

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0595-06

三轴应力状态下土的结构性变化特性

骆亚生, 李 平, 胡仲有

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 应变综合结构势是一种新的、可以方便应用于复杂应力状态下的土结构性参数。根据应变综合结构势参数的定义, 用三轴剪切试验中原状黄土(或人工结构性黄土)、重塑黄土以及饱和黄土的应力-应变曲线求得原状黄土(或人工结构性黄土)的结构性参数曲线, 分析了三轴试验条件下非饱和黄土的结构变化特性。结果表明, 应变综合结构势作为一种新的土结构性参数, 它与应力综合结构势参数对同一影响因素的变化趋势基本相同, 可以合理解释土体在三轴剪切试验条件下土结构性参数曲线所表现出的基本特征, 更适合描述在三轴复杂应力状态下土体结构性的变化和发展。

关 键 词: 黄土; 三轴应力状态; 应变综合结构势; 结构性; 变化特性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Variation properties of soil structure under triaxial complex stress condition

LUO Ya-sheng, LI Ping, HU Zhong-you

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

Abstract: The strain comprehensive structure potential (strain-CSP) is a new structural parameter of soils and it can be applied to complex stress condition conveniently. Based on the definition of strain-CSP, the structural parameter curves of intact loess or men-made structural loess are obtained using the data of stress-strain curves obtained from triaxial tests on intact loess (or men-made structural loess), disturbed loess and saturated loess, and structural variation properties of unsaturated loess are analyzed under triaxial complex stress conditions. The results have shown that the strain-CSP as a new structural parameter of soils, its changing trend relative to a certain affecting factor is the same as that of the stress comprehensive structure potential. Using this new structural parameter of soils, the fundamental features of soils structural parameter curves under triaxial complex stress condition can be explained reasonably, and the variation and development of soils structural characteristics in 3-D complex stress state can be described suitably.

Key words: loess; triaxial complex stress condition; strain-CSP; structural characteristics; variation properties

1 前 言

土的结构性是影响土力学特性的诸要素中一个最为重要的要素, 被认为是“21 世纪土力学的核心问题”^[1], 但由于在土的结构性定量化方面面临巨大困难, 一直以来土结构性的研究和应用距解决工程实际问题的要求相距甚远^[2-4]。谢定义和齐吉琳(1999 年)等用土力学研究方法, 从对土样的压缩试验结果分析出发, 建议了压缩应力条件下土结构性定量化参数(为方便计, 称为应力综合结构势), 为土结构性研究开辟了一条新的途

径。但由于侧限压缩试验和三轴剪切试验中所表现的应力与变形的关系存在实质性的不同, 导致了土结构性参数的不同表现, 使得在压缩试验中求取的土结构性参数将不能直接应用于三轴应力状态^[5]。文献[6]沿用以上思路, 基于三轴应力条件, 探求了一种新的、可以方便应用于复杂应力状态下的结构性参数, 称其为应变综合结构势。对比侧限压缩和三轴剪切两种试验压力与变形关系曲线形态, 可以看出: 对于单轴压缩试验适合采用应力综合结构势参数, 而对于三轴复杂应力状态显然更适合采用应变综合结构势参数。

本文根据文献[6]中应变综合结构势参数的

收稿日期: 2006-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50578134)。

作者简介: 骆亚生, 男, 1967 年生, 副教授。主要从事黄土力学与工程应用研究。

定义,用原状黄土(或人工结构性黄土)试样、重塑黄土试样以及饱和黄土试样分别在三轴剪切试验中所得的应力-应变曲线来求原状黄土(或人工结构性黄土)的结构性参数曲线,分析了三轴试验条件下非饱和黄土的结构变化特性,以期推

动土结构性参数在复杂应力状态下研究和应用。

试验用原状黄土土样取自陕西杨陵某砖窑土场,取土深度为 3.0~4.0 m,属 Q_3 黄土,黄土物理性质见表 1。人工结构性黄土试样由重塑黄土配一定量水泥按不同干密度压制而成。

表 1 黄土土样的物理性质

Table 1 Physics properties of loess sample

液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%	按塑性图 分类	比重	颗粒(mm)组成 / %			按颗粒组 成分类
					>0.05	0.05~0.00	<0.005	
30.5	18.6	11.9	CI	2.71	6.5	61.4	32.1	粉质黏土

2 应变综合结构势的定义^[6]

在某一围压下,在三轴仪上分别对原状土、饱和土和重塑土进行剪切试验所得的应力-应变关系曲线的形状如图 1 所示。可以将应变综合结构势参数定义如下。

假设在某一应变下原状土的剪切应力为 q_o ,饱和土的剪切应力为 q_s ,重塑土的剪切应力为 q_r ,则 q_o 与 q_s 之间的差别是由于加水饱和导致土的结构破坏后所引起的强度损失,它主要反映土的排列特征; q_o 与 q_r 之间的差别是由于扰动导致土的结构联结破坏所引起的强度损失,它主要反映土的联结特征。可以定义出应变综合结构势为

$$m_e = \frac{m_1}{m_2} = \frac{q_o/q_s}{q_r/q_o} = \frac{q_o^2}{q_r q_s} \quad (1)$$

可以看出,土的联结越强,土的扰动导致的强度损失就越大;土的排列越不稳定,浸水后在力的作用下使土结构破坏导致的强度损失也就越大。因此,土颗粒的排列愈不稳定, m_1 越大, m_e 就越大;联结越强时, m_2 越小, m_e 也就越大, m_1 、 m_2 的变化均能敏感地反映在这个土结构性参数的变化上。

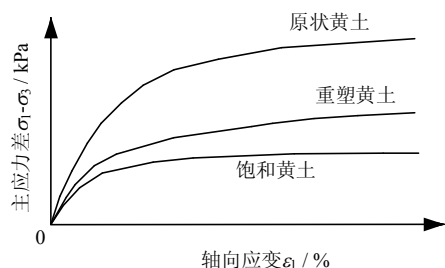
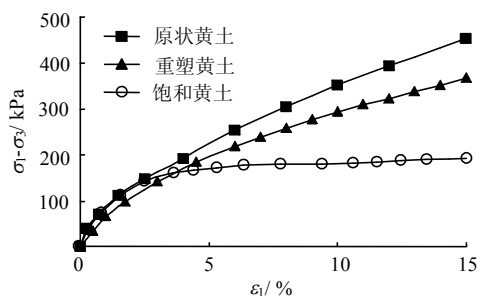


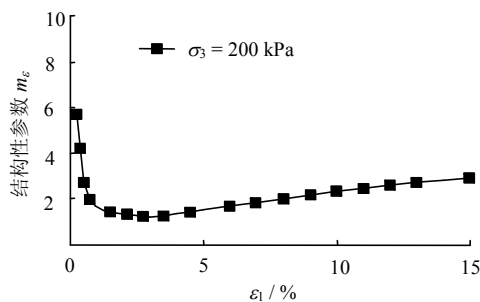
图 1 三轴试验时原状土、饱和土和重塑土的应力应变曲线
Fig.1 Relation curves of stress and strain for intact, saturated and remolded soil under triaxial test condition

3 土结构性变化

作为典型成果,图 2(a)为含水率为 17.8% 的杨凌原状黄土样及其重塑样与饱和样在一定围压下黄土三轴试验得到的 3 条应力-应变曲线,图 2(b)为由它们求出的结构性定量参数曲线。



(a) 应力应变关系特征曲线($w=17.8\%$, $\sigma_3=200$ kPa)



(b) 原状黄土结构性参数曲线($w=17.8\%$)

图 2 黄土结构性参数的典型曲线

Fig.2 Representative curves of structural parameter of loess

由结构性参数曲线可见,黄土在三轴条件下进行剪切时,其土结构性参数在小变形下由于土体结构的初期损伤有一个较大幅度的降低。在一段相对稳定之后又随着土体结构的逐渐愈合,次生结构强度逐渐形成,土的结构性参数随变形的发展表现出逐渐缓慢上升的势态。这表明,土体在变形过程中的初期损伤对土结构的影响较大,为影响土体结构

的主导因素, 土体结构性参数随变形发展而减小; 反之, 变形较大时, 土体结构的愈合因素慢慢上升为主导因素, 土体次生结构强度抑制了损伤因素对土体结构的继续削弱, 也使得土体的结构随变形发展表现出恢复的趋势, 但在试验变形范围内, 恢复段的结构参数还远小于原有的结构强度。

4 非饱和黄土的结构变化特性

图 3~11 示出了其他试验条件下试样在不同围

压下的 $\sigma_1-\sigma_3 \sim \varepsilon_1$ 曲线和重塑样、饱和样的 $\sigma_1-\sigma_3 \sim \varepsilon_1$ 曲线对应不同压力计算得到的结构性参数曲线。其中图 3~图 6 对应于含水率为 5 %, 12 %, 17.8 % 和 26 % 的原状结构性黄土; 图 7~图 9 对应于含水率为 17.8 %, $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$ 的人工结构性黄土 (水泥含量分别为 0.5 %, 1.0 % 和 1.5 %); 图 10 和图 11 对应于另外两种较大密度 ($\rho_d=1.4 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_d=1.5 \text{ g/cm}^3$) 的人工结构性黄土 (水泥含量为 1 %)。

从图 3~11 可以看出, 它们都具有如图 2 典

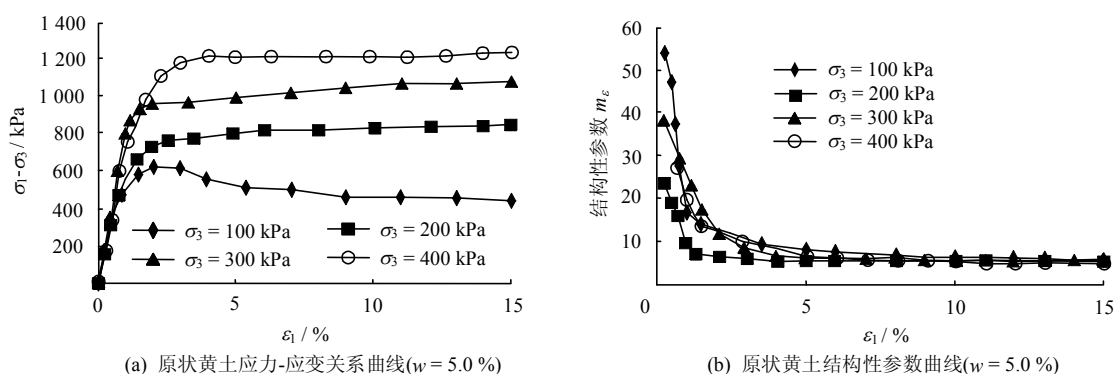


图 3 原状黄土不同围压下结构性参数曲线($w=5.0\%$)

Fig.3 Curves of structural parameter of intact loess under different confining pressures($w=5.0\%$)

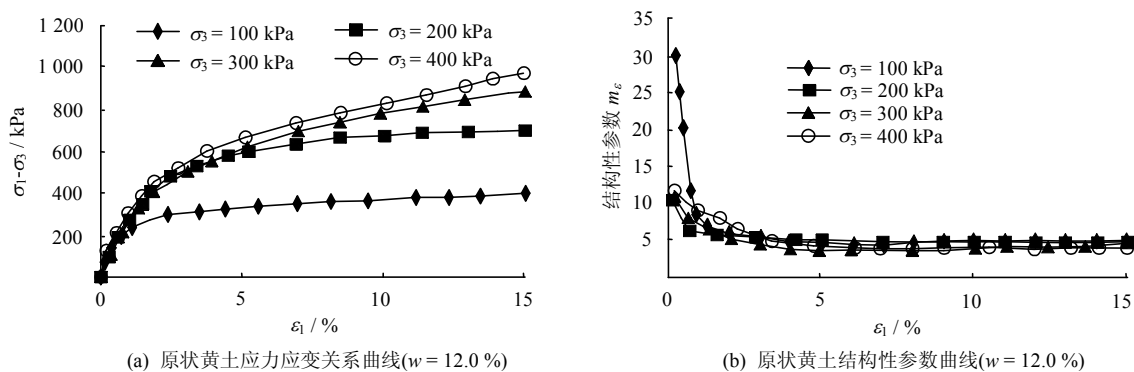


图 4 原状黄土不同围压下结构性参数曲线($w=12.0\%$)

Fig.4 Curves of structural parameter of intact loess under different confining pressures($w=12.0\%$)

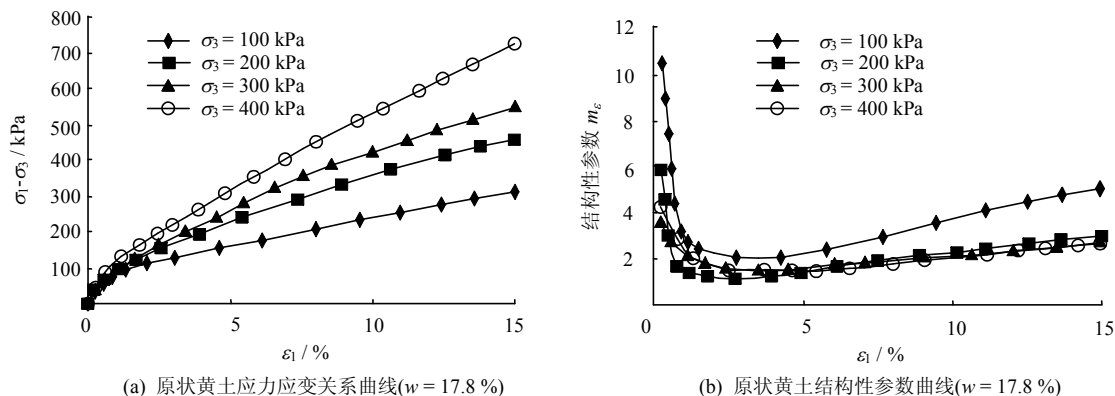
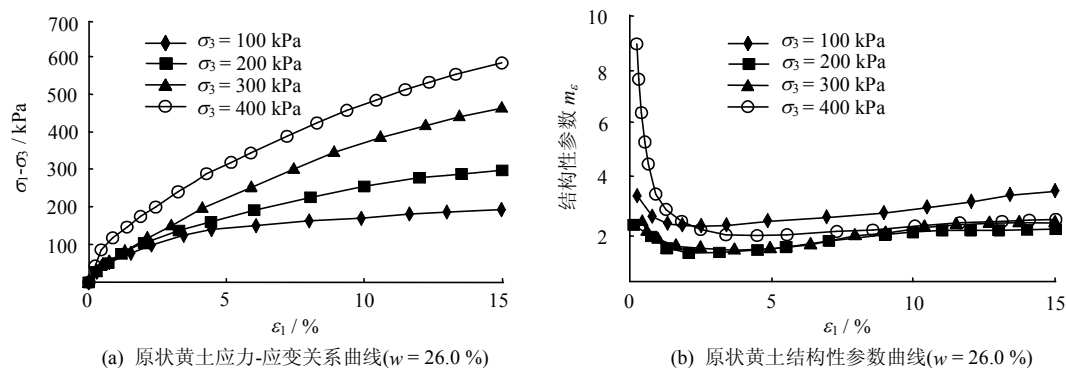
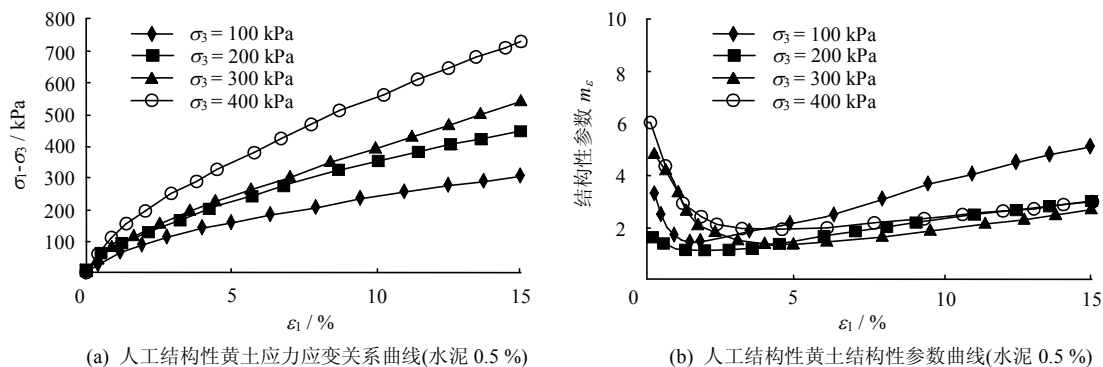
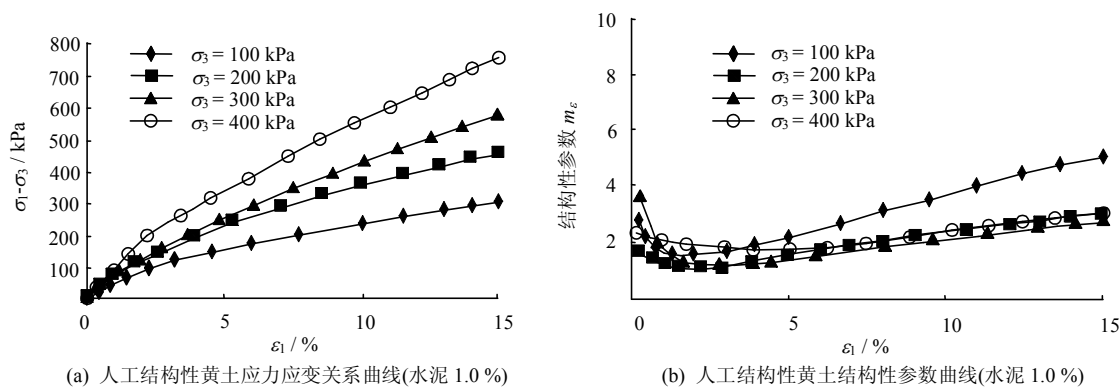
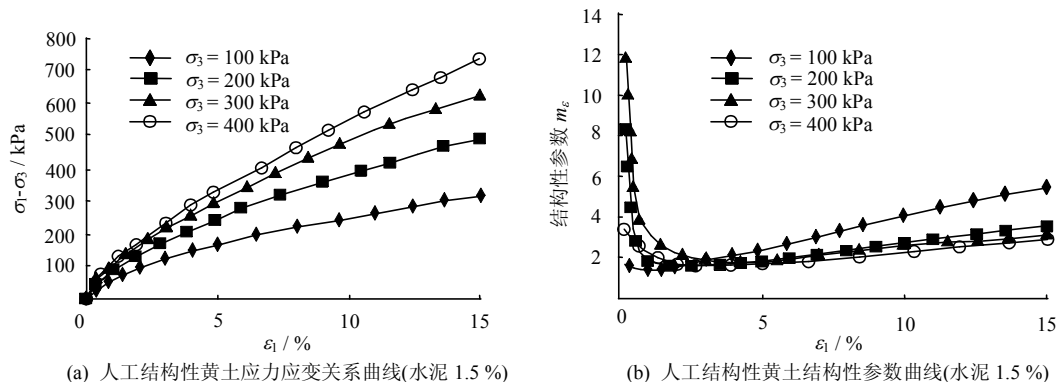


图 5 原状黄土不同围压下结构性参数曲线($w=17.8\%$)

Fig.5 Curves of structural parameter of intact loess under different confining pressures($w=17.8\%$)

图 6 原状黄土不同围压下结构性参数曲线($w=26.0\%$)Fig.6 Curves of structural parameter of intact loess under different confining pressures($w=26.0\%$)图 7 人工结构性黄土不同围压下结构性参数曲线(水泥 0.5%, $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$, $w=17.8\%$)Fig.7 Curves of structural parameter of men-made structure loess under different confining pressures (cement 0.5%, $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$, $w=17.8\%$)图 8 人工结构性黄土不同围压下结构性参数曲线(水泥 1.0%, $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$, $w=17.8\%$)Fig.8 Curves of structural parameter of men-made structure loess under different confining pressure (cement 1.0%, $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$, $w=17.8\%$)图 9 人工结构性黄土不同围压下结构性参数曲线(水泥 1.5%, $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$, $w=17.8\%$)Fig.9 Curves of structural parameter of men-made structure loess under different confining pressure (cement 1.5%, $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$, $w=17.8\%$)

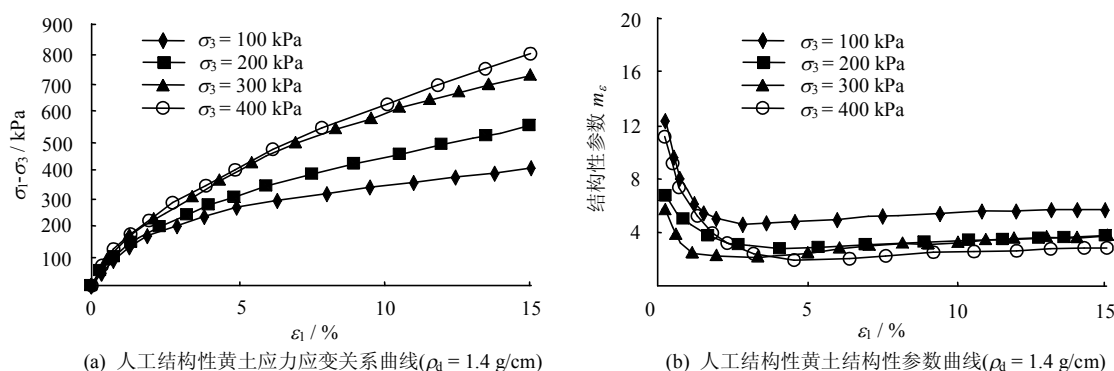


图 10 人工结构性黄土不同围压下结构性参数曲线($\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3, w=17.8 \%$, 水泥 1.0 %)

Fig.10 Curves of structural parameter of men-made structure loess under different confining pressure ($\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3, w=17.8 \%$, cement 1.0 %)

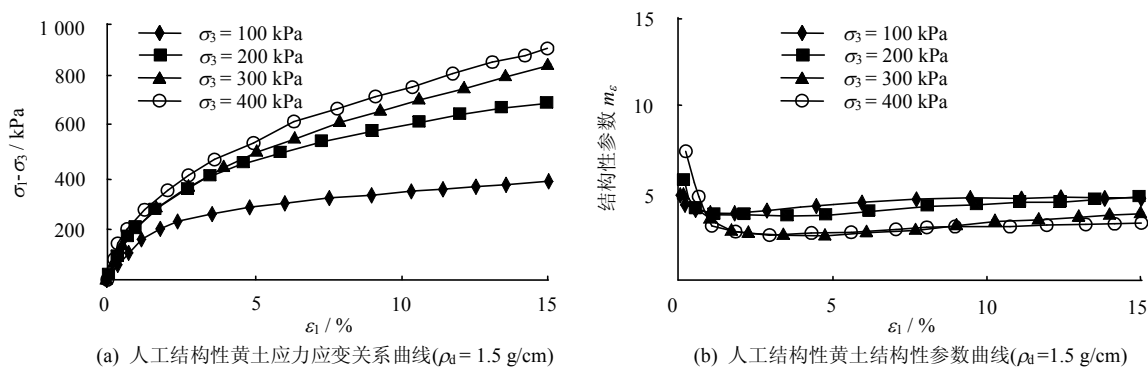


图 11 杨凌人工结构性黄土不同围压下结构性参数曲线($\rho_d=1.50 \text{ g/cm}^3, w=17.8 \%$, 水泥 1.0 %)

Fig.11 Curves of structural parameter of men-made structure loess under different confining pressure ($\rho_d=1.50 \text{ g/cm}^3, w=17.8 \%$, cement 1.0 %)

型曲线的规律性。而且,这种应变综合结构势参数与文献[5,7]应力综合结构势参数对同一影响因素的变化趋势基本相同,即表现为随含水率增大,土结构性参数减小;随围压增大,土结构性参数减小;随水泥含量增加,土结构性参数增大;随密度增大,土结构性参数降低。良好的规律性说明:用应变综合结构势参数描述三轴应力状态下的土体结构变化特性是可行的。

5 结 论

(1) 应变综合结构势作为一种新的土结构性参数,更适合描述在三轴复杂应力状态下土体结构性的变化和发展,可以合理解释土体在三轴剪切试验条件下土结构性参数曲线所表现出的基本特征;

(2) 应变综合结构势参数与应力综合结构势

参数对同一影响因素的变化趋势基本相同,表现为随含水率、围压增大,土结构性参数减小;随水泥含量增加,土结构性参数增大;随密度增大,土结构性参数降低。这也说明,土的强度和变形是由共同的结构因素所控制,用应变综合结构势参数描述三轴应力状态下的土体结构变化特性是可行的。

参 考 文 献

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
- [2] 高国瑞. 黄土显微结构分析及其在工程勘察中的应用[J]. 工程勘察, 1980, (6): 25—28.
- [3] 胡瑞林, 李向全, 官国琳等. 黏性土微结构定量模型及

- 其工程性质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [4] Tovey N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric[J]. *Journal of Microscopy*, 1992, 120: 303—315.
- [5] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系[J]. *水利学报*, 1999, (10): 1—6
- [6] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23 (24): 4 248—4 251.
- [7] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 非饱和黄土的结构变化特性[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2004, 32(8): 112—118.