

DOI: 10.11779/CJGE2018S2016

# 粗粒土静止侧压力系数估算方法研究

蒋明杰<sup>1, 2</sup>, 陆晓平<sup>3</sup>, 朱俊高<sup>\*1, 2</sup>, 吉恩跃<sup>4, 5</sup>, 郭万里<sup>4, 5</sup>

(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. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022; 4. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024;  
5. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 静止侧压力系数  $K_0$  是土体基本的力学参数, 进行粗颗粒土  $K_0$  系数的研究对土石坝及填方工程有重要的理论意义和应用价值。目前, 适用于粗颗粒土  $K_0$  试验仪器及方法较少, 因此准确可靠的  $K_0$  估算公式在实际土石坝工程中具有较强的应用性。为得到可靠的粗颗粒土  $K_0$  估算公式, 利用大型  $K_0$  测试仪以及大型三轴仪, 对某砂卵砾石料和堆石料同时进行了系列  $K_0$  试验以及 CD 三轴试验。基于各土料  $K_0$  试验结果, 验证了笔者之前提出的粗颗粒土  $K_0$  与竖向应力的关系式。在此基础上, 结合三轴试验结果, 总结了一个根据有效内摩擦角  $\varphi'$  预测任意固结状态以及应力状态下粗颗粒土  $K_0$  值的估算公式。最后, 利用  $K_0$  试验结果验证了本文估算公式的准确性及适用性。

**关键词:** 静止侧压力系数; 粗颗粒土; 估算公式; 有效内摩擦角

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0077-05

作者简介: 蒋明杰(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事土体基本性质等方面的研究。E-mail: 18751957312@163.com。

## Method for estimating at-rest lateral pressure coefficient of coarse-grained soils

JIANG Ming-jie<sup>1, 2</sup>, LU Xiao-ping<sup>3</sup>, ZHU Jun-gao<sup>1, 2</sup>, JI En-yue<sup>4, 5</sup>, GUO Wan-li<sup>4, 5</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Management Division  
of Qinhui River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, China; 4. Geotechnical Engineering Department, Nanjing  
Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 5. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control  
Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The at-rest earth pressure coefficient  $K_0$  is a basic mechanical parameter of soils. So studying  $K_0$  of coarse-grained soils is of important theoretical value and practical significance in geotechnical engineering. At present, there are few apparatuses and methods applicable for measuring  $K_0$  of coarse-grained soils. Therefore, an accurate and reliable empirical formula for  $K_0$  has a strong application in the actual earth-rockfill dams. For obtaining the reliable estimation formula for  $K_0$  of coarse-grained soils, a number of  $K_0$  tests and CD triaxial tests for a sandy gravel and a rockfill are performed by using the specially large-size  $K_0$  apparatus and large-size triaxial apparatus, respectively. Based on the results of  $K_0$  tests on all specimens, the relationship between  $K_0$  and vertical stress  $\sigma'_v$  for the coarse-grained soils proposed by the authors is verified. By combining the relationship and triaxial test results, an empirical formula is obtained, which can well describe the relationship between  $K_0$  and stress state under an arbitrary consolidation condition based on the effective angle of internal friction  $\varphi'$ . Finally, the proposed formula is verified by using  $K_0$  test data.

**Key words:** at-rest lateral pressure coefficient; coarse-grained soil; empirical formula; effective internal friction angle

## 0 引言

土体静止侧压力系数  $K_0$  是指土体无侧向变形时的有效水平应力  $\sigma'_h$  与有效竖向应力  $\sigma'_v$  之比。 $K_0$  是土体重要的力学参数, 是确定水平场地中的应力状态以及计算静止土压力的基础。但是, 要准确测定  $K_0$  并不容易, 尤其对粗颗粒土, 相关研究极少。事实上, 不少工程设计中, 需要准确把握粗颗粒土的  $K_0$  值。比如,

山区河流深厚覆盖层地基上的土石坝工程, 其地基往往是砂卵砾石料等粗颗粒土, 准确了解粗颗粒土的  $K_0$

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); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(20141B1605313)

收稿日期: 2018-07-22

\*通讯作者(E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn)

有助于合理分析土石坝应力变形；在大规模填海工程中，其填筑材料也常常是堆石料，粗颗粒土  $K_0$  值的确定对堆体变形及其内部结构物土压力估算十分重要。因此，深入研究粗颗粒土的  $K_0$  系数有重要理论意义和工程价值。

目前， $K_0$  的确定方法有直接和间接 2 种方式。所谓直接方式是指通过现场试验或者室内试验直接测得无侧向变形土体的  $\sigma'_h$  和  $\sigma'_v$ ，从而计算土体的  $K_0$ 。室内直接方式测  $K_0$  比较常见的方法是压缩仪法<sup>[1-4]</sup>和三轴仪法<sup>[5-7]</sup>。间接方式通常是依据强度试验结果，如土体有效内摩擦角  $\varphi'$ ，利用经验公式计算  $K_0$ 。由于粗粒土颗粒直径较大，要求试验仪器尺寸较大，一般没有条件对粗粒土进行  $K_0$  试验，甚至没有较好的方法来测定粗粒土的  $K_0$ 。比如，如果用常规的三轴仪或水囊式压缩仪测定粗粒土的  $K_0$ ，就会出现橡皮膜的嵌入作用，导致无法使试样处于真正的“无侧向变形”。因此，利用经验公式来预测粗粒土  $K_0$  显得尤为重要。

最为常见的间接方式是通过  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系式来计算  $K_0$ ， $\varphi'$  可通过直剪仪或三轴仪测得。大量学者对土体的  $\varphi'$  与  $K_0$  关系式进行了研究，如 Jaky<sup>[8]</sup> 在 1948 年推导了砂土  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系式。Abdelhamid 等<sup>[9]</sup> 基于 Rowe 的假设推导了黏土  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系式。Federico 等<sup>[10]</sup> 对一系列实测静止侧压力进行统计分析，推得了压缩性黏土  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系式。虽然不少学者对  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系做过很多有价值的探索，但是他们绝大多数都是针对砂土或黏土，较少涉及粗粒土。粗粒土  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系还有待进一步研究。

本文利用新近研制的大型土体静止侧压力系数测定仪以及大型三轴仪，对某砂卵砾石料和堆石料压实试样分别进行  $K_0$  试验以及三轴 CD 试验，从而分析粗粒土  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系，进而研究得到粗粒土  $K_0$  的估算公式。

## 1 试验仪器与试验方案

本文  $K_0$  试验仪器采用的是笔者新近研制的新型大型  $K_0$  测试仪，此仪器结构简单，且适用于高应力状态下包括粗颗粒土在内的各种土体，基本构造及原理见文献[11]。

本文试验土料分别为大石峡面板坝的砂卵砾石料和如美堆石坝的堆石料。砂卵砾石料中砾石含量占 21.4%。砂卵砾石料编号为 S1~S4，堆石料编号为 D1~D7。用于  $K_0$  试验各试样土料级配曲线见图 1，各个试样对应级配见表 1。

本文  $K_0$  实验中试样的直径均为 40 cm，试样高度 30 cm，采用试验土料为风干样。填入土料前，在试样

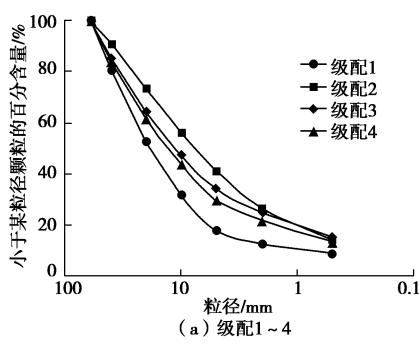
筒侧壁贴上聚四氟乙烯膜并涂凡士林以减小侧壁摩擦力。土料分三等份逐层填入试样筒，并用振动压实器进行压实，从而获得设定的初始相对密实度。各个试验对应试样初始相对密实度、初始密度见表 1。

本文三轴试验仪器采用的是河海大学 LSW-1000 型大型流变三轴剪切试验机，试验围压分别为 0.4、0.8、1.6 以及 2.4 MPa。基于三轴试验结果，根据莫尔-库仑强度理论求取各土料对应有效内摩擦角  $\varphi'$ ，以研究粗粒土  $\varphi'$  与  $K_0$  的关系。各组土料的  $\varphi'$  以及  $\sin \varphi'$  如表 1 所示。

表 1 土料及试样基本性质

Table 1 Basic properties of test soils and specimens

土料	试样	级配	$D_{10}$	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi'$ $(^{\circ})$	$\sin \varphi'$
	S1	级配 1	0.80	2.191	37.5	0.609
砂卵砾	S2	级配 2	0.80	2.256	39.7	0.639
石料	S3	级配 3	0.80	2.299	40.5	0.649
	S4	级配 4	0.80	2.304	40.9	0.655
	D1	级配 5	0.80	1.897	39.5	0.636
	D2	级配 6	0.80	2.016	39.8	0.640
	D3	级配 7	0.80	2.124	42.1	0.670
堆石料	D4	级配 8	0.80	2.168	43.4	0.687
	D5	级配 8	0.76	2.137	43.0	0.682
	D6	级配 8	0.72	2.107	42.7	0.678
	D7	级配 8	0.70	2.095	40.8	0.653



(a) 级配 1~4

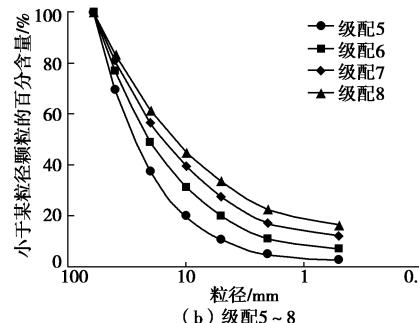


图 1 各土料级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves of test materials

## 2 粗粒土 $K_0$ 估算公式的推导

### 2.1 粗粒土 $K_0 - \sigma'_v$ 关系式验证

基于  $K_0$  试验结果, 整理了土料 S1~S2 以及 D1~D2 在  $K_0$  试验过程  $K_0$  随竖向应力  $\sigma'_v$  变化关系, 如图 2 中离散点所示。

由图 2 可知, 竖向应力  $\sigma'_v$  对  $K_0$  有一定影响,  $K_0$  随着  $\sigma'_v$  的增加呈减小趋势。显然, 得出能描述  $K_0$  与  $\sigma'_v$  关系的公式有重要理论意义。文献[11]之前根据粗粒土松散样  $K_0$  试验, 已得出了粗粒土  $K_0 - \sigma'_v$  关系式, 即式(1), 但对此式是否适用于初始相对密实度  $D_{r0}$  不为 0 的粗粒土, 没有进行验证。下面将利用本文试验结果对式(1)适用性进行验证。

$$K_{0oc} = \left[ \frac{K_{0max} + K_{0min} \sqrt{\frac{\sigma_c / OCR}{p_a}}}{\sqrt{\frac{\sigma_c / OCR}{p_a}} + 1} \right] OCR^n \quad (1)$$

式(1)中  $p_a$  为标准大气压强,  $K_{0max}$  和  $K_{0min}$  为材料参数, 其物理意义分别为竖向应力为 0 和  $\infty$  时的土体  $K_0$  系数。 $\sigma_c$  是前期固结压力。OCR 为超固结比, 当  $OCR > 1$ , 土体处于超固结状态,  $OCR = 1$ , 土体处于正常固结状态。式(1)中  $n$  为材料参数, 可参照 Mayne and 等<sup>[36]</sup> 经过试验研究得出的公式取用:

$$n = \sin \varphi' \quad (2)$$

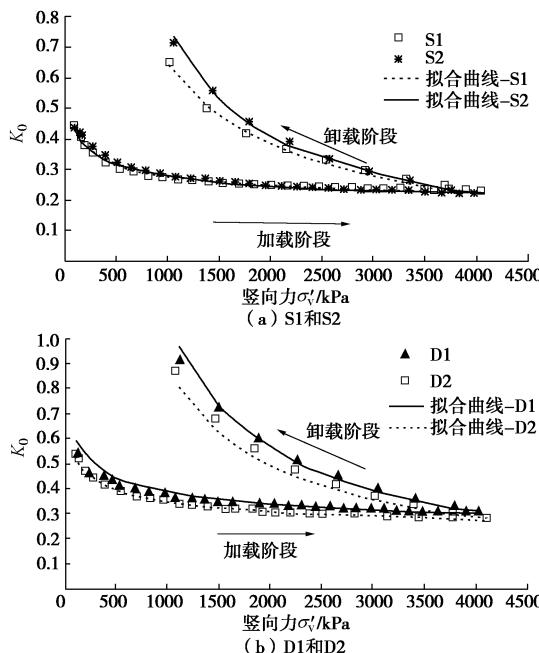


图 2  $K_0 - \sigma'_v$  关系曲线

Fig. 2  $K_0 - \sigma'_v$  curves

为验证式(1)是否对  $D_{r0}$  不为 0 的粗粒土仍然适用, 利用式(1)对 S1~S2 和 D1~D2 土料试验数据进行拟

合, 并将所得拟合曲线绘于图 2。由图 2 知拟合曲线与试验点吻合度较高, 误差基本低于 1%, 最大误差不超过 3%。对其他试样  $K_0$  试验值用式(1)拟合所得预测值误差也大致如此, 限于篇幅, 相关图形不再列出。这表明对于  $D_{r0}$  不为 0 的粗粒土, 式(1)仍能较好地描述其  $K_0$  与竖向应力的关系。

表 2 给出了由式(1)拟合得到的 S1~S4 以及 D1~D7 参数  $K_{0max}$ 、 $K_{0min}$ 、 $n$  及相关系数  $R^2$ 。表 2 中  $R^2$  都在 0.94 以上, 这进一步验证式(1)能较好地反映各种初始条件下粗粒土  $K_0$  与竖向应力的关系。

表 2 各土料  $K_{0max}$ 、 $K_{0min}$ 、 $n$  及  $R^2$

Table 2 Values of  $K_{0max}$ ,  $K_{0min}$ ,  $n$  and  $R^2$  of specimens

参数	试样编号										
	S1	S2	S3	S4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
$K_{0max}$	0.71	0.70	0.69	0.69	0.99	0.86	0.75	0.66	0.71	0.73	0.85
$K_{0min}$	0.15	0.15	0.14	0.14	0.20	0.19	0.15	0.12	0.15	0.16	0.17
$n$	0.64	0.69	0.65	0.67	0.71	0.65	0.67	0.65	0.67	0.70	0.65
$R^2$	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.94	0.99

### 2.2 粗粒土 $K_0$ 估算方法研究

静止侧压力系数  $K_0$  可以通过试验测定, 但由于该试验为非常规试验, 相关研究相对较少, 因此, 不少学者总结出一些经验公式来估算  $K_0$ 。现有的经验公式大多是针对砂土或黏性土提出的, 且基本不考虑应力状态对  $K_0$  的影响, 因此它们未必能准确估算粗粒土  $K_0$ 。而粗粒土颗粒粒径较大, 适合它的  $K_0$  试验仪器以及方法很少, 更需要寻找出合适的经验公式来估算粗粒土  $K_0$ 。为此, 笔者对表 1 中列出的 11 组土料 (S1~S4 和 D1~D7) 进行了大型三轴 CD 试验, 三轴试验得到的  $\varphi'$  见表 1。下面将根据  $\varphi'$  及  $K_0$  试验结果, 建立估算粗粒土  $K_0$  的经验公式。

从表 1 和表 2 可以发现, 砂卵砾石料和堆石料的  $K_{0max}$  和  $K_{0min}$  都随着  $\sin \varphi'$  的增大有减小的趋势。因此, 基于表 1 和表 2, 绘制 S1~S4 以及 D1~D4  $K_{0max}$  以及  $K_{0min}$  和  $\sin \varphi'$  的关系, 如图 3 所示。进一步分析图 3 发现,  $K_{0max}$  和  $K_{0min}$  与  $\sin \varphi'$  关系可以用幂函数表示。因此,  $K_{0max}$  以及  $K_{0min}$  和  $\sin \varphi'$  的关系式可表示为:

$$\begin{aligned} K_{0max} &= a(\sin \varphi')^b, \\ K_{0min} &= c(\sin \varphi')^d. \end{aligned} \quad (3)$$

$a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  是材料参数。分别基于 S1~S4 以及 D1~D4 试验结果, 式(3)拟合得出砂卵砾石料和堆石料参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$ , 并列于表 3。

依据式(3)对 S1~S4 以及 D1~D4 土料试验数据进行拟合, 见图 3。可以看出, 对于砂卵砾石料, 式(3)拟合曲线与数据点吻合较好, 式(3)的拟合

值与对应试验点相差大多不到 1%。对于堆石料, 式(3)所得拟合曲线与数据点吻合较好, 拟合值与对应试验点相差大多不到 3%, 最大误差不到 6%。因此, 可以认为式(3)能较好地反映粗粒土  $K_{0\max}$  以及  $K_{0\min}$  和  $\sin\varphi'$  关系。

将堆石料参数  $a, b, c$  和  $d$  代入式(3), 根据 D5~D7 的  $\varphi'$  来预测其  $K_{0\max}$  以及  $K_{0\min}$ , 发现式(3)的预测值误差不到 14%。说明具体到某种粗粒土, 其参数  $a, b, c$  和  $d$  可以视为常数。

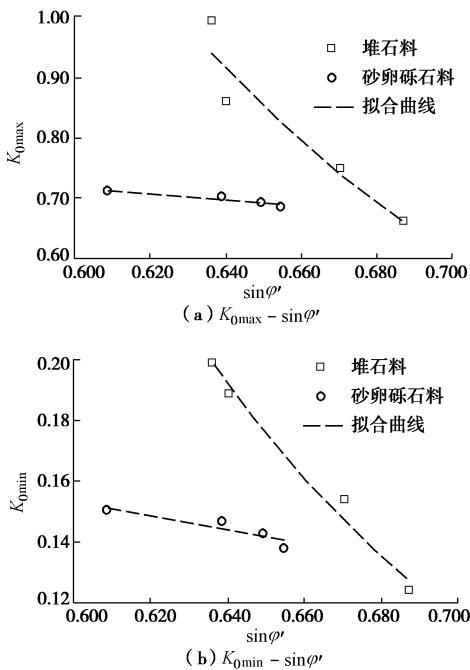


图 3  $K_{0\max}/K_{0\min}$  与  $\sin\varphi'$  关系曲线

Fig. 3 Relationship between  $K_{0\max}/K_{0\min}$  and  $\sin\varphi'$

表 3 各土料不同竖向压力下的  $a, b, c$  和  $d$

Table 3 Values of parameters  $a, b, c$  and  $d$  of specimens

拟合参数	砂卵砾石料	堆石料
$a$	0.567	0.118
$b$	0.461	4.589
$c$	0.09	0.015
$d$	1.043	5.752

至于式(1)中的参数  $n$ , 对比表 1 中  $\sin\varphi'$  和表 2 中  $n$ , 可发现  $n$  与  $\sin\varphi'$  较为接近, 除 D1 两者相差 12.3% 以外, 其他土料两者相差都不到 8%, 因此, 式(2)应当也对粗粒土适用。

结合式(1)~(3), 可得粗粒土基于  $\varphi'$  的  $K_0$  经验公式:

$$K_{0oc} = \left[ \frac{a(\sin\varphi')^b + [c(\sin\varphi')^d] \sqrt{\frac{\sigma_c/OCR}{p_a}}}{\sqrt{\frac{\sigma_c/OCR}{p_a}} + 1} \right] OCR^{\sin\varphi'} \quad (4)$$

依据式(4), 对于某种粗粒土, 只要知道其材料参数  $a, b, c$  和  $d$ , 就可以根据  $\varphi'$  来估算任意固结状态以及任意竖向应力作用下土体  $K_0$ 。

### 2.3 试验验证

为展示式(4)反映任意固结状态下粗颗粒土  $K_0$  系数与  $\varphi'$  关系的有效性, 基于表 1 中 D5~D7 有效内摩擦角  $\varphi'$  以及表 3 中堆石料参数  $a, b, c$  和  $d$ , 利用式(4)预测 D5~D7 任意固结状态下  $K_0$  和  $\sigma'_v$  关系, 并将拟合得到的  $K_0$  和  $\sigma'_v$  关系曲线与相对应的  $K_0$  试验数据一同绘于图 4。

从图 4 可以看出, 对于 D5 和 D7, 式(4)拟合曲线与试验数据吻合较好, 预测值误差较小, 大多小于 3%。对于 D6, 式(4)拟合曲线与试验有一定误差, 但最大误差也仅 14.6%, 处于可以接受的范围。因此, 对于同一种粗粒土土, 只要求出其材料参数  $\varphi'$  以及  $a, b, c$  和  $d$ , 就能根据式(4)来较好地预测加卸载时不同竖向应力下粗粒土  $K_0$ 。由于相关的试验数据较少, 本关系式对其他土料的适用性有待进一步验证。

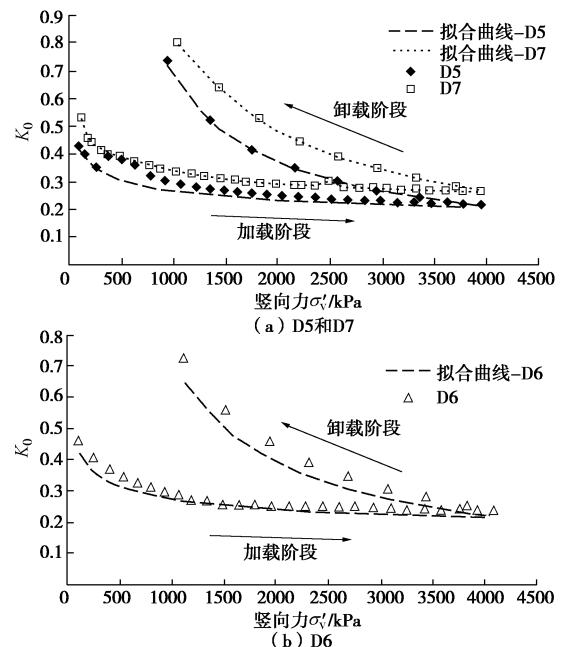


图 4 由式(4)拟合的  $K_0 - \sigma'_v$  关系曲线

Fig. 4  $K_0 - \sigma'_v$  curves fitted by Eq. (4)

## 3 结 论

对 4 组砂卵砾石料和 7 组堆石料同时进行了大型  $K_0$  试验和大型三轴 CD 试验, 基于  $K_0$  试验结果, 验证了笔者提出的  $K_0 - \sigma'_v$  关系式也适用于初始相对密实度较大的粗粒土。在此关系式上, 基于  $K_0$  试验以及大三轴试验数据, 提出了一个能利用内摩擦角  $\varphi'$  来预测任意固结状态和应力状态下  $K_0$  的估算式。同时, 利用本文

试验数据验证了该公式的可靠性。

### 参考文献:

- [1] MESRI G, VARDHANABHUTI B. Compression of granular materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(4): 369 - 392.
- [2] LIRER S, FLORA A, NICOTERA M V. Some remarks on the coefficient of earth pressure at rest in compacted sandy gravel[J]. ActaGeotechnica, 2011, **6**(1): 1 - 12.
- [3] 李国维, 胡 坚, 陆晓琴, 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-qin, 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. (in Chinese))
- [4] 莫伟宏, 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**(S2): 798 - 803. (in Chinese))
- [5] WATABE Y, TANAKA M, TANAKA H, et al.  $K_0$ -consolidation in a triaxial cell and evaluation of in-situ  $K_0$  for marine clays with various characteristics[J]. Political Science Quarterly, 2003, **43**(1): 1 - 20.
- [6] SHOGAKI T, NOCHIKAWA Y. Triaxial strength properties of natural deposits at  $K_0$  consolidation state using a precision triaxial apparatus with small size specimens[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2004, **44**(2): 41 - 52.
- [7] 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**(S1): 3203 - 3208. (in Chinese))
- [8] JAKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, **78**(22): 355 - 358.
- [9] ABDELHAMID M S, KRIZEK R J. At-rest lateral earth pressure of consolidating clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, **102**(7): 721 - 738.
- [10] FEDERICO A, ELIA G, GERMANO V. A short note on the earth pressure and mobilized angle of internal friction in one-dimensional compression of soils[J]. Journal of Geoengineering, 2008, **3**(1): 41 - 46.
- [11] 朱俊高, 蒋明杰, 陆阳洋, 等. 应力状态对粗颗粒土  $K_0$  系数影响试验研究[J]. 岩土力学(录用待刊). (ZHU Jun-gao, JIANG Ming-jie, LU Yang-yang, et al. Experimental study on influence of stress state on  $K_0$  coefficient for coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics (Accepted). (in Chinese))
- [12] MAYNE P W, KULHAWY F H.  $K_0$ -OCR relationships in soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, **20**(1): 851 - 872.

(本文责编 明经平)