

高应力水平下深部黏土力学特性微观分析

商翔宇^{1,2}, 余海岁^{1,3}, 周国庆¹, 王飞², 陆勇²

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 英国诺丁汉大学土木工程学院岩土力学中心, 英国)

摘要: 深部黏土在不同应力水平作用下会表现出不同的力学特性, 已有试验结果表明高应力水平下正常固结饱和深部黏土的压缩指数和内摩擦角均小于中常压下相应值。为揭示深部黏土力学性质发生上述变化的内在机理, 首先利用现有基于双电层理论推算高压黏土压缩曲线的计算方法对试验结果进行验证计算, 发现其低估了深部黏土在高压下的压缩性, 分析表明原有的两黏土薄片中心无量纲势函数与黏土薄片无量纲距离参数的对数假设关系存在不合理之处, 利用新提出的假设以及相应的计算方法获得的预测计算结果能够很好地与试验结果相吻合。然后利用弹性黏着摩擦理论对内摩擦角随应力水平变化进行了计算分析, 结果表明在 0.2 MPa 作用下土的摩擦系数是 1.6 MPa 相应值的 2 倍, 与实测结果基本一致。

关键词: 深部黏土; 高应力水平; 力学特性; 微观分析

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)02-0363-06

作者简介: 商翔宇(1977-), 男, 河南汝阳人, 博士, 副教授, 主要从事深土力学、深部岩土工程等方面的研究与教学工作。E-mail: xyshang@126.com。

Micro analysis of mechanical characteristics of deep clay under high stress level

SHANG Xiang-yu^{1,2}, YU Hai-sui^{1,3}, ZHOU Guo-qing¹, WANG Fei², LU Yong²

(1. State Key Lab for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Nottingham Centre for Geomechanics, School of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK)

Abstract: The deep clay exhibits different mechanical properties under different stress levels. The available test results show that the compression index and internal friction angle of normally consolidated saturated deep clay at high pressure are lower than those at medium and low pressures. In order to reveal the intrinsic mechanism of the clay for the above mechanical change, the $e-p$ curve of the clay at high pressure is firstly compared with that calculated by the existing method which can predict the $e-p$ relationship at large pressure by use of the parameters obtained from experimental $e-p$ data at low pressure based on the diffuse double-layer theory. It is seen that the calculated results underestimates the compression of the deep clay at high pressure. Unreasonable hypothesis that there is a logarithm relationship between the dimensionless potential function at the midpoint of two clay platelets and dimensionless distance function is discovered. The improved hypothesis and the relevant procedure are proposed. There is quite good agreement between the calculated and experimental $e-p$ relationships at large pressure. And then, based on the elastic adhesive friction theory, the calculated results show that the friction coefficient of the clay at 0.2 MPa is 2 times the one at 1.6 MPa, which is almost consistent to the measured one.

Key words: deep clay; high stress level; mechanical property; micro analysis

0 引言

随着经济迅速发展, 地下工程朝更深方向发展, 要保证施工过程的安全, 必须对包括黏土在内的深部工程土层的力学性质有较好把握。

随着研究土层深度增加, 土层所受应力水平不断增大, 相应土的力学性质会发生不可忽略的变化^[1-2]。现有土力学试验仪器、方法及理论大多是以一般建筑

地基所遇到的常规应力水平土层力学性质研究为参照, 难以满足地下工程不断向地层深处发展趋势的要

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009136); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDE08006X); 江苏自然科学基金项目(BK2011212)

收稿日期: 2011-01-13

求^[2-4]。目前已有关于高应力水平下黏土力学性质的研究^[4-8]，这些研究主要从试验角度揭示了黏土在高应力水平下具有的特性，但从微观层次上对其进行定量分析研究尚不多见。事实上，从微观层次研究黏土在高应力水平下的力学特性对于系统深入研究其宏观力学性质是十分必要的。

笔者前期通过对不同应力水平下的深部饱和和重塑黏土展开了系统的直接剪切试验和三轴试验研究^[9]，发现其压缩变形参数、抗剪强度参数均随压应力水平增大而变化；高压下饱和和黏土压缩指数和内摩擦角均小于中常压下相应值，且压缩曲线和抗剪强度包络线皆可用交汇点在 1.6 MPa 左右的双折线拟合。具体而言中常压下（小于 1.6 MPa）压缩指数平均值是高压（大于 1.6 MPa）对应值的 1.14 倍；而中常压下内摩擦角正切值是高压对应值的 2.03 倍。

针对上述试验结论，本文拟从微观理论出发进行定量分析，一方面对上述试验结论进行基础物理理论验证，另一方面则可以揭示深部黏土随应力水平增大力学性质发生变化的内在机理。本文研究将为进一步深入揭示黏土在高压下的复杂力学特性奠定基础。

1 高应力下黏土压缩曲线微观分析

1.1 基于现有理论的分析

双电层理论是目前公认的能够合理定量描述黏土颗粒之间及其与孔隙水之间相互作用的微观分析工具^[10]。最早的双电层理论仅考虑单个黏土颗粒，后来其被拓展至适用于多个土颗粒双电层相互作用的情况，其应用范围变得十分广泛^[11-12]，可用于机理解释直至工程应用。

Snehasis 等^[12]利用上述双电层理论，提出了由低压下测定的一些物理参数可以推导出合乎实际的高压下土压缩曲线方程的方法。

首先简要介绍利用双电层理论推求压缩曲线方程的步骤，其所需方程为

$$p' = 2n_0kT(\cosh u - 1), \quad (1)$$

$$K = \left(\frac{2n_0E^2v^2}{\varepsilon_0DkT} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$e = 10^{-6}G\gamma_w Sd, \quad (3)$$

式(1)为双电层斥力表达式，由于双电层斥力与外部施加的有效应力数值相等，因此直接采用有效应力指标 p' (N/m²)。式(1)~(3)中其它各量： n_0 是黏性土粒周围流体的离子浓度(ions/m³)； k 是 Boltzmann 常数，即 1.38×10^{-23} J/K； T 是 kelvin 温度(K)； K 是双电层参数，其导数可以看作是双电层厚度，即扩散电荷重心与黏性土颗粒表面的距离(1/m)； E 是单位

电荷，即 1.602×10^{-19} C(库仑)； v 是可交换阳离子的化合价位； ε_0 是真空的电容率，即 8.8542×10^{-12} C²/J/m； D 是黏性土颗粒周围流体的介电常数，对于水为 80.4； e 是土样孔隙比； G 是土颗粒比重； γ_w 是水的密度(Mg/m³)； S 是土颗粒比表面积(m²/g)； d 是两黏土片间距之半(m)； u 则是与距离无量纲参数团 Kd 相关的计算参数。

对于给定黏土矿物和孔隙流体性质，可以由试验确定 u 和 Kd 之间的关系，Snehasis 等^[12]研究认为两者之间有如下关系：

$$u = A \lg(Kd) + C, \quad (4)$$

式中， A ， C 为待定参数。

文献[12]研究表明式(4)在压力从数十千帕到数十兆帕之间均适用，且 A ， C 为不变常数；基于此关系式，首先由 p' 求出 u ，然后由该关系式由 u 查出相应 Kd ；而根据已知黏土矿物和孔隙流体物理性质参数，可以求出 K ，因此可以求出 d ；最后可由 d 求出孔隙比 e 。

以下以最大固结压力为 15 MPa 的正常固结饱和和深部黏土压缩试验数据^[9]进行分析。首先根据实测 $e - p'$ 数据求出 u 和 Kd 之间关系。根据本文前期进行的矿物成份分析实测数据，及对试验所用黏土进行的压汞试验结果^[9]，取土粒比表面积为 120 m²/g，可交换阳离子化合价位取为 2.2，黏性土粒周围流体的离子浓度 n_0 取为 6.02×10^{22} ions/m³，开尔文温度取常温为 298 K，其它参数取值与上文相同。按照前文所述步骤，由实测孔隙比求取 d ，由有效应力 p' 求取 u 。以小于 1.6 MPa 测得的 $e - p'$ 曲线试验数据进行计算，所求 u 和 Kd 之间关系见图 1，为计算方便本文利用自然对数代替上述文献中所用以 10 为底的对数。

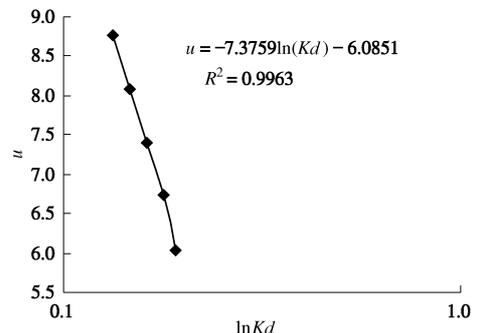


图 1 无量纲参数 u 和 Kd 关系曲线

Fig. 1 Relation between u and Kd

将式(4)中以 10 为底的对数替换为自然对数表述，联立式(1)~(4)消去 u 和 Kd ，可以得到 $e - p'$ 压缩方程：

$$e = G\gamma_w S \left(\frac{2n_0E^2v^2}{\varepsilon_0DkT} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{C}{A}\right).$$

$$\exp\left(\frac{1}{A} \operatorname{arccosh}\left(\frac{p'}{2n_0 kT} + 1\right)\right) \times 10^6 \quad (5)$$

将相应已知参数代入式 (5), 并以 $\lg p'$ 为横轴、以 e 为纵轴绘制该方程曲线见图 2。

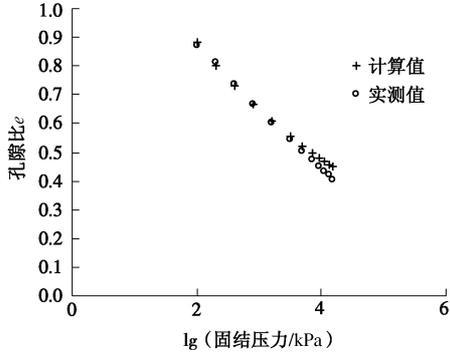


图 2 按现有双电层理论计算压缩曲线与实测压缩曲线对比
Fig. 2 Comparison between compression curves based on existing double-layer theory and measured ones

由图 2 可以看出, 压缩曲线随围压的变化趋势可利用上述模型基本进行比较合乎实际的描述。但在应力较大时两者之间误差有增大趋势, 计算孔隙比值大于实测值, 换言之, 微观计算值低估了土在高压下的压缩性。

1.2 改进的分析方法

实际上, u 是两黏土薄片距离中点处的无量纲势函数^[10-11]:

$$u = \frac{vE\Psi_c}{kT} \quad (6)$$

式中, Ψ_c 系上述中点处的电势, 可由两个泊松 - 玻尔兹曼方程 (7) 解进行叠加得到

$$\frac{d^2\Psi_i}{dx^2} = \frac{2n_0 vE}{\epsilon_0} \sinh \frac{vE}{kT} \quad (i=1,2) \quad (7)$$

即 $\Psi_c = \Psi_1 + \Psi_2$ 。由式 (7) 解的理论可知, Ψ_c 将随两黏土薄片间距减小而增大, 其规律大致可以用对数函数表述, 这是试验获得的 u 和 Kd 之间关系为对数关系的内在原因。

式 (7) 的一级近似解为^[13]

$$\frac{\frac{vE\Psi}{2kT}}{\frac{vE\Psi}{2kT} + 2} = \eta_0 \exp(-Kx) \quad (8)$$

式中, $\eta_0 = \frac{\exp(\frac{vE\Psi_0}{2kT}) - 1}{\exp(\frac{vE\Psi_0}{2kT}) + 1}$, Ψ_0 是黏土颗粒表面电位,

对于给定黏土种类和孔隙溶液性质 η_0 是常数。

如果电位较低, 满足 $\frac{vE\Psi}{2kT} \ll 2$, 则式 (8) 可以简化为^[13]

$$\frac{vE\Psi}{4kT} = \eta_0 \exp(-Kx) \quad (9)$$

进一步得到两黏土薄片距离中点处的电势为

$$\Psi_c = \frac{8kT}{vE} \eta_0 \exp(-Kd) \quad (10)$$

考虑式 (6), 由式 (10) 可知 u 和 Kd 之间理论关系应为指数函数关系。因此如下对图 1 中所示 u 和 Kd 数据重新利用指数函数进行拟合, 并按照前述相同的方法, 计算高压作用下的压缩曲线。结果见图 3, 4。

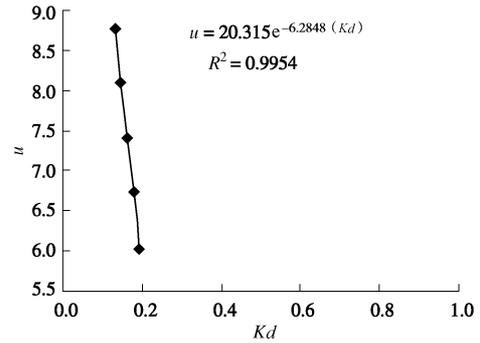


图 3 按指数函数拟合的无量纲参数 u 和 Kd 关系曲线
Fig. 3 Fitting relation between u and Kd according to exponential function

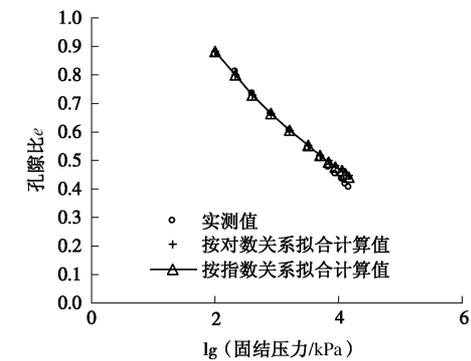


图 4 按不同 $u-Kd$ 关系计算压缩曲线与实测压缩曲线对比
Fig. 4 Comparison between compression curves according to different relationships of $u-Kd$ and measured ones

由图 4 可见, 基于 u 和 Kd 之间关系应为对数函数或指数函数关系假设, 计算出的压缩曲线基本重合, 均低估了黏土在高压作用下压缩性。由此可见上述两种假设可能存在与本试验不符的情况, 譬如由式 (10) 的推导过程可以看到, 其应用条件为 $u \ll 4$ 。如下考虑适当放宽此适用条件。

如果直接利用式 (8), 并考虑到 $\Psi_c = \Psi_1 + \Psi_2$, 则黏土薄片间中点电势为

$$\Psi_c = \frac{8kT}{vE} \frac{\eta_0 \exp(-Kd)}{1 - \eta_0 \exp(-Kd)} \quad (11)$$

对式 (11) 稍作变化可得

$$-Kd = \ln \eta_0 + \ln \left(\frac{vE\Psi_c}{8kT} \right) - \ln \left(\frac{vE\Psi_c}{8kT} + 1 \right) \quad (12)$$

再将式(6)代入式(12),可以进一步得

$$-Kd = \ln \eta_0 + \ln \left(\frac{u}{8} \right) - \ln \left(\frac{u}{8} + 1 \right) \quad (13)$$

当 $u \ll 8$, 即 $\frac{vE\Psi}{2kT} \ll 4$ 时, 式(13)右端第三项可以做一阶泰勒展开如下:

$$-Kd = \ln \eta_0 + \ln u - \ln(u+8) \approx \ln \left(\frac{\eta_0}{8} \right) + \ln u - \frac{u}{8} \quad (14)$$

相比于式(10), 式(13)所表示的 Kd 和 u 之间关系成立的条件 $u \ll 8$ 要比式(10)的 $u \ll 4$ 更宽一些。

直接利用式(14)对试验数据进行非线性拟合较为复杂。本文计算实践表明如下处理方法是一种可行的近似手段。即首先对根据低压下试验数据计算出的 u 和 Kd 分别进行指数拟合和线性拟合如式(15)、(16), 分别见图3, 5。

$$u = A_1 \exp(Kd) \quad (15)$$

$$u = B_1(Kd) + C_1 \quad (16)$$

式中, A_1, B_1, C_1 为待定参数。

然后由式(15)、(16), 分别用 u 显式表达 Kd , 并根据已知 K 进一步求出 d ; 最后以两种方法求出的 d 平均值作为黏土薄片间距为

$$Kd = \frac{1}{2} \left[\ln u + \frac{u}{B_1} - \left(\frac{C_1}{B_1} + \ln A_1 \right) \right] \quad (17)$$

对比式(17)、(14)可见, 这里的近似方法得出的 Kd 和 u 之间关系是一致的, 因此在电势更高条件下成立。将式(17)代入式(3)即可以求出孔隙比 e , 然后按照前述相同的步骤, 可以求出高压下作用孔隙比随固结压力的变化曲线。对上述试验数据进行重新计算, 结果见图6。

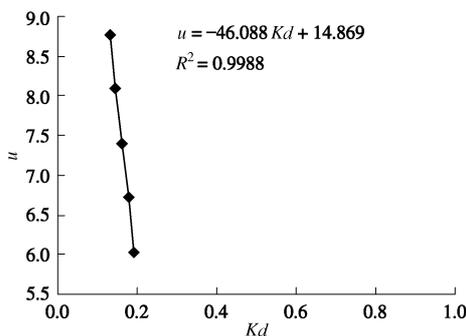


图5 按线性函数拟合的无量纲参数 u 和 Kd 关系曲线

Fig. 5 Fitting relation between u and Kd according to linear function

将图6新计算结果与按原方案计算结果曲线图4进行对比, 可以看到改进后的计算值能很好地与实测值吻合。以上分析说明黏土薄片间距、层间斥力以及相应薄片间离子电势均会随压力变化而变化, 而这些变化可以由基本物理化学规律决定, 变化过程是一种

耦合变化的物理化学过程, 而上述基于双电层理论的计算方法可以较好地描述这一过程。

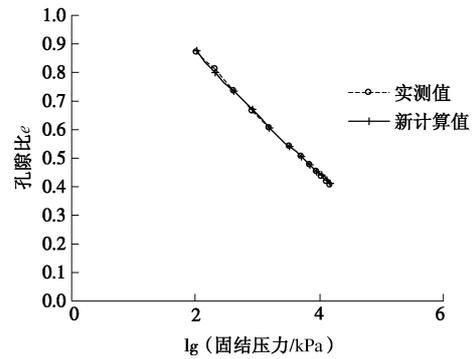


图6 改进计算压缩曲线与实测压缩曲线对比

Fig. 6 Comparison between compression curves based on modified calculation and measured ones

2 高应力下黏土内摩擦角减小的微观分析

黏着摩擦理论可以用来对摩擦系数随压力增大而变化的现象进行理论分析, 该理论的基础假设是由太沙基提出, 即认为实际的接触面积为

$$A_c = \frac{N}{\sigma_y} \quad (18)$$

而接触能抵抗的最大剪切力为

$$T = A_c \tau_s \quad (19)$$

摩擦系数为

$$u = \frac{T}{N} = \frac{\tau_s}{\sigma_y} \quad (20)$$

式中, σ_y 为材料的屈服强度, τ_s 为屈服区域材料的剪切强度。

笔者先期进行的压汞试验结果表明(见图7), 在试验应力水平范围内黏土孔隙尺寸在 $20 \sim 1800 \text{ nm}$ 内变化^[9], 属于黏着摩擦理论所适用的土体孔隙尺寸范围^[11]。

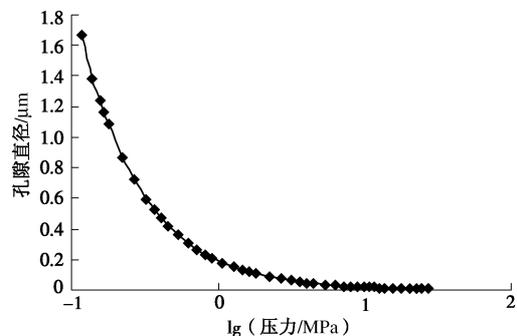


图7 孔隙直径随压力变化曲线

Fig. 7 Variation of pore diameter with pressure

由图7可以看到, 随压力增大黏土孔隙直径逐渐减小。在微观上看, 压力增大的过程伴随着颗粒与颗

粒接触微面上尺寸大致与孔隙直径大小相当的“小山坡”接触尖角被不断压碎, 致使孔隙直径减小、接触面积增大; 因此可以用上述理论对本文试验结果进行分析。

在上述黏着摩擦理论基础上提出的弹性黏着摩擦理论可以用来进行定量分析^[11], 该理论以 Hertz 的弹性接触理论为基础, 并根据上述假设得出摩擦系数公式。首先根据 Hertz 接触理论, 两个半径为 R 的接触光滑球体在法向接触载荷为 N 的时, 将会产生半径为 r 的平面圆形接触区域。

$$r = (\delta NR)^{\frac{1}{3}}, \quad (21)$$

式中, δ 为与材料弹性性质等的函数, 由此可以计算出接触面积为

$$A_c = \frac{\pi}{4} (\delta NR)^{\frac{2}{3}}。 \quad (22)$$

同样有 $T = A_c \tau_s$, 因此摩擦系数为

$$u = \frac{T}{N} = \frac{\pi}{4} \tau_s (\delta R)^{\frac{2}{3}} N^{-\frac{1}{3}}。 \quad (23)$$

如果进一步假设土体全部由大小相同的球体堆积而成, 并且不考虑颗粒尺寸和有效应力对于接触点数目影响, 则有

$$N = 4R^2 \sigma'。 \quad (24)$$

经过同样步骤可以计算出摩擦系数为

$$u = \frac{\pi}{16} \tau_s (4\delta)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sigma'} \right)^{\frac{1}{3}}。 \quad (25)$$

由式(25)可以看到, 摩擦系数与有效法向应力呈反比。如果比较 200 kPa 和 1600 kPa 有效法向应力作用下的摩擦系数, 前者是后者的 2 倍; 而试验结果试验结果表明, 低、高压下获得的摩擦系数之比为 2.03, 并且压力 1600 kPa 左右为高低围压的分界。因此仅就 200 kPa 和 1600 kPa (或 300 kPa 与 2400 kPa) 根据上述理论进行分析, 试验结果与理论分析结果很接近; 但上述公式是基于理想假设得出的, 无法解释实际测试结果反映的摩擦系数为分段性区别的特点。不过如果以 200~300 kPa 作为常压代表值、以 1600~2400 kPa 作为高压代表值, 上述分析是基本可行的。

3 结 论

本文对重塑饱和深部黏土高压下压缩指数和内摩擦角均小于中常压下相应值, 且 1.6 MPa 左右为高压与中常压的分界点的试验结论, 进行了定量微观分析, 获得了如下结论:

(1) 现有利用双电层理论由低压参数推算高压黏土压缩曲线的计算方法低估了深部黏土在高压下的压缩性, 其原因在于 u 为 Kd 的对数函数假设不尽合理。

(2) 通过对双电层理论的分析, 提出若按双电层理论本身给出的近似理论假设, 即 u 为 Kd 的指数函数, 则计算压缩曲线与原基于对数函数假设的计算压缩曲线几乎重合。然后对 u 与 Kd 之间理论关系进行了重新推导, 所推导的公式相比原理论近似公式适当放宽了适用条件。并用改进方法进行了计算, 预测计算结果能够很好地与试验结果相吻合。这说明深部黏土压缩变形的宏观特性实际上由其内在黏土颗粒及水之间相互作用的物理机制所决定, 双电层理论可以用来进行合理解释计算。

(3) 用弹性黏着摩擦理论计算表明, 在 0.2 MPa 作用下土的摩擦系数是 1.6 MPa 相应值的 2 倍; 而实测结果表明以 1.6 MPa 为高低压分界点的不同压力作用下, 中常压下摩擦系数是高压下的 2.03 倍, 两者存在吻合点; 但利用该理论无法对实测高低压下摩擦系数具有分段线性的特点做出合理的解释, 这与该理论进行了大量的假设有关, 另外也与其不能考虑黏土颗粒之间电斥力增大会减小有效应力相关。

参考文献:

- [1] 张永双, 曲永新. 鲁西南地区上第三系硬黏土的工程特性及工程环境效应研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 446 - 449. (ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin. Study on the engineering properties and engineering-environmental effects of Neogene hard clays in south-west of Shandong province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 446 - 449. (in Chinese))
- [2] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论—深土力学[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 123 - 126. (CUI Guang-xin. The basic theory for analyzing loads on underground structure in deep alluvium - mechanics of deep soil[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 123 - 126. (in Chinese))
- [3] 谢定义. 21 世纪土力学的思考[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 111 - 114. (XIE Ding-yi. Perspective to soil mechanics of 21 century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 111 - 114. (in Chinese))
- [4] 马金荣. 深层土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1998. (MA Jin-rong. Study on mechanical properties of deep soil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1998. (in Chinese))
- [5] 李文平, 王维理, 张志勇, 等. 大埋深黏土三轴高压卸载变形与强度特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 307 - 311. (LI Wen-ping, WANG Wei-li, ZHANG Zhi-yong, et al. Study on the characteristics of deformation and strength of a

- deep clay under triaxial high pressure unloading test[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(3): 307 - 311. (in Chinese))
- [6] 许延春. 深部饱和黏土的力学性质特征[J]. 煤炭学报, 2004, **29**(1): 27 - 30. (XU Yan-chun. Mechanics characteristics of deep saturated clay[J]. Journal of China Coal Society, 2004, **29**(1): 27 - 30. (in Chinese))
- [7] 马金荣, 秦勇, 周国庆. 黏土的高压三轴剪切特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, **37**(2): 176 - 179. (MA Jin-rong, QIN Yong, ZHOU Guo-qing. Research on tri-axial shear properties of clay under high pressures[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, **37**(2): 176 - 179. (in Chinese))
- [8] 赵晓东, 周国庆, 王博. 深部重塑土高压应力路径试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, **38**(4): 471 - 475. (ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, WANG Bo. Study of the stress paths tests for the deep reconstituted soils at high pressure[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009, **38**(4): 471 - 475. (in Chinese))
- [9] 商翔宇. 不同应力水平深部黏土力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (SHANG Xiang-yu. Study on mechanical properties of deep soil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))
- [10] IWATA Shingo, TABUCHI Toshio, WARKENTIN P Benno. Soil-water interactions-mechanisms and applications[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1988.
- [11] JAMES K Mitchell, KENICHI Soga. Fundamentals of soil behavior[M]. New Jersey: John wiley & sons, 2005.
- [12] SNEHASIS Tripathy, TOM Schanz. Compressibility behaviour of clays at large pressures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**: 355 - 362
- [13] 胡纪华, 杨兆禧, 郑忠. 胶体与界面化学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1997. (HU Ji-hua, YANG Zhao-xi, ZHENG Zhong. Colloid and interface chemistry[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1997. (in Chinese))

本期广告索引

- 封2 北京金土木软件技术有限公司
 封3 北京理正软件设计研究院有限公司
 封4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插1 常州金土木工程仪器有限公司
 后插2 台州市建元工程勘察仪器有限公司