

DOI:CNKI:61-1390/S.20120223.1726.030

网络出版时间:2012-02-23 17:26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120223.1726.030.html>

湿载条件下黄土结构性损伤演化特性研究

罗爱忠^{1,2}, 邵生俊¹, 许 萍¹

(1 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2 毕节学院 建筑工程学院, 贵州 毕节 551700)

【摘 要】 【目的】分析压缩和增湿条件下黄土结构性损伤的演化规律,为黄土地区的工程建设提供参考。**【方法】**对含水率为 2%, 5%, 10%, 18%, 21%, 25% 的原状土及重塑饱和土(含水率为 44%)进行侧限压缩试验,测定并分析不同含水率条件下黄土的孔隙比与压缩应力的关系。**【结果】**基于对试验结果的分析,当湿度较小时,原状黄土仍具有较高的结构强度,曲线比较平缓;反之,当压缩应力大于结构强度时,黄土的结构已经被破坏,压缩变形逐渐增大。基于应力分担的概念,建立了一个描述湿载条件下黄土结构性损伤演化特性的参数,并进一步分析了湿载条件下黄土结构性损伤的演化规律,表明随着湿载作用的增强,黄土结构性逐渐减弱,宏观上表现为抗力的减小。**【结论】**损伤演化规律能为黄土地区工程的设计和施工提供一定的参考,在工程设计和施工中,应充分考虑黄土结构的特殊性并提出相应的防护措施。

【关键词】 黄土;湿载;结构性损伤;演化规律

【中图分类号】 TU432

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)03-0200-06

Research on structural damage developments of loess under stress and moisture

LUO Ai-zhong^{1,2}, SHAO Sheng-jun¹, XU Ping¹

(1 Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 School of Architecture Engineering, Bijie University, Bijie, Guizhou 551700, China)

Abstract: 【Objective】 The research was conducted to analyze the structural damage developments of loess under stress and moisture and to make some references for constructing infrastructures in the loess region. **【Method】** The compression tests of intact loess and remold-saturated loess are conducted under different moistures 2%, 5%, 10%, 18%, 21% and 25% to study the relationship between compression stress and void ratio. **【Result】** Based on the results of compression tests of loess, when the moisture is low, there is high strength for intact loess and the curves between void ratio and logarithmic stress are steady, otherwise, when the compression stress is bigger than the structural strength, and the structural of loess is damaged, and the compression displacement is increased gradually. Based on the concept of stress distribution, a parameter of structural damage developments is proposed under stress and moisture. Further more the change law of structural damage developments is analyzed, and it shows that the structure of loess is weakened gradually with the action of stress and moisture, the resistance ability is reduced. **【Conclusion】** The structural damage ratio of loess structural proposed herein can provide some reference for the design and construction in loess region so that specific of loess is considered and the corresponding measures is prepared.

* [收稿日期] 2011-09-22

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50779054, 10872161)

[作者简介] 罗爱忠(1980—),男,贵州毕节人,讲师,在职博士,主要从事黄土力学及地基基础研究。E-mail: 55192473@126.com

[通信作者] 邵生俊(1964—),男,甘肃武威人,教授,博士生导师,主要从事黄土力学及环境岩土工程研究。

E-mail: sjshao@xaut.edu.cn

Key words: loess; stress and moisture; structural damage; damage development

结构性是工程建设中遇到的非饱和土体的共性。从广义上讲,土都具有结构性^[1];从微观上讲,土的结构是指土体颗粒的形状和排列方式及颗粒间的相互作用,它可以由结构单元特征、颗粒排列特征、孔隙性和结构联接4个方面的特征进行描述^[2]。天然原状黄土在沉积的过程中形成大孔隙骨架结构,颗粒间接触点处经过长期的物理化学作用逐渐形成了胶结。由土颗粒和集团颗粒组成的骨架和骨架间较多的孔隙构成原状黄土的特殊显微结构,从而使原状黄土一般都具有结构性和结构强度,即具有较高的抗压和抗剪能力^[3]。随着黄土地区工程建设规模的逐年扩大,建筑物传递的荷载与黄土因地下水位变化、降水入渗或生活生产用水排泄不当等原因引起的土体含水率变化相耦合,必然造成黄土强度降低、变形增大,影响建筑物的正常使用^[4-5]。黄土的固化联结键一旦被破坏,如浸水、加荷、扰动使得黄土的结构性发生损伤,就会发生承载力降低、湿陷和强度弱化等现象^[6]。在外在因素作用下,土体内土颗粒间的胶结键遭到破坏,随之土颗粒之间会产生相互滑动,土颗粒之间胶结键破坏的产生及其发展过程,反映了土体结构性损伤的变化过程^[7]。自从 Dougill 等^[8]将损伤理论引入岩土工程以来,其在岩土工程中得到了很大的发展。当前研究损伤演化规律的方法很多,大体上可以归纳为3类:一是根据对损伤的认识,直接给出可能的损伤演化方程表达式^[9-14];二是通过试验拟合,建立损伤演化方程的表达式^[14-18];三是从断裂力学出发,推导出材料的损伤演化方程^[18-19]。对于土结构破坏和塌陷的分析,应该用结构性损伤参数来描述^[20],但现有的结构性研究一般多侧重于结构性参数的修正及与其相应的考虑结构性的应力应变关系变换,而很少研究增湿加载过程中的结构破损及结构性损伤演化特性。为此,本研究从荷载应力分担的角度定义了一个新的参数“损伤比”,并研究了其随各种外在因素的变化特性,通过所研究的结构性损伤演化特性,能为黄土地区的工程设计和施工提供一定的参考,以便于在设计 and 施工中充分考虑黄土结构性的特殊性,并提出相应的防护措施。

1 黄土压缩试验

1.1 试验土体的基本物理力学性质

试验所采用的土样为陕西省西安市南郊 Q3 黄

土,取土深度 8.5~10.00 m。经室内试验测定,此原状黄土的天然密度为 1.53 g/cm³,天然含水率为 21%,干密度 1.273 g/cm³,液限 35.3%,塑限 16.9%,塑性指数 18.4。为了能够反映不同含水率条件下结构性黄土的结构损伤特性,通过水膜转移法对试样进行处理,使得试验含水率(w)分别控制为 2%,5%,10%,15%,18%,21%,25%及 44%(重塑饱和),以反映含水率变化对黄土结构性损伤的影响。

1.2 试验数据分析

图 1 为不同含水率条件下黄土的压缩试验结果。

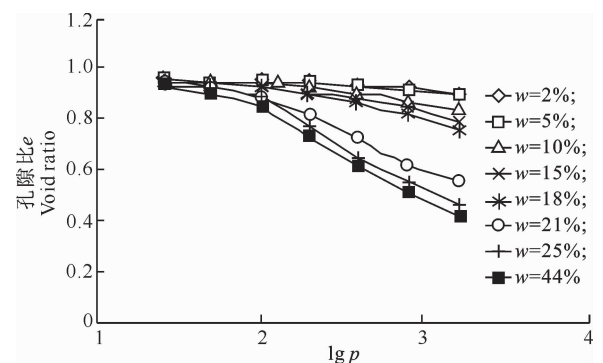


图 1 不同含水率条件下黄土孔隙比与压缩应力的关系

Fig. 1 Relationship between void ratio and compression stress under different water content

从图 1 可以看出,尽管所使用的西安 Q3 黄土质地松软,孔隙发育,但当湿度较小时,该原状黄土仍具有较高的结构强度, $e-\lg p$ (p 为压缩应力)曲线比较平缓。反之,当压缩应力大于结构强度时,黄土的结构已经破坏,压缩变形逐渐增大, $e-\lg p$ 曲线明显分为 3 段:第 1 阶段原生结构未发生明显损伤,压缩曲线呈现平缓状态;第 2 阶段原生结构损伤和次生结构生成交错进行,压缩曲线呈现明显的非线性;第 3 阶段原生结构损伤基本完成,在荷载作用下,土体内部结构调整主要是次生结构生成,压缩曲线呈线性变化。在压缩变形初期,土体结构保持完好状态下的变形,基本上是弹性变形;随着压缩应力或土体含水率的增大,结构大量破损,这时除了颗粒间的滑移以外,还伴随着结构的塌陷;在变形发展的后期,土体的性质已接近重塑饱和土,颗粒之间的滑移成为变形的主要原因,从力学角度看,损伤的演化表现了物质内部结构的不可逆变化过程。

比较不同含水率条件下试样的压缩曲线可知,随着含水率增大,在相同应力作用下,变形呈增大趋势,表明增湿溶解了颗粒之间的胶结和盐基,水的作用同样使得土体结构发生了损伤,同时水膜的楔入,使得土体颗粒间的固化联接键遭到破坏,这种破坏作用同样加速了黄土的结构损伤。从图 1 还可以看出,黄土的压缩曲线没有汇集于饱和重塑黄土的压缩曲线($\omega=44\%$),这一点同时也反映了黄土具有较强的结构性,使得结构完全破坏时所需要的应力很大,一般而言,这个应力已经超出了工程应力范围。

1.3 湿载条件下结构性黄土的结构变化分析

结构性与初始孔隙比、密度和粒度一样,是土体性状的一种重要表征。结构性的丧失一般表述为应变的发展或重塑引起的结构性状的消失。而湿陷性黄土一般属于欠压密结构性土,其当前屈服压力由先期固结压力和结构屈服压力所构成。在结构屈服破坏前,土体的压缩变形随着压力的增强而增长,但变形增长比较缓慢。当上部压力超过屈服压力时,变形增长加快。所以原状黄土的压缩曲线与正常固结土压缩曲线的变化给出了同一压力下结构破坏后孔隙比的可能变化量;也可以认为,2 种曲线的差异给出了同一孔隙比情况下,2 种土所能承担的荷载差异。根据上面的分析及土体损伤力学的复合体理论,可以假定一定结构损伤状态的土所能承担的应力由原状部分和完全损伤部分共同承担,用张量形式可表述为:

$$\sigma_{kl} = (1-\omega)(\sigma_i)_{kl} + \omega(\sigma_d)_{kl} \quad (1)$$

式中: σ_{kl} 为当前土所承受的应力张量, ω 为表征结构性变化特性的损伤比, $(\sigma_i)_{kl}$ 为原状结构性土所承受的应力张量, $(\sigma_d)_{kl}$ 为完全损伤土所承受的应力张量。

在一维压缩条件下,式(1)可以进一步用压缩应力表示为:

$$p = (1-\omega)p_i + \omega p_d \quad (2)$$

式中: p 、 p_i 、 p_d 分别为一维压缩条件下某一孔隙比对应的结构性损伤土、原状土和结构性完全损伤土所能承担的压力。

2 基于压缩条件的黄土结构性损伤演化规律分析

2.1 损伤比的定义

从不同含水率条件下黄土的压缩曲线可以看出,黄土颗粒间盐分所形成的胶结在增湿环境下软

化或遭到破坏后,产生了对水的敏感性反映,增湿使得黄土的结构性降低;同时,由于外部的扰动及荷载的影响,黄土的结构势充分释放出来,最后回归到正常固结土的特性。因此可以认为,在一定含水率的增湿条件下,未受到充分扰动的土体所表现出的就是结构性未损伤土体的性质,受到增湿及充分扰动的正常固结土所表现出的就是结构性完全损伤土的性质。在某一孔隙比条件下,结构性完全损伤土所承担的荷载为 p_d ,结构性黄土结构性部分所承担的荷载为 $p - p_d$,在初始孔隙比为 e_0 时,土的结构性部分所能承担的荷载为 p_s ,实际上 p_s 是结构性土的结构屈服压力。因此,可以定义结构性损伤参数为:

$$\omega = \frac{p_s - (p - p_d)}{p_s} \quad (3)$$

可进一步表示为:

$$\omega = 1 - \frac{(p - p_d)}{p_s} \quad (4)$$

如果考虑增湿对结构性的影响,结构屈服压力 p_s 可以表示为含水率的函数,即:

$$p_s = f(\omega) \quad (5)$$

式中: ω 为试验土样的初始含水率。

因此,为了反映增湿过程的影响,损伤参数进一步可以表示为:

$$\omega = 1 - \frac{(p - p_d)}{p_s^{\max}} \quad (6)$$

式中: $p_s^{\max}$ 为原状结构性土压缩曲线上的屈服压力。

2.2 屈服压力与含水率的关系

p_s 可采用 Casagrande^[21] 建议的经验作图法求得,对于本研究所试验的西安黄土, p_s 与含水率之间的关系如图 2 所示。

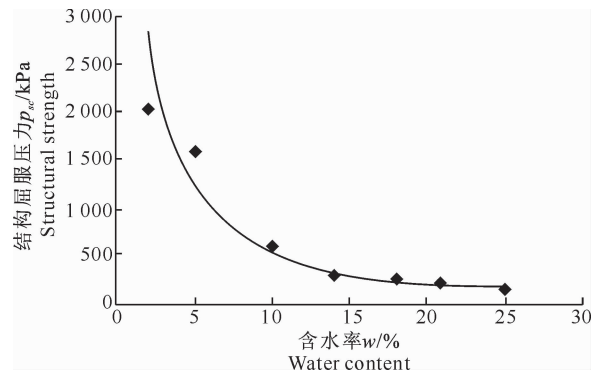


图 2 黄土结构性屈服压力与含水率的关系

Fig. 2 Relationship between structural yield stress of loess and water content

通过对图 2 的回归分析可知, p_s 与含水率之间

满足如下关系:

$$p_{\infty}=29.826\omega^{-1.476\ 1}.$$
(7)

在工程实践中,黄土的含水率一般大于10%但低于饱和含水率,所以可以假定含水率为2%时的原状黄土为结构性未损伤的原状黄土,黄土经过重塑饱和后,可以认为是无结构性的正常固结黄土。所以可以得 $p_{\infty}^{\max}=2\ 040\ \text{kPa}$ 。

2.3 湿载条件下黄土结构性损伤的演化特性

基于以上的思想,对试验数据进行整理,得到不同含水率条件下黄土结构性损伤参数与轴向应变的关系如图3所示。

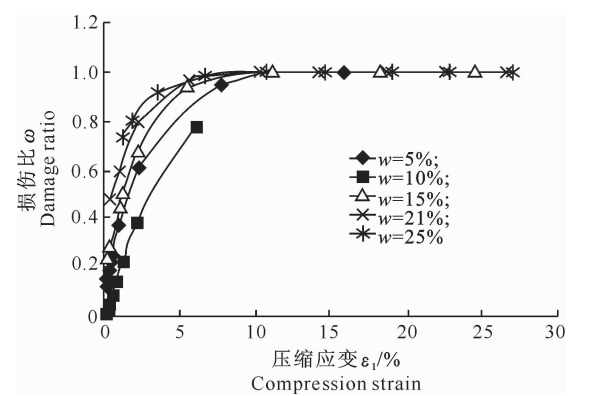


图3 不同含水率条件下黄土损伤比与压缩变形的关系

Fig.3 Relationship between damage ratio and compression strain under different water contents

从图3可以看出,在低含水率条件下,工程允许应力并未使黄土结构性完全损伤,结构性损伤参数并未达到1;随着含水率的增大,初始损伤逐渐加大,在工程允许应力范围内,黄土的结构性完全损伤,损伤参数接近于1。分析认为,在低含水率条件下,颗粒之间的盐分在颗粒之间构成胶结,在新的增湿环境下,这种胶结发生软化或遭到破坏,反映到宏观上就表现出变形特性逐渐接近于正常固结土的特性。

2.4 黄土结构性损伤演化的定量描述

分析图3所给出的不同含水率条件下损伤比与压缩变形的关系曲线,可以看出该曲线可用如下的数学表达式进行描述,即:

$$\begin{cases} \omega=-A\exp(-B\epsilon_1)+C, \epsilon_1\leqslant 20\%; \\ \omega=1, \epsilon_1>20\%. \end{cases}$$
(8)

式中:A、B、C为与试样的初始含水率有关的材料参数, ϵ_1 为压缩试验的竖向应变。通过对本试验数据的回归分析,A、B、C与含水率的关系可以用如下数学表达式表示:

$$A=0.215\ 9\omega^{-0.439\ 7};$$
(9)

$$B=0.196\ 4\omega^{0.570\ 2};$$
(10)

$$C=1.0.$$
(11)

将式(9)–(11)代入式(8),就可以计算出不同含水率条件下损伤比随压缩变形的关系,进而在加载过程中就可以判断某一变形条件下结构性损伤量的大小。

3 结构性黄土压缩特性的初步验证

从式(2)可以看出,在一定的变形条件下,如果能得到一定土性条件下完全损伤土的压缩曲线关系,及原状结构未损伤土的压缩曲线模式,在一定变形条件下,就可以得到损伤过程中损伤土所能承担的最大荷载。由于篇幅关系,本研究仅对本试验的压缩曲线进行初步验证。

3.1 p_i 及 p_d 的确定

p_i 代表一定应变条件下原状结构未损伤土所能承担的应力,由于假定了原状结构未损伤土是完全弹性状态,也即是将结构性未损伤的土体看作线弹性体,因此 p_i 可以用如下的关系表示:

$$p_i=K_i\epsilon_1.$$
(12)

式中: K_i 为原状土的弹性体积模量,可以由等向压缩试验求得; ϵ_1 为压缩应变。

p_d 为完全损伤土所能承担的应力,根据充分扰动饱和土的压缩曲线,可知其满足如下的关系:

$$p_d=p_0\exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda}\epsilon_1\right).$$
(13)

式中: p_0 为当前土的上覆压力, e_0 为土的初始孔隙比, λ 为充分扰动饱和土 $e-\lg p$ 曲线的斜率。

3.2 压缩曲线的验证

为了验证本研究所提出的黄土结构性损伤演化规律的合理性,依据式(2),对本试验所得的压缩曲线数据进行了初步验证。将一维压缩损伤复合体模型参数列于表1。

表1 一维压缩损伤复合体模型参数的取值
Table 1 Calculating parameter of damage complex model based odometer test

p_0/kPa	e_0	λ	K_i
100	0.956	0.434	1 080

图4为含水率为2%,10%,18%,21%,25%条件下黄土侧限压缩试验结果与计算结果的比较。从图4可以看出,在低含水率条件下,本研究的方法能很好地模拟结构性黄土的压缩曲线变化特性;但当含水率较高时,本研究方法的模拟结果与试验结果相比有一定偏差。总体而言,应用本研究所提出的

损伤演化规律描述结构性黄土压缩特性的变化是可行的。

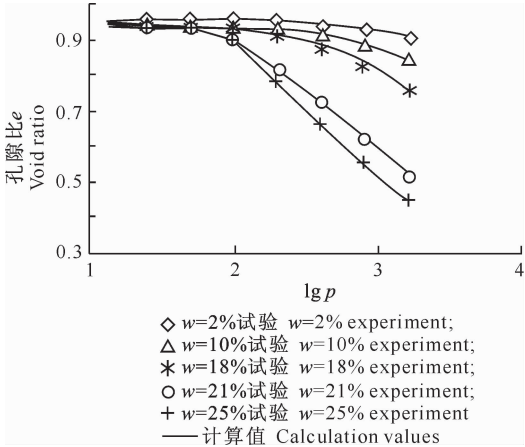


图 4 不同含水率条件下黄土侧限压缩试验结果与计算模拟结果的对比

Fig. 4 Contrast between compression tests data and calculating results under water content

4 结 论

- 1) 湿陷性黄土存在的欠压密、大孔隙、粒间盐分胶结的特殊结构,使得其在浸水增湿条件下容易发生原生结构软化,使结构强度降低,在一维压缩过程中土体结构损伤剧烈。
- 2) 本研究提出的结构性损伤比参数,能够反映黄土压缩应力增大与浸水增湿作用引起的结构破损变化,根据损伤比建立的应力应变关系能够反映加载及浸水的耦合作用。
- 3) 本研究建立的黄土损伤演化规律,能很好地描述湿载过程中黄土结构性的损伤演化特性,反映地基增湿过程中黄土土体结构性的变化过程。

[参考文献]

[1] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等. 粘土结构性对其力学特性的影响及其成因分析 [J]. 水利学报,2000(10):43-47.
Gong X N,Xiong C X,Xiang K X,et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(10): 43-47. (in Chinese)

[2] 胡瑞林. 粘性土微结构定量模型及其他工程地质特征研究 [M]. 北京:北京地质出版社,1995.
Hu R L. Research on quantitative microstructure models of natural clayed soils and its engineering geology characteristics [M]. Beijing: Beijing Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)

[3] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论 [J]. 岩土工程学报,1990,12(4):1-10.

Gao G R, A structure theory for collapsing deformation of loess soils [J]. Chinese J Geot Eng,1990,12(4):1-10. (in Chinese)

[4] 刘祖典. 影响黄土湿陷系数因素的分析 [J]. 工程勘察,1994(5):6-11.
Liu Z D. Analysis on the coefficients of collapsibility of loess [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1994(5): 6-11. (in Chinese)

[5] 张苏民,郑建国. 湿陷性黄土(Q3)的增湿变形特性 [J]. 岩土工程学报,1990,12(4):21-31.
Zhang S M,Zheng J G. The deformation characteristics of collapsible loess during moistening process [J]. Chinese J Geot Eng,1990,12(4):21-31. (in Chinese)

[6] 谢定义. 试论我国黄土力学研究的若干新进展 [J]. 岩土工程学报,2001,23(1):1-13.
Xie D Y. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. Chinese J Geot Eng,2001,23(1):1-13. (in Chinese)

[7] 邵生俊,李彦兴,周飞飞. 湿陷性黄土结构损伤演化特性 [J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4161-4165.
Shao S J, Li Y X, Zhou F F. Structural damage evolvement properties of collapsible loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4161-4165. (in Chinese)

[8] Dougill J W, Lau J C, Burtn J. Toward a theoretical model for progressive failure and softening in rock, concrete and similar materials [C]//Mechanical in Engineering. Virginnia: American Society of Civil Engineers CASCE Press,1976:335-355.

[9] 沈珠江. 结构性粘土的非线性损伤力学模型 [J]. 水利水运科学,1993(3):247-255.
Shen Z J. A nonlinear damage model for structured clay [J]. Hydro-Science and Engineering, 1993(3): 247-255. (in Chinese)

[10] 沈珠江. 结构性粘土的堆砌体模型 [J]. 岩土力学,2000,21(1):1-4.
Shen Z J. A masonry model for structured clays [J]. Rock and Soil Mechanics,2000,21(1):1-4. (in Chinese)

[11] Lemaitre J, Dufailly J. Damage measurements [J]. Engineering Fracture Mechanics,1987,28(5/6): 643-661.

[12] 任建喜,葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(4):425-431.
Ren J X, Ge X R. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(4):425-431. (in Chinese)

[13] 陈正汉,卢再华. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用 [J]. 岩土工程学报,2001,23(4):387-392.
Chen Z H, Lu Z H. The matching of computerized tomography with triaxial test apparatus for unsaturated soils [J]. Chinese J Geot Eng,2001,23(4):387-392. (in Chinese)

[14] 邵生俊,罗爱忠,于清高,等. 加荷增湿作用下 Q3 粘黄土的结构损伤特性 [J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2077-2082.
Shao S J, Luo A Z, Yu Q G, et al. Structural damage proper-

ties of Q3 loess under tri-axial loading and moistening [J]. Chinese J Geot Eng, 2006, 28(12): 2077-2082. (in Chinese)

[15] 林 斌,赵法锁. 黄土的损伤及其演化规律研究 [J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2006, 26(3): 17-21.
Lin B, Zhao F S. Study on damage of loess and its evolution [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 26(3): 17-21. (in Chinese)

[16] 胡再强,沈珠江,谢定义. 结构性黄土的本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 17-21.
Hu Z Q, Shen Z J, Xie D Y. Constitutive model of structural loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 17-21. (in Chinese)

[17] 雷胜友,唐文栋,王晓谋,等. 原状黄土损伤破坏过程的 CT 扫描分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(1): 51-56.
Lei S Y, Tang W D, Wang X M, et al. Undisturbed loess analyzed with CT scanning in the process of undrained triaxial compression test [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(1): 51-56. (in Chinese)

[18] Krajcinovic D, Fanella D. A micro rnechanical damage model for concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25 (5/6): 585-596.

[19] 曹文贵,方祖烈. 岩石损伤软化统计本构模型之研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628-633.
Cao W G, Fang Z L. A study of statistical constitutive model for soft and damage rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 628-633. (in Chinese)

[20] 谢定义,姚仰平,党发宁. 高等土力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
Xie D Y, Yao Y P, Dang F N. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)

[21] Casagrande A. The structure of clay and its importance in foundation engineering [J]. Boston Soc Civil Eng, 1932, 19 (3): 11-18.

[42] 郁俊谊,刘占德,赵菊琴. 陕西猕猴桃主产区眉县果园土壤养分分析 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011, 39 (4): 117-120.
Yu J Y, Liu Z D, Zhao J Q. Investigation of orchard nutrients in the major kiwi production region of Meixian of Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 117-120. (in Chinese)

[43] Sims J T, Goggin N, McDermott J. Nutrient management for water quality protection: Integrating research into environmental policy [J]. Water Science and Technology, 1999, 39 (12): 291-298.

[44] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment [J]. Environ Qual, 1995, 24: 904-910.

[45] Cooke L G. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment [J]. Water Science and Technology, 1994, 29 (5): 209-227.

[46] 刘 瑞,戴相林,周建斌,等. 不同氮肥用量下冬小麦土壤剖面累积硝态氮及其与氮素表关盈亏的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1340-1346.
Liu R, Dai X L, Zhou J B, et al. Relationship between accumulated NO₃-N in soil profiles and apparent nitrogen budget in winter wheat fields under nitrogen fertilization [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1340-1346. (in Chinese)

(上接第 199 页)