

深层土侧向应力的试验研究及新认识

王秀艳¹, 唐益群², 臧逸中¹, 陈江¹, 韩双平¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 同济大学地下工程学院, 上海 200092)

摘要: 在不同试验室利用多种试验仪对河北省衡水、黄骅等地区埋深 500 m 以内的多个土样, 进行了静止侧压力系数 K_0 试验。试验结果表明: 土的静止侧压力系数 K_0 并不总为常数, 指出了岩土工程中常用静止侧压力系数公式 $K_0 = \Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1$ 求侧向应力 σ_3 的适用范围与不足, 认为该公式用于垂向应力 σ_1 小于 200 kPa 时浅部土体求得的侧向应力 σ_3 基本适用, 用于垂向应力 σ_1 大于 200 kPa 的深层土求得的侧向应力 σ_3 则存在一定缺陷, 可能引起深部土体工程的不安全隐患或事故。指出了不同类型土的侧向压力 σ_3 与垂向应力 σ_1 存在较好的幂函数相关关系, 说明了对相同土样不同试验方法测试侧向应力 σ_3 也有差异, 总结出正确求得不同深度土体侧向应力 σ_3 的方法。研究成果可为岩土工程施工与研究提供可靠技术参数。

关键词: 深层土; 静止侧压力系数 K_0 ; 试验; 侧向应力 σ_3 ; 垂向应力 σ_1

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2007)03 - 0430 - 06

作者简介: 王秀艳(1965 -), 女, 黑龙江呼兰人, 博士, 研究员, 主要从事环境地质、地质工程等方面研究工作。E-mail: wxiuyan9948@163.com。

Experimental studies and new ideas on the lateral stress in soil

WANG Xiu-yan¹, TANG Yi-qun², ZANG Yi-zhong¹, CHEN Jiang¹, HAN Shuang-ping¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2.

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Soil lateral stress σ_3 or earth pressure at rest P_0 was extensively used in geotechnical engineering designs and calculations. The coefficient of earth pressure at rest k_0 were tested with a large number of samples buried above the depth of 500 m in areas, such as Hengshui, Huanghua of Hebei province etc. by using various instruments in different laboratories. It was shown that k_0 was not always a constant, it was a variable, indicating the deficiency of the formula $K_0 = \Delta\sigma_3 / \Delta\sigma_1$ in calculating σ_3 . This formula was basically applicable to calculate σ_3 when the vertical effective stress σ_1 was less than 200 kPa in shallow soil, but it was defective when σ_1 was larger than 200 kPa, and might cause unsafety and accident when it was used in deep soil. It was found that there was a good power-law relations between σ_3 and σ_1 for different soils, and different experimental methods might acquire different results of σ_3 . Therefore, an improved method was presented to calculate σ_3 , which could provide reliable data for geotechnical engineering construction and research.

Key words: deep soil; coefficient of earth pressure at rest; test; lateral stress; vertical stress

0 引言

土的侧向应力 σ_3 或静止土压力 P_0 是天然土体水平方向所受应力的,是岩土工程中重要的参数之一。广泛应用于基坑、重力式挡土墙、堤坝、矿山、地下空间、土体变形等实际工程设计之中,受到土木工程及岩土工程专家的高度重视,国内外相关学者有过很多研究,取得大量的成果,积累了丰富的经验。从早期的 K_0 理论研究、室内 K_0 固结剪切试验^[1-8]、 K_0 固结三轴试验研究^[9-12]到具体土体工程中的应用^[13-17],其最终目的无一不是模拟天然土体的应力状态,为实际工程提供可信技术参数,使施工工程既安全可靠又节约

成本。以往成果大多是以土体的侧压力系数 K_0 为常数的前提下对浅部土的研究,而深部土体侧向应力 σ_3 或 K_0 研究则不多,有的浅部土的试验结果虽然反映出应力条件对土体 K_0 有影响或提出了 K_0 不归一化或利用现行 K_0 试验方法测试超固结土存在一定缺陷等问题,但少见具体解决办法。

基于Terzaghi ($K_0 = \sigma_3 / \sigma_1$)或Bishop ($K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$)理论,与岩土工程相关的教科书、工具书^[18-21]等均明确:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40472139)

收稿日期: 2006 - 02 - 17

侧压力系数 K_0 是指在不允许产生侧向变形的情况下, 土体在承受竖向应力增量 $\Delta\sigma_1$ (以下简写成 σ_1) 将会引起侧向应力的相应增量 $\Delta\sigma_3$ (以下简写成 σ_3) 时, 其比值即为侧压力系数: $K_0=\sigma_3/\sigma_1$, 该式中 σ_1 为土的垂直应力, 与侧向应力 σ_3 呈线性相关关系, 求解侧向应力 σ_3 大小的传统途径则是先测定侧压力系数 K_0 。通常情况下, 室内试验室仅做垂直应力 σ_1 小于200 kPa的4~5个点的侧向应力 σ_3 得到 K_0 数据结果, 施工工程技术人员就将此值做为该层土任意深度通用 K_0 值。笔者通过对河北省衡水、黄骅等地区埋深500 m以上不同性质土样, 在不同试验室、利用不同仪器进行侧压力系数 K_0 测定试验, 试验结果表明: 侧压力系数 K_0 并不总是常数, 利用传统的侧压力系数公式求解土体的侧向应力 σ_3 存在一定不足, 对于深部黏性土, 侧向应力 σ_3 与垂直应力 σ_1 关系就不一定是直线关系。所以, 习用侧压力系数 K_0 求得侧向应力 σ_3 的方法, 用于实际岩土工程可能使计算的深部土体侧向应力偏小而造成安全隐患或重大工程事故。

1 侧向应力试验

侧向应力试验方法如同静止侧压力系数 K_0 试验方法, 试验土样均经过预先饱和。试验所用的土样除3.0 m以上为探坑取样外, 其余均为钻探岩芯样, 岩芯的直径约为108 mm, 试验所用岩芯是采用对岩芯扰动较小的双螺旋钻进法 (钻探) 取得的。

1.1 利用 K_0 固结仪测试的侧向应力

利用静止侧压力系数 K_0 固结仪, 对河北衡水、黄骅两地区的黏性土进行侧向应力试验, 结果为: 衡水地区黏性土样侧向应力 σ_1 与垂直应力 σ_3 关系呈如图1的直线关系; 而黄骅地区黏性土样则不然, 侧向应力 σ_1 与垂直应力 σ_3 关系则呈如图2所示曲线关系。上述试验均由河北中核岩土工程有限责任公司土工试验室在同一个仪器上完成, 使用的仪器为电力部南京自动化总厂1995年生产 K_0 固结仪。

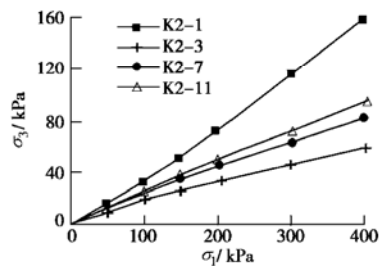


图1 衡水土样垂直应力与侧向应力关系曲线(用 K_0 仪)
Fig. 1 Stress curves obtained by K_0 test with Hengshui samples

1.2 利用多功能固结仪测试的侧向应力

该试验使用的是自行设计加工的多功能固结仪,

仪器主要由以下4个部分组成: ①不锈钢圆锻造的刚性、密封式、耐压样品室; ②4个传感器:垂直应力传感器 (MPa)、侧向应力传感器 (MPa)、渗压传感器 (kPa) 和位移传感器 (mm); ③数据采集装置; ④计算机数据存储输出装置。除释出孔隙水体积为人工读数外, 其余为自动采集, 记录最小间隔时间是8 s。传感器输出数据精确为0.001。该仪器垂直应力和侧向应力最大量程为20 MPa, 仪器示意图如图3, 试样的尺寸为61.8 mm (直径) ×40.0 mm (高) 的圆柱体, 在试验过程中由于释出孔隙水压力可以随时读出, 很容易求得垂直有效应力 σ_1' 和水平有效应力 σ_3' 。不同地点、不同埋深土样的侧向有效应力 σ_3' 与垂直有效应力 σ_1' 试验结果如图4所示。

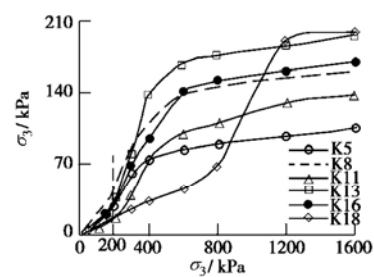


图2 黄骅垂直应力与侧向应力关系曲线(用 K_0 仪)
Fig. 2 Stress curves obtained by K_0 test with Huanghua samples

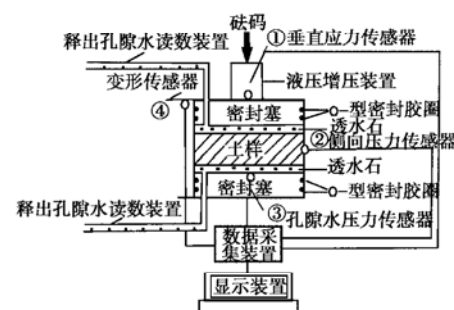


图3 多功能固结仪示意图
Fig. 3 Multi-function consolidometer

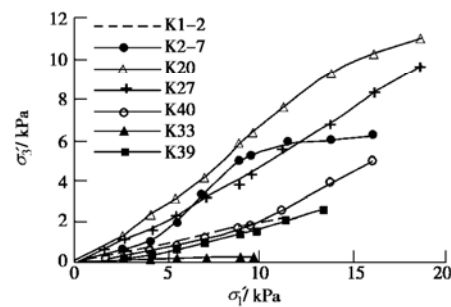


图4 用多功能试验固结仪得到的应力关系曲线
Fig. 4 Stress curves obtained with multi-function consolidometer

1.3 三轴仪测试侧向应力

利用三轴试验仪对衡水地区不同埋深土样进行中压和高压三轴剪切试验,得到的垂直应力 σ_1 与侧向应力 σ_3 关系曲线,如图5、6。图5的试验由河北中核岩土工程有限责任公司土工试验室完成,仪器为北京华勘科技有限公司2003年生产KTG全自动三轴仪;图6的试验由中国水利水电科学研究院岩土所土工试验室完成,仪器为英国1986年生产WF大型高压三轴仪。取得数据方法是按天然土的受力状态(不允许侧向变形)根据三轴剪切试验结果,某一围压的垂向应力 σ_1 (或 σ_1')与应变 ε 关系曲线后期直线段始点对应的 σ_1 (或 σ_1')被认为该围压下的天然应垂直应力 σ_1 值,从而得到不同围压 σ_3 与垂直应力 σ_1 关系图。其中图5为由三轴固结不排水剪切试验得到的结果,而图6则是三轴固结排水剪切试验得到的结果。

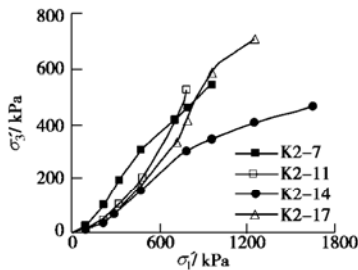


图5 由中压三轴剪切试验得到的应力关系曲线

Fig. 5 Stress curves obtained with the medium-pressure triaxial apparatus

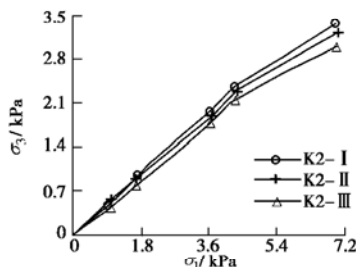


图6 由高压三轴剪切试验得到的应力关系曲线

Fig. 6 Stress curves obtained with the high-pressure triaxial apparatus

1.4 试验结果分析与总结

将每个样试验得到的 σ_3 与 σ_1 数据进行拟合,得到的直线(斜体)关系(为传统方法的 σ_3 与 σ_1 关系)方程与幂函数关系方程及土的部分性质指标列于表1,综合分析本次试验成果,可知土体的侧压力系数 K_0 并不总是常数。对侧向应力试验总结如下:

(1) 相同的土样在同一仪器上试验,试验终止时垂直应力 σ_1 大小不同,试验结果的侧向应力 σ_3 与垂向应力 σ_1 关系曲线形状不一定相同,终止试验的应力越大,残差越大,见图1, 2, 4~6及表1。

(2) 相同试样在不同类型仪器上,得到的试验结果也有所不同,如图1、图4及图5中的K2-7与K2-11。

(3) 在天然有效应力作用下,在三轴试验仪上得到的侧向应力 σ_3 值一般大于在 K_0 固结仪上的得到侧向应力 σ_3 值,如图1与图5中的K2-7与K2-11。

(4) 所有的试验结果曲线可为直线(见图1)、渐进的直线(见图6)或幂函数曲线(见图2)三种形式;当垂直应力 σ_1 小于200 kPa时,所有试验的 σ_3 与 σ_1 基本呈直线关系,如图1及图2, 4~6中的 σ_1 小于200 kPa部分曲线;当垂直应力 σ_1 大于200 kPa时:透水性强的土,如砂性土(图4中K1-2, K33, K39)、富含钙质结核或钙质胶结严重的黏性土(图4中的K27, 图2中K20、K40, 图6)一般呈直线或近直线关系,而透水性差的、均匀、密实的黏性土, σ_3 与 σ_1 之间则呈如图2~5中的幂函数曲线关系。

(5) 从表1看出,无论是何种土性,土的侧向应力 σ_3 与垂向应力 σ_1 幂函数关系方程(见表1)的相关系数较大、而残差较小;而直线关系方程的相关系数较大、残差一般较大,具有较大离散性。因此,土体侧向应力 σ_3 与垂向应力 σ_1 呈幂函数关系优于直线关系。

(6) 对于几组砂土的侧向应力 σ_3 试验,结果表明 σ_3 值都比较小。

2 求侧向应力的方法与探讨

试验结果表明:土体的侧向应力 σ_3 与垂直应力 σ_1 之间并不总呈直线关系,在岩土工程中常用的侧压力系数 $K_0 = \sigma_3 / \sigma_1$ 公式求得的侧向压力 σ_3 在用于深层黏性土中可能偏小,会存在一些安全隐患或造成事故。土体的侧向应力 σ_3 是与土体的所处的地质环境条件和本身的性质等多项指标有关的参数,其计算是个复杂问题,表1列出的各土样 σ_3 与 σ_1 关系方程差别也说明这一点。但通过以上诸多试验得知,不需浪费精力去研究侧向应力 σ_3 与其他指标之间的关系,在一定条件下,某一点的土体的天然侧向应力 σ_3 仅有一个值,既简单又准确的方法就是在试验室内模拟具体地质条件测定实际垂直有效应力下土样的侧向应力 σ_3 就可以了,最好是采用三轴试验结果。

试验结果表明:各土样侧向应力 σ_3 都比较小。这一结果是否可以解释以下几个问题:①地下水位以上的非软土地区,10 m内基坑无支护也不会产生边坡失稳现象;②研究表明,侧向应力不同,土体的变形也不一致,土体的侧向压力 σ_3 越大,土的变形与渗透性越小^[22],正确求得侧向应力 σ_3 对于模拟天然状态下土体的变形及强度等有更重要的意义;均质密实的黏性土侧向应力 σ_3 并不是随埋深的增加而线性正比增大,说明深层坚硬黏性土在地下水位降低的附加应力下会产生一定的变形;③试验结果砂土的侧向压力 σ_3 比较

表 1 土的部分物理性质参数及侧向应力试验成果统计表(σ_1/kPa , σ_3/kPa)
Table 1 Soil parameter and test result(σ_1/kPa , σ_3/kPa)

时代	取样地点	试样编号	埋深/m	岩性	塑性指数/ I_p	σ_3 与 σ_1 关系方程	相关系数 /R	残差 δ	试验仪器类型
第四系	衡水	K2-1	1.5	粉质黏土	16.7	$\sigma_3 = 0.3811\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.139\ln\sigma_1 - 1.757$	0.9862 0.9999	4.6480 0.0124	K_0 仪固结仪
		K2-3	17.5	粉质黏土	12.0	$\sigma_3 = 0.1523\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.824\ln\sigma_1 - 0.886$	0.9972 0.9959	2.6699 0.0632	
		K2-7	53.8	粉质黏土	13.2	$\sigma_3 = 0.2097\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.917\ln\sigma_1 - 1.082$	0.9987 0.9992	2.4990 0.0313	
		K2-11	73.5	黏土	17.1	$\sigma_3 = 0.2394\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.9703\ln\sigma_1 - 1.262$	0.9998 0.9986	1.2163 0.0427	
		K5	113.3	粉质黏土	15.7	$\sigma_3 = 0.0875\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.8140\ln\sigma_1 - 0.962$	0.9371 0.9557	23.7850 0.2965	
	黄骅	K8	131.3	粉质黏土	13.6	$\sigma_3 = 0.1359\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.816\ln\sigma_1 - 0.551$	0.9382 0.9611	36.5627 0.2772	
		K11	141.1	黏土	22.0	$\sigma_3 = 0.1076\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.099\ln\sigma_1 - 2.776$	0.9682 0.9717	20.2707 0.3161	
		K13	158.7	黏土	20.0	$\sigma_3 = 0.1625\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.208\ln\sigma_1 - 2.998$	0.9421 0.9526	42.2297 0.4564	
		K16	167.1	黏土	17.3	$\sigma_3 = 0.1389\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.107\ln\sigma_1 - 2.502$	0.9547 0.9658	31.6110 0.3515	
		K18	189.9	粉质黏土	12.1	$\sigma_3 = 0.1233\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.107\ln\sigma_1 - 2.970$	0.9760 0.9870	20.0786 0.2129	
	衡水	K2-7	53.8	粉质黏土	13.2	$\sigma_3 = 0.5793\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.2960\ln\sigma_1 - 2.444$	0.9986 0.9879	18.0818 0.1837	中压三轴仪
		K2-11	73.5	黏土	17.1	$\sigma_3 = 0.55772\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.8338\ln\sigma_1 - 6.008$	0.9749 0.9993	63.3851 0.0608	
		K2-14	85.3	黏土	17.3	$\sigma_3 = 0.3153\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.442\ln\sigma_1 - 4.133$	0.9916 0.9813	35.7409 0.2758	
		K2-17	162.2	粉质黏土	15.2	$\sigma_3 = 0.5367\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.702\ln\sigma_1 - 5.378$	0.9881 0.9975	59.4951 0.1122	
	第三系	K2- I	300.0	黏土(富含钙质结核)	22.5	$\sigma_3 = 0.5082\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.0292\ln\sigma_1 - 0.8952$	0.9980 0.9931	133.0778 0.1088	高压三轴仪
		K2- II	400.0	粉质黏土(富含钙质结核)	24.3	$\sigma_3 = 0.4867\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.9160\ln\sigma_1 - 0.0097$	0.9980 0.9989	127.21122 0.0378	
		K2-III	500.0	黏土(富含钙质结核)	25.8	$\sigma_3 = 0.4590\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.954\ln\sigma_1 - 0.682$	0.9976 0.9974	131.09621 0.0619	
第四系	天津	K1-2	1.5	粉土	7.5	$\sigma_3 = 0.1721\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.0460\ln\sigma_1 - 2.2602$	0.9951 0.9844	114.4434 0.2103	
	衡水	K2-7	53.8	黏土	17.1	$\sigma_3 = 0.4467\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.2425\ln\sigma_1 - 3.07866$	0.9861 0.9853	662.7164 0.2451	
		K20	197.5	黏土	21.5	$\sigma_3 = 0.6309\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.179\ln\sigma_1 - 2.147$	0.9977 0.9715	427.3125 0.3305	多功能高压固结仪
	黄骅	K27	265.7	黏土(含少量小 Ca 核)	19.5	$\sigma_3 = 0.4927\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.107\ln\sigma_1 - 1.7360$	0.9978 0.9990	329.0243 0.0571	
		K33	320.0	含土粉砂		$\sigma_3 = 0.0329\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 0.6629\sigma_1 - 0.5912$	0.9821 0.9034	37.2254 0.3560	
		K39	364.1	含土粉砂		$\sigma_3 = 0.1710\sigma_1$ $\ln\sigma_1 = 1.088\ln\sigma_1 - 2.733$	0.9917 0.9827	170.9295 0.2316	
		K40	369.6	黏土(富含钙质结核)	23.5	$\sigma_3 = 0.2453\sigma_1$ $\ln\sigma_3 = 1.2760\ln\sigma_1 - 4.135$	0.9733 0.9906	509.9422 0.2004	
	第三系								

注: 1.K2-7 表示一个试样进行两种或两种以上的试验; 2.*表示直线, #表示接近直线。

小的原因一方面是由于砂土结构相对松散, 钻探过程中可能对土样产生一定程度的扰动; 另一方面, 试验过程中未考虑地下水对土体的作用因素。所以, 含水层内的土的侧向应力应加上水头压力。

3 结 论

综上所述, 对河北省不同地区、埋深500 m以内土体的侧向应力试验研究, 得到如下结论:

(1) 土体的侧向应力 σ_3 与垂直应力 σ_1 之间并不总呈直线关系, 即土体的侧压力系数 K_0 不总为常数。在岩土工程中习用的侧压力系数 $K_0=\sigma_3/\sigma_1$ 公式求得的侧向压力 σ_3 : 对垂向应力大于200 kPa的深层黏性土可能产生较大偏差, 不适用; 对于透水性较强的土(如砂性土、含钙质结核较多的黏性土)和垂向应力小于200 kPa的浅层土体、基本实用。

(2) 试验结果表明: 土体的侧向应力 σ_3 与垂直应力 σ_1 关系可为直线、渐进的直线和幂函数关系曲线三种形式, 幂函数关系优于直线关系。

(3) 简捷正确求解土体侧向应力 σ_3 的方法是在试验室内在三轴试验仪或 K_0 固结仪上按侧压力系数 K_0 试验方法, 直接测定考虑工程具体条件因素在内的土体垂直有效应力下的侧向应力, 利用该方法取得的侧向应力值参数对实际工程更有意义。

参考文献:

- [1] BROOKER E Q, IRELAND H O. Earth pressure at-rest related to stress history[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1965,2(1):1 - 15.
- [2] BERRE T, JERRUM L. Shear strength of normally consolidated clay [C]// Proceeding 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973,1:39 - 49.
- [3] LIZUKA A, YATOMI C, YASHIMA A, SANO I, et al. The effect of stress induced anisotropy on shear band formation[J]. Archive of Applied Mechanics, 1992,62(2):104 - 114.
- [4] PRUSKA L. At-rest lateral earth pressure coefficient of a granular medium[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1978,15(1):56 - 61.
- [5] ATKINSON J H, RICHARDSON D, ROBINSON P J. Compression and extension of K_0 normally consolidated kaolin clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(12):1468 - 1481.
- [6] 邵龙潭, 洪 帅, 郑卫锋. 循环孔隙水压力作用下饱和砂土变形的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006,28(4):428 - 441.(SHAO Long-tan, HONG Shuai, ZHENG Wei-feng, Experimental study on deformation of saturated sand under cyclic pore water pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(4):428 - 441.(in Chinese))
- [7] MAYNE P W. Ko -Cu/Sigmavo trends for overconsolidated clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE, 1984, 110(10):1511 - 1516.
- [8] MAYNE P W, KULHAWY F H. Independence of geostatic stress from overconsolidation in some Beaufort Sea clays: Discussion[J]. Can Geotech J, 1988,25:617 - 621.
- [9] Amii Prashant and Dayakar Penumadu. A laboratory study of normally consolidated kaolin caly[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005,42:27 - 37.
- [10] 姜 朴, 方涤华, 宋永祥, 等. K_0 固结三轴仪的研制与试验研究[J]. 岩土工程学报, 1991,13(3):43 - 52.(JIANG Pu, FANG Di-hua, SONG Yong-xiang, et al. 1991. Development and experiment of K_0 -consolidation triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991,13:43 - 52.(in Chinese))
- [11] 钱建固, 黄茂松, 杨 峻. 真三维应力状态下土体应变局部化的非共轴理论[J]. 岩土工程学报, 2006,28(4):510 - 515.(QIAN Jian-gu, HUANG Mao-song, YANG Jun. Effect of non-coaxial plasticity on onset strain localization in soils under 3D stress condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(4):510 - 515.(in Chinese))
- [12] 李佳川, WONG Kai Sin. 灌浆对地下连续墙及邻近土体变形的影响[J]. 同济大学学报, 2000,28(3):291 - 296.(LI Jia-chuan, WONG K S. Effect of jet grouting on deformation of diaphragm walls and nearby soils[J]. Journal of Tongji University, 2000,28:291 - 296.(in Chinese))
- [13] 袁聚云, 王新波, 董建国, 等. K_0 固结条件对上海黏性土强度和变形的影响[J]. 大坝观测与土工测试, 1999,23(4):29 - 32.(YUAN Ju-yun, WANG Xin-bo, DONG Jian-guo, et al. Research on the strength and deformation of shanghai clayey soil under K_0 consolidation condition[J] Dam Observation and Geotechnical Tests, 1999, 23(4):29 - 32.(in Chinese))
- [14] 董筱波, 袁 磊, 徐 波, 等. 标准应力路径三轴测试系统及其在 K_0 固结试验的应用[J]. 河海大学学报, 2001,29(增):169 - 172.(DONG Xiao-bo, YUAN Lei, XU Bo, Standard triaxial testing system and its application to K_0 consolidation test[J]. Journal of Hohai University, 2001,29(S):169 - 172.(in Chinese))
- [15] 王新波, 毛鹏飞, 翟松涛. 软土考虑 K_0 固结非线性弹性模型的研究及其应用[J]. 岩土工程技术, 2002(2):70 - 74.(WANG Xin-bo, MAO Peng-fei, ZHAI Song-tao. Study and application of a nonlinear elastic model considering K_0 - consolidation for soft clay[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002(2):70 - 74.(in Chinese))
- [16] 姜安龙, 郭云英, 高大钊. 静止土压力系数研究[J]. 岩土工程技术, 2003,6:354 - 359.(JIANG An-long, GUO

- Yun-ying, GAO Da-zhao. The study on coefficient of earth pressure at rest[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003,6:354 - 359.(in Chinese))
- [17] TING C M R, SILLS G C, WIJESEKERA D C. Development of K_0 in soft soils[J]. Geotechnique, 1994,44(1):101 - 109.
- [18] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1993:189 - 190.(The Compiling Committee of the Handbook of Engineering Geology Manual. Engineering geology manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993:189 - 190.(in Chinese))
- [19] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.(Lin Zong-yuan. Geotechnical testing and monitoring manual[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [20] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.(CHEN Xi-zhe, Soils mechanics and foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.(in Chinese))
- [21] Radoslaw Michalowski L, ASCE F. Coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,11:1429 - 1433.
- [22] 王秀艳. 深层坚硬黏性土渗透变形特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003:23 - 37.(WANG Xiu-yan. The study of seepage and deformation for deep clayey soil[D]. Changchun: Jilin University, 2003:23 - 37.(in Chinese))

上接第 359 页

《岩土工程学报》2006 年第 28 卷增刊被 EI 收录论文 (123 篇)

论文题目	作者	页码
钻孔咬合桩挡土结构咬合面的剪切性能研究	刘丰军, 廖少明, 李文林, 宋 博	1445~1449
带撑双排桩支护结构性状分析	应宏伟, 初振环	1450~1454
分步开挖过程中基坑支护结构的变形和土压力性状研究	高 伟, 窦远明, 周晓理, 彭芳乐	1455~1459
深基坑复合土钉墙支护 FLAC-3D 模拟及大型现场原位测试研究	吴忠诚, 汤连生, 廖志强, 刘晓纲, 颜 波	1460~1465
超深基坑对城市桥梁保护区域影响的初步探讨	梁发云, 李镜培, 褚 峰	1466~1469
基坑内预留土堤对基坑性状的影响分析	陈福全, 吴国荣, 刘毓胤	1470~1474
围护结构变形模式对土压力的影响	王保建, 熊巨华, 朱碧堂	1475~1480
考虑竖向土拱的桩锚与土钉的联合支护	王立明, 高广运, 郭院成	1481~1484
地下连续墙测试中弯矩的计算方法探讨	焦志斌, 刘永绣	1485~1488
PCC 桩复合地基褥垫层作用数值分析	谭慧明, 刘汉龙, 张 霆	1489~1492
考虑开挖效应的基坑被动土压力计算	魏 纲, 郑金涛	1493~1496
软土地层管幕法施工三维数值模拟	孙 旻, 徐 伟	1497~1500
基坑支护桩间土体拱效应理论及有限元分析	钟小春	1501~1504
平稳随机地震动模型及其激励下土石坝地震反应特性研究	王志华	1505~1509
深基坑排桩冻结温度场的数值模拟	张树光, 孙 利	1510~1512
土钉支护中土钉力的计算方法	郭院成, 秦会来, 李 峰	1513~1516
双排钻孔桩-搅拌桩复合围护结构位移计算方法	翟杰群, 高广运, 冯世进	1517~1521
深基坑圆形支护结构分析	李 凡	1522~1524
基坑支护设计优化研究	赵洪波, 茹忠亮	1525~1528
冻土中锥型桩模型试验研究及有限元分析	李栋伟, 汪仁和, 胡 璞, 林 斌	1529~1533
北京地区基坑支护技术现状研究	罗文林, 韩 焯, 刘赅伟	1534~1537
基坑内土体加固对围护结构变形的影响分析	罗战友, 刘 薇, 夏建中	1538~1540
润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基础基坑围护设计	裴 捷, 梁志荣, 王卫东	1541~1545
新型逆作法结构型式的设计与应用	王卫东, 翁其平, 胡玉银	1546~1551
超高层建筑地下主体结构与深基坑支护结构相结合的设计和实践	岳建勇, 周 春, 任 臻, 王 湧, 胡振青	1552~1555
润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基础隔水、降水的设计和施工	裴 捷, 王少峰, 韦世国, 赵有明	1556~1559
采用水上深基坑围护法建造特大型船坞坞口的创新设计	李小军, 陈映华, 宣庐峻	1560~1564
逆作法深基坑在超高层建筑中的设计应用	朱宪辉, 汪贵平, 顾倩燕	1565~1568
坑中坑基坑支护设计与监测	吴铭炳, 林大丰, 戴一鸣, 俞 强	1569~1572
复杂条件下基坑变形控制——亚龙总部大楼基坑工程设计研究	顾开云, 许 磊	1577~1581
黄土边坡框架预应力锚杆支护结构的设计研究	朱彦鹏, 郑善义, 张 鸿, 阎 茹	1582~1585
“两墙合一”深基坑工程设计中的若干技术问题与对策	宋青君, 王卫东, 翁其平	1590~1595

下接第 451 页