

非饱和黄土结构性参数与其强度指标关系初探

骆亚生, 胡仲有, 张爱军

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 在非饱和黄土结构性前期研究成果的基础上, 初步探索了结构性参数与强度指标之间的联系规律以及如何利用结构性参数求取土体不同结构状态下的强度指标等问题。分析表明, 结构性参数与强度指标之间存在良好的内在联系; 所定义的非饱和黄土结构性参数比与土结构性的影响因素之间关系密切; 通过反映土结构性各因素综合影响的定量指标——综合结构状态量, 结合原状黄土天然含水率下的强度指标, 可以在较大范围求出给定结构状态下非饱和黄土的强度指标。

关 键 词: 非饱和黄土; 结构性参数; 强度指标; 综合结构状态量

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Regularity of relation between structural parameter and strength indexes of unsaturated loess

LUO Ya-sheng, HU Zhong-you, ZHANG Ai-jun

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

Abstract: Based on authors' previous research achievements of structural characteristics of unsaturated loess, the regularity of relation between structural parameter and strength indexes is explored; and the question how to use structural parameter to ascertain the strength indexes of soils under different structural states is discussed too. The research indicates that the structural parameter is a corking criterion to confirm the strength indexes of soils and further expresses the internal contact with both; and there also has a very consanguineous relation between the ratio of structural parameter of unsaturated loess and influence factors of structural characteristics of soils; using the quantitative index which reflects the synthetical effect of different factors on structural characteristics of soils, named value of synthetical structural state, and considering the strength indexes of intact loess under natural water content, the strength indexes of unsaturated loess under discrecional structural state can be calculated.

Key words: unsaturated loess; structural parameter; strength index; value of synthetical structural state

1 引 言

土的结构性是影响土力学特性诸要素中一个最为重要和本质的一个因素, 土结构性模型的研究更是被称为“21 世纪土力学的核心问题”^[1]。近年来, 对土结构性研究再次引起了人们的广泛关注, 不少学者对土结构性参数或考虑结构性影响的土本构关系进行了研究和探索^[2-6]。黄土以其大孔隙、欠固结、强胶结的特殊结构以及对水的特殊敏感性, 一直以来是土结构性研究的主要对象, 笔者以黄土在不同湿度、密度状态下进行的大量试验为基础, 对

非饱和黄土的结构性做了一些研究和探索^[7-9]。文献[7]建议了一种可直接用于复杂应力条件的土结构性参数——应变型综合结构势 m_e , 文献[8]基于应变型综合结构势概念, 分析和建立了三轴应力状态下非饱和黄土的结构性本构关系, 作为对复杂应力条件下土结构性本构关系研究的一种探索。

文献[8]中所述的结构性本构模型所包含的有关参数, 具有与邓肯-张模型相同的形式, 在模型中也具有相同或类似的地位和作用, 但它们与邓肯-张模型中的相应参数具有原则性的不同, 是在考虑结构性的前提下对土体本构关系进行描述的几何

信息，它们代表了所研究土体在结构性域内力与变形之间的关系。同样，本构关系中的结构性强度指标 c_s 和 ϕ_s 并不等同于常规意义上的强度指标，不能直接用来进行强度或稳定分析。本文初步探索结构性参数与强度指标之间的联系规律，以及如何利用结构性参数求取土体不同状态下的强度指标等问题，试图在黄土结构性研究和实际工程应用之间建立关联。

2 应变综合结构势 m_e 的定义^[7]

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-应变关系曲线如图 1 所示，据此将应变综合结构势参数 m_e 如下定义。

假设在某一应变下原状土的剪切应力为 q_0 ，饱和土的剪切应力为 q_s ，重塑土的剪切应力为 q_r ，则 q_0 与 q_s 之间的差别是由于加水饱和导致土的结构性破坏后所引起的强度损失，它主要反映土的排列特征，以 m_1 表示。 q_0 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，以 m_2 表示。可以定义出应变综合结构势（针对不同应变的结构性参数）为

$$m_e = \frac{m_1}{m_2} = \frac{q_0/q_s}{q_r/q_0} = \frac{q_0^2}{q_r q_s} \tag{1}$$

从式（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 的变化均能敏感的反映在这个土结构性参数的变化上。

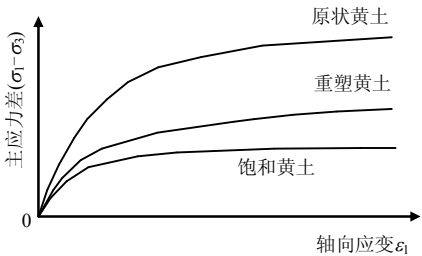


图 1 三轴试验时原状土、饱和土和重塑土的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of intact, saturated and remolded soils under triaxial test

3 结构性参数比与结构性影响因素的关系

表 1 为文献[9]中不同结构状态的非饱和黄土在达到破坏应变时各围压下的结构性参数值的统计结果。表中结构性参数比是以原状黄土天然含水率（ $\rho_d=1.26\text{ g/cm}^3$ ， $w=17.8\%$ ）下的结构性参数为基准，在不同围压下的不同结构状态非饱和黄土参数。平均参数比为其在各围压下的平均值。依据表 1 可以做出平均结构性参数比对应于含水率、水泥含量和干密度的关系曲线见图 2~4，可以得到相应的关系式(2)~(4)（下文中提到结构性参数比均指平均结构性结构比）。

表 1 非饱和黄土破坏应变下结构性参数及其结构性参数比
Table 1 Structural parameter and structural parameter ratio at failure strain state of unsaturated loess

黄土类型	干密度 /(g/cm ³)	水泥含量 / %	含水率 / %	不同围压 σ_3 (kPa)破坏应变下结构性参数及其结构性参数比								平均参数比	
				100		200		300		400			
				m_e	m_e/m_{e0}	m_e	m_e/m_{e0}	m_e	m_e/m_{e0}	m_e	m_e/m_{e0}		
原状	1.26	0	5.0	5.68	1.114	5.79	1.949	5.27	1.909	4.78	1.726	1.675	
			12.0	5.49	1.076	4.68	1.576	4.47	1.620	3.78	1.365	1.409	
			17.8	5.10	1.000	2.97	1.000	2.76	1.000	2.77	1.000	1.000	
			26.0	3.44	0.675	1.97	0.663	2.19	0.793	2.29	0.827	0.740	
人工结构性	1.26	0.5		5.07	0.994	2.94	0.990	2.71	0.982	2.91	1.051	1.004	
		1.0	17.8	5.10	1.000	2.99	1.007	2.79	1.011	3.07	1.108	1.031	
		1.5		5.43	1.065	3.51	1.182	3.09	1.120	2.91	1.051	1.104	
		1.40	1.0	17.8	5.67	1.112	3.71	1.249	3.52	1.275	2.96	1.069	1.176
		1.50	1.0	17.8	4.89	0.959	4.71	1.586	3.79	1.373	3.30	1.191	1.277

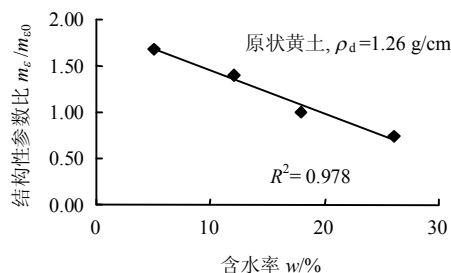


图2 含水率与结构性参数比关系

Fig.2 Relation of water content and ratio of structural parameter

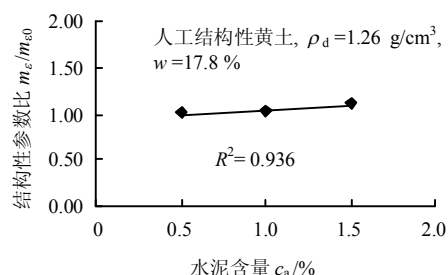


图3 水泥含量与结构性参数比关系

Fig.3 Relation of cement content and ratio of structural parameter

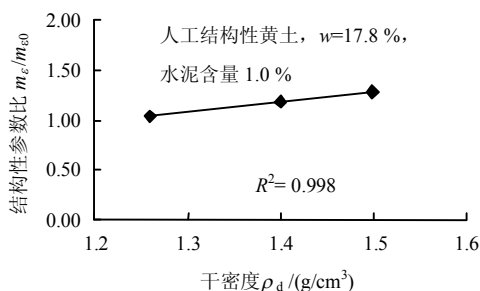


图4 干密度与结构性参数比关系

Fig.4 Relation of dry density and ratio of structural parameter

由以上各图可得含水率与结构性参数比的关系式为

$$m_e/m_{e0} = -0.0463w + 1.9095 \quad (2)$$

水泥含量与结构性参数比的关系式为

$$m_e/m_{e0} = 0.1c_a + 0.9465 \quad (3)$$

干密度与结构性参数比的关系式为

$$m_e/m_{e0} = 1.0249\rho_d - 0.2595 \quad (4)$$

4 结构性参数比与强度指标的关系

表2为文献[9]中不同结构状态的非饱和黄土三轴试验强度指标的统计结果。表中后半部分为以原状黄土天然含水率 ($\rho_d = 1.26 \text{ g/cm}^3$, $w = 17.8\%$)

下的强度指标 ($c = 57.24 \text{ kPa}$, $\phi = 23.51^\circ$) 为基准, 对不同结构状态非饱和黄土所求得的强度指标比值。从表2可以看出, 试验直接得到的强度指标只是在统计意义上符合已有的常识性规律, 黏聚力数值之间存在很大离差, 不符合黏土黏聚力消长的一般规律, 带来了实际应用中的不确定性, 但通过对比可以明显看出, 表1中结构性参数比与表2中的内摩擦角正切比值上非常接近, 规律上完全相同。将表1中结构性参数比与表2中的两类强度指标比分别建立关系如图5、6所示, 并由此得出它们之间的关系表达式(5)和式(6)。

表2 非饱和黄土强度指标的试验结果及其强度指标比
Table2 Results of strength index test and strength index ratio of unsaturated loess

黄土类型	干密度 $\rho_d / (\text{g/cm}^3)$	水泥含量 $c_a / \%$	含水率 $w / \%$	强度指标 (试验值)		强度指标比 (试验值)	
				c / kPa	$\phi / (^\circ)$	c/c_0	$\tan\phi/\tan\phi_0$
原状	1.26	0	5.0	59.48	34.97	1.039	1.608
			12.0	70.86	29.81	1.238	1.317
			17.8	57.24	23.51	1.000	1.000
			26.0	16.57	23.72	0.289	1.010
			0.5	52.47	24.19	0.917	1.033
人工结构性	1.26	1.0	17.8	49.81	25.06	0.870	1.075
		1.5		62.90	24.22	1.099	1.034
		1.40	17.8	88.59	24.10	1.548	1.028
		1.50	17.8	79.07	27.92	1.381	1.218

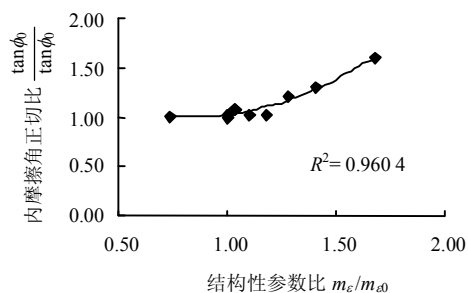


图5 结构性参数比与内摩擦角正切比关系

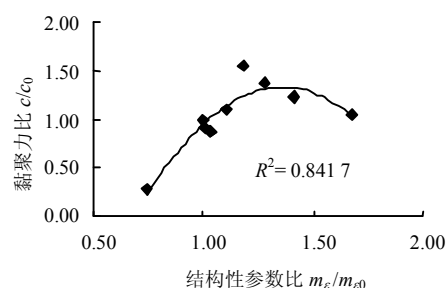
Fig.5 Relation between m_e/m_{e0} and $\tan\phi/\tan\phi_0$ 

图6 结构性参数比与黏聚力比关系

Fig.6 Relation between m_e/m_{e0} and c/c_0

由以上两图得到结构性参数比与内摩擦角正切比关系为

$$\frac{\tan \phi}{\tan \phi_0} = 0.864 2 \left(\frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} \right)^2 - 1.434 5 \frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} + 1.597 5 \quad (5)$$

结构性参数比与黏聚力比关系为

$$\frac{c}{c_0} = -2.883 9 \left(\frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} \right)^2 + 7.846 7 \frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} - 4.004 8 \quad (6)$$

表 3 为文献[9]中不同结构性的非饱和黄土按其

结构状态特征,由式(2)~(4)分别整理出相应的结构性参数比后,代入式(5)、(6)求得对应的强度指标比,再以原状黄土天然含水率 ($\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$, $w=17.8 \%$) 下的强度指标 ($c=57.24 \text{ kPa}$, $\phi=23.51^\circ$) 为基准,求得的强度指标。图 7~9 分别为非饱和黄土在不同含水率、不同水泥含量和不同干密度下强度指标的试验值与计算值的对比情况。通过对比可以看出计算得到的强度指标可以反映试验结果的真实性。

表 3 非饱和土强度指标的公式计算结果

Table 3 Formula result of strength index of unsaturated loess

黄土类型	干密度 /(g/cm ³)	水泥含量 /%	含水率 /%	结构性参数比 (计算值)	强度指标比 (计算值)		强度指标 (计算值)	
					c/c_0	$\tan \phi / \tan \phi_0$	c/kPa	$\phi / (^\circ)$
原状	1.26	0	5.0	1.678 0	1.041 8	1.623 7	59.63	35.24
			12.00	1.353 9	1.332 5	1.239 4	76.27	28.33
			17.80	1.085 4	1.114 5	1.058 6	63.79	24.73
			26.00	0.705 7	0.096 3	1.015 6	5.520	23.84
		0.5		0.996 5	0.950 7	1.026 2	54.42	24.06
人工结构性	1.26	1.0	17.80	1.046 5	1.048 4	1.042 7	60.01	24.40
		1.5		1.096 5	1.131 8	1.063 6	64.78	24.83
		1.0	17.80	1.175 4	1.233 9	1.105 3	70.63	25.68
		1.50	17.80	1.277 9	1.313 0	1.175 6	75.16	27.09

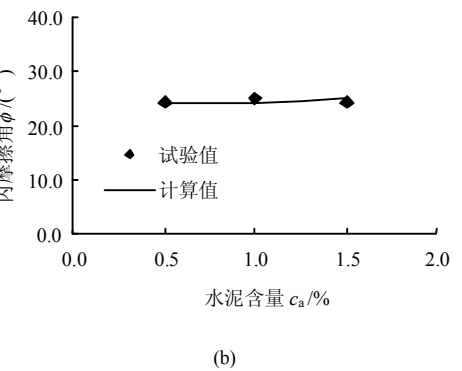
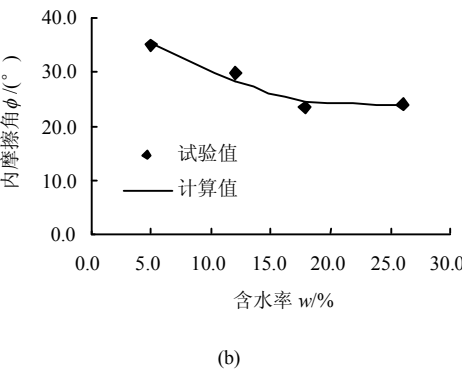
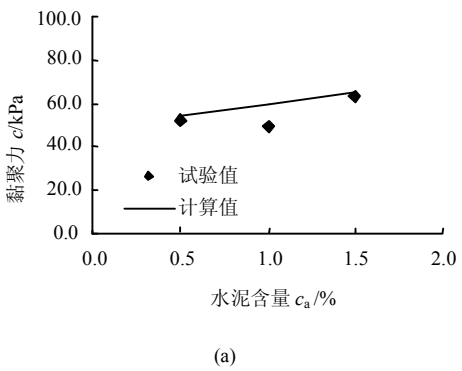
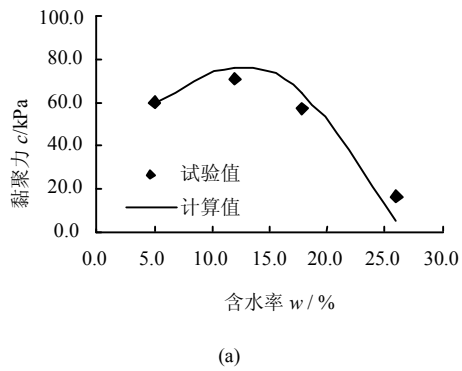
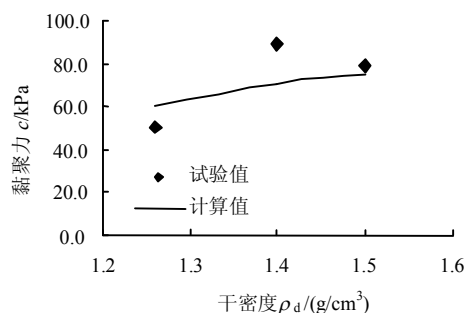
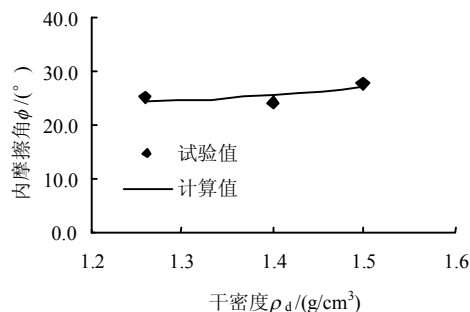


图 7 不同含水率下强度指标试验值与计算值 (原状黄土, $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$)
Fig.7 Test value and calculation value of strength indexes of loess under different water content (intact loess, $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$)

图 8 不同水泥含量下强度指标试验值与计算值 (人工结构性黄土, $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$, $w=17.8 \%$)
Fig.8 Test value and calculation value of strength indexes of loess under different cement content (manmade structural loess, $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$, $w=17.8 \%$)



(a)



(b)

图9 不同干密度下强度指标试验值与计算值(人工结构性黄土, $w=17.8\%$, 水泥含量为 1.0%)

Fig.9 Test values and calculation values of strength indexes of loess under different dry densities

5 综合结构状态量及其应用

显而易见, 本文所得到的有关结构性参数比的公式对结构性状态在文献[9]所列试验范围内的所有结构性土都是适用的, 即原状黄土, 含水率范围为 $5\% \sim 26\%$; 人工结构性黄土 $w=17.8\%$ 、 $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$; 水泥含量范围为 $0.5\% \sim 1.5\%$ 和 $w=17.8\%$ 、水泥含量为 1.0% 、干密度为 $1.26 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$ 。为了在更大范围内建立非饱和黄土结构状态与其结构性参数比的关系, 可以假定人工结构性黄土在含水率、水泥含量和密度两两确定的情况下, 结构性参数比与含水率、水泥含量和干密度的关系仍用式(2)~(4)表示, 则可得到受含水率、水泥含量和干密度综合影响的结构性参数比公式。如果将含水率、水泥含量和干密度的综合影响称为非饱和黄土的综合结构状态量, 则由含水率与结构性参数比负相关, 水泥含量及干密度与结构性参数比正相关, 并考虑到原状黄土因素, 构造出综合结构状态变量见式(7), 并用 P_{cs} 来表示, 结构性参数比与综合结构状态量 P_{cs} 的关系如图10所示。由图10可得到它们之间的关系用式(8)表示。

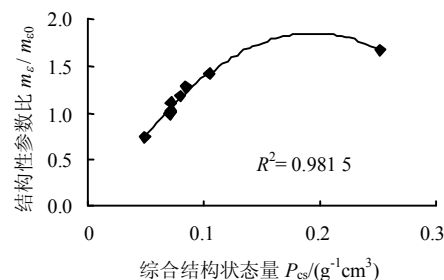


图10 结构性参数比与综合结构状态量关系

Fig.10 Relation between $m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ and P_{cs}

综合结构状态量:

$$P_{cs} = \rho_d \frac{100 + c_a}{100} \frac{1}{w} \quad (7)$$

式中: ρ_d 为干密度 (g/cm^3); c_a 为水泥含量(%); w 为含水率(%)。

结构性参数比与综合结构状态量 P_{cs} 的关系:

$$m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0} = -53.059P_{cs}^2 + 20.599P_{cs} - 0.1471 \quad (8)$$

由式(7)、(8)及由任一含水率、水泥含量和干密度下非饱和黄土的综合结构状态量, 求出其结构性参数比, 进而根据式(5)、(6)并结合原状黄土天然含水率下的强度指标, 求出给定结构状态下非饱和黄土的强度指标。

6 结 语

通过对非饱和黄土结构性参数与强度指标的对比分析, 初步探索了它们之间的联系规律以及用结构性参数求取土体不同状态下的强度指标等问题。分析表明, 非饱和黄土结构性参数比与土结构性的影响因素之间关系密切; 结构性参数与强度指标之间有良好的内在联系, 体现在对应于同一结构性黄土, 结构性参数比与该土样的内摩擦角正切比值上非常接近, 规律上完全相同。不同结构性的非饱和黄土按其结构状态特征分别整理出相应的结构性参数比后, 可以直接求得强度指标; 非饱和黄土的综合结构状态量与对应的结构性参数比有良好的统计规律, 可以反映土结构性各影响因素的综合影响, 由任一含水率、水泥含量和干密度下非饱和黄土的综合结构状态量求出其结构性参数比, 能够求出任意给定结构状态下非饱和黄土的强度指标。

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.
SHEN Zhu-jiang. Mathematics model of soils structure

- The key issue of 21st soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [2] 熊传祥, 龚晓南. 一种改进的软土结构性弹塑性损伤模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 395—397.
XIONG Chuan-xiang, GONG Xiao-nan. An updated elastoplastic damage model for structural soft-clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 395—397.
- [3] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35—40.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. Constitutive relation considered the soils structure[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 35—40.
- [4] 沈珠江. 结构性黏土的堆砌模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 1—4.
ZHEN Zhu-jiang. A masonry model for structural clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 1—4.
- [5] 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. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1891—1896.
- [6] 王立忠, 赵志远, 李玲玲. 考虑结构性的修正邓肯-张模型[J]. 水利学报, 2004, (1): 83—89.
WANG Li-zhong, ZHAO Zhi-yuan, LI Ling-ling. Non-linear elastic model considering soil structural damage[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (1): 83—89.
- [7] 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): 4248—4251.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(24): 4248—4251.
- [8] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构性本构关系[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, (5): 14—18.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi. Structural constitutive relation of soil under complex stress conditions[J]. **Journal of Sichuan University**, 2005, 37(5): 14—18.
- [9] 骆亚生. 非饱和黄土在动静复杂应力条件下的结构变化特性及结构性本构关系研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [19] KATSUNORI Nagano. Energy pile system in new building of Sapporo City University[C]// Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, H. O. Paksoy (ed.), Springer Netherlands: [s. n.], 2007: 245—253.
- [20] 张钦, 袁东立, 程洪涛. 南京朗诗 B1 地块 1~6 号楼地源热泵系统设计[J]. 中国建设信息供热制冷, 2007, (5): 35—37.
ZHANG Qin, YUAN Dong-li, CHENG Hong-tao. Design of ground source heat pump air conditioning system for Nanjing Landsea 1-6[J]. **China Construction Heating & Refrigeration**, 2007, (5): 35—37.
- [21] 仲智, 唐志伟. 桩埋管地源热泵系统及其应用[J]. 可再生能源, 2007, 25(2): 94—96.
ZHONG Zhi, TANG Zhi-wei. Energy pile geothermal heat pump system and its application[J]. **Renewable Energy Resources**, 2007, 25(2): 94—96.
- [22] 付祥钊. 夏热冬冷地区建筑节能技术分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [23] CEKEREVAC C, LALLOUI L. Experimental study of the thermal effects on the mechanical behaviour of a clay[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28: 209—228.
- [24] LALLOUI L, CEKERVAC C, VULLIET L. Non-isothermal modeling of the cyclic mechanical behavior of MC clay[C]//Proceedings of the 11th International Conference of IACMAG Torino: [s. n.], 2005: 377—384.
- [25] LALLOUI L, CEKEREVAC C. Thermo-plasticity of clays: an isotropic yield mechanism[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(8): 649—660.
- [26] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

上接第 937 页