

原状黄土蠕变特性试验研究

王松鹤, 骆亚生, 杨永俊, 杨静敬

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以在陕西省杨凌区所采集的黄土样品为研究对象, 对不同初始含水率的原状黄土进行了剪切蠕变试验, 获取了蠕变曲线和蠕变特征参数, 并研究了含水率、剪应力水平对蠕变特性的影响。结果表明, 当含水率一定时, 剪应力水平对黄土的蠕变特性有较大的影响, 表现为剪应力愈大, 黄土的蠕变应变愈大; 当剪应力水平一定时, 含水率对黄土蠕变特性影响明显, 表现为含水率愈大, 蠕变应变愈大。根据蠕变曲线特征, 建立了原状黄土的蠕变本构模型, 通过试验数据拟合得到本构模型中的参数。经验证, 该模型能较好地模拟杨凌地区原状黄土的蠕变特性。

关键词: 原状黄土; 蠕变; 本构模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)04-0122-03

中图分类号: TU432

Experimental Study of the Creep Behavior of Unsaturated Intact Loess

WANG Song-he, LUO Ya-sheng, YANG Yong-jun, YANG Jing-jing

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: By taking the loess in Yangling District, Shaanxi Province as a research object, a direct shear creep test is conducted to obtain the characteristic creep curve and parameters of intact loess under different water contents and analyze the influences of water content and shear stress on creep characteristics. Results indicate that at a given water content, shear stress obviously influences the creep characteristics. The higher shear stress, the greater creep strain of loess. At a given shear stress, water content obviously influences the creep characteristics. The higher water content, the bigger creep strain. According to the typical behavior of creep curve, a creep constitutive model and characteristic parameters are obtained by fitting test data. The model better simulates the creep characteristics of intact loess in Yangling District by model test.

Keywords: intact loess; creep behavior; constitutive model

土体流变现象普遍存在于岩土工程中, 边坡失稳, 基坑的侧向位移, 路基破坏等工程问题均与流变密切相关。蠕变作为流变的一种重要的表现形式, 逐渐受到国内外学者的广泛关注, 并对此开展了大量的研究。Munson 等^[1] 针对盐岩的蠕变特性提出了多机制变形模型 (M-D)。Hunsche^[2] 对盐岩蠕变本构模型进行了研究。吴紫汪等^[3] 通过观测分析冻土蠕变过程中微观结构的变化, 发现结构缺陷的增生与扩展制约着土结构的强化和弱化作用。近年来, 蒋甫, 应荣华^[4] 采用三参量模型研究黄土工后沉降, 分析黄土在不同填筑路基高度作用下随时间的蠕变变形规律。汪斌^[5], 严绍军等^[6] 利用 Burger's 蠕变模型研究了黄土坡滑带土的蠕变性。孙学先等^[7] 考虑多年冻土蠕变特性, 对冻土区钻孔灌注抗拔桩进行非线性

有限元分析。黄小华等^[8] 建议了黏弹组合模型参数的确定方法。于小军^[9] 通过电阻率测试, 为预估软土微结构蠕变提供一种新途径。

目前蠕变特性研究的对象主要为岩石、软土、冻土、滑带土等, 我国在黄土蠕变研究中还处于初步发展阶段。充分认识非饱和黄土的蠕变特性, 深入认识和有效控制影响蠕变特性的不利因素, 不仅可以逐步完善和发展流变理论, 也可以有效预防和减少工程失稳、滑坡、人员伤亡等工程事故发生, 对于黄土分布地区工程实际具有重要的指导意义。

本研究通过杨凌地区原状黄土的剪切蠕变试验, 利用 Boltzmann 叠加原理对试验资料进行处理, 获得了蠕变曲线和蠕变特征参数, 并在此基础上推导出了杨凌地区原状黄土的蠕变本构模型。

收稿日期: 2008-11-26

修回日期: 2009-03-13

资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (50578134); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NECT-06-0864)

作者简介: 王松鹤 (1985-), 男 (汉族), 河北省藁城市人, 硕士研究生, 主要从事黄土力学与工程方面的研究。E-mail: wangsonghe888@yahoo.com.cn.

通信作者: 骆亚生 (1967-), 男 (汉族), 陕西省泾阳县人, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学与工程方面的生产与科研工作。E-mail: lyas@public.xa.sn.cn.

1 试验材料和方法

试验所用试样取自陕西杨凌某砖厂黄土边坡,取土深度 3.5—4 m,属 Q₃ 黄土,烘干法测得的天然含水率为 16.6%,天然干密度为 1.26 g/cm³,土料的物理性质指标见表 1。试验用原状黄土试样由所取原状黄土直接削制而成。

试验所用的剪切蠕变仪是在普通应变式直剪仪基础上改进而来,该装置主要由剪切盒、加压系统及量测系统 3 部分组成,法向应力仍采用原直剪仪上的杠杆式加压方式进行施加,与原应变式直剪仪不同之处在于水平剪应力采用由钢丝绳绕过定滑轮后加砝码来实现,试验装置实物图见图 1。各量表的测量精度为 1%;实验室内装有温度计,用以观测温度变化;为减少试验过程中试样水分的散失,本试验通过给剪切盒加压板包以湿棉花进行保湿,并在试验结束后测定试验前后含水率的变化,经试验验证,该方法可行。

试验采取分级加载方式,选取一组(8个)相同的土体试样,分别调整至目标含水率 12%,16%,24%;

分别施加不同的法向应力,固结稳定后再对每个试样分级施加水平剪切荷载。法向应力分 8 级,为 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 kPa,剪应力参照土工试验规程,由直剪试验得到的极限剪应力来分级施加。变形稳定以每级水平剪切荷载下,定时观测变形持续到稳定(一般不大于 0.01 mm/d)为标准。试样出现快速连续剪切变形时试样破坏。



图 1 改进后的直剪蠕变仪

表 1 黄土的物理性质指标

土样来源	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	按塑性图分类	颗粒组成/%		
						> 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	< 0.005 mm
杨凌	2.70	28.7	17.5	11.2	CL	16.5	62.8	20.7

2 结果与分析

2.1 蠕变特性及其影响因素分析

利用 Boltzmann 叠加原理对试验资料进行处理,获得各级剪切应力下的蠕变曲线簇。图 2 为剪应力水平对蠕变特性的影响。在一定法向应力 σ_n 和含水率 w 下,剪应力较小时,土体剪切速率逐渐降低,最后趋于一稳定值,呈衰减蠕变形态;当剪应力增大到一定值时,试样出现连续快速变形,发生剪切破坏。主要是由于黄土是一种典型的结构性土,其原生结构具有一定的初始结构强度。剪应力较小时,土体的原生结构逐渐产生破坏,同时次生结构逐渐生成,增大了土体结构的稳定性,阻止了土骨架变形的发展,于是在低应力水平时,蠕变曲线呈衰减趋势;剪应力增大到一定值时,土体原生结构完全破坏,次生结构生成;剪应力未超过次生结构强度时,曲线仍呈衰减趋势,剪应力超过次生结构强度时,土体结构已完全破坏,产生连续变形,直至土体破坏。

要是水膜的楔入和润滑作用,减弱了土体颗粒间原有的联结和摩擦,含水率愈大,这种减弱作用愈明显,产生的蠕变应变愈大。

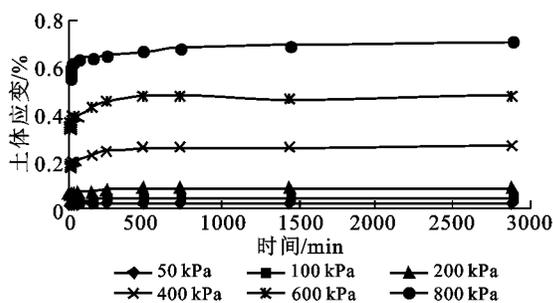


图 2 剪应力水平对蠕变特性的影响

$w = 16\%, \sigma_n = 50 \text{ kPa}$

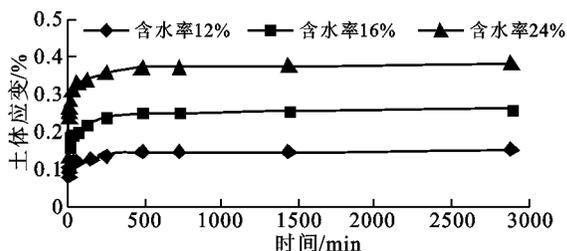


图 3 含水率对蠕变特性的影响

$\tau = 400 \text{ kPa}, \sigma_n = 50 \text{ kPa}$

图 3 为含水率对蠕变特性的影响。在黄土工程中,含水率一般被认为是一种广义的力^[10],剪应力一定时,含水率愈大,土体发生的剪切蠕变变形愈大,主

2.2 蠕变本构模型建立

通过对试验资料的分析,笔者获得了不同含水率下的应力应变等时关系曲线(以 $w = 16\%$, $\sigma_h = 50$ kPa 为例),如图 4 所示。

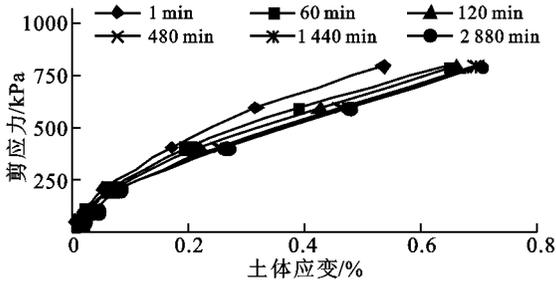


图 4 等时关系曲线($w = 12\%$)

在对图 4 中曲线进行拟合时发现,采用幂函数拟合时,相关系数均在 0.95 以上。基于以上分析,总结出黄土的本构模型如下式:

$$\tau = a\varepsilon^b \quad (1)$$

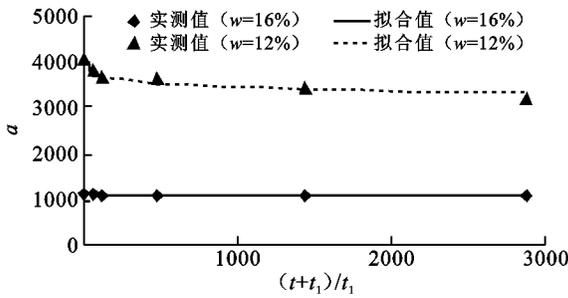


表 2 模型参数拟合结果

$(t+t_1)/t_1$	$w = 16\%$		$w = 12\%$	
	a	b	a	b
2	1 152.1	0.598 5	4 059.9	0.809 6
61	1 115.1	0.648 1	3 819.6	0.869 7
121	1 090.3	0.683 8	3 659.2	0.908 3
481	1 092.2	0.734 2	3 612.8	0.942 7
1 441	1 084.2	0.734 1	3 436.8	0.937 9
2 881	1 065.4	0.730 4	3 203.3	0.927 5

由表 2 可知,模型参数 a, b 均随时间 t 增大而减小;通过拟合结果比较发现, $a \sim (t+t_1)/t_1$ 在采用幂函数拟合, $b \sim (t+t_1)/t_1$ 采用对数函数拟合时均具有较好的相关性,具体拟合结果见图 5。

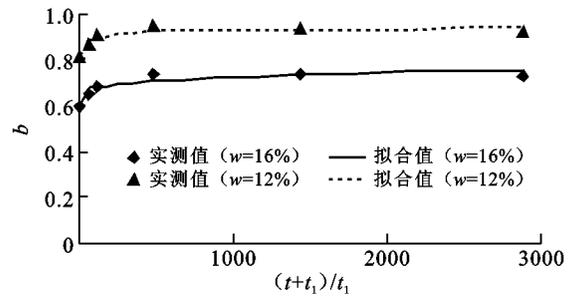


图 5 模型参数 a, b 拟合结果

将 $a \sim (t+t_1)/t_1, b \sim (t+t_1)/t_1$ 的拟合结果代入公式(1)中可得陕西杨凌地区原状黄土的蠕变本构模型,见公式(2),对试验数据进行拟合得到模型参数(表 3)。

$$\tau = \alpha \left(\frac{t+t_1}{t_1} \right)^\beta e^{\mu \ln \left(\frac{t+t_1}{t_1} + \lambda \right)} \quad (2)$$

式中: τ ——施加的剪应力(kPa); ε ——土体的应变(%); t ——时间(min); t_1 ——单位时间($t_1 = 1$ min); $\alpha, \beta, \mu, \lambda$ ——模型参数。

表 3 模型参数拟合结果

条件	α	β	μ	λ
$w = 16\%$	1 157.7	-0.010 0	0.020 4	0.582 5
$w = 12\%$	4 223.4	-0.029 7	0.018 3	0.804 6

由图 6 知,无论从曲线形态还是从数值上,拟合值与试验值吻合都很好,表明式(2)可以很好的描述杨凌地区原状黄土的蠕变特性。该模型不仅具有较分数线性蠕变模型更简单的形式,同时具有较少的模型参数。

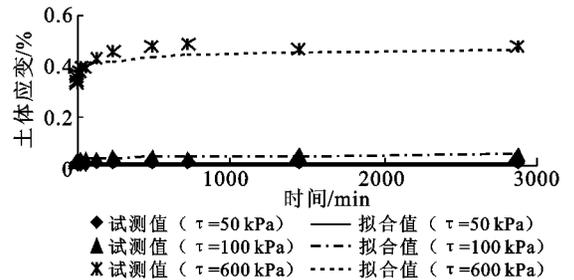


图 6 模型验证($w = 16\%$)

3 结论

通过对杨凌地区原状黄土的剪切蠕变试验,分析了含水率、剪应力水平对原状黄土的蠕变特性的影响,得到了蠕变曲线和蠕变特征参数,并采用合适的经验公式对各级剪应力下的蠕变曲线进行了模拟,获得了适合杨凌地区原状黄土的蠕变本构模型,并拟合出该模型的参数,经过验证及相关性分析,表明该本构模型能较好的模拟杨凌地区原状黄土的剪切蠕变特性,具有较好的适用性。

节约型的社会生产和消费体系,争取资源消耗和废物排放减少,这是从人口、消费的角度促进整个社会发展模式转变的重要环节。只有在这些方面采取有效措施,减轻人类对自然的压力,才能实现可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] Wackernagel M, Rees W. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [2] Odum E P. Ecology: The link between the natural and social sciences [M]. New York: Holt Saunders, 1975.
- [3] 徐中民. 可持续发展定量研究的几种新方法评介[J]. 中国人口·资源与环境, 2000, 10(2): 60-64.
- [4] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型[J]. 生态经济, 2000, 16(10): 8-10.
- [5] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630-636.
- [6] 徐中民, 陈东景, 张志强, 等. 中国 1999 年的生态足迹分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 441-445.
- [7] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2257-2262.
- [8] 陈六君, 毛谭, 刘为, 等. 生态足迹的实证分析: 中国经济增长中的生态制约[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(5): 53-57.
- [9] 杨世琦, 孙兆敏, 冯永忠, 等. 陕西省 2001 年生态足迹分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 14-18.
- [10] 王景华, 赵善伦. 山东省 2003 年生态足迹计算与分析[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2006, 21(2): 96-98.
- [11] 薛国珍, 潘俊刚, 王尚义, 等. 太原市 2003 年生态足迹的计算与分析[J]. 地域研究与开发, 2006, 25(2): 115-119.
- [12] 王盈, 章锦河, 贾铁飞. 芜湖市 2003 年生态足迹计算与分析[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2006, 35(5): 106-110.
- [13] 赵先贵, 王书转, 马彩虹, 等. 西安市 2002 年生态足迹分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 33-37.
- [14] 张红霞, 苏勤, 章锦河, 等. 1990—1999 年安徽省生态足迹的动态测度与分析[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 39-44.
- [15] 吴介军, 蔡琳, 张秋花, 等. 1993—2004 年陕西省生态足迹分析与评价[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 104-108.
- [16] 唐金利, 匡耀求, 黄宁生, 等. 广东省东莞市 1998—2003 年生态足迹计算与分析[J]. 热带地理, 2006, 26(2): 102-109.
- [17] 卢远, 华瑾. 广西 1990—2002 年生态足迹动态分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(3): 49-53.
- [18] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 280-285.
- [19] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. Ecological footprints of Nations[C]//Toronto: International Council for Local Environmental initiatives, 1997: 10-21.

(上接第 124 页)

然而, 目前对于黄土蠕变特性的地区性差异和蠕变过程中土体内部微观结构的变化规律仍然缺乏相关的研究, 需要岩土工作者做出进一步的努力。

[参 考 文 献]

- [1] Munson D E, Dawson P R. Salt constitutive modeling using mechanism maps [C]// The Mechanical Behavior of Salt of the First Conference. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984: 717-737.
- [2] Cater N L, Russell J E. Modified mechanical equation of state for rock salt [C]// The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984: 409-430.
- [3] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土蠕变变形形态特征的微观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 1-6.
- [4] 蒋甫, 应荣华. 黄土粘弹性性质的室内外试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 269-273, 319.
- [5] 汪斌, 朱杰兵, 唐辉明, 等. 黄土坡滑坡滑带土的蠕变特性研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1): 49-52.
- [6] 严绍军, 项伟, 唐辉明, 等. 大岩淌滑坡滑带土蠕变性质研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 58-62, 68.
- [7] 孙学先, 张慧, 田明. 考虑多年冻土蠕变特性的抗拔桩非线性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3101-3106.
- [8] 黄小华, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 蠕变试验中黏弹组合模型参数确定方法的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1226-1231.
- [9] 于小军. 电阻率模型理论应用于海相软土蠕变研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1720-1727.
- [10] 骆亚生. 非饱和黄土在动静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.