

文章编号: 1000-7598 (2013) 10-2796-05

黄土初始结构性及其湿载作用下演化规律

余芳涛^{1,2}, 邵生俊^{1,2}, 范文¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 西安 710048)

摘 要: 黄土的结构性是除粒度、密度、湿度之外更为重要的指标。通过总结分析综合结构势理论框架内已提出的结构性参数及其演化规律, 并将结构性参数分为过程结构性参数和初始结构性参数两类, 这种分类说明了合理的结构性参数既要反映土的基本物理属性还要反映其在外扰动作用下的演化过程。针对目前结构性参数及其演化规律存在的问题, 采用能够反映初始结构性的构度指标与反映过程结构性的应力比结构性参数, 提出了球应力与剪应力对结构性参数综合影响的综合应变, 并分析综合应变与结构性参数之间的关系, 建立了一个能反映结构性从初始到湿载作用下衰减演化的数学模型。通过理论分析和常规三轴试验研究表明, 该数学模型避免了试验围压对初始结构性的影响, 并且考虑了湿载过程中体应变与剪应变的共同影响, 更加准确地反映黄土的结构损伤演化规律。

关 键 词: 黄土; 构度指标; 应力比结构性参数; 初始结构性; 演化规律

中图分类号: TU 475+3

文献标识码: A

Initial structure of loess and its evolution under condition of stress and moisture

SHE Fang-tao^{1,2}, SHAO Sheng-jun^{1,2}, FAN Wen¹

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

2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Loess structure is more important mechanical properties of loess besides its particle size, density and humidity. Based on the theory of comprehensive structure potential, we made a synthesis of the existing structural parameters and their evolution, and structural parameter can be of two types: initial structural parameter and the process of structural parameter. Structural parameter tends to satisfy both the basic physical property of soil and its evolution under the condition of stress and moisture. Based on existing problem of structural parameters and their evolution, structure index is used to describe initial structure, and stress ratio structure parameter is used to describe the process of structure. The relationship between stress ratio structural parameter and comprehensive strain is studied. Finally, a mathematical model that can reflect the attenuation evolution of soil structure under the condition of initial stress and moisture is established. Theoretical analysis and triaxial test show that the model can avoid the influence of confining pressure under the condition of triaxial tests on initial structure, and it can consider the influence of body strain and shear strain under the process of stress and moisture. The model can more accurately reflect the damage evolution of loess.

Key words: loess; structure index; stress ratio structural parameter; initial structure; evolution

1 引 言

黄土与一般土相比其特殊性根本在于其结构性。黄土的结构性是除粒度、密度、湿度之外更为重要的指标^[1]。近年来, 在黄土力学性质及其本构模型的研究中, 对结构性的力学效应引起了人们的高度重视。在土结构性量化认识方面, 土的综合

结构势从扰动、浸水、加荷释放结构势出发, 比较原状土、重塑土和饱和土的抗力、变形力学效应, 提出了一种建立具有合理性、普适性、灵敏性和稳定性的土结构性量化参数的研究途径。通过这种途径得到的结构性参数能使一簇簇的应力-应变关系得到很好的归一化^[2]。

黄土结构性参数研究已经走了一段历程, 最初

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41272320)。

第一作者简介: 余芳涛, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事黄土力学与工程的研究工作。E-mail: shefangtao@xaut.edu.cn

的应变结构性参数 m_ϵ [2] 和孔隙比结构性参数 m_e [3], 再到应力结构性参数 m_σ [4] 和应力比结构性参数 m_η [5], 无侧限抗压强度构度指标 m_u [6], 以及压剪强度结构性参数 m_f [7]。已有的结构性参数有其各自的优点与缺点, 目前结构性参数主要问题集中于能否统一合理地反映初始结构性参数、结构损伤演化过程以及反映强度演化方式。本文基于此, 在评述已有结构性参数及其演化规律的基础上, 建立一个能反映从初始结构性到湿载作用下衰减演化的数学模型, 并通过常规三轴压缩试验与无侧限压缩试验验证与分析。

2 当前结构性参数及其演化规律评价

综合结构势诞生的初期, 结构性参数蜂拥出现。经过众多学者的研究与总结 [8-9], 可以将已有的结构性参数分为两类: 一类为过程结构性参数; 包括应变结构性参数、孔隙比结构性参数, 应力结构性参数, 应力比结构性参数。应变结构性参数以压缩试验为基础, 能够较好地反映压应力状态下结构性演化规律, 但不能反映工程上的剪切结构损伤演化以及强度破坏。孔隙比结构性参数与应变结构性参数理论基础一致, 仅是反映形式不同。应力结构性参数是基于常规三轴试验, 考虑了剪切应力对土结构性的破坏, 但并没有反映球应力对土结构性的影响。此后, 应力比结构性参数针对这一点, 对应力结构性参数进行了进一步补充。最重要的是应力比结构性参数在剪切作用下演化规律上产生变化, 不再是先前的结构性随剪切变形的发展先增大后减小, 而是单调减小。这与人们对土结构性的定性认识相一致, 剪应力和球应力都会引起土微结构联效应和稳定性的减弱。相对于上述几种结构性参数, 应力比结构性参数具有较强的优越性。压剪强度结构性参数是由原状土、重塑土和饱和重塑土的最大剪应力构成, 研究不同围压条件下结构性随破坏时剪应变的发展规律, 而破坏剪应变反映了土的破坏方式, 实际上反映了土的结构性对抗剪强度的影响。另一类为初始结构性参数, 即为无侧限抗压强度构度指标。它反映了土固有的结构性状, 不随应力路径变化而变化。

应力比结构性参数对应力结构性参数与应变结构性参数优势较为明显, 但其结构损伤演化规律有两点不足之处, 其一, 当土含水率较大时, 体应变对结构性影响较大, 然而以前的结构性衰减演化均采用随剪应变变化规律, 不考虑体应变的影响。其二, 由于采用不同围压下常规三轴剪切试验, 不

同固结围压作用下剪切时初始结构性参数值随围岩增大或减小, 在实际工程中围压模拟地层不同深度的水平应力, 固结围压是结构性形成时的压力, 它对初始结构性的影响在实际中是不合理的。构度指标采用是无侧限抗压试验, 所以不随固结围压的影响, 但其不能反映复杂应力条件下结构性演化过程。

综上所述, 结构性参数发展至今, 可以分为过程结构性参数和初始结构性参数两大类, 过程结构性参数具有优越性是应力比结构性参数和压剪强度参数, 初始结构性参数即为无侧限抗压强度构度指标。下面将会依据上述已有的结构性参数及其演化规律的不足, 提出一种新的思路, 能很好地反映从初始结构性到湿载作用下衰减演化的全过程。

3 结构性演化模型建立思路

基于前面的对现有结构性参数及其演化规律的评价与分析, 采用构度指标与应力比结构性参数, 建立反映黄土初始结构性及其湿载作用下演变的数学模型, 具体方法如下:

首先, 提出在常规三轴压剪过程中球应力与剪应力对剪应变和体应变综合影响的综合应变。

$$\epsilon_D = \sqrt{\epsilon_s^2 + \epsilon_v^2} \quad (1)$$

式中: ϵ_D 为综合应变; ϵ_s 为剪应变; ϵ_v 为体应变。

然后, 基于常规三轴试验, 分析在压剪过程中, 结构性随综合应变衰减变化规律。笔者将随综合应变衰减过程的应力比结构性参数除以剪切时初始结构性数值, 称之为归一化结构性参数, 如式 (2) 所示。这样可以消除固结围压对剪切时初始结构性数值的影响, 并使压剪过程中结构性参数与综合应变关系曲线纵坐标在 0~1 之间, 即可反映不同围压和不同含水率在压剪损伤过程中归一化结构性参数随综合应变变化趋势。

$$\frac{m_\eta - 1.0}{m_{\eta_0} - 1.0} = m \quad (2)$$

式中: m 为归一化结构性参数; m_{η_0} 为初始结构性参数。

$$m = f_1(w, \sigma_{3c}, \epsilon_D) \quad (3)$$

式中: w 为含水率; σ_{3c} 为固结围压 (或小主应力)。

再次, 分析构度指标与含水率关系。

$$m_u = f_2(w) \quad (4)$$

最后, 将构度指标作为初始结构性引入。

$$m_{\eta_0} = m_u \quad (5)$$

依据式(2)~(5),可得反映黄土初始结构性及其湿载作用下演变的数学模型表达式:

$$m_{\eta} = f_1(w, \sigma_{3c}, \varepsilon_D) [f_2(w) - 1] + 1 \quad (6)$$

4 试验分析与验证

通过常规三轴固结排水试验和无侧限抗压试验,分析与验证上述湿载作用下结构性演化模型。试验黄土样取自西安东郊白鹿原直立边坡,取土深度为7 m左右,干密度为 1.52 g/cm^3 ,天然含水率为15%,塑性指数为13.4,固结围压分别为50、100、200、300 kPa,含水率分别为10%、15%、18%、22%的原状、重塑以及饱和试样。含水率为10%的原状土采用天然原状土风干的方法制备。含水率为18%和22%的原状样采用天然原状土通过滴定注水法制备,先对试样加水,然后在保湿缸中放置24 h以上,让水分自由均匀扩散。重塑样在控制干密度和含水率的条件下,通过压样法制备。饱和样采用抽气饱和法制备。无侧限抗压试验主要研究能反映初始结构性的构度指标,含水率与常规三轴固结排水试验一致的原状、重塑以及饱和试样。

前人分析黄土损伤演化关系均基于结构性参数与剪应变之间的关系分析,没有考虑体应变对结构性衰减演化过程的影响。依据式(1)所示的综合应变计算方法进行处理试验数据,对比结构性随剪应变与随综合应变变化规律差异,如图1所示,可知,

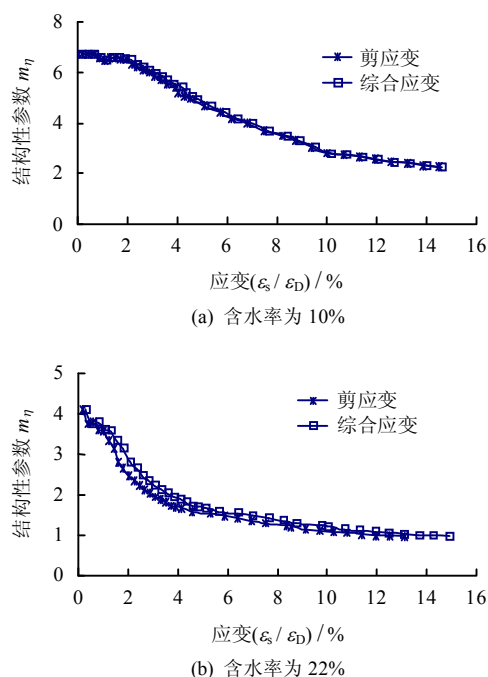


图1 结构性随剪应变和综合应变的变化规律
Fig.1 Changes of structure with shear strain and comprehensive strain

当含水率较大时,体应变对结构性衰减演化规律影响较大,考虑体应变的结构性衰减较缓,反映了土样不易产生脆性破坏,产生塑性膨胀破坏。当含水率较小时,综合应变与剪应变的结构性演化过程一致,反映了土样容易产生脆性破坏,剪应变对结构性演化过程影响起决定性作用。

结构性参数随综合应变变化规律,如图2所示,可以看出,含水率越小,结构性越强,结构性参数随剪切变形的衰减越突出。相同含水率下,初始剪切时结构性参数随着固结围压的变化规律较突出,

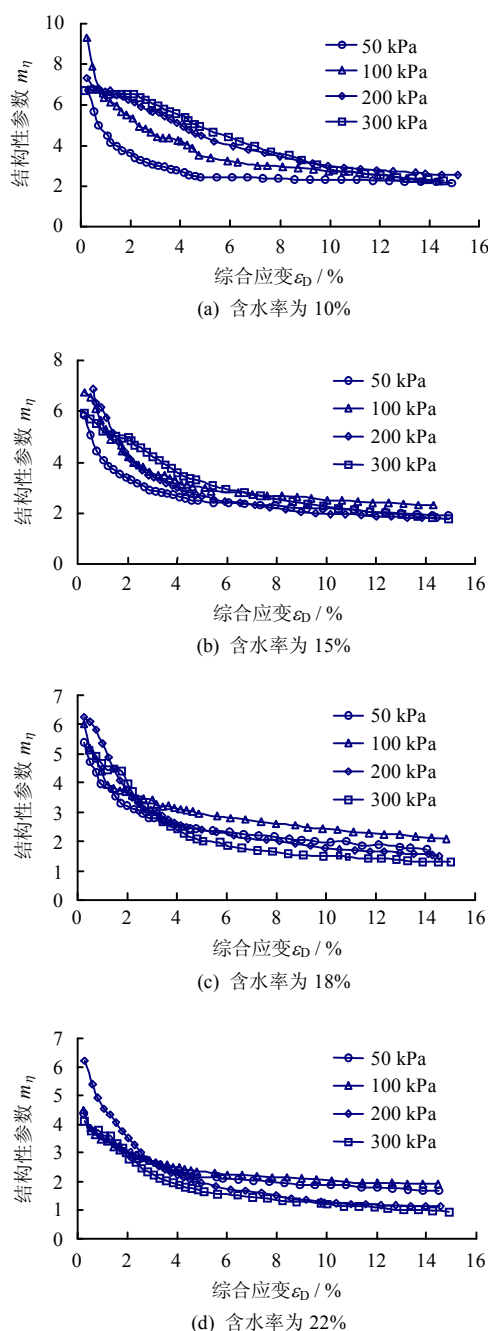


图2 不同围压、不同含水率结构性参数与综合应变的关系
Fig.2 Relationships between structural parameters and comprehensive strain under different confining pressures and water contents

这是因为土初始结构性受固结围压的压损性或压硬性的影响。那么在实际过程中同一种土的初始结构性应该相同，不应该随着埋深增大而增大或减小。故将常规三轴试验的围压对初始结构性影响消除，采用式 (2) 计算方法。分析不同含水率、不同固结围压对归一化结构性参数随综合应变的演化规律，如图 3 所示，在含水率很低时，围压变化对结构性参数与综合应变关系的形状变化敏感性较强；在含

水率较高时，围压变化对结构性参数与综合应变关系的形状变化敏感性较弱，而且随着围压增大，结构性衰减越慢。

依据图 3 的曲线形式，经数据拟合可得

$$m = f_1(w, \sigma_{3c}, \varepsilon_D) = \frac{\varepsilon_D}{1 + [A + Bw + Bw \ln(1 + \sigma_{3c} / 1000)] \varepsilon_D} \quad (7)$$

式中：固结围压单位为 kPa； A 、 B 为结构性衰减形状参数，本次黄土试验参数， $A = -0.2$ ， $B = 0.1$ 。

图 4 为构度指标随含水率之间关系，构度指标随含水率呈指数衰减，在含水率较低时，构度指标变化较大，当含水率较大时，土体接近饱和，构度指标变化较小。曲线形式经数据拟合可得

$$m_u = f_2(w) = Cw^D \quad (8)$$

式中： C 、 D 为初始结构性状态参数，本次黄土试验参数， $C = 270$ ， $D = -1.3$ 。

通过式 (6) ~ (8) 建立从初始结构性到湿载作用下衰减演化过程的数学模型，其公式为

$$m_\eta = \left[1 - \frac{\varepsilon_D}{1 + [A + Bw + Bw \ln(1 + \sigma_{3c} / 1000)] \varepsilon_D} \right] \cdot \frac{1}{[Cw^D - 1] + 1} \quad (9)$$

数学模型计算得到结果如图 5 所示，图 5(a) 为具有相同初始结构性的土，随着应力路径不同，结构性沿着不同方式的衰减演化过程，固结围压不影响初始结构性，仅影响结构性衰减演化过程。由图 5(b) 可知，土的含水率变化不仅影响初始结构性，而且影响其衰减方式。该数学模型避免了试验围压对初始结构性的影响，并且考虑了湿载过程中体应变与剪应变的共同影响，更加准确地反映黄土的结构损伤演化规律。

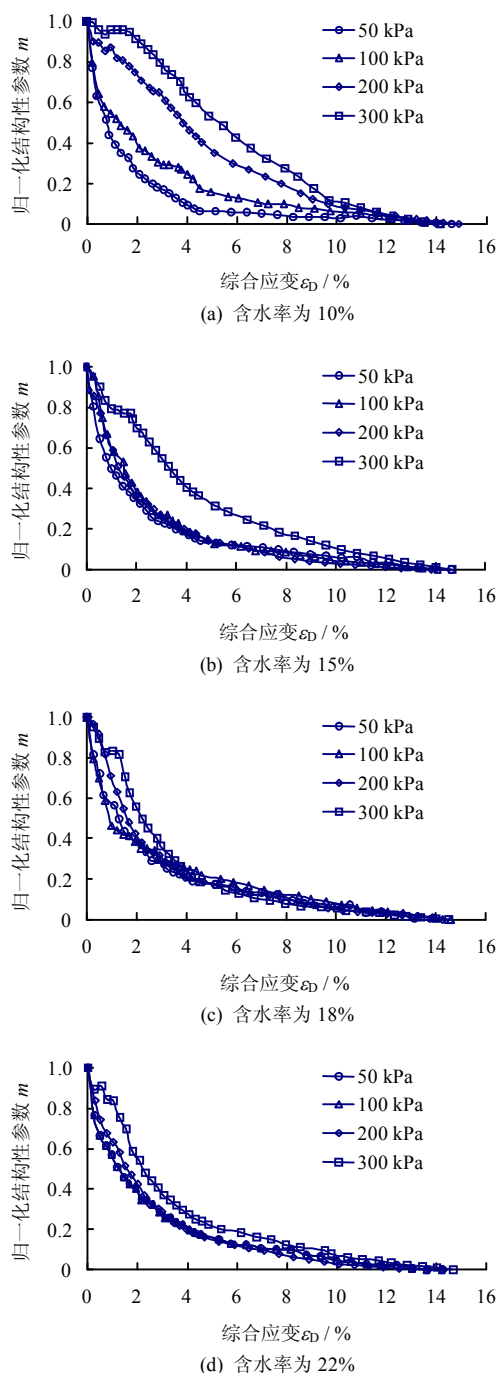


图 3 不同围压、不同含水率的归一化结构性参数与综合应变关系

Fig.3 Relationships between normalized structural parameters and comprehensive strain under different confining pressures and water contents

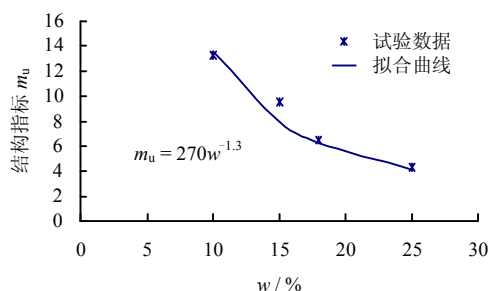


图 4 构度指标与含水率的关系

Fig.4 Relationship between structural index and water content

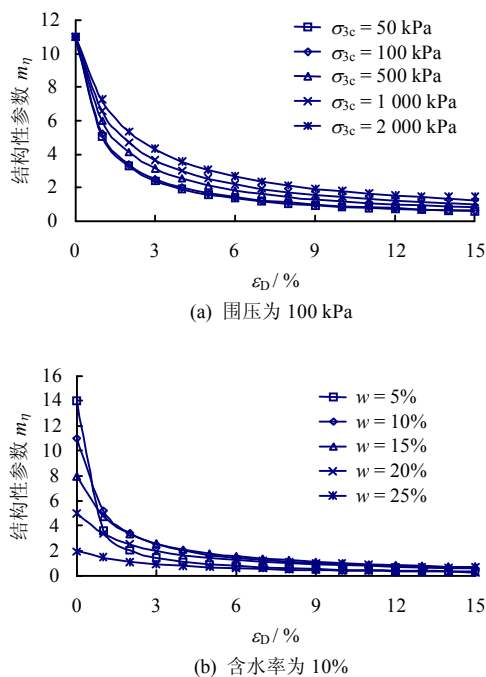


图5 结构性演化数学模型的计算值
Fig.5 Calculation of structural evolution mathematical model

5 结 论

(1) 通过对现有的结构性参数及其演化规律的总结分析, 将结构性参数分为两类, 一类为过程结构性参数, 包括应变结构性参数、孔隙比结构性参数, 应力结构性参数, 应力比结构性参数, 压剪强度参数; 另一类为初始结构性参数, 例如, 无侧限抗压强度构度指标, 并分析了各种结构性参数的优势与缺陷。

(2) 提出了反映体应变与剪应变的综合应变, 并分析了它与结构性参数之间关系, 在含水率较大时, 体应变对土的结构性衰减影响较大, 在含水率较小时, 体应变对土的结构性衰减影响较小。

(3) 依据现有的结构性参数及其演化规律分析, 结合常规三轴压缩试验和无侧限抗压试验, 提出了一种反映从初始结构性到湿载作用下衰减演化规律的新思路, 并分析其合理性和优越性。

参 考 文 献

[1] 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): 1—13.

XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 1—13.

[2] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651—656.

XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.

[3] 陈存礼, 高鹏, 何军芳. 考虑结构性影响的原状黄土等效线性模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1330—1336.

CHEN Cun-li, GAO Peng, HE Jun-fang. Equivalent linear model of intact loess considering structural effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1330—1336.

[4] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531—536.

SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.

[5] 邓国华, 邵生俊, 陈昌禄, 等. 一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构性参数[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 35—40.

DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, CHEN Chang-lu, et al. A structure parameter reflect coupling action between shear stress and mean spherical stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 35—40.

[6] 冯志焱. 非饱和黄土结构性定量化参数与结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.

[7] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15—19.

SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 15—19.