

马兰黄土软化型本构模型研究

栾长青¹, 唐益群¹, 林斌²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092 2. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽淮南 232001)

摘要:通过对不同含水量的马兰黄土的单轴压缩试验、固结不排水剪切试验、固结排水试验,在深入了解马兰黄土本身独特的物理力学性质的基础上,分析了马兰黄土的应力—应变曲线特性及物理意义,提出了马兰黄土的软化本构模型。该模型准确的描述了轴向应变不高于5%~6%的马兰黄土应力—应变关系,揭示了马兰黄土在低应变的条件下的受力机理,也为进一步研究马兰黄土的其他各种力学机理提供了理论基础。同时对所得本构模型的各参数的变化规律进行了分析,分析结果表明参数 a 和 b 都是含水量和围压的函数,并且两者都呈一定的变化规律。

关键词:马兰黄土;物理力学性质;软化;本构模型

关键词:三峡工程;街道;建设;发展

中图分类号:TU-856

文献标志码:A

文章编号:1006-7329(2008)02-0053-04

Study on Softening Constitutive Model of Malan Loess

LUAN Chang-qing¹, TANG Yi-qun¹, LIN Bin²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In this paper, based on the uniaxial compression tests, consolidated undrained shear tests, consolidation drainage shear tests of Malan loess with different water contents, and based on understanding deeply of peculiar physico-mechanical property of Malan loess, the properties and physical meanings of stress-strain curves of Malan loess were analyzed, and softening constitutive model of Malan loess was proposed. The model can be used to describe accurately stress-strain of Malan loess which axial strain was lower than 5%~6%, and disclosed mechanical behavior of Malan loess under lower strain, and it also provided theoretical basis for further study on other mechanical properties of Malan loess. At the same time, variations of parameters from softening constitutive were analyzed. It was shown that parameters a and b were all functions of water contents (w) and confining pressures (σ_3), which had some certain change patterns.

Key words: Malan loess; physico-mechanical property; softening; constitutive model

黄土是一种第四系沉积物,具有不同于同期其它沉积物的内部成分和外部形态特征,一般都具有以下特征^[1]:(1)颜色以黄色、褐黄色为主,有时呈灰黄色;(2)颗粒成分以粉粒为主,一般含量在60%以上,粒径大于0.25 mm的极少;(3)有肉眼可见的大孔隙、较大孔隙,一般在1.0 mm左右;(4)富含碳酸盐类,垂直节理发育。晚更新世马兰黄土(Q₃)按《湿陷性黄土规范(TJ25-78)》分类,属于新黄土^[3],是典型的黄土,构成黄土层的上部,质地酥松,无层理,大孔隙、结构发育,有垂直节理裂隙^[1]。

1 Q₃ 黄土结构强度

黄土的结构强度是指粗粉粒接点处由胶结物质胶结而成的联结强度,其大小可以用其天然结构破坏时原状黄土与相应的重塑黄土的应力差来表示^{[4][5]}。岩土材料的抗剪强度是由凝聚力和内摩擦力两部分组成的,它们不是同时发挥作用的^{[6][7]},研究表明黄土的凝聚力在轴向变形不大于1%时就能达峰值,而摩擦力在较大的应变时才能达到最大值^[1],因此黄土的变形破坏过程实质上是颗粒间胶结力逐步丧失摩擦力逐渐

* 收稿日期:2007-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目资助(40372124)

作者简介:栾长青(1977-),男,江苏扬州人,博士研究生,主要从事土木工程研究,(E-mail)kaobo2005@163.com。

发挥作用的过程,由于黄土颗粒间由胶结物形成的胶结力在很小应变时就已经破坏了,此时黄土颗粒间的摩擦力尚未发挥出来,这在变形曲线上必存在一个应力转折点,该点之后的黄土应力将随着应变增加而迅速减小,所以利用原状黄土压缩曲线的转折点来定义黄土的结构强度是可行的^[8],且试验操作简单。采用 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪,分别研究了单轴条件和常规三轴条件下的黄土结构强度及其变化规律。

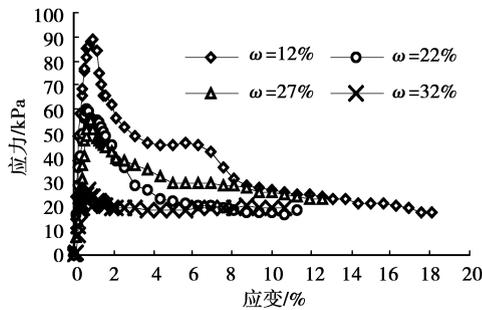


图1 Q₃ 黄土单轴压缩曲线

含水量对 Q₃ 黄土的强度有很大影响^[1],非饱和黄土压缩曲线的转折点随着含水量的增加而不断降低(图3),说明黄土的结构强度是与含水量密切相关的,进一步的分析结果显示,黄土的结构强度随着含水量的增加而呈线性减少

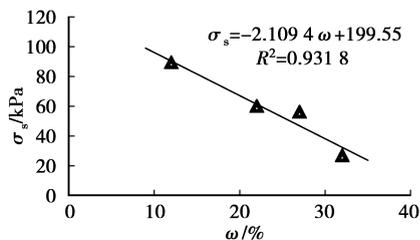


图2 Q₃ 黄土的结构强度与含水量的关系

将含水量不同的 Q₃ 黄土在不同的围压下的 CU 剪切试验结果绘制 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 曲线图(图3)可以得出常规三轴条件下,无论固结压力 σ_3 如何变化,黄土的结构强度仍然存在,它是原生结构强度的丧失与软化和因压密作用而产生的新的结构强度^[9]二者共同作用的结果。三轴条件下的极限应变 ε_1 大于单轴条件下的极限应变。同时,从曲线图很明显看出,当轴向应变超过黄土结构存在所允许的极限应变后,黄土的应力应变关系完全符合邓肯一张双曲线模型该双曲线在 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 坐标系中呈线性关系,在图2中可以明显看出这种曲线峰值后的线性关系。此时黄土的结构性已不复存在,其力学性质等同于相同条件下的重塑黄土,表现为应变硬化的特点。

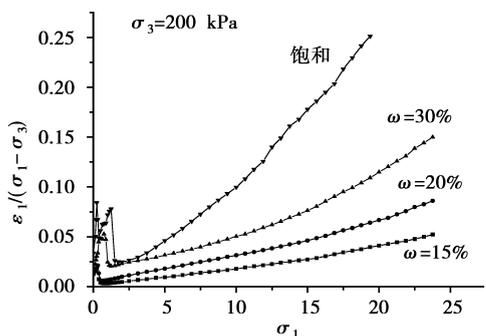
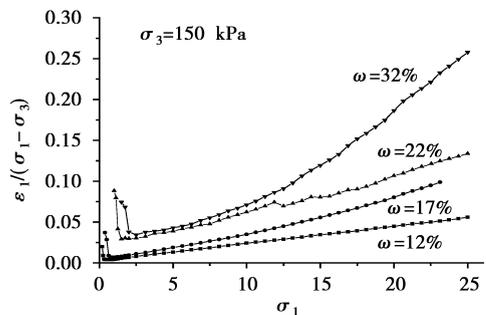
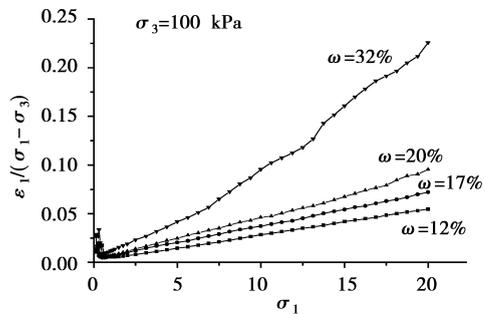
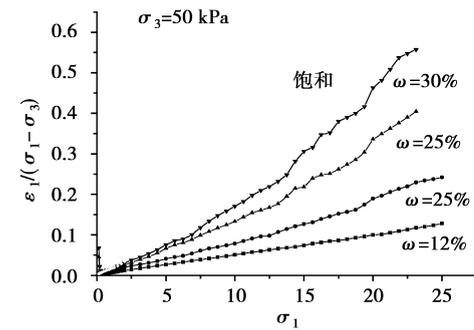


图3 不同围压下的 CU 试验曲线

2 Q₃ 黄土三轴剪切实验

以西安市南郊 Q₃ 黄土为试样,试验设备为常规的三轴剪切仪,采用固结排水剪(CD)。围压取 0~200 kPa,用来反映围压对结构的影响。原状土样的含水量分别为 12.0%,20.0%,30.0%和饱和状态,从而反映含水量对黄土结构性以及参数的影响(图4)。

由三轴剪切实验结果可以明显看到,虽然黄土的质地疏松、大空隙发育、结构性鲜明,但是其破坏形式受围压的影响还是非常显著的。总体来说,线性变形极限强度随着球应力 σ_3 的增加而增大,峰值强度之

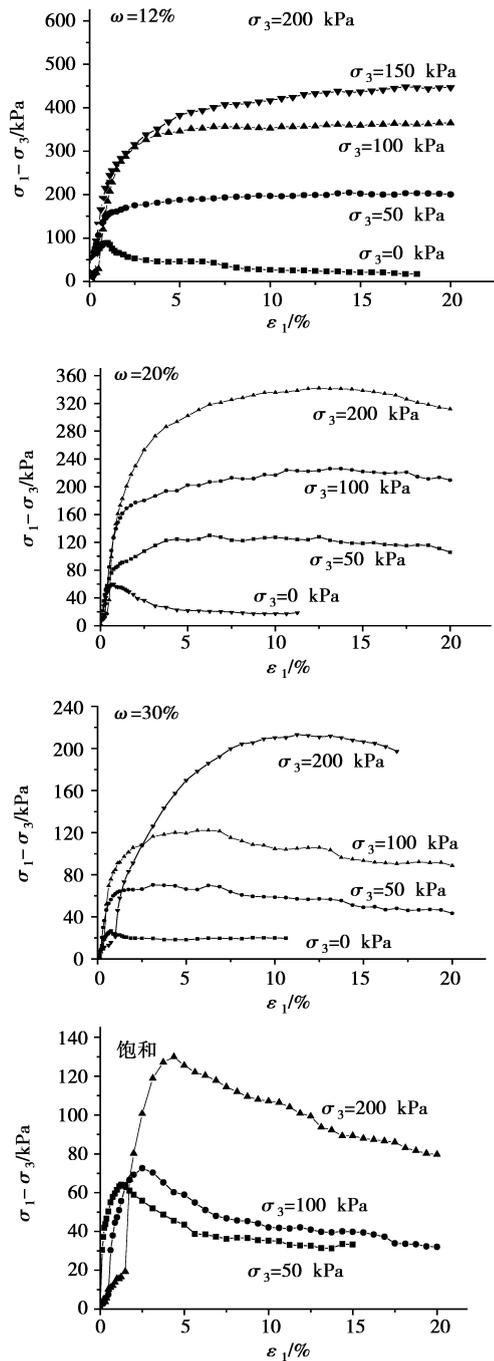


图 4 原状土样应力—应变曲线

前,黄土的应力应变关系表现为应变硬化的特点,在球应力 $\sigma_3=0$ 的应力状态下,黄土的压缩软化性特性表现较为明显;球应力越大,黄土的应变软化现象越明显。

3 软化型本构方程的建立

3.1 实验数据的整理

对于软化型黄土应力应变曲线的数学描述,采用函数^[1]进行描述,即;

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1 (a + c\epsilon_1)}{(a + b\epsilon_1)^2} \quad (1)$$

a, b, c 均为试验常数,其中:

$$b = \frac{1 - \sqrt{1 - q_r/q_p}}{2q_r}, c = b - \frac{1}{4q_p}, a = (b - 2c)(\epsilon_1)_P$$

式中: q_r —残余强度, q_p —峰值强度, $(\epsilon_1)_P$ —与峰值强度相应的轴向应变。根据黄土轴向应变为 5%~6% 的试验结果拟合而成的(图 5)。

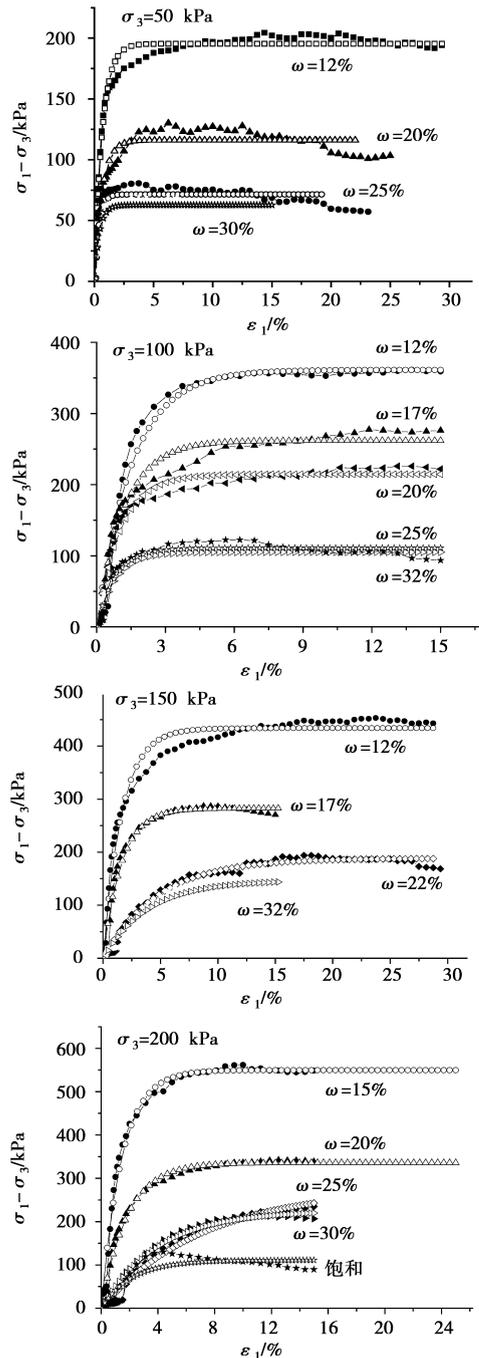


图 5 试验数据的拟合曲线

结果表明,当 $\epsilon_1 \leq 15\%$ 时,该函数所描述的曲线与试验结果比较吻合,而当 $\epsilon_1 > 15\%$ 后,由于软化效应导致黄土强度的降低,使得试验值和计算值的偏差随应变增加而加大。

但是确定残余强度 q_r 比较困难,这给应用和推广

该公式带来诸多的不便。分析表明,利用(2)式的指数函数对轴向应变小于 15% 的试验结果进行拟合,效果较好。因此,(2)式可以用来描述非饱和 Q₃ 黄土 CU 剪切的应力应变关系。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = a[1 - \exp(-b\varepsilon_1)] \quad (2)$$

对于函数式(2)中参数的具体确定方法是:由试验得到黄土三轴强度的极限值 $a = (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$, 令 $R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$, 由(2)式可以得到:

$$\ln(1 - R) + b\varepsilon_1 = 0 \quad (3)$$

将应力应变曲线峰值前的试验值 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 点绘在 $\ln(1 - R) \sim \varepsilon_1$ 坐标系中,则可得到一条斜率为 E 且过坐标原点的直线,则: $-b = E$ 。将求得的 a, b 值代入(2)式就可确定 Q₃ 黄土 CU 试验的本构方程。

3.2 模型参数变化规律探讨

由前面对试验结果的分析可以知道,应变软化型黄土本构关系中的两个参数 a 和 b 是和球应力及黄土的湿度状态密切相关的,笔者通过对有限的常规三轴试验结果分析后,发现参数 a, b 的变化是有一定规律可寻的(图 5)。

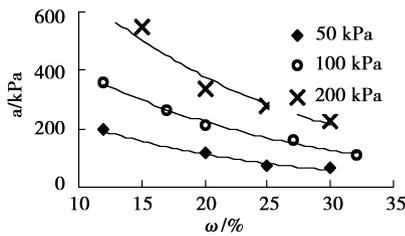


图 6 参数 a 变化曲线

通过对图 6 中不同球应力下的黄土试验结果分析可知,反映黄土极限强度大小的参数 a ,随着含水量的增加而降低,随着球应力的增加而增加。曲线拟合结果表明,参数 a 随含水量呈指数形式变化(表 1)。

表 1 参数 a 的拟合方程

σ_3/kPa	拟合方程	R^2
50	$a = 425.2 \exp(-0.0664\omega)$	0.97
100	$a = 695.71 \exp(-0.0566\omega)$	0.99
150	$a = 727.49 \exp(-0.0532\omega)$	0.91
200	$a = 1193.9 \exp(-0.0575\omega)$	0.94

结合图 6 中不同球应力条件下曲线形状相似的特点,对表 1 中的数据作进一步分析可以得出,参数 a 随球应力和含水量的变化规律可以表示为:

$$a = m(\sigma_3) \exp(-k\omega) \quad (4)$$

式中 $m(\sigma_3)$ 为球应力 σ_3 的函数, k 近似为一与球应力无关的试验常数。

通过对不同球应力下 $m(\sigma_3)$ 的分布特征研究后,发现 $m(\sigma_3)$ 也可以用指数函数来描述(图 7),

即:

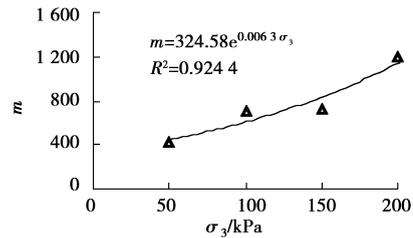


图 7 $m(\sigma_3)$ 与 σ_3 变化曲线

$$m(\sigma_3) = 324.58 \exp(0.0063\sigma_3) \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式有:

$$a = 324.58 \exp(0.0063\sigma_3 - k\omega) \quad (6)$$

$$k \approx 0.058$$

采用类似的研究方法,得到参数 b 随含水量的变化规律,可以用如下的指数函数描述,方程为:

$$b = j(\sigma_3) \exp[-n(\sigma_3)\omega] \quad (7)$$

(7)式反映出,参数 b 同时受到球应力和含水量的影响,而且这两个影响因素之间存在着交叉影响效应。

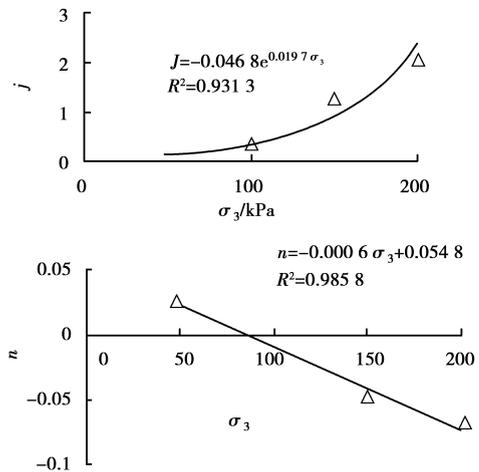


图 8 $j(\sigma_3)$ 及 $n(\sigma_3)$ 变化曲线

对有限的试验结果分析表明(图 8), $j(\sigma_3)$ 和 $n(\sigma_3)$ 分别为指数函数和线性函数,规律如下:

$$j(\sigma_3) = 0.0468 \exp(0.0197\sigma_3)$$

$$\approx 0.047 \exp(0.02\sigma_3) \quad (8)$$

$$n(\sigma_3) \approx 0.055 - 0.0006\sigma_3 \quad (9)$$

由(7)、(8)、(9)式可得到,同时考虑球应力和含水量影响的参数 b 的变化方程为:

$$b = 0.047 \exp[0.02\sigma_3 + (0.0006\sigma_3 - 0.055)\omega] \quad (10)$$

4 结 语

Q₃ 黄土的软化本构模型的提出很好了吻合了轴向应变为 5%~6% 的应力-应变关系。通过对本构模型中参数 a 和 b 分析,认识到两者都是含水量 ω 和围压 σ_3 的函数,并且两者都呈一定的变化规律。参数 a 随围压增大而增大,随含水量增大而减少。

(下转 60 页)

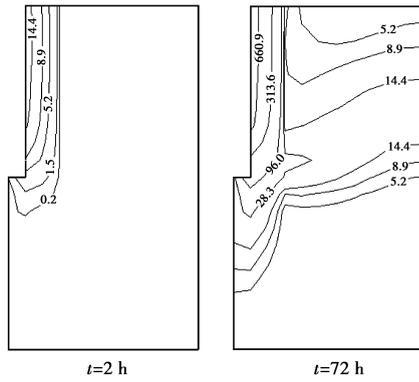


图6 不同时刻的等效塑性应变分布($\times 10^{-3}$)

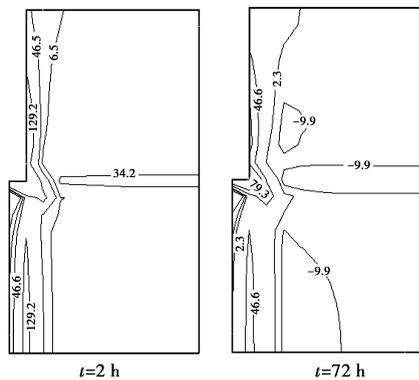


图7 不同时刻的空隙压力分布($\times 10^3$ Pa)

4 结 论

本文在基于混合物理论的多孔介质模型的理论框架内,将饱和软土视为弹粘塑性体,液体考虑为无黏性的理想流体。给出弹粘塑性饱和软土动力响应的控制场方程,然后通过 Galerkin 加权残值法推导得到了罚有限元

系统方程,并给出了系统方程的迭代求解方法,并讨论相关参数的确定。最后根据编制的弹粘塑性饱和软土动力问题有限元程序计算桩基对饱和软土作用的动力响应,指出了饱和软土动力响应的一些特点及机理。

参考文献:

- [1] Biot M A. The Theory of Propagation of Elastic in a Fluid-Saturated Porous Solid [J]. I. Acoust. Soc. Am. 1956, 28: 168-191.
- [2] Bowen R M. Incompressible Porous Media by Use of the Theory of Mixtures [J]. Int J Engng Sci, 1980, 18: 19-45.
- [3] Bowen R M. Compressible Porous Media by Use of the Theory of Mixtures [J]. Int J Engng Sci, 1982, 20: 19-45.
- [4] Duvaut G, Lions J L. Les Inequations en Mecanique et en Physique, Dunod[M], Paris, France. 1972. (In French)
- [5] 杨绪灿,杨桂通,徐秉业. 粘塑性力学概论[M]. 北京:中国铁道出版社. 1985.
- [6] Owen D R J, Hinton E. Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice [M]. Swansea, UK: Pineridge Press Limited, 1980.
- [7] 张延军,张延诘. 海积软土弹粘塑性 Biot 固结的数值分析 [J]. 吉林大学学报, 2003, 33(1): 71-75.
ZHANG Yan-jun, ZHANG Yan-jie. The numerical analysis of elastic visco-plastic Biot consolidation to marine soft soil [J]. Journal of Jilin University, 2003, 33(1): 71-75.
- [8] 刘保国,乔春生. 岩体粘塑性模型参数的反分析[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 118-122.
LIU Bao-guo, QIAO Chun-sheng. Back analysis of viscoplastic model parameters of rock mass [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 118-122.

(编辑 胡 玲)

(上接第 56 页)

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1996.
- [2] 陕西省公路勘察设计院. 铜川-黄陵一级公路水毁修复路段工程地质勘察报告[R]. 2003.
- [3] 孙建中,赵景波. 黄土高原第四系[M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [4] 党进谦. 非饱和黄土的结构强度及其应用[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(5): 48-51.
DANG Jin-qian. Unsaturated loess structural strength and its application [J]. Northwest Agricultural University Journal, 1998, 26(5): 48-51.
- [5] 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): 79-90.
DANG Jin-qian, LI Jing. Non-saturated loess intensity and the structure of shear strength [J]. Water Journal, 2001 (7): 79-90.
- [6] 沈珠江. 岩土破损力学:理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程

学报, 2003, 25(3): 253-257.

SHEN Zhen-jiang. Geotechnical mechanical damage: brittle ideal elasto-plastic model [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 253-257.

- [7] 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 486-492.

QIN Si-qing. Model slope instability and chaos mutation mechanism [J]. Rock Mechanics and Engineering Journal, 2000, 19(4): 486-492.

- [8] 胡再强,沈珠江. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775-779

HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang. Non-structural studies of saturated loess [J]. Rock Mechanics and Engineering Journal, 2000, 19(6): 775-779.

- [9] 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 Bin, ZHAO Fa-suo. Loess and the Evolution of injury [J]. Journal of Anhui University of Science and technology (Natural Science), 2006, 26(3): 17-21.

(编辑 王秀玲)