

文章编号: 1000-7598 (2013) 05-1253-06

侧限压缩条件下土体结构性参数的单变量模型

陈 茜, 骆亚生, 程大伟, 郭 鸿

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过分析侧限压缩条件下基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数, 给出了结构性参数的统一表达式, 即采用割线模量表示的土体结构性参数。这种表示的积极意义在于避免了初始状态下基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数均无法求解的现象。构建了以主动作用为单变量描述的土体结构性参数模型, 即基于相同应力方法的土结构性参数模型和基于相同应变方法的土结构性参数模型, 并对杨凌黄土的原状样、重塑样和饱和样进行侧限压缩试验。通过试验值和计算值的比较, 检验了模型的合理性。研究表明, 试验值和计算值能够较好吻合。采用主动作用为单变量描述的土体结构性参数直观地反映主动作用对土体结构性的影响, 同时简化结构性参数计算过程, 实现数值计算。

关 键 词: 结构性; 割线模量; 单变量模型

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Single variable model of soil structural parameters under confined compression condition

CHEN Xi, LUO Ya-sheng, CHENG Da-wei, GUO Hong

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

Abstract: By analyzing the soil structural parameters based on strain considering and stress considering under confined compression conditions respectively, a unified expression for structural parameters is given, which is soil structural parameters using the secant modulus description. The obvious merit of the soil structural parameters expressed by the secant modulus is that it can avoid, when soil is under initial state, the soil structural parameters based on strain considering and stress considering can not be solved. Further, a single variable model of structural parameters using the active role description is established. In this model, the same stress method and strain method are utilized. For experiment, the confined compression test with intact sample, remolded sample and saturated intact sample from Yangling are conducted. Through the comparison of experimental values and calculation values, the rationality of the single variable model of structural parameters is tested. The results show that the calculated values agree with the experimental values well. The single variable model of structural parameters using the active role description can directly reflect the influence of the active role on soil structure. In addition, the single variable model of structural parameters has the ability to simplify the calculation process and realize the numerical calculation.

Key words: structural; secant modulus; single variable model

1 引 言

土的结构性是土物理状态的显示^[1], 也是决定土的力学性质的一个根本内在因素。土的结构性是指构成土体颗粒的形状、大小、表面特征、定量的比例关系、空间上的排列状态以及骨架颗粒与胶结物的胶结形式, 孔隙的形态、大小、数量和分布情

况^[2]。在力学性质上表现为土体保持原结构状态不被破坏的能力, 土的应力水平对其力学性质的影响表明土受力过程中结构性的变化^[3], 土的固结系数和渗透系数受微结构的影响也较大, 土的各向异性是土结构性的表现。土的结构性对土工程性质的重要性已成为共识, 被认为是 21 世纪土力学的核心问题^[4]。

收稿日期: 2012-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51178392)。

第一作者简介: 陈茜, 女, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事水工程与环境方面的研究工作。E-mail: 616137105@qq.com

通讯作者: 骆亚生, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土静、动力特性试验、理论及其工程应用方面的研究工作。

E-mail: 771545499@qq.com

目前,土结构性研究存在三大基本途径^[1]:①微结构形态学研究方法,②固体力学的研究方法,③土力学的研究方法。其中,土力学方法在结构性研究中具有很大的潜力和良好的发展前景。自谢定义等^[1]提出的基于释放土体结构势思想确定土体结构的量化参数——基于应变考虑的结构性参数 m_p ($m_p = (\varepsilon_r \varepsilon_s) / \varepsilon_o^2$, 其中 ε_o 、 ε_s 、 ε_r 分别为压力 p 下原状、原状饱和、重塑土体的应变)的方法以来,土的结构性参数及其相关的研究方兴未艾。骆亚生^[5]、邵生俊^[6]等先后提出了基于应力考虑的结构性参数 m_e , $m_e = \sigma_o^2 / (\sigma_r \sigma_s)$, 其中 σ_o 、 σ_s 、 σ_r 分别是应变 ε 时原状、原状饱和、重塑土体的应力。夏望民^[7]提出了模量结构性参数 m_E , $m_E = (E_{do} - E_{drs}) / E_{drs}$, 其中 E_{do} 、 E_{drs} 分别是原状土体和饱和重塑土体的割线模量。陈存礼、胡再强等^[8-10]提出了孔隙比结构性参数 m_e , $m_e = e_o^2 / (e_r e_s)$, 其中 e_o 、 e_r 、 e_s 分别是原状土体、重塑土体和饱和原状土体的孔隙比。冯志焱^[11-12]提出了试锥下沉结构性参数 m_s , $m_s = (\delta_s \delta_r) / \delta_o^2$, 其中 δ_o 、 δ_r 、 δ_s 分别是原状土体、重塑土体和饱和原状土体的试锥入土深度。这些参数的确定,试验简单、机制明确,能够反映某种作用对土结构性的影响。但如果仔细观察可以发现,上述结构性参数存在以下特点:在形式上表现出多样性,在表达上往往涉及多个变量。如此,产生的问题是形式太多,不便于揭示结构性的本质;变量太多,很难准确确定不同变量对结构性的影响程度。

基于上述的问题,本文选取两个典型的结构性参数进行分析,给出了在形式上统一的结构性参数表达式。建立基于侧限压缩试验的土结构性参数单变量模型,并检验其合理性。

2 土结构性参数的统一形式

采用土力学方法构建土结构性参数的主要思想是通过释放结构势的方法寻求结构性的量化指标。其典型地描述方式有两种,即基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数,其表达式分别为

$$m_p = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_s}{\varepsilon_o^2} \quad (1)$$

$$m_e = \frac{\sigma_o^2}{\sigma_r \sigma_s} \quad (2)$$

式中: m_p 为基于应变考虑的土结构性参数; ε_o 、 ε_s 、

ε_r 分别为压力 p 下原状、原状饱和、重塑土体的应变; m_e 为基于应力考虑的土结构性参数; σ_o 、 σ_s 、 σ_r 分别为应变 ε 时原状、原状饱和、重塑土体的应力。

对于式(1),考虑到 ε_o 、 ε_s 和 ε_r 为同一压力 p (即土体内的应力均为 σ_p) 下土体的应变,则可化简得

$$m_p = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_s}{\varepsilon_o^2} = \frac{\frac{\sigma_p}{E_{d\sigma_r}} \frac{\sigma_p}{E_{d\sigma_s}}}{\left(\frac{\sigma_p}{E_{d\sigma_o}}\right)^2} = \frac{E_{d\sigma_o}^2}{E_{d\sigma_r} E_{d\sigma_s}} \quad (3)$$

式中: σ_p 、 $E_{d\sigma_o}$ 、 $E_{d\sigma_s}$ 、 $E_{d\sigma_r}$ 分别为压力 p 作用下土体的应力、原状、原状饱和、重塑土体的割线模量。

同理,对于式(2),考虑到 σ_o 、 σ_s 和 σ_r 为对应于同一压应变 ε 土体的应力,则可化简为

$$m_e = \frac{\sigma_o^2}{\sigma_r \sigma_s} = \frac{(E_{d\varepsilon_o})^2}{(E_{d\varepsilon_r})(E_{d\varepsilon_s})} = \frac{E_{d\varepsilon_o}^2}{E_{d\varepsilon_r} E_{d\varepsilon_s}} \quad (4)$$

式中: $E_{d\varepsilon_o}$ 为应变 ε 时原状土体的割线模量; $E_{d\varepsilon_s}$ 为应变 ε 时原状饱和土体的割线模量; $E_{d\varepsilon_r}$ 为应变 ε 时重塑土体的割线模量。

比较式(3)和式(4)可以发现,化简后的基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数,其表达式在形式上是一致的,即结构性参数可用统一形式来描述:

$$m = \frac{E_{do}^2}{E_{dr} E_{ds}} \quad (5)$$

式中: m 为土结构性参数, E_{do} 、 E_{ds} 、 E_{dr} 分别为原状、原状饱和和重塑土体的割线模量。

在式(5)中,当割线模量 E_{do} 、 E_{ds} 和 E_{dr} 是基于相同应力求得时,则 $m = m_p$;当割线模量 E_{do} 、 E_{ds} 和 E_{dr} 是基于相同应变求得时,则 $m = m_e$ 。

该基于割线模量表达的在形式上统一的结构性参数具有的一个积极意义在于避免了由于起始状态土体的应力、应变均为 0,造成基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数在此状态下均无法求解。

3 单变量模型

3.1 侧限压缩试验下土体的应力-应变关系曲线

侧限压缩试验下典型的土体应力-应变关系曲线如图 1 所示。

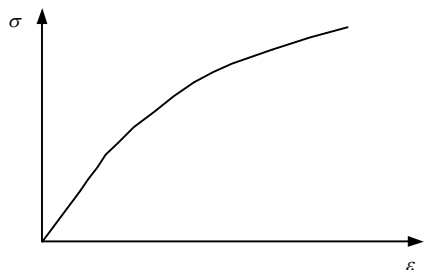


图 1 侧限压缩试验下典型的土体应力-应变关系曲线
Fig.1 The typical curve of soil stress - strain relationship under confining compression test

由图可见,侧限压缩试验下土体应力-应变关系曲线是双曲线型的,建议采用的表达式为

$$\sigma = \frac{a\varepsilon}{1 - b\varepsilon} \quad (6)$$

式中: a 与 b 均为试验常数。

为了验证式(6)的合理性,进行了 1 组试验。该组试验中包含 3 个试样,即含水率为 w 、干密度为 ρ 的天然原状样及具有相同含水率和干密度的重塑样,另有一个饱和原状样。选取这样一组试样的目的是:一方面,这样的一组试样中分别包含了原状样和重塑样、非饱和样和饱和样,验证范围较广;另一方面,该组样的选取刚好满足测试结构性参数的试验需求,在后续分析中可以直接引用,以减少工作量。

试样取自陕西杨凌渭河 II 级阶地的杨凌黄土,取土深度为 3 m,烘干法测定其天然含水率为 19%,干密度为 1.26 g/cm³,饱和含水率为 42.5%。加荷等级为 50、100、200、300、400 kPa。

试验结果见图 2 和表 1。

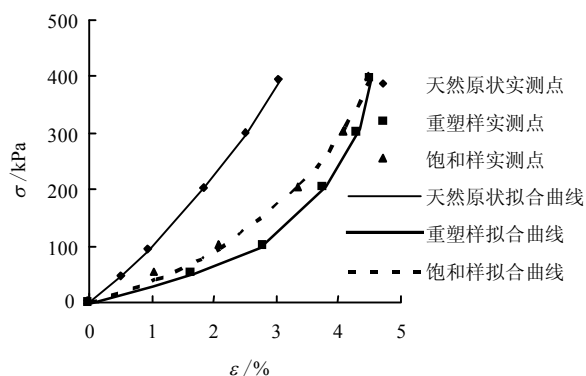


图 2 应力控制的不同土体的应力-应变实测点及其拟合曲线
Fig.2 Measured point and fitting curves of stress and strain with different soils under stress controlled conditions

表 1 应力控制的不同土体应力-应变关系曲线拟合参数
Table 1 Fitting parameters of stress-strain relationship curves with different soils under stress controlled conditions

试样	拟合参数		
	a	b	R^2
天然原状样	8 910.58	10.43	1.0
重塑样	1 848.87	17.52	1.0
饱和原状样	3 221.81	13.75	1.0

由图、表可见,采用建议的表达式拟合得到的曲线能够与实测点较好地吻合,说明采用式(6)描述侧限压缩试验下的土体应力-应变关系具有合理性。

3.2 结构性参数的单变量模型

通过第 2 节的分析可知,土结构性参数 m 的表达式中所涉及的割线模量有两种求取方法:①基于相同应力求取,则 $m = m_p$;②基于相同应变求取,则 $m = m_\varepsilon$ 。以下对这两种方法分别展开分析。

当割线模量 $E_{d\sigma_0}$ 、 $E_{d\sigma_s}$ 和 $E_{d\sigma_r}$ 是基于相同应力求得时,有

$$\sigma_0 = \sigma_r = \sigma_s \quad (7)$$

$$E_{d\sigma_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

$$E_{d\sigma_s} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_s} \quad (9)$$

$$E_{d\sigma_r} = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_r} \quad (10)$$

由式(6)可得

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{a + b\sigma} \quad (11)$$

考虑到式(7),则有

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{a_1 + b_1\sigma_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{a_2 + b_2\sigma_s} = \frac{\sigma_0}{a_2 + b_2\sigma_0} \quad (13)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{a_3 + b_3\sigma_r} = \frac{\sigma_0}{a_3 + b_3\sigma_0} \quad (14)$$

式中: a_1 、 b_1 为侧限压缩试验下原状样的试验参数; a_2 、 b_2 为侧限压缩试验下饱和原状样的试验参数; a_3 、 b_3 为侧限压缩试验下重塑样的试验参数。

将式(12)~(14)代入式(8)~(10),可得

$$E_{d\sigma_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = a_1 + b_1\sigma_0 \quad (15)$$

$$E_{d\sigma_s} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_s} = a_2 + b_2\sigma_0 \quad (16)$$

$$E_{d\sigma_r} = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_r} = a_3 + b_3\sigma_0 \quad (17)$$

将式 (15)~(17) 代入式 (5), 可得

$$m = m_p = \frac{E_{d\sigma_0}^2}{E_{d\sigma_r} E_{d\sigma_s}} = \frac{(a_1 + b_1\sigma_0)^2}{(a_2 + b_2\sigma_0)(a_3 + b_3\sigma_0)} \quad (18)$$

当割线模量 $E_{d\sigma_0}$ 、 $E_{d\sigma_s}$ 和 $E_{d\sigma_r}$ 是基于相同应变求得时, 有

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_r = \varepsilon_s \quad (19)$$

采用上述相同的推导思路, 可得

$$m = m_\varepsilon = \frac{E_{d\sigma_0}^2}{E_{d\sigma_r} E_{d\sigma_s}} = \frac{a_1^2(1 - b_2\varepsilon_0)(1 - b_3\varepsilon_0)}{a_2 a_3(1 - b_1\varepsilon_0)^2} \quad (20)$$

具体推导过程不再赘述。

观察式 (18) 和式 (20) 可以发现, 不论是采用基于相同应力的方法还是基于相同应变的方法计算割线模量 $E_{d\sigma_0}$ 、 $E_{d\sigma_s}$ 和 $E_{d\sigma_r}$, 均可以获得以主动作用为单变量表示的土结构性参数。该表达方式有如下的积极意义: 一方面是由于涉及的单变量是主动作用, 所以用它表示土结构性参数可以直观地反映土体结构的主动作用对土体结构性的关系; 另一方面是采用单变量表示土结构性参数, 可以简化计算过程, 利用实现数值计算。

3.3 模型的检验

基于应变考虑的土结构性参数 m_p , 由于它通过直接读取试验数据进行计算确定的, 可将其视为实测值; 而基于相同应力方法的土结构性参数 m , 由模型公式直接求取 (利用式 (18) 求取), 将其视为计算值。同理, 将基于应力考虑的土结构性参数 m_ε 视为实际值, 将基于相同应变方法的土结构性参数 m (利用式 (20) 求取) 可视为计算值。通过比较这两类实测值与计算值的数值关系, 判断模型的合理性。

检验基于相同应力方法的土结构性参数模型公式合理性的初始数据来自第 3 节侧限压缩试验下土体应力-应变关系曲线表达式检验所采集的数据。该

组数据中包括了一个干密度为 ρ 的天然原状样及一个具有相同含水率和干密度的重塑样和一个饱和原状样, 刚好满足测试结构性参数的需求。数据处理结果见图 3 和表 2。

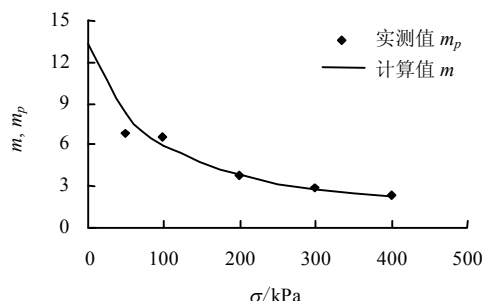


图 3 基于应变考虑的土结构性参数的实测点和基于相同应力方法的土结构性参数的计算曲线

Fig.3 Measured point of soil structural parameters based on strain and calculation curve of soil structural parameter based on same stress method

表 2 基于应变考虑的土结构性参数的实测值与基于相同应力方法的土结构性参数计算值的比较

Table 2 Comparison between measured values of soil structural parameters based on strain and calculation values of soil structural parameters based on the same stress method

应力 σ_0 /kPa	实测值 m_p	计算值 m	相对误差/%
0		13.33	
50	6.77	8.35	23.37
100	6.49	5.99	-7.81
200	3.66	3.78	3.28
300	2.80	2.78	-0.88
400	2.21	2.22	0.10

注: 采用 $(m - m_p)/m_p \times 100\%$ 计算相对误差。

检验基于相同应变方法的土结构性参数模型公式合理性的初始数据重新进行侧限压缩, 采集所需的数据。为便于与基于相同应力方法的土结构性参数相对比, 试样依旧采用杨凌黄土, 包括一个干密度为 ρ 的天然原状样及一个具有相同含水率和干密度的重塑样和一个饱和原状样。两个侧限压缩试验的主要区别在于, 前者采用应变控制, 后者采用应力控制。控制应变分别为 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%。试验测试所得的应力-应变数据见图 4, 应力-应变关系曲线拟合参数见表 3。基于相同应力方法的土结构性参数计算值与基于应变考虑的土结构性参数的实测值之间的关系, 分别见图 5 和表 4。

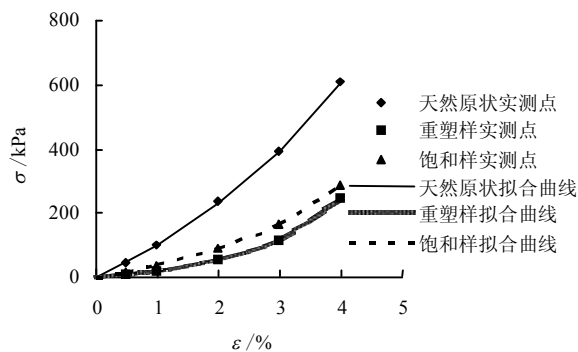


图4 应变控制的不同土体应力、应变实测点及其拟合曲线
Fig.4 Measured point and fitting curves of stress and strain with different soils under strain controlled conditions

表3 应变控制的不同土体应力-应变关系曲线拟合参数
Table 3 Fitting parameters of stress-strain relationship curves with different soils under strain conditions

试样	拟合参数		
	a	b	R^2
天然原状样	9 207.13	9.92	1.0
重塑样	1 829.30	17.57	1.0
饱和原状样	3 271.96	13.63	1.0

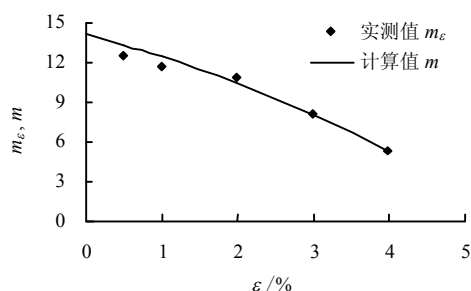


图5 基于应力考虑的土结构性参数的实测点和基于相同应变方法的土结构性参数的计算曲线
Fig.5 Measured point of soil structural parameters based on stress and the calculated curve of soil structural parameter based on the same strain method

表4 基于应力考虑的土结构性参数的实测值与基于相同应变方法的土结构性参数计算值的比较
Table 4 Comparison between measured values of soil structural parameters based on stress and calculated values on the same strain method

应变 ε_0 / %	实测值 m_e	计算值 m	相对误差 / %
0.0		14.16	
0.5	12.46	13.33	6.96
1.0	11.69	12.43	6.25
2.0	10.74	10.40	-3.21
3.0	7.98	8.02	0.49
4.0	5.27	5.26	-0.17

注：采用 $(m - m_e) / m_e \times 100\%$ 计算相对误差。

分别对比图3、表2和图5、表4，可以发现采用单变量表示的土结构性参数从总体上看和实测值比较吻合，说明模型具有合理性。只有当主动作用较小时，才出现较大误差。造成这种现象的原因可能是多方面：由于主动作用较小，由试验仪器产生的对试验结果的影响变大，比如：仪表的精度对读数准确性影响，仪器的灵敏性对主动作用的施加影响等；另外，对应力-应变关系曲线的拟合方法、拟合度的好坏也会对实测值与计算值之间的误差产生影响。此外，实测值的计算方法在较小主动作用条件下的适用性也是需要考虑的问题。

需要补充说明的是，由于土体应力-应变之间的关系不是线弹性关系，所以基于相同应力方法的土结构性参数和基于应变方法的土结构性参数并不相等。因此，在使用时应注明是基于何种方法的结构参数。有一个特殊点除外，即主动作用起始点处对应的土结构性参数在理论上是相等。通过对比表2和表4主动作用为0时的计算值，可以发现二者很接近，其差异仅为0.52%（以13.33为基准）。产生差异的原因可能是由于两组试样间的差异造成的。

4 结 论

(1) 基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数二者可以在形式上进行统一，即采用割线模量表示的土体结构性参数。采用割线模量表示的土体结构性参数的一个积极意义在于避免出现由于起始状态土体的应力、应变均为0，造成基于应变考虑的土结构性参数和基于应力考虑的土结构性参数在此状态下均无法求解的现象。

(2) 构建了以主动作用为单变量描述的土体结构性参数模型，即基于相同应力方法的土结构性参数模型和基于相同应变方法的土结构性参数模型，检验了它们的合理性。采用主动作用为单变量描述的土体结构性参数的积极意义在于它可以直观地体现土体结构的主动作用对土体结构性的影响；另一方面，采用单变量表示土结构性参数，可以简化计算过程，利于实现数值计算。

(3) 由于土体应力-应变之间的关系不是线弹性关系，所以基于相同应力方法的土结构性参数和基于应变方法的土结构性参数除了主动作用起始点处相等外，其余的并不相等。因此，在使用时应注明是基于何种方法的结构参数。

参 考 文 献

- [1] 谢定义, 齐吉琳. 土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.
- [2] 齐吉琳. 土的结构性及其定量化参数的研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 1999: 15—20.
- [3] 骆亚生, 张爱军. 黄土结构性的研究成果及其新进展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 66—69.
LUO Ya-sheng, ZHANG Ai-jun. Outcomes research of loess and its new advance[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(6): 66—69.
- [4] 沈珠江. 土体结构性模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. Mathematics model of soils structure—the key issue of 21th century soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [5] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力条件下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4248—4251.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Soil structural parameters under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4248—4251.
- [6] 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. Study of the structural and quantitative parameters of undisturbed loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.
- [7] 夏旺民. 黄土弹塑性损伤本构模型及工程应用研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [8] 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. Undisturbed loess taking into account the structural effects of the equivalent linear model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1330—1336.
- [9] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1891—1896.
CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, GAO Peng. Structural and deformation characteristics of undisturbed loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1891—1896.
- [10] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1352—1360.
CHEN Cun-li, GAO Peng, HU Zai-qiang. Moistening deformation characteristics and its structural relationship of the loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1352—1360.
- [11] 冯志焱. 非饱和黄土结构性及有效应力动力等效黏弹性模型研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [12] 冯志焱, 谢定义. 复杂加载条件下原状黄土结构性定量化参数变化全过程分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 72—75.
FENG Zhi-yan, XIE Ding-yi. Quantitative analysis of soil structure variations in whole process under complex loading conditions of intact loess[J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 2009, 25(1): 72—75.