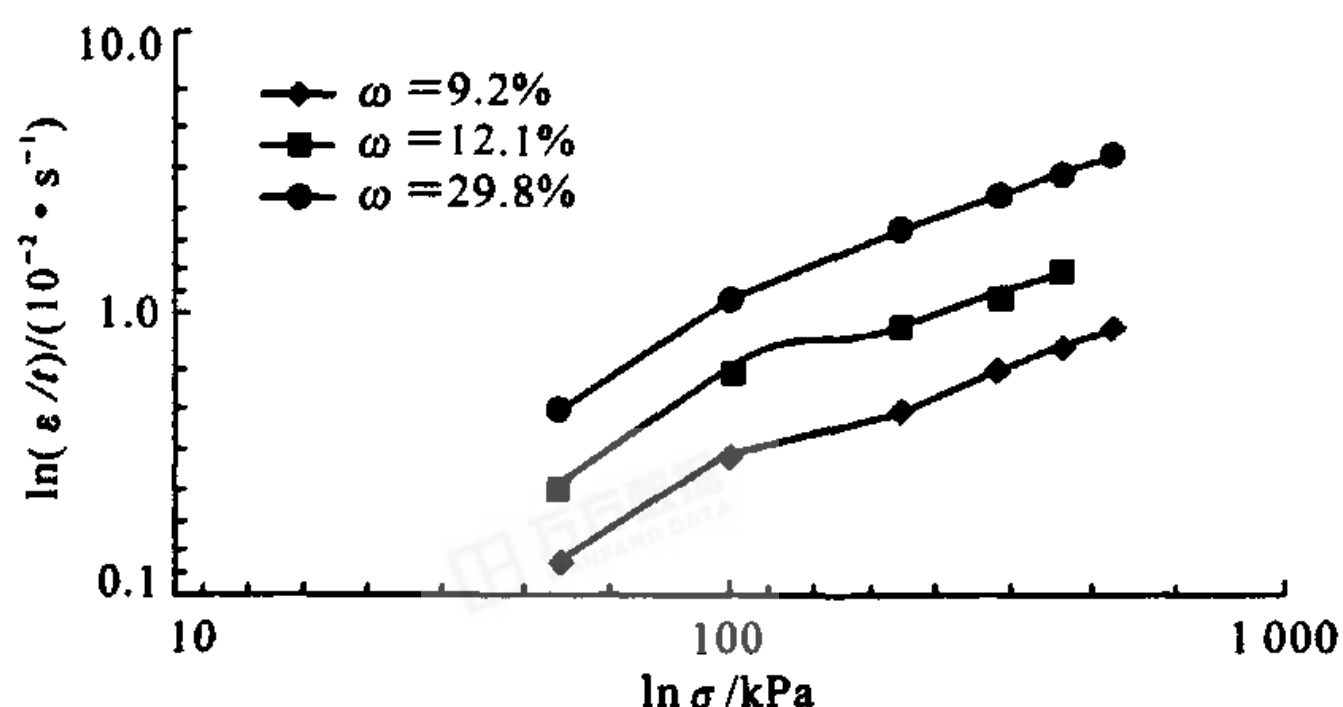
从式(10)可以看出, 该模型含有 3 个参数 R, Q, λ 。

3.2.1 参数 Q, R

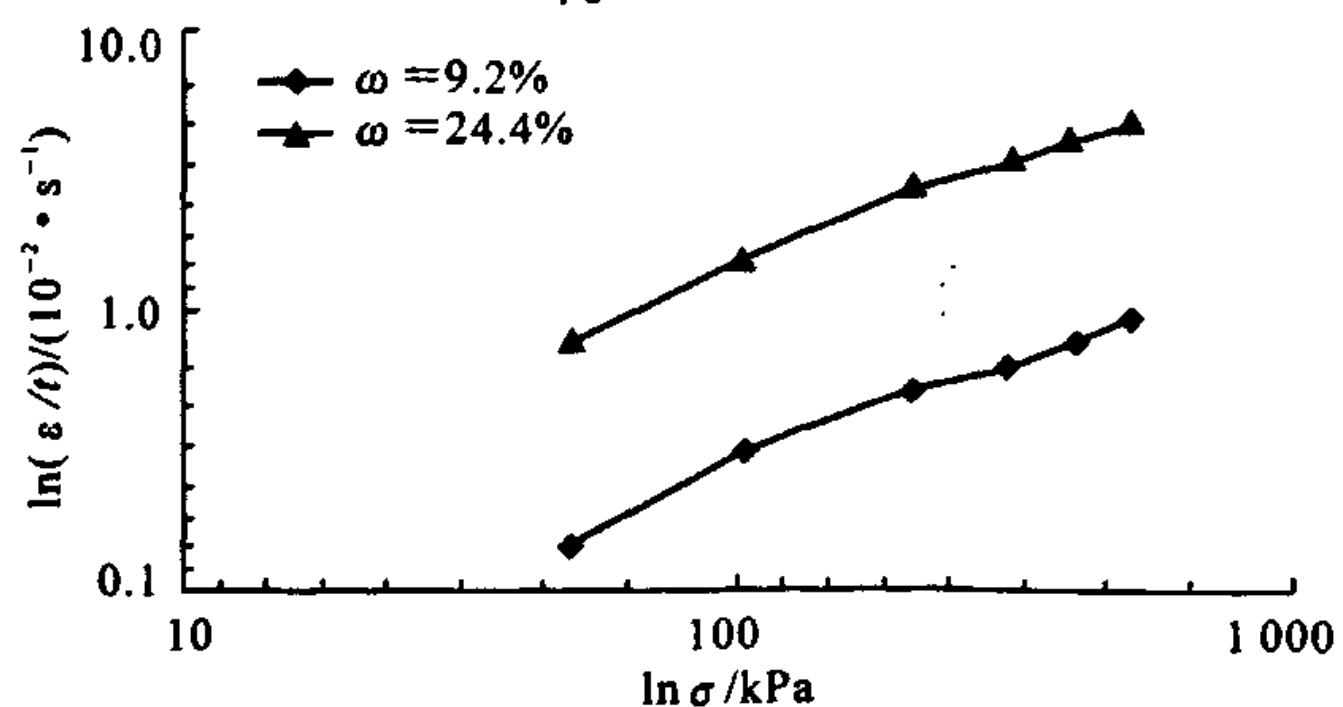
当 $t = 1$ min 时, 由式(9)容易得出

$$\ln \epsilon_{t=1} = Q \ln \sigma + R \quad (11)$$

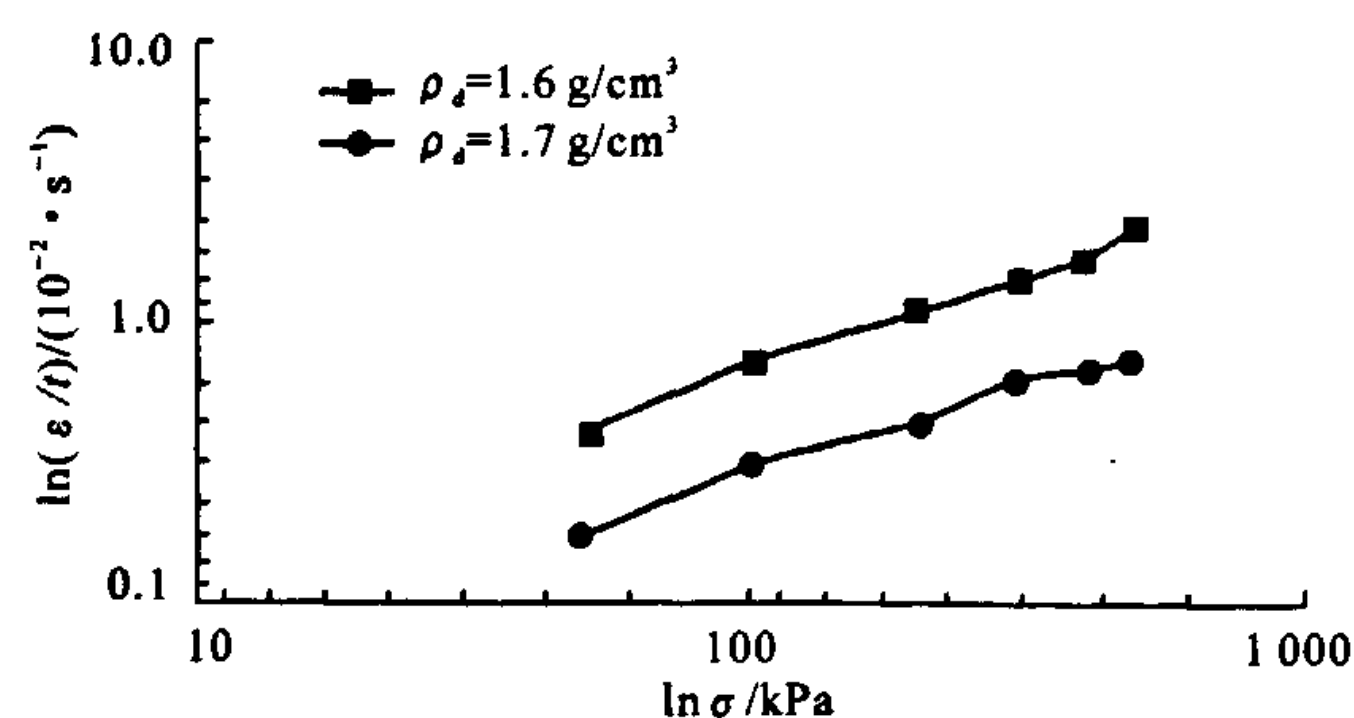
Q, R 表征了单位时刻割线应变速率对数 $\ln \epsilon_{t=1}$ 与应力间的关系, 可由式(11)表示的直线斜率与截距求出, 如图 4 所示。



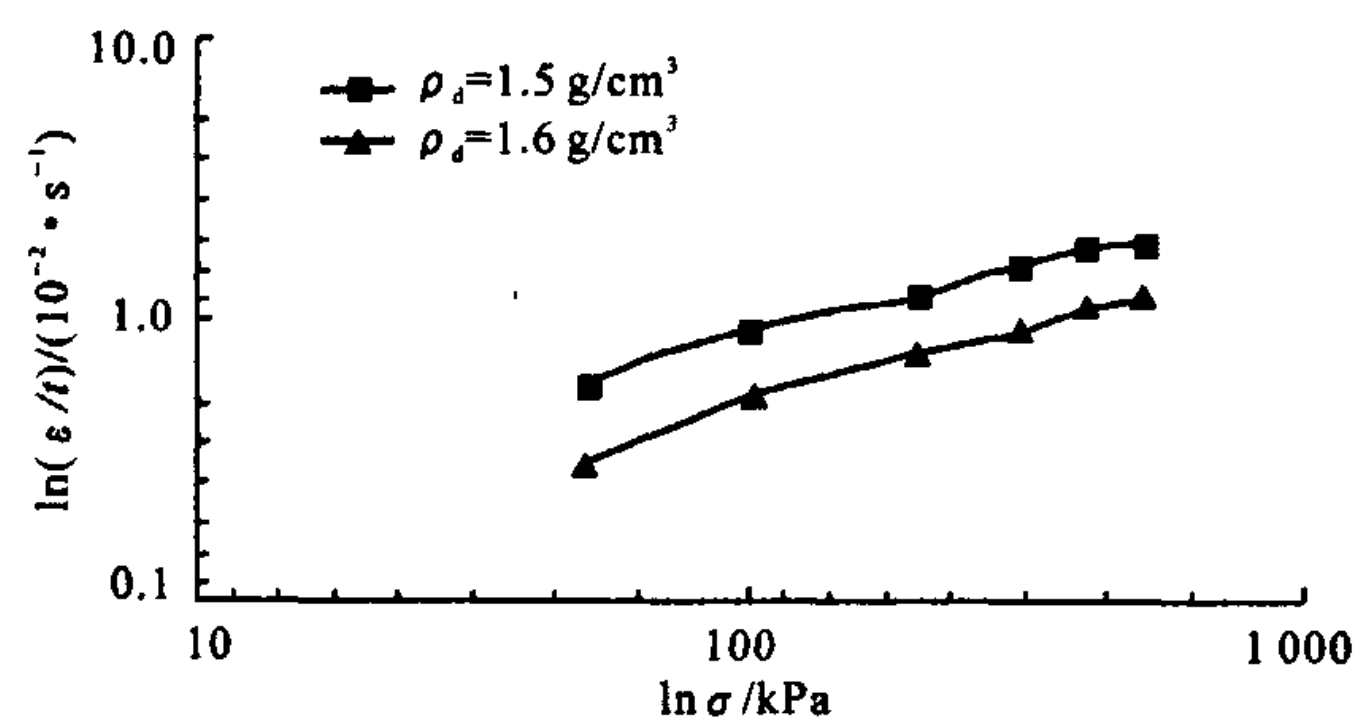
(a) $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$



(b) $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$



(c) $\omega = 9.2\%$



(d) $\omega = 16.6\%$

图 4 $t = 1$ min 时 $\ln(\epsilon/t)$ 与 $\ln \sigma$ 的关系曲线

图 4 反映了单位时刻 ($t = 1$ min) 割线应变速率对数与应力对数的关系, 基本呈直线关系。从图 4 可以看出, 对于相同干密度但不同含水质量分数的土样, 各条曲线基本平行, 即 Q 基本相等; 但是截距随着含水质量分数的增加而增大, 即随着含水质量分数的增加而增大。相同含水质量分数但干密度不同的土样, 各条曲线基本平行, 即 Q 基本相等; 但是截距随着干密度的增大而减小, 即 R 随着干密度的增大而减小。

由此说明, 干密度与含水质量分数对参数 Q 没有明显影响; 参数 R 随着含水质量分数的增加而增大, 随着干密度的增大而减小。

从物理意义上讲, Q 决定着单位时刻应变随应力的变化趋势, Q 基本相等, 说明应变-应力曲线形状相同。截距 R 为单位时刻、单位应力时割线应变速率对数。由于含水质量分数越大, 土体越软, 变形越容易, 所以 R 值也越大; 干密度越大, 土体越密实, 变形越困难, R 值也越小。 R 随着含水质量分数的增加而增大, 随着干密度的增大而减小, 结果与图 4 得出的结论一致。

3.2.2 参数 λ

在某应力水平下, 由式(9)容易得出

$$\ln(\epsilon/t) = \ln(e^R \sigma^Q) + (\lambda - 1) \ln t \quad (12)$$

λ 表征了 $\ln(\epsilon/t)$ 随 $\ln t$ 的变化规律, 可由式(12)表示的直线斜率求出。根据室内试验数据可知, 式(12)表示直线在不同应力水平下基本平行, 即 λ 随着应力变化幅度很小。本文的试验数据表明, λ 处于 $0 \sim 0.15$ 范围内, 模型中 λ 为定值。

4 模型可靠性分析

对式(10)两边同时求导

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = e^{R\sigma} \lambda t^{\lambda-1} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} = \lambda(\lambda-1) e^{R\sigma} \lambda t^{\lambda-2} \quad (14)$$

因为 $0 < \lambda < 0.15$, 所以由式(13)、式(14)易得

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} > 0, \quad \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} < 0$$

这说明,在给定应力水平下,应变随时间增加而增加,应变速率随着时间的增加而减小,即应变增加过程减缓,属于衰减型,与实际相符。

图5为式(10)计算值与实测值的比较图。

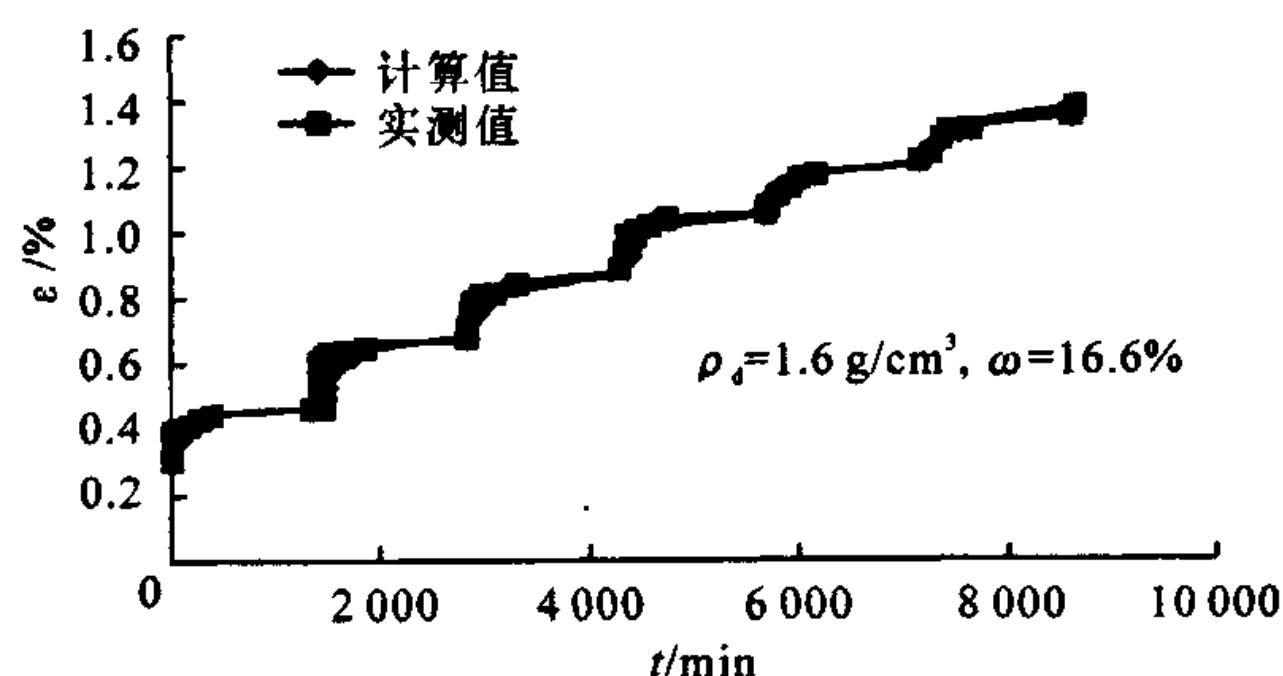


图5 实测值与计算值的曲线比较

从图5可以看出,无论从形态还是从数值上计算值与实测值都很接近,说明式(10)表示的模型可以很好地描述陇西 Q_3 压实黄土的应力-应变-时间关系。

5 结 语

(1)在比较了 Singh-Mitchell(1968)、Mesri(1981)、Lin-Wang(1998)等经验模型的基础上,得出其普通的表达式;结合室内试验,利用参数变异法推导出了适用于陇西 Q_3 压实黄土一维压缩情况下的应力-应变-时间关系。

(2)本模型是对 Singh-Mitchell(1968)的3个参数模型的修正,将 Singh-Mitchell(1968)模型中应力-应变关系由指数关系模拟修正为由幂次关系模拟;而应变-时间关系仍由幂次关系模拟。通过试验验证,这种修正是合适的。

(3)模型中的3个参数 Q 、 R 、 λ ,物理意义明确,易确定。通过对参数的探讨,给出了参数确定方法及其物理意义,研究了干密度与含水质量分数对参数的影响。

参考文献:

References:

[1] 郭增玉,张朝鹏,夏旺民.高湿度 Q_2 黄土的非线性流变本构模型及参数[J].岩石力学与工程学报,2000,

19(6):780-784.

GUO Zeng-yu, ZHANG Chao-peng, XIA Wang-min. Nonlinear rheological constitutive models and their parameters of high moisture Q_2 loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(6):780-784.

[2] 刘恩龙.黄土流变学及其工程应用[D].西安:西安建筑科技大学,2002.

[3] 马莉英,肖树芳,王清.黄土的流变特性模拟与研究[J].试验力学,2004,19(2):178-182.

MA Li-ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Simulation and study on rheological behavior of loess[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(2):178-182.

[4] 吴燕开,陈红伟,张志征.饱和黄土的性质与非饱和黄土流变模型[J].岩土力学,2004,25(7):1 143-1 146.

WU Yan-kai, CHEN Hong-wei, ZHANG Zhi-zheng. Characteristics of saturated loess and rheological model of unsaturated loess in Xi'an[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(7):1 143-1 146.

[5] 刘保健,支喜兰,谢永利,等.公路工程中黄土湿陷性问题分析[J].中国公路学报,2005,18(4):27-31.

LIU Bao-jian, ZHI Xi-lan, XIE Yong-li, et al. Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005,18(4):27-31.

[6] 石刚,王晋国,支喜兰,等.黄土地区公路工程地基承载力分区计算方法[J].交通运输工程学报,2005,5(4):48-52.

SHI Gang, WANG Jin-guo, ZHI Xi-lan, et al. Calculation method of foundation bearing capacity based on division in loess area for highway engineering[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(4):48-52.

[7] 景宏君,张斌.黄土地区公路路基冲击压实试验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):25-29.

JING Hong-jun, ZHANG Bin. Experiments of highway subgrade impact compaction in loess region[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(1):25-29.

[8] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for soils[J]. J Soil Mech Found Div, 1968,94(1):21-46.

[9] Mesri G, Febres C E, Shields D R, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays [J]. Geotechnique,1981,31(4):537-552.

[10] Lin H D, Wang C C. Stress-strain-time function of clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4):289-296.