

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2413

新型静止侧压力系数试验仪的研制与应用

朱俊高^{1,2}, 陆阳洋^{1,2}, 蒋明杰^{1,2}, 褚福永³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 丽水学院 工程与设计学院, 浙江 丽水 323000)

摘 要: 研制了一种新型静止侧压力系数试验仪, 介绍了该仪器结构及工作原理。对干砂进行了试验, 测定其静止侧压力系数, 与传统的水囊式 K_0 固结仪试验结果进行了对比。分析了该试验仪的可能误差来源, 主要包括加载过程中的试样侧向变形和试样与压力室筒壁之间的摩擦力, 具体分析了试样侧向变形引起 K_0 值误差的大小, 提出了摩擦力影响修正方法, 充分论证了仪器的准确性和有效性。对某粗颗粒土进行了静止侧压力系数试验, 测定了该土在加载及卸载条件下 K_0 随应力状态的变化, 验证了仪器对粗颗粒土的适用性。该仪器结构简单, 操作方便, 结果准确, 适用于包括粗颗粒土在内的各种土的 K_0 试验, 克服了现有的静止侧压力系数试验仪不适用于粗颗粒土的缺陷, 而且适用高应力范围。

关 键 词: 粗颗粒土; 静止侧压力系数; 侧壁摩擦力; 新型 K_0 试验仪

中图分类号: TU 415

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)08-3071-06

Development and application of new apparatus for K_0 test

ZHU Jun-gao^{1,2}, LU Yang-yang^{1,2}, JIANG Ming-jie^{1,2}, CHU Fu-yong³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. College of Engineering and Design, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China)

Abstract: In this paper, the large apparatus to measure static lateral pressure coefficient was introduced. The K_0 value of dry sand was tested by using the apparatus. The dry-sand test result was used to compare with the test of the water-bag type K_0 oedometer. The friction of the sidewall produced during the experiment was amended, and the deviation caused by lateral expansion were also analyzed. The accuracy and effectiveness of the apparatus was validated. Coarse granular soil was tested by this apparatus. And the change of K_0 under various stress conditions was tested, which verified the applicability of the apparatus to coarse granular soil. It is convenient in operation, stable in performance, and precise in accuracy. It can be used to test the static lateral pressure coefficient of large practical size coarse grained soil, which is hard to get with the traditional instrument.

Keywords: coarse grained soil; at-rest lateral pressure coefficient; side wall friction; new-type apparatus for K_0 test

1 引 言

土体静止侧压力系数 K_0 是土体在无侧向变形条件下侧向有效应力与竖向有效应力之比。它是土体性质的一个重要指标, 在很多工程结构的设计中用来计算土压力或估计地基应力。尽管静止侧压力系数是土体的一个基本力学参数, 但相关研究相对较少, 而且由于测量手段限制, 精度不甚理想。

国内外学者对土体静止侧压力系数的研究主要集中在黏土及砂土。1920 年 Tezarghi^[1]首先在侧壁坚硬的容器中进行了土的静止侧压力系数试验。方法是在土样中插入两根垂直和水平放置贯穿容器的钢带, 当试样固结完成后, 抽出两根钢带, 测得抽出钢带所需的力, 从而计算 K_0 。Komoronik 等^[2]在单向固结仪环刀壁贴上电阻应变片来进行 K_0 试验, 这种方法对应变片精度要求高, 而且环刀的模

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFC0404804); 国家自然科学基金项目 (No. 51479052); 教育部“创新团队发展计划” (No. IRT_15R17); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金项目。

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0404804), the National Natural Science Foundation of China (51479052), the Program for Innovative Research Team in University (IRT_15R17) and the Open Subject Fund Projects of Engineering Research Center of Dyke Safety and Disease Control of Ministry of Water Resources.

第一作者简介: 朱俊高, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事土体基本性质与本构关系、土石坝工程等方面的研究工作。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

通讯作者: 陆阳洋, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事土体基本性质、土石坝工程等方面的研究工作。E-mail: luyangyang@hhu.edu.cn

量也必须预先知道。Brooker等^[3]改进了Komoronik的试验仪,在环刀外侧配备了液体压力设备,当环刀内壁受到试样的侧压力时,在环刀外壁施加液体压力,使应变片的应变为0,认为此时液体压力与试样侧向应力相等。Abdelhamid等^[4]设计了一种测定 K_0 值的固结仪,该仪器在环刀侧壁安装侧压力及孔隙水压力的测头,直接测量侧向压力。

另一方面,很多学者通过改装三轴仪进行试验。其原理是在三轴试验中施加轴向力的同时,改变试样的围压,使其不发生侧向变形,从而测定 K_0 。Bishop等^[5]最早采用双筒压力室进行了土的三轴 K_0 试验,他们在压力室中设置一个充满水银的内筒,维持内筒水银高度不变,即保证了试样没有侧向变形。姜朴等^[6]研制了一种 K_0 固结三轴仪,利用光纤液位传感器监测双筒压力室的内筒的水位,从而调控内室压力实现无侧向变形。袁聚云等^[7]利用真三轴仪,通过控制两个侧向不发生位移使试样达到 K_0 状态,并对上海地区淤泥质粉质黏土进行了 K_0 试验。纠永志等^[8]利用应力路径三轴仪,通过反压控制器测量体积变化进行 K_0 试验,通过试样体积的变化计算理论上试样新的高度,以确保试样直径保持不变,进行 K_0 试验。对三轴仪类 K_0 试验仪,大多采用柔性壁(即橡皮膜),对粗颗粒土,加载过程中会产生橡皮膜嵌入,而且,这种嵌入引起的试验误差目前还没有可靠方法进行修正,因此,此法不适用于粗颗粒土。

程海涛等^[9]利用安装在三轴试样中间高度处的径向霍尔效应传感器量测中断面处的径向变形,据此变形由计算机控制系统来调节轴向加载和围压实现 K_0 固结条件。对粗颗粒土,这种量测方式虽然不受橡皮膜嵌入的影响,但径向变形的测量与控制仅在安装了霍尔效应传感器的中间一周,而且,粗颗粒土试样表面凹凸不平,易引起传感器的突变,也不能很好地控制粗颗粒土试样不产生侧向变形。

目前,最常用的 K_0 测量仪器为水囊式 K_0 固结仪。将试样放在很薄的橡皮膜中,橡皮膜与刚性侧壁之间只留有很小的充满水的缝隙。由于水是几乎不可压缩的,当试样受到竖向力时会产生轻微的侧向膨胀,相应地挤压了水体,通过压力表测得水压力即是试样的侧压力,从而计算出静止侧压力系数。很多学者利用这种 K_0 固结仪研究土体静止侧压力系数。赵玉花等^[10]对沿海软黏土进行了 K_0 试验,发现该种土的静止侧压力系数具有阶段性特征。肖先波^[11]对含气砂土进行了 K_0 试验,结果表明,砂

土的 K_0 随含水率的增大而增大,随密度的增大而减小。罗耀武等^[12]对砂土、粉土和粉质黏土进行了 K_0 试验,结合土体物理力学特性对 K_0 加卸载模型进行了探讨。李国维等^[13]对汕汾高速公路路基原状试样进行了 K_0 试验,研究了超固结软黏土次固结系数、侧压力系数和应力历史的关系。莫玮宏等^[14]在 K_0 固结仪上增加了围压控制系统,对某吹填地基原状土样等进行了应力比加载试验,并与该土样的侧限(K_0)试验进行了对比。对粗颗粒土,这种仪器试验时试样周围的橡皮膜也有嵌入作用。因此,这种仪器也不适用于粗颗粒土。

上述仪器一般只适用于黏土或砂土等细颗粒土,相关试验研究也主要针对这类土,适用粗颗粒土的试验仪器及相关研究极少。沈靠山^[15]将土压力盒埋入大型压缩试验的试样中,通过土压力盒测得到粗颗粒土的竖向应力和侧向应力,由此计算 K_0 。但由于土压力盒的精度影响,试验误差较大。

实际工程中,粗颗粒土地基很多,粗颗粒土大面积填方工程也不少,粗颗粒土的静止侧压力系数研究几乎为0,进行相关研究十分必要。

本文针对现有仪器并不适用于粗颗粒土静止侧压力系数试验的缺点,研制了一种新型的静止侧压力系数试验仪,适用于粗颗粒土的静止侧压力试验。同时,利用该仪器对粗颗粒土和干砂进行了 K_0 的测定,初步验证了该仪器的有效性。

2 静止侧压力系数试验仪的研制

2.1 仪器原理

如前所述,现有的常用室内 K_0 试验中无论是单向压缩试验还是三轴仪 K_0 试验,静止侧压力一般通过水囊来传递,这种试验一般只适用于黏土和砂土,因为在粗颗粒土的静止侧压力系数试验中,橡皮膜嵌入导致结果不准确,而且在高压下粗颗粒土的棱角易刺破橡皮膜,不能施加高压。

为了克服以上缺陷,笔者研制了一种新型的静止侧压力系数试验仪(以下简称新型 K_0 试验仪),该试验仪适用于各类土包括粗颗粒土的静止侧压力系数试验。仪器的基本原理如图1所示,当对刚性圆环内试样施加竖向应力 σ_v 时,如果试样侧壁及端面没有摩擦力,则试样内各处应力均匀,且符合无侧向变形状态(K_0 状态),若侧向应力为 σ_h ,则 $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ 。因此,如果将刚性圆环一分为二,并将两个半圆环通过变形极小的测力计(拉力传感器)连接,只要拉力传感器的变形足够小,就可以认为试样处于 K_0 状态。

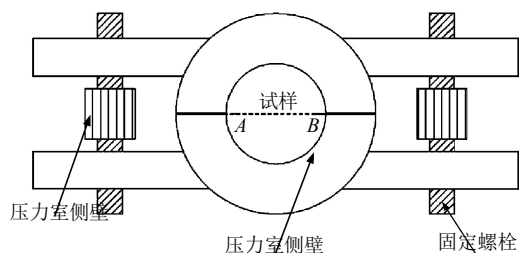


图 1 仪器原理图俯视

Fig.1 Top view of the apparatus principle

因此, 试样施加竖向应力 σ_v 后, AB 断面上的法向应力等于侧向应力, 该断面上的侧向应力的合力 F 可由拉力传感器测得。则 $\sigma_h = F / (\overline{AB} \cdot h)$, 其中 $\overline{AB}$ 为试样直径, h 为试样高度。静止侧压力系数 K_0 值即为 σ_h 和 σ_v 比值。

2.2 仪器结构

本文研制的新型静止侧压力系数测试仪主要由压力室、加载系统和量测控制系统组成 (如图 2 所示)。压力室由两块半径相同的半圆形钢筒拼接组成, 置于可自由滚动的钢珠上。两个半圆压力室之间用 4 个拉力传感器连接, 试样底面及顶面分别放置 2 个半圆形传力板, 板的下面及上面放置若干可自由滚动的钢珠以减小摩擦力。

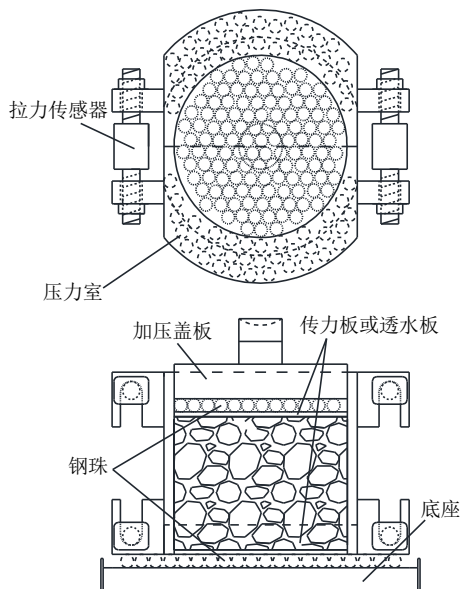


图 2 新型静止侧压力系数测试仪结构示意图

Fig.2 The structure of new type apparatus for K_0 tests

加载系统包括由顶部横梁提供反力的加载架和加载油缸, 加载油缸与压力室底座相连, 油泵压力通过活塞从试样底部提供顶升力加载。量测控制系统包括测定试样侧向力的 4 只拉力传感器、2 只

安装在试样顶部的用于测量试样压缩量的位移传感器和竖向荷重传感器, 通过计算机控制油缸压力或位移速率来实现竖向荷载的控制。仪器压力室直径为 40 cm, 高为 40 cm, 可加载最大竖向压力为 800 kN, 仪器结构如图 2 所示。

试验时, 由上部加压横梁提供的反力通过荷重传感器、加压盖板、滚珠以及 (半圆形) 上传力板将力传递到土样, 通过荷重传感器测定竖向荷载。

当试样上施加竖向压力后, 会产生侧向膨胀, 这种膨胀趋势传导至下传力板, 为保证下传力板不阻止这种膨胀趋势, 下传力板也由两块相同半径的半圆形金属板拼成, 且在下传力板和底座之间放置滚珠, 减小下传力板的底部摩擦力即端部约束产生的影响。另压力室至于滚珠之上, 保证 4 个拉力传感器测得的合力即为试样沿直径断面的侧向压力的合力。

试验加载通过计算机控制, 数据自动采集。通过自动控制系统记录试验过程中的竖向力, 试样压缩量, 4 个侧向拉力。试验过程中可以选择加载的速率, 可以分别选择由力或者位移控制。

理论上, 试验过程中要求试样无侧向变形, 才能测定 K_0 。但无论哪种仪器, 都是通过微小的侧向变形来实现 K_0 量测, 即使是水囊式 K_0 固结仪, 也是利用试样侧向变形挤压水囊引起水囊内水压力升高实现侧向压力的测定, 而且, 试样侧面的水囊在加载前能否与试样紧贴会大大影响试验结果, 难以评估。本文的试验仪也不例外, 在加载过程中, 试样有少量侧向膨胀。为分析这种侧向变形对试验结果的影响, 必须进行分析。

根据广义胡克定律有

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比。令竖向应变 $\varepsilon_v = \varepsilon_z$, 则有 $\varepsilon_h = \varepsilon_x = \varepsilon_y$, $\sigma_v = \sigma_z$, $\sigma_h = \sigma_x = \sigma_y$, 则式 (1) 变为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v &= \frac{1}{E} (\sigma_v - 2\nu\sigma_h) \\ \varepsilon_h &= \frac{1}{E} [\sigma_h - \nu(\sigma_h + \sigma_v)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式 (2) 中第 1 式可得

$$\sigma_v = E\varepsilon_v + 2\nu\sigma_h \quad (3)$$

根据式(2)中第2式有

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{E\varepsilon_h}{(1-\nu)\sigma_v} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)的右端,并考虑到静止侧压力系数的定义式, $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$, 则得到

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{E\varepsilon_h}{(1-\nu)E\varepsilon_v + (1-\nu)2\nu\sigma_h} \quad (5)$$

试样处于 K_0 状态时,有 $\varepsilon_h = 0$, 则式(5)写为

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (6)$$

因此,式(5)中最右端一项即为因侧向应变而导致的试验误差。如果该项值很小,则误差可忽略。

试验表明,该试验仪在最大竖向荷载(800 kN 对应 6.4 MPa 应力)下,拉力传感器被拉伸产生压力室两部分之间的相对位移不超过 0.06 mm,对应侧向应变 ε_h 大约为 0.015%。对人工压实的密实粗粒土,最大荷载下的竖向应变约为 3%,侧向应变远小于竖向应变, $\varepsilon_h / \varepsilon_v = 0.005$ 。

假设泊松比为 0.3, 则有下式成立

$$\frac{E\varepsilon_h}{(1-\nu)E\varepsilon_v} = 0.007 \quad (7)$$

因此,式(5)最右端一项

$$\frac{E\varepsilon_h}{(1-\nu)E\varepsilon_v + 2\nu(1-\nu)\sigma_h} < 0.007 \quad (8)$$

由此可见,试验过程中由于轻微的侧向膨胀使得 K_0 值产生的试验误差不足 0.007,可以忽略不计。对一般黏土、砂土或较松粗粒土,其竖向应变要大于 3%,对应试验引起的 K_0 误差应小于 0.007。

3 仪器有效性验证及粗颗粒土应用

3.1 仪器有效性验证

3.1.1 侧壁摩擦力影响与修正分析

对新型 K_0 试验仪,试样侧壁摩擦力是影响 K_0 测定精度的重要因素之一。试验时,试样受压相对压力室侧壁向下运动,受到向上的摩擦力。如果要知道摩擦力的大小,则可以评估摩擦力影响。

为分析、评估乃至修正摩擦力影响,笔者利用该试验仪对 0.5~1.0 mm 标准砂中砂干样(干密度为 1.58 kg/cm³)进行了静止侧压力系数试验,试验时测定侧壁摩擦力。摩擦力是通过对称安置在压力室侧壁下方的 4 个荷重传感器测定。试验过程中试样对筒壁产生的摩擦力以及试样筒自身重力与荷重

传感器提供的反力在竖直方向达到平衡,所以试验过程中通过荷重传感器所测得的压力减去试样筒自重即为侧壁摩擦力。试验采用压力控制,最大试验压力为 800 kN,可提供 6.4 MPa 的最大竖向应力。为减小侧壁摩擦力,在试样与压力室侧壁之间放置聚四氟乙烯薄膜,并涂凡士林。试样直径 40 cm,高度 28 cm。

根据试验结果,可直接由 4 个拉力传感器的合力计算得 σ_h 。至于竖向应力 σ_v ,如果不考虑侧壁摩擦力影响,则 σ_v 等于荷重传感器读数除以试样面积,据此,整理出 $\sigma_v - \sigma_h$ 关系如图 3 所示,其拟合直线斜率即为 $K_0 = 0.357$ 。

但侧壁摩擦力存在使得试样应力状态发生了改变,试样内实际竖向应力 σ_v^* 近似为

$$\sigma_v^* = (N - 0.5F) / A \quad (9)$$

式中: N 为荷重传感器测得的竖向荷载; F 为传感器测得的摩擦力合力; A 为试样面积。

即 K_0 计算时采用的竖向应力取值为试样上下底面竖向应力的平均值。这样,考虑摩擦力影响的修正后的 K_0^* 就可由 σ_v^* 和 σ_h 计算。修正后的 $\sigma_v^* - \sigma_h$ 关系也在图 3 中给出,其拟合直线斜率 $K_0^* = 0.428$ 。没有修正的 K_0 比实际值(考虑摩擦力影响修正值)小 0.071,占比 16.5%。可见,摩擦力对试验结果影响较大,应用时宜采取减小摩擦力措施或对摩擦力进行修正。

修正可采用类似上述方法由试验测定摩擦力。也可根据经验取用合适的摩擦系数计算摩擦力。由本文试验结果可以计算出摩擦系数, $\mu = F / (\sigma_h S)$, S 为试样侧面(柱面)面积,不同荷载级下摩擦系数的平均值为 0.20。此值可供类似试验参考。

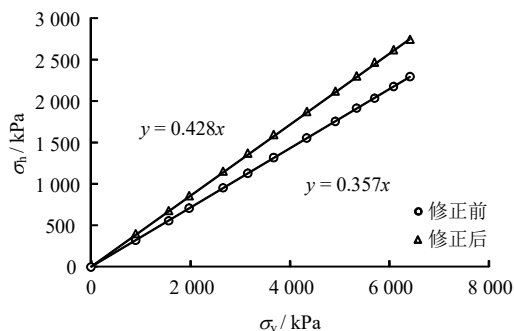


图3 新型静止侧压力系数试验仪试验结果
Fig.3 Result of new type apparatus for K_0 tests

3.1.2 对比试验

为了进一步验证新型 K_0 试验仪的准确性,笔者

采用传统的水囊式 K_0 固结仪对 $0.5 \sim 1.0$ mm 标准砂中砂干样进行了试验 (制样干密度为 1.58 kg/cm^3), 并将试验结果与新型 K_0 仪试验结果进行比较。图 4 给出了水囊式 K_0 固结仪的试验结果, 其拟合直线斜率 $K_0 = 0.321$ 。

对比图 3 与图 4 可见, 新型 K_0 试验仪未修正 $K_0 = 0.357$, 考虑摩擦力影响修正后 $K_0 = 0.428$, 分别比水囊式 K_0 固结仪所测得的静止侧压力系数 0.321 大 11% 和 33% 。

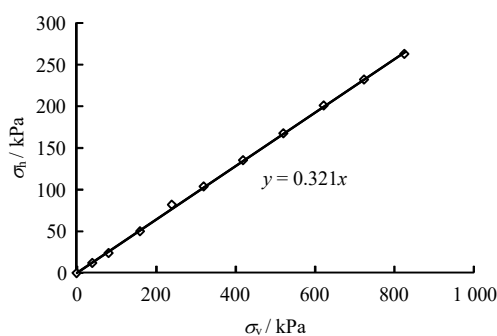


图 4 水囊式 K_0 固结仪试验结果

Fig.4 Result of water-bag type K_0 consolidation instrument

对本文新型 K_0 试验仪, 其误差来源主要有两方面, 即试样侧向变形及侧壁摩擦力。但这两个因素都会导致测得的 K_0 值比实际值小。而这里新型 K_0 试验仪测得的 K_0 值 (无论是否经摩擦力影响修正) 都大于水囊式 K_0 固结仪的结果。除传感器误差外, 没有使得测量值偏大的误差来源, 这只能说明新型 K_0 试验仪的结果更准确。也就是水囊式 K_0 固结仪误差更大。

对水囊式 K_0 固结仪, 在试验过程中可能由于橡皮膜与试样贴合不紧密、橡皮膜变形、少量气泡存在导致水囊中水压缩等原因产生轻微的侧向膨胀。同时, 试样压缩也会带动橡皮膜向下运动, 使得橡皮膜对其有向上的反作用力, 使测得的 K_0 值比实际值小。

新型静止侧压力试验仪不仅可以适用于黏土、砂土的等细颗粒土, 而且可以适用于水囊式 K_0 固结仪难以试验的粗颗粒土。另外, 由于水囊式 K_0 固结仪橡皮膜不能承受高水压力, 它不能用于高应力条件下的 K_0 测定, 而笔者研制的新型 K_0 试验仪可以应用于很高压力范围。

3.2 粗颗粒土 K_0 试验应用

为验证新型 K_0 试验仪的广泛适用性, 本节进行了较高应力条件下粗颗粒土的 K_0 测定试验。试样采

用某水电站高面板堆石坝的微新风化岩堆石料, 级配见表 1。试验用料最大粒径为 60 mm , 制样干密度为 1.51 g/cm^3 , 试样分 3 层松填制备而成。试验最大竖向荷载为 800 kN , 可以提供 6.4 MPa 的最大竖向应力。当施到加最大竖向应力保持稳定一段时间后, 进行卸载试验。为了验证仪器的稳定性, 进行了 2 组平行试验。

表 1 试样级配

Table 1 Gradation of sample

粒径/mm	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2	<2
粒组含量/%	33.33	33.34	16.66	8.34	5.00	3.33

图 5 给出了试验过程中的 K_0 值随竖向应力的变化曲线, 其中 K_0 值为进行摩擦力影响的修正值。

从图中可以发现, 在加载过程中, 土样的静止侧压力系数几乎保持不变, 两组平行试验结果分别为 0.393 和 0.380 , 平均 $K_0 = 0.386$ 。因此, 对所试验的密度, 粗颗粒土的静止侧压力系数 K_0 不随应力变化。

卸载过程中, 随着竖向应力的逐渐减小, 侧向应力也在减小。在卸载后期, 静止侧压力系数显著增大。

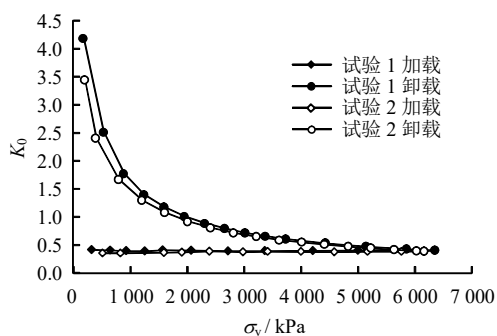


图 5 粗颗粒土静止侧压力试验结果

Fig.5 Test result of coarse granular soil

4 结 论

(1) 研制了一种新型静止侧压力系数试验仪, 可用于包括粗颗粒土在内的各种土的静止侧压力系数试验。该试验仪进一步改善了静止侧压力系数的测量技术, 具有以下新特点: ①解决了现有的 K_0 试验仪不适用于对粗颗粒土试验的问题; ②试验精度高; ③适用于高应力条件。

(2) 介绍了新型静止侧压力系数试验仪的工作原理, 分析可能的误差来源主要是试样侧壁摩擦力及侧向变形。其中, 因试样侧向变形引起 K_0 值偏小

量不超过 0.007。对所试验的标准砂中砂,侧壁摩擦力引起的 K_0 值偏小 0.071。侧壁摩擦力影响较大,提出了修正摩擦力影响的方法。

(3)和常规水囊式 K_0 固结仪的标准砂试验结果的对比表明,即使不进行摩擦力影响修正,新型 K_0 试验仪测得的 K_0 也比水囊式 K_0 固结仪结果大,说明新型 K_0 试验仪试验精度比水囊式 K_0 固结仪高。

(4)对某粗颗粒土进行了静止侧压力系数试验,测定了较高应力范围内粗粒土的静止侧压力系数。在所试验的应力范围内,其静止侧压力系数不随应力变化, $K_0 = 0.386$ 。

参考文献

- [1] TERZAGHI K. Old earth pressure theories and new test results[J]. *Engineering News Record*, 1920, 85(14): 632—637.
- [2] KOMORNIK A, ZEITLEN J G. An Apparatus for measuring lateral soil swelling pressure in the laboratory[C]//Proceedings of the 6th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1965, 1: 278—281.
- [3] BROOKER E Q, IRELAND H O. Earth pressure at-rest related to stress history[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1965, 2(1): 1—15.
- [4] ABDELHAMID S, KRIZEK R J. At-rest lateral earth pressure of consolidation clay[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102(7): 721—738.
- [5] BISHOP A W, HENKEL D J. The measurement of soil properties in the triaxial test[M]. [S. l.]: Edward Arnold Ltd., 1957: 71—73.
- [6] 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. Development and experiment of K_0 -consolidation triaxial apparatus[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 13(3): 43—52.
- [7] 袁聚云, 杨熙章, 赵锡宏, 等. K_0 固结真三轴仪的研制及试验研究[J]. *大坝观测与土工测试*, 1995, 19(3): 28—32.
YUAN Ju-yun, YANG Xi-zhang, ZHAO Xi-hong, et al. Development and experiment of K_0 -consolidation true triaxial apparatus[J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 1995, 19(3): 28—32.
- [8] 纠永志, 黄茂松. 超固结软黏土的静止土压力系数与不排水抗剪强度[J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 951—957.
JIU Yong-zhi, HUANG Mao-song. Coefficient of earth pressure at rest and undrained shear strength of overconsolidated soft clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 951—957.
- [9] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土连续加载 K_0 固结特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊 1): 3203—3208.
CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. K_0 Consolidation characteristics of compacted loess under continuous loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.1): 3203—3208.
- [10] 赵玉花, 沈日庚, 李青. 软黏土侧压力系数 K_0 阶段性特征研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1264—1268.
ZHAO Yu-hua, SHEN Ri-geng, LI Qing. Research on staged characteristics of lateral pressure coefficient K_0 of soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1264—1268.
- [11] 肖先波. 含气砂土静止侧压力系数的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(2): 76—78.
XIAO Xian-bo. Experimental study on lateral pressure coefficient of gassy sand[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 76—78.
- [12] 罗耀武, 凌道盛, 陈云敏, 等. 土体 K_0 加卸载过程中水平应力变化研究[J]. *工业建筑*, 2010, 40(7): 56—58.
LUO Yao-wu, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. The change in horizontal stress of soils during K_0 loading-unloading[J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(7): 56—58.
- [13] 李国维, 胡坚, 陆晓岑, 等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2198—2205.
LI Guo-wei, HU Jian, LU Xiao-cen, et al. One-dimensional secondary consolidation coefficient and lateral pressure coefficient of overconsolidated soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2198—2205.
- [14] 莫玮宏, 陈晓平, 罗庆姿. K_0 等比固结条件下软土的变形[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊 2): 798—803.
MO Wei-hong, CHEN Xiao-ping, LUO Qing-zi. Deformation of soft soils under constant stress ratio consolidation with K_0 [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Supp.2): 798—803.
- [15] 沈靠山. 覆盖层砂卵石料静止侧压力系数研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
SHENG Kao-shan. Steel-soil interface tests and numerical simulation of shear strength tests[D]. Nanjing: Hohai University, 2009.