

文章编号: 1000-4750(2020)03-0142-07

粗粒土静止侧压力系数影响因素试验研究

蒋明杰^{1,2,3}, 朱俊高^{1,2}, 梅国雄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. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 河海大学, 江苏, 南京 210098;
3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西, 南宁 530004)

摘 要: 目前, 适用于测试粗粒土 K_0 值的试验仪器及方法较少, 关于粗粒土 K_0 影响因素的研究几乎空白。为研究分析粗粒土 K_0 影响因素, 利用新近研制的大型 K_0 测试仪对某砂卵砾石料进行了大量 K_0 试验。通过改变试样的相对密实度 D_{r0} 与颗粒最大粒径 d_M 等初始条件, 研究了粗粒土在不同试验条件下 K_0 的变化规律。试验结果表明: 粗粒土的 D_{r0} 与 K_0 存在线性负相关关系; 颗粒最大粒径 d_M 与 K_0 呈负相关关系, 可近似用幂函数表示; K_0 随着竖向应力 σ'_v 的增加呈减小趋势, 而且较低竖向应力下这种趋势显著。

关键词: 静止侧压力系数; 粗粒土; 初始相对密实度; 颗粒最大粒径; 竖向应力

中图分类号: TU43 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.0199

EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE FACTORS OF LATERAL PRESSURE COEFFICIENT AT REST FOR COARSE GRAINED SOIL

JIANG Ming-jie^{1,2,3}, ZHU Jun-gao^{1,2}, MEI Guo-xiong³

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

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: At present, there are few apparatuses and methods applicable for measuring K_0 of coarse-grained soil, and the relevant research about the effect factors of K_0 for coarse-grained soil is almost blank. To investigate the effect factors of K_0 for coarse-grained soil, several K_0 tests for a sandy gravel were performed by using a newly-developed large-size K_0 apparatus. By changing the initial conditions such as initial relative density D_{r0} and maximum grain size d_M , the K_0 behavior of coarse-grained soil under different experimental conditions is investigated. The test data show that: a linear negative correlation exists between K_0 and D_{r0} for coarse-grained soil; a negative correlation exists between K_0 and d_M for coarse-grained soil, and the correlation can be expressed by a power function; K_0 trends to decrease with the increase of effective vertical stress σ'_v , and the effect of σ'_v on K_0 is more pronounced under low σ'_v .

Key words: at-rest earth pressure coefficient; coarse grained soil; initial relative density; maximum grain size; effective vertical stress

静止侧压力系数 K_0 是土体处于无侧向应变状态时, 所受有效水平应力与有效竖向应力的比值是土体重要的状态参数。 K_0 是确定土体应力状态的基

本参数, 准确把握它有重要的工程意义^[1-4]。由于粗粒土颗粒最大粒径较大, 要求试验仪器尺寸较大, 目前适用的 K_0 测试仪器和方法较少, 因此, 关

收稿日期: 2019-04-15; 修改日期: 2019-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404804); 国家自然科学基金项目(51479052, 51578164); 广西自然科学基金创新研究团队项目(2016GXNSFGA380008)

通讯作者: 朱俊高(1964—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 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(E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn)。

作者简介: 蒋明杰(1990—), 男, 湖南人, 助理教授, 博士, 主要从事土体基本特性及本构关系、土石坝工程研究(E-mail: 18751957312@163.com);

梅国雄(1975—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 长江学者, 主要从事固结理论和土体基本性质研究(E-mail: meiguox@163.com)。

于粗粒土 K_0 的研究不多。事实上,粗粒土广泛应用于高土石坝、重载铁路路基和大规模填海工程等填筑工程^[5],掌握粗粒土 K_0 演化规律对分析及设计这些岩土工程有重要的应用价值。

根据众多学者的研究,土料 K_0 会受到诸如应力状态、超固结比、级配、以及相对密实度等因素影响。如 Brooker 和 Ireland^[6]、Mayne 和 Kulhawy^[7] 以及李国维等^[8]先后研究了超固结比 OCR 对 K_0 的影响规律,其中 Mayne 和 Kulhawy^[7]建立的 OCR 与 K_0 关系公式被广泛应用于砂土和黏土; Wanatowski 等^[9]采用平面应变仪研究了应力状态对 K_0 的影响规律,发现 K_0 随着竖向应力增大有减小趋势;王秀艳等^[10]利用多种试验仪揭示了土体埋置深度对土体 K_0 的影响规律;Wang 等^[11]采用单向固结仪揭示了级配、初始干密度对砂泥岩 K_0 的影响规律,并分别建立 K_0 与这两个影响因素的关系式。Vardhanabhuti 和 Mesri^[12]、Northcutt 和 Wijewickreme^[13]以及 Lee 等^[14-15]研究了相对密实度对砂土和黏土 K_0 的影响规律,发现 K_0 随着相对密实度增大呈减小趋势。

虽然关于 K_0 影响因素的研究成果颇多,但它们大多是基于砂土或黏土 K_0 试验数据得出,对于粗粒土 K_0 的影响因素和变化规律,相关研究极少。所以,有必要进一步研究粗粒土 K_0 影响因素。

本文基于近年研制的大型 K_0 测试仪,对某砂卵石料进行 K_0 试验。基于试验结果,研究粗粒土 K_0 的影响因素,并分析各因素对 K_0 产生作用的机理。

1 试验装置和方案

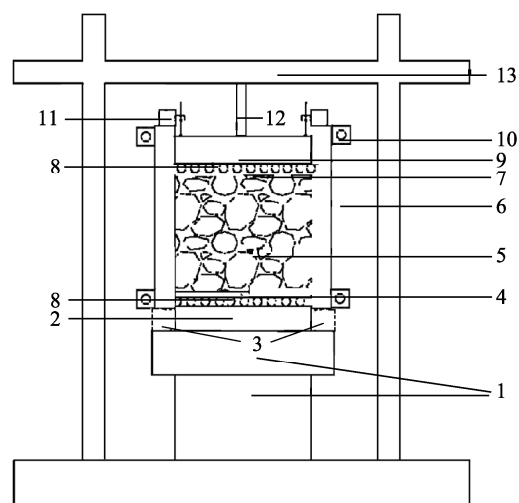
1.1 试验装置及原理

本文采用的大型 K_0 测试仪,由笔者团队研制。该仪器结构简单,操作方便,可在 0 MPa~4 MPa 下对粗粒土、砂土及黏土等各类土体进行试验,其仪器结构及试验原理见图 1。

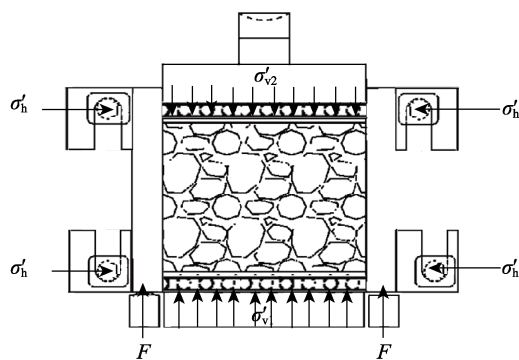
如图 1(b)所示,竖向应力导致试样出现侧向变形的趋势,因此试样会对试样筒 6 产生挤压作用,此时作用在 AB 断面(如图 1(c))上的法向应力等于作用在试样上的侧向应力,而该断面上的法向应力的合力 N_h 可由拉力传感器测得。因此,试样所受水平应力可表达为:

$$\sigma_h = \frac{N_h}{(h - \Delta h)d} \quad (1)$$

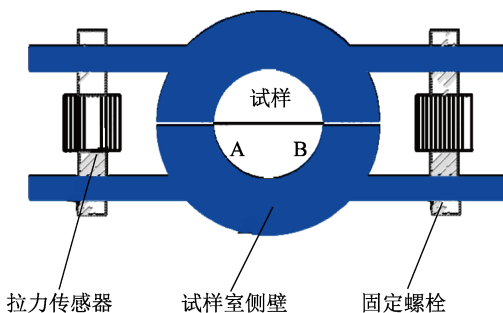
式中: h 为试样初始高度; Δh 为试样加载后的压缩量,由位移传感器 11 测得; d 为试样直径。



(a) 结构示意图



(b) 受力简图



(c) 原理俯视图

1—加载装置; 2—底座; 3—压重传感器; 4—下传力板; 5—压力室;
6—试样筒; 7—上传力板; 8—钢珠; 9—加压盖板; 10—拉压力传感器;
11—位移传感器; 12—荷载传感器; 13—加载架

图 1 K_0 测试仪示意图

Fig.1 Sketch map of K_0 apparatus

为减轻侧壁摩擦力的影响,根据 Wang 等^[11]的研究,本文在计算土体静止侧应力系数 K_0 时,试样所受竖向力采用试样顶部与底部竖向应力的算术平均值。为在试验过程中测出侧壁摩擦力 F ,将 4 个压重传感器 3 对称放置在试样筒底部 6,并在制样后清零压重传感器,从而排除试样和试样筒

6 自重的影响。根据荷载传感器 12 测得试样顶面竖向压力为 N_v ，底面竖向压力即为 $N_v - F$ ，从而可以分别假定摩擦力沿侧壁均匀分布，则试样内平均竖向应得到试样顶面竖向应力 σ'_{v1} 和底面竖向应力 σ'_{v2} 。

$$\sigma'_v = [N_v + (N_v - F)] / 2A = \frac{(N_v - F/2)}{\pi d^2} \quad (2)$$

因此，根据式(3)即可计算出修正 F 影响后土体 K_0 值。关于仪器详细的介绍以及试验结果的验证见文献[16—17]。需要说明的是，由于式(3)假定摩擦力沿侧壁均匀分布，然而事实上摩擦力沿侧壁高度有减小趋势，因此式(3)会导致一定误差，且这误差与试样高度有关。笔者团队曾以该仪器对高度分别为 20 cm、25 cm 和 30 cm 的砂土试样进行 K_0 试样，发现以式(3)计算这三种试样的 K_0 值随高度的增大而又减小趋势，但最大差异值不到 5%。因此可以认为“摩擦力沿侧壁均匀分布”这一假定造成的误差可以忽略。

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \left(\frac{N_h}{(h - \Delta h)d} \right) / \left(\frac{4(N_v - F/2)}{\pi d^2} \right) \quad (3)$$

1.2 试验土料及试验方案

本文对取自大石峡面板坝的砂卵砾石料进行试验。土料原级配颗粒最大粒径高达 100 mm，无法直接进行试验，故本文利用等量替代法[18]对原级配土料进行缩尺，使其缩尺后最大粒径 d_M 满足试验要求。缩尺后的试验用料编号为 S1~S7。其中，S1~S4 缩尺后颗粒最大粒径 d_M (简称缩尺粒径) 分别为 10 mm、20 mm、40 mm 和 60 mm。S5~S7 与 S4 采用一样的级配。原级配土料及 K_0 试验各土料级配见表 1。

表 1 土料及试样基本性质
Table 1 Basic property of tested soil and specimens

试样	初始相对 密实度	初始 干密度/ (g/cm ³)	粒组含量/(%)					
	D_{r0}		100~60	60~40	40~20	20~10	10~5	<5
原级配	—	—	21.9	12.3	16.5	12.8	8.04	28.46
S1	0.8	1.795	—	—	—	—	71.54	28.46
S2	0.8	1.907	—	—	—	43.68	27.86	28.46
S3	0.8	2.004	—	—	31.58	24.39	15.56	28.46
S4	0.8	2.043	17.64	17.64	23.79	18.38	11.73	28.46
S5	0.7	1.989	17.64	17.64	23.79	18.38	11.73	28.46
S6	0.6	1.938	17.64	17.64	23.79	18.38	11.73	28.46
S7	0.4	1.844	17.64	17.64	23.79	18.38	11.73	28.46

本文试样采用高度和直径分别为 30 cm 和 40 cm 的风干土料。制样时，根据试样尺寸、初始

干密度以及级配曲线均匀配置 5 份土料，然后将配好的五份土料逐层填入试样筒，以电子振动器振捣每层土料到控制密度，并对每层土料表面进行整平。S1~S7 的初始相对密实度 D_{r0} 以及初始干密度如表 1 所示。

制样结束后，以 20 kPa/min 的速度对试验逐级施加 100 kPa~4200 kPa 竖向荷载 σ'_v ； σ'_v 达到预定值时，稳压 15 min 后记录各传感器读数；当 σ'_v 达到 4200 kPa 后，稳压 240 min 后记录各传感器读数，并以 20 kPa/min 的速度进行卸载；卸载过程中 σ'_v 达到预定值时，稳压 15 min 后记录各传感器读数。根据沈靠山[19]的研究，粗粒土在 120 min 内完成固结，因此，卸载阶段的粗粒土可视为处于超固结状态。

2 K_0 试验结果及分析

基于 K_0 试验结果，整理了试验过程中土料 S1~S7 静止侧压力系数 K_0 随竖向应力 σ'_v 演化规律，如图 2 中离散点所示。

由图 2 所示，在加载过程中砂卵砾石料 K_0 随着 σ'_v 增加呈减小趋势，且 $\sigma'_v > 500$ kPa 后，这种趋势逐渐变缓。Landva 等[20]城市固体废弃物 K_0 试验结果、Lirer 等[21]砂卵砾石料的 K_0 试验结果以及 Zhu 等[16]粗粒土松散样 K_0 试验结果都显示了与本文相似的 K_0 演化规律，而 Wanatowski[9]和 Gu 等[22]通过研究也发现砂土 K_0 随着竖向应力增大呈减小趋势。

由图 2(a)~图 2(d)知，在卸载时，粗粒土 K_0 随着 σ'_v 的减小会显著地增大，这与其他学者，如 Brooker 和 Ireland[6]，Wang 等[11]，Lee 等[15]，以及 Zhu 等[16]卸载试验时的 K_0 变化规律一致。

为比较分析缩尺粒径 d_M 对 K_0 的影响，在图 2(a)~图 2(b)中都分别给出了两种 d_M 试样的试验结果。可以看出，无论土样处于加载阶段或是卸载阶段，当 σ'_v 相同时，不同 d_M 试样的 K_0 明显不同， d_M 越大， K_0 越小，这说明对同种缩尺方法缩制所得土料来说， d_M 对其 K_0 有一定影响。

为比较分析初始相对密实度 D_{r0} 对 K_0 的影响，在图 2(c)~图 2(d)中都分别给出了两种不同相对密实度试样的试验结果。可以看出，无论土样处于加载阶段或是卸载阶段，当 σ'_v 相同时，不同密度试样的 K_0 明显不同，初始相对密实度 D_{r0} 越大， K_0 越小，这说明 D_{r0} 对 K_0 有一定影响。Vardhanabhuti 和 Mesri[12]含粉砂 K_0 试验结果、Northcutt 和 Wijewickreme[13]、Lee 等[14]纯沙 K_0 试验结果以及

Lee 等^[15]泥砂 K_0 试验结果都显示了与本文相似的 K_0 系数变化规律。

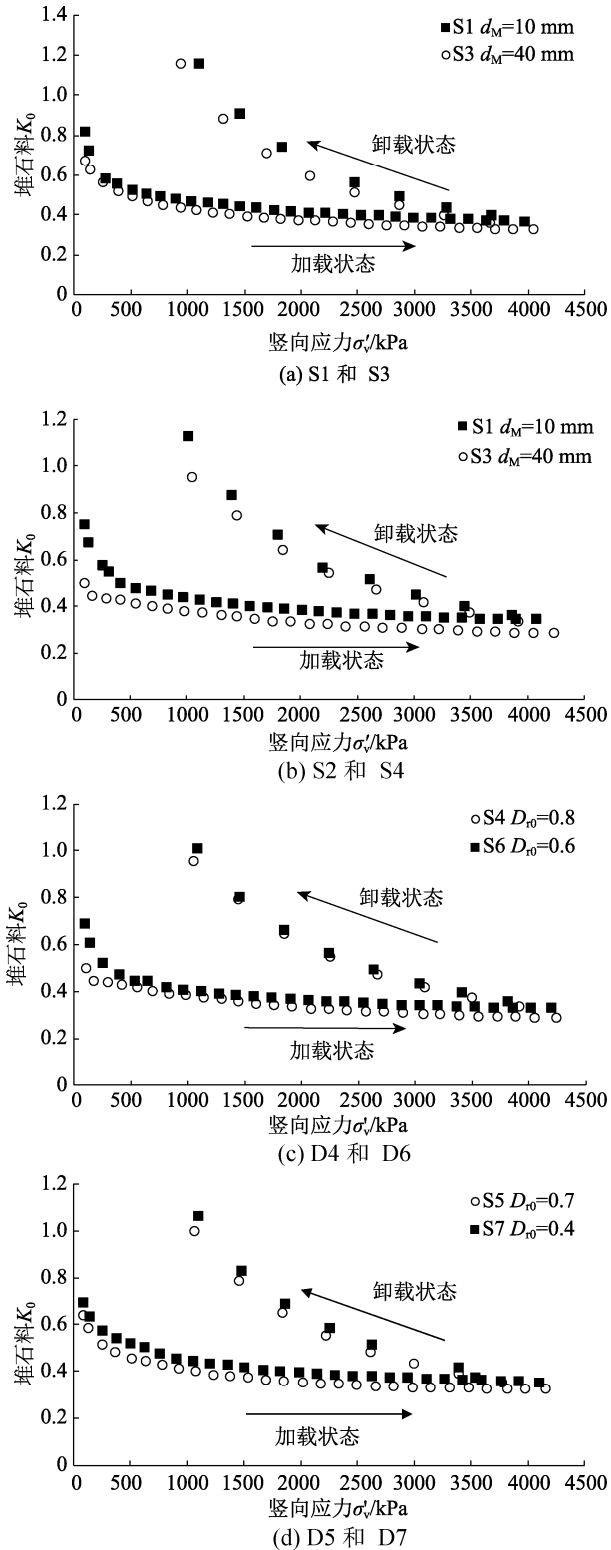


图2 K_0 - σ'_v 关系曲线

Fig.2 K_0 - σ'_v relation curves

综上, 竖向应力 σ'_v , 缩尺粒径 d_M 以及初始相对密度 D_{r0} 都对粗粒土 K_0 有一定影响, 接下来将

详细分别分析 σ'_v 、 d_M 以及 D_{r0} 对粗粒土 K_0 的影响规律。

2.1 初始相对密度对 K_0 影响

根据上文, 试样的初始相对密度 D_{r0} 对 K_0 有一定影响。为进一步分析 D_{r0} 对 K_0 的影响规律, 根据 S4~S7 试验结果整理得加载过程中对应 σ'_v 分别在 100 kPa、500 kPa、1000 kPa、2000 kPa 和 4000 kPa 时, 以及卸载过程中 σ'_v 分别在 1100 kPa、1500 kPa、2250 kPa、3000 kPa 和 3800 kPa 时对应初始相对密度 D_{r0} 的砂卵砾石料 K_0 , 并绘于图 3。图 3 清楚地表明, 对应相同竖向应力下, K_0 随 D_{r0} 的增大基本呈线性减小趋势, 可近似用直线拟合, 即:

$$K_0 = aD_{r0} + b \quad (4)$$

式中, a 、 b 为拟合参数, 且 $a < 0$ 。加卸载时各竖向应力下拟合所得 a 、 b 以及决定系数 R^2 分别列于表 2。

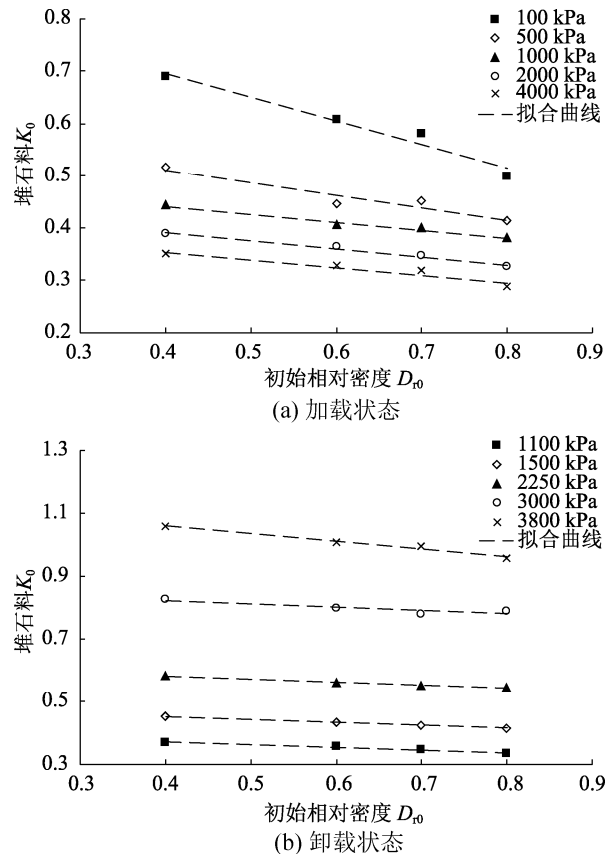


图3 K_0 - D_{r0} 关系曲线

Fig.3 K_0 - D_{r0} relation curves

由图 3 可以看出, 式(4)的拟合曲线与试验点吻合很好。式(4)预测值误差较小, 与试验值最大相差不到 3.81%, 决定系数 R^2 最小值也达到了 0.85, 说明式(4)拟合效果较好。显然, 堆石料 K_0 与初始相

对密实度 D_{r0} 可近似视为线性负相关。

K_0 随 D_{r0} 的增大而减小可能是由于土体颗粒连锁效应。根据 Wang 等^[11]以及 Lee 等^[15]的研究, 土料相对密实度 D_r 增加会增大土体颗粒连锁效应(即颗粒间的咬合作用), 而颗粒连锁效应越大, 竖向方向的力链越强, 这会导致竖向应力向水平方向传播的程度降低。因此, 随着土料初始相对密实度 D_{r0} 增大, 土体 K_0 呈减小趋势。

2.2 缩尺粒径对 K_0 影响

根据上文, 对同种缩尺方法缩制所得土料来说, 缩尺粒径 d_M 对其 K_0 有一定影响。为了进一步分析 d_M 对 K_0 的影响规律, 根据 S1~S4 试验结果整理得加载过程中对应 σ'_v 分别在 100 kPa、500 kPa、1000 kPa、2000 kPa 和 4000 kPa 时, 以及卸载过程中 σ'_v 分别在 1100 kPa、1500 kPa、2250 kPa、3000 kPa 和 3800 kPa 时不同 d_M 处砂卵砾石料 K_0 , 并绘于图 4。图 4 清楚地表明, 对应相同竖向应力下, K_0 随 d_M 的增大基本呈减小趋势, 两者关系可表示成:

$$K_0 = cd_M^d \tag{5}$$

式中, c 、 d 为拟合参数, 且 $c < 0$ 。加卸载时各竖向应力下拟合所得 c 、 d 以及决定系数 R^2 分别列于表 3。

由图 4 可以看出, 式(5)的拟合曲线与试验点吻合很好。与对应与试验值相比, 式(5)预测值误差较小, 最大相差不到 9.6%。表 2 中的决定系数 R^2 最小值也达到了 0.72, 说明式(5)拟合效果较好。显然, 对同种缩尺方法缩制所得土料来说, 其 K_0 与缩尺粒径 d_M 的关系可以用幂函数表示。

表 2 不同 σ'_v 下各土料的 a 和 b

Table 2 a and b under different σ'_v for specimens

参数值	加载阶段					卸载阶段				
	100 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	4000 kPa	3800 kPa	3000 kPa	2250 kPa	1500 kPa	1100 kPa
a	-0.450	-0.240	-0.150	-0.150	-0.150	-0.08	-0.090	-0.100	-0.110	-0.250
b	0.876	0.606	0.502	0.453	0.412	0.405	0.488	0.621	0.849	1.157
R^2	0.960	0.910	0.970	0.990	0.920	0.990	0.990	0.990	0.850	0.970

表 3 不同 σ'_v 下各土料的 c 和 d

Table 3 c and d under different σ'_v for specimens

参数值	加载阶段					卸载阶段				
	100 kPa	500 kPa	1000 kPa	2000 kPa	4000 kPa	3800 kPa	3000 kPa	2250 kPa	1500 kPa	1100 kPa
c	1.533	0.674	0.590	0.547	0.497	0.467	0.542	0.583	1.108	1.476
d	-0.250	-0.110	-0.100	-0.120	-0.130	-0.080	-0.070	-0.020	-0.090	-0.100
R^2	0.840	0.720	0.900	0.910	0.890	0.920	0.96	0.960	0.930	0.830

2.3 应力状态对 K_0 影响

由第 1 节知, 加载时 K_0 随竖向应力 σ'_v 增大呈

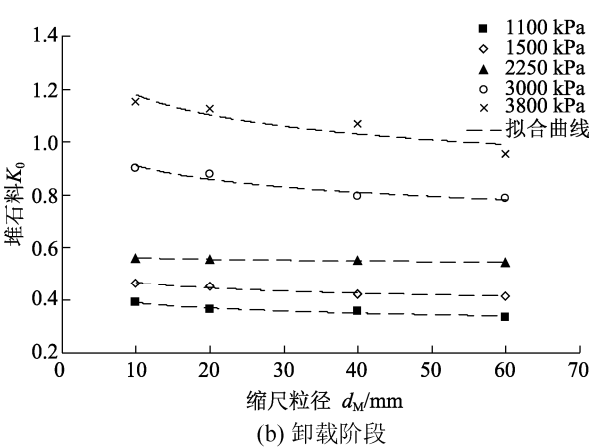
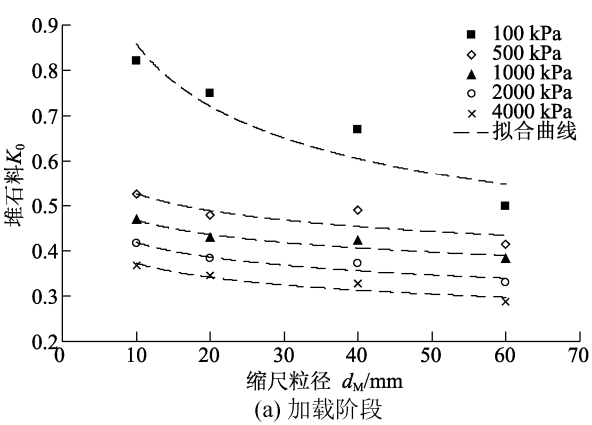


图 4 K_0 - d_M 关系曲线
Fig.4 K_0 - d_M relation curves

K_0 随 d_M 的增大而减小可能也是由于土体颗粒连锁效应。根据 Wang 等^[11]的研究, 颗粒粒径增大会增强土体颗粒连锁效应, 因此, 随着土料颗粒最大粒径 d_M 增大, 土体 K_0 呈减小趋势。

减小趋势, 且这一趋势随着 σ'_v 的增大趋于平缓。
 K_0 随 σ'_v 增大而减小的原因可解释为: 土料在 σ'_v 增

大时,土体会被进一步压实,土体相对密度 D_r 随之增加,根据 2.1 节,由于土体颗粒连锁效应, D_r 的增加会导致 K_0 的减小,故而 K_0 随 σ'_v 的增大而减小。

为进一步分析加载时 σ'_v 对 K_0 的作用机理,以 S4 试验为例,整理出该试样在加载过程中 D_r 与 σ'_v 的变化关系曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出,在加载过程中 D_r 随 σ'_v 增大而增大,且大致分为两个阶段:在 $\sigma'_v < 500 \text{ kPa}$, D_r 随 σ'_v 成比例增加,且斜率大致为 7×10^{-5} ; 在 $\sigma'_v > 500 \text{ kPa}$, D_r 也随 σ'_v 成比例增加,且斜率大致为 3×10^{-5} ,其他六个试样的 D_r 与 σ'_v 的变化曲线大致与图 5 类似。这说明对于粗粒土来说, σ'_v 对土料 D_r 的影响存在阈值(称为压实阈值),在 σ'_v 达到压实阈值之后,由于土体已经被压实到一定程度, D_r 随 σ'_v 的增大而增大的趋势会减缓。因此,对于粗粒土来说,当 σ'_v 达到压实阈值之后,随 σ'_v 的增大, K_0 的减小趋势趋于平缓。

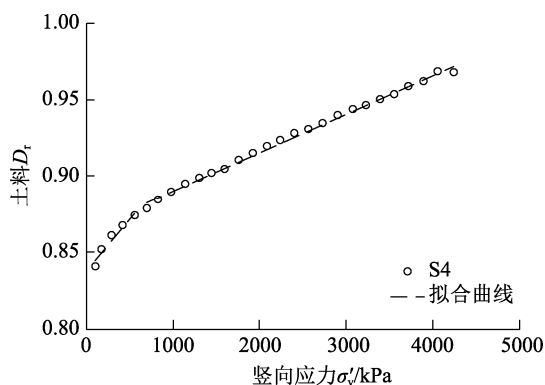


图 5 S4 σ'_v - D_r 关系曲线

Fig.5 σ'_v - D_r relation curves for S4

图 3 表明,卸载时 K_0 随着 σ'_v 的减小会显著增大。根据 Wang 和 Gao^[23] 的研究,这可能是由于加载过程中土体压缩量中有一部分为塑性变形,这部分变形会导致部分水平应力在土体压实过程中保持不变,即使移除 σ'_v ,这部分“锁定”的水平应力也不会消失。故而,卸载时,随着竖向应力不断减小, K_0 逐渐增大。

3 结论

对某一砂砾料 7 组不同级配进行了大型 K_0 试验,研究了粗粒土静止侧压力系数的影响因素及其变化规律,得出以下结论:

(1) 粗粒土相对密度对其 K_0 系数影响较大;随着土体初始相对密度 D_{r0} 的增大,土体颗粒连锁效应变大,进而导致土体 K_0 降低,而且,两者呈

线性关系;随着竖向应力的增大, K_0 随 D_{r0} 增大而减小的趋势逐渐减缓。

(2) 对同种缩尺粒径缩制土料来说,粗粒土颗粒最大粒径 d_M 对其 K_0 系数有一定影响,随着土体 d_M 的增大,土体 K_0 变小,两者呈幂函数关系。

(3) 竖向加载时, K_0 随竖向应力 σ'_v 的增大呈减小趋势,且随着 σ'_v 增大,这一趋势逐渐变缓;卸载时土体 K_0 随着 σ'_v 减小而显著增大。

参考文献:

- [1] 刘华北,汪磊,王春海,等.土工合成材料加筋土挡墙筋材内力分析[J].工程力学,2017,34(2):1-11.
Liu Huabei, Wang Lei, Wang Chunhai, et al. Analysis methods for the reinforcement loads of geosynthetic-reinforced soil retaining walls [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 1-11. (in Chinese)
- [2] Pegah E, Liu H, Dastanboo N. Evaluation of the lateral earth pressure coefficients at-rest in granular soil deposits using the anisotropic components of S-wave velocity [J]. Engineering Geology, 2017, 230: 55-63.
- [3] Ni P, Song L, Mei G, et al. On predicting displacement-dependent earth pressure for laterally loaded piles [J]. Soils and Foundations, 2017, 58(1): 85-96.
- [4] 应宏伟,王小刚,张金红.考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J].工程力学,2018,35(5):118-124.
Ying Hongwei, Wang Xiaogang, Zhang Jinhong. Analysis on heave-resistant stability considering the effect of excavation width [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 118-124. (in Chinese)
- [5] 陈金锋,徐明,宋二祥,等.不同应力路径下石灰岩碎石力学特性的大型三轴试验研究[J].工程力学,2012,29(8):195-201.
Chen Jinfeng, Xu Ming, Song Erxiang, et al. Large scale triaxial testing on mechanical properties of broken limestone under various stress paths [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 195-201. (in Chinese)
- [6] Brooker E W, Ireland H O. Earth pressures at rest related to stress history [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1965, 2(1): 1-15.
- [7] Mayne P W, Kulhawey F H. K-OCR relationships in soil [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 20(1): 851-872.
- [8] 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.
- [9] Li Guowei, Hu Jian, Lu Xiaoqin, et al. One-dimensional secondary consolidation coefficient and lateral pressure coefficient of over consolidated soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2198-2205. (in Chinese)
- [9] Wanatowski D, Chu J. Stress-strain behavior of a granular fill measured by a new plane-strain apparatus [J]. Astm Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(2): 149-157.

- [10] 王秀艳, 唐益群, 藏逸中, 等. 深层土侧向应力的试验研究及新认识[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 430—435.
Wang Xiuyan, Tang Yiqun, Zang Yizhong, et al. Experimental studies and new ideas on the lateral stress in soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 430—435. (in Chinese)
- [11] Wang J J, Yang Y, Bai J, et al. Coefficient of earth pressure at rest of a saturated artificially mixed soil from oedometer tests [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017(1): 1—9.
- [12] Vardhanabhuti B V, Mesri G M. Coefficient of earth pressure at rest for sands subjected to vibration [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1242—1263.
- [13] Northcutt Sheri, Wijewickreme Dharma. Effect of particle fabric on the coefficient of lateral earth pressure [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(5): 457—466.
- [14] Lee J, Yun T S, Lee D, et al. Assessment of K_0 , correlation to strength for granular materials [J]. Soils & Foundations, 2013, 53(4): 584—595.
- [15] Lee J, Lee D, Park D. Experimental investigation on the coefficient of lateral earth pressure at rest of silty sands: Effect of fines [J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(6): 20130204.
- [16] Zhu J G, Jiang M J, Lu Y, et al. Experimental study on the coefficient of sandy gravel under different loading conditions [J]. Granular Matter, 2018, 20(3): 40.
- [17] 朱俊高, 陆阳洋, 蒋明杰, 等. 新型静止侧压力系数试验仪的研制与应用[J]. 岩土力学, 2018, 29(8): 362—367.
Zhu Jungao, Lu Yangyang, Jiang Mingjie, et al. Development and application of new-type apparatus for K_0 test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 29(8): 362—367. (in Chinese)
- [18] Lowe J. Shear strength of coarse embankment dam materials [C]. Proceedings 8th International Congress on Large Dams, 1964: 745—761.
- [19] 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.
Shen Kaoshang. Study of coefficient of earth pressure at rest on gravel soil [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)
- [20] Landva A O, Valsangkar A J, Pelkey S G. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1157—1165.
- [21] Lirer S, Flora A, Nicotera M V. Some remarks on the coefficient of earth pressure at rest in compacted sandy gravel [J]. Acta Geotechnica, 2011, 6(1): 1—12.
- [22] Gu X, Hu J, Huang M. K_0 of granular soils: A particulate approach [J]. Granular Matter, 2015, 17(6): 703—715.
- [23] Wang Y H, Gao Y. Experimental and dem examinations of K_0 in sand under different loading conditions [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5): 04014012.

(上接第 141 页)

- [22] Gasparini D, Vanmarcke E H. SIMQKE: Gram for artificial motion generation [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- [23] 田玉基, 杨庆山. 地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 170—174.
Tian Yuji, Yang Qingshan. Analysis models and methods for structural seismic responses [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 170—174. (in Chinese)
- [24] 王琦. 多塔矮塔斜拉桥振动台模型试验与分析[D]. 上海: 同济大学, 2019.
Wang Qi. Shaking table model test and analysis of multi-tower extra-dosed cable-stayed bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (in Chinese)
- [25] Aviram A, Mackie K R, Stojadinović B. Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California [R]. Berkeley: University of California, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2008.
- [26] 艾庆华, 王东升, 李宏男, 等. 基于塑性铰模型的钢筋混凝土桥墩地震损伤评价[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 158—166.
Ai Qinghua, Wang Dongsheng, Li Hongnan, et al. Seismic damage evaluation of RC bridge columns based on plastic hinge model [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 158—166. (in Chinese)
- [27] Ernst J H. Der E-Modul von Seilen unter berucksichtigung des Durchhanges [J]. Der Bauingenieur, 1965, 40(2): 52—55.
- [28] Shakyia K, Wijeyewickrema A C. Mid-column pounding of multi-story reinforced concrete buildings considering soil effects [J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(1): 71—85.
- [29] Jankowski R, Wilde K, Fujino Y. Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27(5): 487—502.
- [30] Vamvatsikos D, Cornell C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(2): 523—553.
- [31] 吕大刚, 于晓辉, 王光远. 基于单地震动记录 IDA 方法的结构倒塌分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 33—39.
Lü Dagang, Yu Xiaohui, Wang Guangyuan. Structural collapse analysis based on single-record IDA method [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6): 33—39. (in Chinese)
- [32] 沙奔, 王浩, 陶天友, 等. 考虑混凝土损伤的隔震连续梁桥碰撞响应分析[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 193—199.
Sha Ben, Wang Hao, Tao Tianyou, et al. Analysis on pounding response of isolated continuous girder bridge considering concrete damage [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 193—199. (in Chinese)