

重塑黄土变形特性

程海涛,刘保健,谢永利

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究黄土路堤的沉降特性,基于室内一维固结试验,从流变角度分析了重塑黄土的变形特性;在此基础上,从简单的 Kelvin 模型入手,引入非线性应力、应变关系的割线模量,利用变参数法建立了描述重塑黄土变形特性的非线性模型,并进行了计算值与实测值的比较分析。结果表明:随着时间的增加,各应力水平下的应变逐渐趋于稳定,不会出现破坏现象,且基本呈双曲线关系;变形属非线性衰减型,且非线性程度随着应力水平的提高而增强;非线性模型中含有 4 个土性参数,均可由室内一维固结试验得出;计算值与实测值吻合较好,表明该模型具有较高的可靠性,为研究黄土路堤沉降特性提供了有力依据。

关键词:道路工程;重塑黄土;流变;Kelvin 模型;割线模量

中图分类号:U414.11 **文献标志码:**A

Deformation characteristics of remolded 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 analyze the settlement characteristics of loess road embankment, based on one-dimensional consolidation tests, the deformation characteristics of remolded loess are analyzed from the angle of rheology. The results of tests show that the strain will level off to a certain extent with time under every stress level and the failure will not appear. The relation of strain and time can be described by hyperbolic model. The deformation belongs to non-linear attenuation and the degree of non-linearity strengthens when the stress level increases. According to the deformation characteristics, using non-linear secant modulus and varying parameters method, the non-linear model based on Kelvin model is proposed. The model can describe the deformation characteristics of remolded loess. The model involves 4 parameters in connection with properties of soil and they can be gotten from one-dimensional consolidation tests easily. At last, through the comparison of calculated value with measured one, the reliability of the model is testified. It provides powerful reference for studying the settlement characteristics of loess road embankment. 8 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; remolded loess; rheology; Kelvin model; secant modulus

0 引 言

在沟壑纵横的西部山区修建高速公路时,将会

遇到大量的非饱和高填方黄土路堤。填土路堤的沉降分最后沉降量与施工期沉降量,二者之差为工后沉降量。公路路堤铺筑路面后,工后沉降量的大小

收稿日期:2007-11-14

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,工学博士,E-mail:chenghaitao1991@163.com。

是路堤质量的主要标准。不论是施工期还是工后期,填土路堤的沉降变形与荷载和时间有关,都可以表示为荷载与时间的函数,理论上属于流变范畴。

现有的土本构关系及应力、应变计算方法主要用于最终沉降量的计算,与时间无关。非饱和土固结理论虽然考虑了时间的因素,但由于技术和经济成本过高,难以应用到实际中去。流变理论能够同时考虑应变、应力和时间三维相互关系,但目前流变理论主要用于对软土体、岩体变形进行研究,并取得了一定成果^[1]。而对非饱和填土体的变形研究成果还不多见。因此,研究非饱和填土体的应变、应力和时间三维关系具有重要的理论意义和实用价值。为此,本文基于室内一维固结试验,从流变角度研究了重塑黄土的变形特性,引入非线性应力-应变关系的割线模量,并推导出了描述重塑黄土变形特性的非线性模型。

1 变形特性分析

试验土样取自兰州—海石湾高速公路 70 m 高填方路堤,属非饱和和重塑黄土。土样的平均含水量(含水质量分数) $w = 11.0\%$,最大干密度 $\rho_d = 1.59 \text{ g/cm}^3$,相对密度 $d_s = 2.69$,孔隙比 $e = 0.697$ 。用室内一维固结仪进行了土样的分级加载固结试验。按照“坐标平移法”把分级加载试验曲线分别转化为加载试验曲线,得到应变-时间曲线,如图 1 所示,应力-应变等时曲线如图 2 所示。

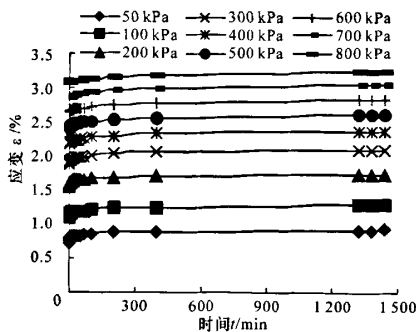


图 1 应变-时间曲线

从图 1 可以得出如下结论。

(1) 加载初期应变增加迅速,随着时间的增加,应变曲线逐渐平缓,即应变速率逐渐减小。

(2) 在低应力水平下,应变有较明显的增长现象,但应变速率衰减较快,在高应力水平下应变增长不明显。

(3) 随着时间的增加,各级应力水平下的应变逐渐趋于稳定,而不会出现破坏现象。

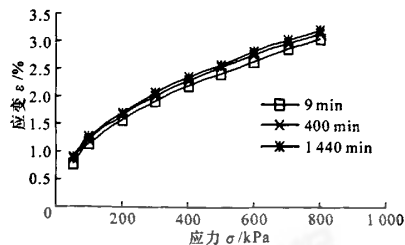


图 2 应力-应变等时曲线

(4) 各应力水平下变形的总体趋势大致相同,基本呈双曲线关系(式(1));转化成直线形式^[2]如图 3 所示。由此可以看出,随着应力的增加,斜率越来越小,并且减小的速率越来越缓慢。

$$\frac{t}{\epsilon} = C + Dt \quad (1)$$

式中: t 为时间(min); C 为应变时间转化曲线的截距; D 为时间趋于无穷大时应变倒数。

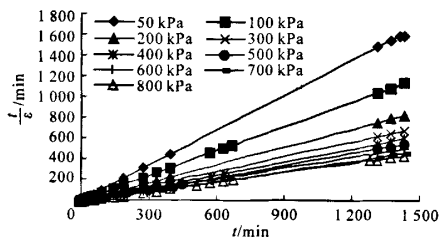


图 3 应变-时间转化曲线

从图 2 可以得出如下结论。

(1) 不同时刻的应力-应变等时曲线是不同的,而且一般不是直线,说明变形是非线性的。

(2) 随着应力的增加,应力-应变曲线向应力轴方向弯曲,说明应力-应变等时曲线偏离直线的程度增大,非线性程度随应力水平的提高而增强。

(3) 随着时间的增加,应力-应变等时曲线逐渐靠拢,说明其变形属于衰减型。

上述现象的产生可这样解释:在应力施加初期,由于土体比较疏松,土粒间孔隙较大,土颗粒相对滑移较容易,滑移距离也较大,在较短的时间内就能达到新的平衡,所以具有明显的变形,且应变速率衰减较快。在应力水平较高时,土体在前几级荷载作用下已变得较密实,即土体压缩模量随应力而增加,所以应变增加不明显,非线性程度随着应力提高而增强。另外,由于试验中侧向变形的限制,所以试验中呈现衰减蠕变,并且不会出现破坏现象。

2 计算模型

从上述分析可知,重塑黄土在一维固结试验中

属衰减蠕变,随着荷载的施加,土体变形不会出现由弹性变形到塑性变形的剪切破坏情况。在实际情况中,弹性、塑性、粘性等各种形式的变形,从一开始都是一起发生的,不能从时间段上直观地划分开来,并且把变形按阶段分成弹性、塑性、粘性,这从变形机理上也是难以解释的^[3,4]。

由于重塑黄土一般属于非饱和黄土,鉴于非饱和和土固结理论在应用上的复杂性,本文利用 Kelvin 模型,如图 4 所示,基于土体变形,从宏观上建立描述重塑黄土变形特性的变参数非线性模型。所谓变参数是指模型的弹簧模量 E 与牛顿粘壶的粘滞系数 η 不再是常数,而是与应力水平有关的变量,即 $E = E(\sigma)$ 和 $\eta = \eta(\sigma)$ 。

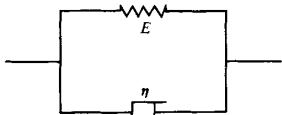


图4 Kelvin 模型

2.1 模型的数学表达式

Kelvin 模型本构方程为

$$\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon} \quad (2)$$

其蠕变柔量为 $J(t) = [(1 - e^{-B/\eta})/E]H(t)$, 反映蠕变的规律, 其中 $H(t)$ 为与时间 t 有关的阶跃函数。从 Kelvin 模型蠕变柔量可以看出, 刚施加应力时刻, 其蠕变柔量为 0, 在一定的应力水平下, 蠕变柔量随着时间的增加, 而增加并趋近于一定值。即在给定应力水平下, 随着时间的增加, 应变由 0 增加并趋于一定值, 应变速率则逐渐减小, 最终趋于 0。

由式(2)可得

$$E = \left(\frac{\sigma - \eta \dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} \right)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}_{t \rightarrow \infty}} = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}_{ult}} \quad (3)$$

$$\eta = \left(\frac{\sigma - E\epsilon}{\dot{\epsilon}} \right)_{t=0} = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}_{t=0}} \quad (4)$$

引入割线模量概念: $E_{soi} = \frac{\sigma}{\epsilon_{ult}} = A + B\sigma$, 代入式(3)可得

$$E = A + B\sigma \quad (5)$$

在式(1)中对时间求导可得应变速率

$$\dot{\epsilon} = \frac{C}{(C + Dt)^2} \quad (6)$$

代入式(4)可得

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}_{t=0}} = C\sigma \quad (7)$$

把式(5)、式(6)、式(7)代入式(2)可得

$$\sigma = (A + B\sigma)\epsilon + C\sigma \frac{C}{(C + Dt)^2} \quad (8)$$

把 ϵ 解出

$$\epsilon = \frac{\sigma}{A + B\sigma} \left[1 - \frac{C^2}{(C + Dt)^2} \right] \quad (9)$$

式中: A 为初始割线模量; B 为割线模量曲线斜率, 均是与土的性质有关的参数, 其确定方法见文献[5]; $\dot{\epsilon}_{t=0}$ 为初始应变速率; $\dot{\epsilon}_{t \rightarrow \infty}$ 、 $\dot{\epsilon}_{ult}$ 均为 $t \rightarrow \infty$ 时的应变; E_{soi} 为第 i 级压力作用下对应的土的割线模量。

式(9)即为利用 Kelvin 模型建立的描述重塑黄土变形特性的非线性模型。

2.2 模型参数的确定及可靠性分析

从式(9)可以看出, 该模型包含 4 个参数 A 、 B 、 C 、 D 。

分析式(1)可知, 截距 C 在数值上等于时间为 0 时应变速率的倒数, 拟和 C 与应力关系(图 5)可得

$$C = M\sigma^N \quad (10)$$

式中: M 、 N 均为与土的性质有关的参数, 可由试验数据反算得出。一般情况下, $M > 0$, $N < -1$ 。

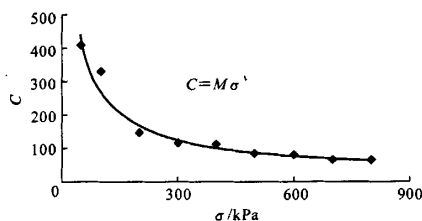


图5 截距与应力的关系

根据割线模量概念, D 为

$$D = \frac{1}{\epsilon_{ult}} = \frac{A}{\sigma} + B \quad (11)$$

把式(10)、式(11)分别代入式(9)可得

$$\epsilon = \frac{\sigma}{A + B\sigma} \left\{ 1 - \frac{(M\sigma^N)^2}{[M\sigma^N + (A/\sigma + B)t]^2} \right\} \quad (12)$$

式(12)就是描述重塑黄土变形特性的非线性模型的最终形式。模型中含有 A 、 B 、 M 、 N 共 4 个参数, 都与土的性质有关, 可由室内一维固结试验很容易得出。

由式(5)、式(7)及式(10)可知: $E(\sigma) = A + B\sigma$, $\eta(\sigma) = M\sigma^{1+N}$ 。可以看出, 当应力增加时, 弹性模量增加, 粘滞系数减小。这说明随着应力的增加, 应变增长缓慢, 应力-应变非线性程度越来越大, 与试验现象相符。

对式(12)两边时间 t 求导, 易得: $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} < 0$, 说明应变随时间 t 的增加而增加, 应变速率随 t 的增加而减小, 呈衰减蠕变。

令 $\alpha = \frac{(M\sigma^N)^2}{[M\sigma^N + (A/\sigma + B)t]^2}$, 则式(12)可改写为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{A + B\sigma}(1 - \alpha) = \epsilon_{ult}(1 - \alpha) \quad (13)$$

随着时间的增加, α 由 1 减小到 0。从式(13)可以看出, 该模型描述了 ϵ 由 0 增加到 ϵ_{ult} 的全过程。

根据大量试验资料得出的参数 M 、 N , 可以求出初始应变速率 $\dot{\epsilon}_{t=0}$, 其值一般都很大, 说明施加荷载初期应变增长很快, 计算结果也充分证明了这一点。这说明, 该模型可以很好地描述施加应力初期变形增长迅速的特点^[6-8]。

图 6、图 7 为利用模型计算的应变-时间曲线及应力-应变等时曲线; 图 8 为计算值与实测值的比较。从各图中可以看出, 变形属于非线性衰减型, 并且计算值与实测值在形态和数值上都比较接近, 说明该模型能够很好地描述重塑黄土变形特性。

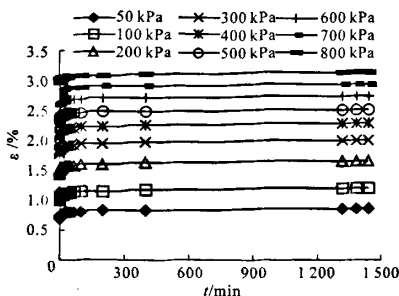


图 6 计算的应变-时间曲线

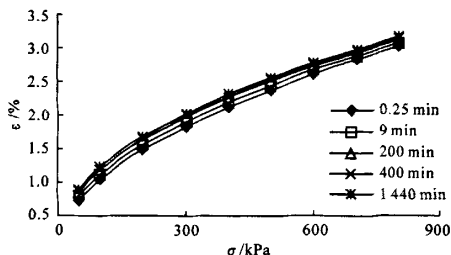


图 7 计算的应力-应变等时曲线

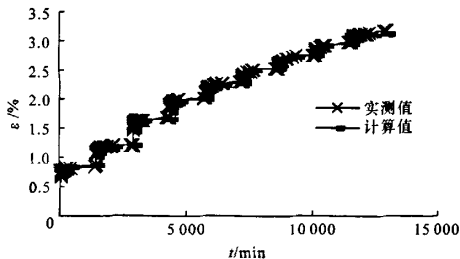


图 8 计算值与实测值的比较

3 结 语

(1) 鉴于非饱和土固结理论在应用上的复杂性, 本文从流变角度分析了重塑黄土的变形特性。

(2) 从简单的 Kelvin 模型入手, 引入割线模量, 利用变参数法建立了描述重塑黄土变形特性的非线性模型。模型中包含 4 个土性参数, 能很容易从室内一维固结试验中得到, 且经济、方便。通过对比分析, 证明了该模型的可靠性。

(3) 该模型中参数的取值以及含水量、干密度等的影响还有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 李传勋. 压实黄土荷载、变形与时间关系及应用问题的研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [3] 陈晓平, 白世伟. 软土蠕变-固结特性及计算模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 728-734.
CHEN Xiao-ping, BAI Shi-wei. Research on creep-consolidation characteristics and calculating model of soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 728-734.
- [4] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [5] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土应力-应变-时间特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 6-9.
CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. Stress-strain-time behavior of compacted loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 6-9.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张玉芬, 张志权, 赵桂娟, 等. 二灰黄土力学性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(5): 20-23.
ZHANG Yu-fei, ZHANG Zhi-quan, ZHAO Gui-juan, et al. Test on mechanical properties of lime-fly-ash loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 20-23.