

黄土湿陷过程中的压力与湿陷速率关系的数学模型及分析

张向东, 兰常玉, 李永靖

(辽宁工程技术大学 土木建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:通过对黄土湿陷过程的分析, 根据能量守恒定律, 建立了黄土的湿陷过程中压力与湿陷速率关系的数学模型。通过试验, 确定了模型中的相关参数, 得到了湿陷速率随压力变化曲线。根据对模型及试验曲线的分析, 指出在黄土湿陷过程中湿陷速率随着压力的增大而增大, 但增长速率却逐渐减小; 湿陷起始压力随着湿陷量的增大而增大; 湿陷速率的变化具有突变性。

关键词:土力学; 黄土; 压力; 湿陷速率

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)07-1222-04

MATHEMATICAL MODEL AND ANALYSIS ON THE RELATION BETWEEN PRESSURE AND SPEED OF COLLAPSE DURING COLLAPSE OF LOESS

ZHANG Xiang-dong, LAN Chang-yu, LI Yong-jing

(Institute of Civil and Architectural Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: On the basis of energy conservation during the collapsible process of loess, a relation between pressure and collapse speed during collapse of loess was built. The model parameters and the curves of the relation were obtained by experiment. Based on the model and the curve, the obtained conclusions are: the higher pressure is, the higher collapsible speed is; the larger quantity of collapse is, the larger collapse pressure of origination is, and the collapsible speed has the character of salutation.

Key words: soil mechanics; loess; pressure; collapsible speed

1 引言

黄土地基的实际湿陷过程是一个增湿-减湿不断往复交替的过程。在湿陷过程中土体的微观结构也是不断变化的, 这就导致了土体湿陷量在不同时间段其大小是不同的, 即黄土的湿陷速率是一个变化量, 而湿陷速率的大小标志着黄土湿陷量的发展

速度, 即湿陷敏感性^[1]。湿陷敏感性不同, 就会对建筑物造成不同的危害, 所以定量表示黄土的湿陷速率就有其现实的意义。

由黄土的湿陷机理可知, 外界荷载及土体自重(以下统称为压力)是土体发生湿陷的外因^[2], 同时也是影响湿陷速率的重要因素。若要研究湿陷速率的变化规律, 就有必要研究压力与湿陷速率的关系。本文将在试验研究的基础上, 利用建模手段, 探讨

收稿日期: 2003-12-01; **修回日期:** 2004-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478033)

作者简介: 张向东(1962-), 男, 博士, 1997年于东北大学资源与土木工程学院获博士学位, 现任辽宁工程技术大学教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: Zhxd2008@yahoo.com.cn.

黄土湿陷过程中压力与湿陷速率的关系。

2 建模的理论依据及基本假设

根据建模理论，本文在分析前人研究成果的基础上，并以室内单轴有侧限压力试验成果加以确定和修正模型参数的方法来构造黄土湿陷过程中的压力与湿陷速率关系模型。

土的力学特性与土的结构有较大的相关性，许多学者对此展开了大量的研究工作^[3-6]。由于黄土湿陷过程中的土体结构变化过程很难具体把握，这就给研究工作带来了一定的困难。但若从能量角度出发，则可以避开结构特性对研究工作的困扰。所以本文确定模型的基本出发点是能量守恒定律，即认为压力对土体所做的功等于土颗粒间的摩擦力、粘聚力等所做的功。

基于黄土的湿陷机理，可以认为黄土在粘弹性阶段为一线性粘弹性体以及在粘塑性阶段为一非线性粘塑性体^[7]，皆因土颗粒结合水膜变化所致。同时，增湿变形主要决定于最终含水量^[8]，所以，可以认为黄土湿陷过程中结合水膜的厚度变化很微小。根据以上所述，做出如下假设：

- (1) 黄土发生湿陷，其内因只是水膜楔入土颗粒之间，可溶盐的影响可忽略^[9]；
- (2) 带有结合水膜或结合水膜增厚的土颗粒在黄土增湿湿陷过程中只产生弹性变形；
- (3) 压力对土体所做的功，全部转化为土颗粒间的摩擦热；
- (4) 湿陷量随时间的变化规律满足 H-K 体模型，即

$$\delta = A + B(1 - e^{-ct}) \tag{1}$$

式中： δ 为湿陷量，取单位高度土体的湿陷量时即为湿陷性系数； A, B, c 均为常数。

3 压力与湿陷速率关系的数学模型

由于土体在浸水受湿之前土颗粒间有较高的联结强度，土体的承载力较高，整个土体处于静止状态。此时促使湿陷发生的力(外界荷载及土体自重等)与阻止湿陷发生的力(土颗粒间的摩擦力、粘聚力等)合力为 0，故引入处于压紧状态的弹性体 H_2 ，其弹力大小代表着阻止湿陷发生的力值。当有水浸入土体时，土颗粒间的联结强度、土体的承载力均迅速

减弱，即阻止湿陷发生的力值迅速减小，所以当土体发生湿陷时引入处于拉伸状态的弹性体 H_1 ，用以减小阻止湿陷发生的力值(即 H_2 的弹力)。用串联起来的弹性体 H_1 与 H_2 的合力大小来表示土体浸水受湿时阻止湿陷发生的力值大小。同时，因为弹性系数 E 完全取决于弹性体的材料，而黄土在湿陷过程中其材料组成只是结合水膜的厚度有微小变化，可以将其忽略，因此将弹性体 H_1, H_2 的弹性系数均取为 E 。

在黄土湿陷变形过程中，压力必然会对土体做功。很明显，根据能量守恒定律，压力对土体所做的功是被土体消耗掉了，所以引入牛顿体 N (活塞质量为 m ，其粘滞性系数为常数 η) 用以表示土体对能量的消耗和吸收。根据黄土湿陷变形过程中随着土体所受压力不断增大最终会导致破坏，所以引入圣维南体 V (摩擦力为 P_s)，并将其与牛顿体 N 串联。最后，将 2 个串联体并联，构成了黄土湿陷过程的力学模型如图 1 所示。

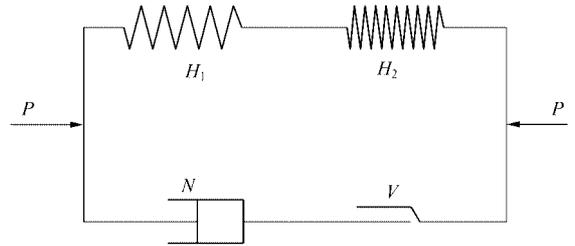


图 1 压力与湿陷速率关系的力学模型

Fig.1 The model of relationship between the pressure and the speed of collapse

设在任意时刻 t ，土体在压力 P 的作用下，其湿陷量的大小为 δ ；弹性体 H_1 的变形量为 δ_1 ，弹性体 H_2 的变形量为 δ_2 ；圣维南体 V 所受到的力为 P' ($P' < P_s$)；牛顿体 N (活塞) 的运动速度是 v ，即湿陷速率。因为在任意时刻 t ，牛顿体 N 中流动液体的质量很小，所以将其动能忽略，则根据能量守恒定律可得

$$P\delta = \frac{1}{2} E\delta_1^2 - \frac{1}{2} E\delta_2^2 + \frac{1}{2} mv^2 \tag{2}$$

同时由模型可知

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \tag{3}$$

将式(1)，(3)代入式(2)，整理可得

$$v = \sqrt{\frac{2(A+B)}{m} - \frac{2B}{m} e^{-ct}} \sqrt{\frac{2P}{m} - \frac{E(\delta_1 + \delta_2)}{m}} \tag{4}$$

在式(4)中令 $\delta_{max} = \frac{2(A+B)}{m}$, $\lambda = \frac{2}{m}$, $P_q = \frac{E(\delta_1 + \delta_2)}{m}$, 则

$$v = \sqrt{\delta_{max} - \lambda B e^{-ct}} \sqrt{\lambda P - P_q} \quad (5)$$

4 模型参数确定

式(5)中的各参量可通过试验加以确定,由于本文主要讨论压力与湿陷速率的关系,故忽略时间 t 对湿陷速率的影响。令 $\sqrt{\delta_{max} - \lambda B e^{-ct}} = 1$, 则式(5)可改写为

$$v = \sqrt{\lambda P - P_q} \quad (6)$$

通过现场取样,对阜新市南郊黄土进行了室内湿陷性试验,为尽可能减小含水量及试验操作等因素所引起的误差,取各组试样的平均湿陷速率值作为最终试验结果,如表 1 所示。

表 1 阜新南部黄土湿陷资料

Table 1 The collapsibility data of loess in the south of Fuxin

| 压力/MPa | 湿陷速率的平均值/mm · d ⁻¹ |
|--------|-------------------------------|
| 0.1 | 0.050 |
| 0.2 | 0.081 |
| 0.3 | 0.113 |
| 0.4 | 0.131 |
| 0.5 | 0.150 |
| 0.6 | 0.156 |

根据试验结果,可得 $\lambda = 0.068$, P_q 值则列于表 2 中。

表 2 P_q 的值

Table 2 The value of P_q

| 压力/MPa | P_q 值 |
|--------|---------|
| 0.1 | 0.004 |
| 0.2 | 0.007 |
| 0.3 | 0.008 |
| 0.4 | 0.010 |
| 0.5 | 0.011 |
| 0.6 | 0.016 |

根据求得的 λ 及 P_q 值,可得湿陷速率与压力关系如图 2 所示。

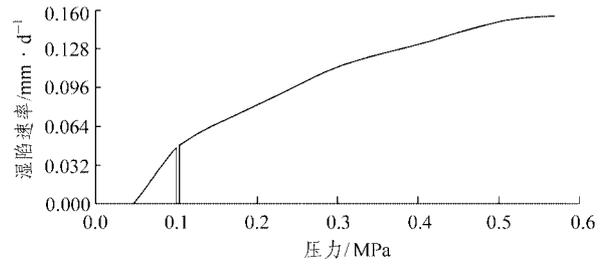


图 2 压力与湿陷速率的关系

Fig.2 The relationship between the pressure and the speed of collapse

5 结 论

- (1) 在黄土湿陷过程中,湿陷速率随着压力的增大而增大,但增长速率却逐渐减小;
- (2) 由试验结果及图 2 可见, P_q 值的变化是导致湿陷速率的变化具有突变性^[10]的原因,且每次湿陷都会导致下次湿陷起始压力的增大;
- (3) 通过与前人的研究成果相比较,可知本文所采用的研究方法获得的成果与国内外相关研究结果基本一致,这说明利用能量法研究黄土的湿陷性问题是可行的。

参考文献(References) :

[1] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4) : 273 - 285.(Xie Dingyi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess[J]. Journal of Underground Space ,1999 ,19(4) :273 - 285.(in Chinese))

[2] 邢义川. 黄土力学性质研究的发展和展望[J]. 水力发电学报, 2000 ,(4) :54 - 65.(Xing Yichuan. Development and looking ahead of loess mechanics[J]. Journal of Hydroelectric Engineering ,2000 ,(4) : 54 - 65.(in Chinese))

[3] 胡瑞林,王思敬,张礼中等. 动荷载作用下黄土的强度特征及结构变化机理研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2) : 174 - 181.(Hu Ruilin ,Wang Sijing ,Zhang Lizhong ,et al. Approach to the strength behaviors and micro-structural changes of loess under dynamic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2000 , 22(2) : 174 - 181.(in Chinese))

[4] 朴毅彬,陈万业,廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究[J]. 岩土工程学报,2000 ,22(1) :49 - 54.(Pu Yibin ,Chen Wanye , Liao Quanrong. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2000 , 22(1) : 49 - 54.(in Chinese))

- [5] 王 梅, 杜建安, 白晓红. 黄土湿陷性质的微观研究[J]. 科技情报开发与经济, 2001, 11(01): 75-76.(Wang Mei, Du Jian'an, Bai Xiaohong. Micro-examination on collapse property of loess[J]. SCI/TECH Information Development & Economy, 2001, 11(01): 75-76.(in Chinese))
- [6] 党进谦, 李 靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, (7): 79-83.(Dang Jinqian, Li Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (7): 79-83.(in Chinese))
- [7] 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 Zengyu, Zhang Chaopeng, Xia Wangmin. 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.(in Chinese))
- [8] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.(Xie Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.(in Chinese))
- [9] 孙建中, 刘建民. 黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 365-367.(Sun Jianzhong, Liu Jianmin. On unsaturated collapse, remnant collapse and multiple collapse of the loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 365-367.(in Chinese))
- [10] 毕 毅. 黄土地基湿陷性研究与工程应用中若干问题[J]. 土工基础, 1999, 13(3): 35-37.(Bi Yi. Certain problems on collapsibility study and engineering practice in loess foundation[J]. Soil Engineering and Foundation, 1999, 13(3): 35-37.(in Chinese))

“ 首届全国隧道与地下工程风险管理学术研讨会 ” 会议简讯

由中国土木工程学会隧道及地下工程分会主办、同济大学承办的“ 首届全国隧道与地下工程风险管理学术研讨会 ” 将于 2005 年 9 月在上海同济大学召开。

会议主题有：

- (1) 风险管理理论与方法进展；
- (2) 各类地下工程建设方案论证的风险决策、评估与分析；
- (3) 投资与保险有关理论与案例分析；
- (4) 设计、建设与施工中的风险管理与控制技术；
- (5) 运营阶段灾害防治与控制的风险分析应用；
- (6) 典型地下工程建设中的事故与控制案例分析；
- (7) 其他土木工程领域内的风险管理与应用研究。

被录用的论文将以《地下空间与工程学报》正式期刊（专辑）的形式出版。会议将邀请国内院士、知名专家做主题和专题报告。

论文重要日期为：2005 年 3 月 30 日，论文摘要提交截止日期；2005 年 4 月 30 日，论文接受通知日期；2005 年 6 月 30 日，论文提交截止日期。

会议联系地址为：

上海市四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系(200092)

联系人：黄宏伟，张冬梅，胡群芳 电话：0086-21-65982986 传真：0086-21-65982986，0086-21-65985210

E-mail：dmzhang@mail.tongji.edu.cn，huqunf@126.com。

详细信息请浏览 <http://www.tunneltj.com.cn/>。

欢迎投稿和参加会议。