维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:1007-2993(2003)06-0354-06

静止土压力系数研究

姜安龙[1]　　郭云英[1]　　高大钊[2]
(1　南昌航空工业学院,江西南昌　330034)　　(2　同济大学地下建筑与工程系,上海　200092)

【摘　要】 静止土压力系数是岩土工程中一个非常重要的参数。探讨了静止土压力系数与土体物理力学指标关系、分析了现有静止土压力系数的确定方法和影响准确确定静止土压力系数的一些因素,对静止土压力系数确定方法及其选取提出了一些建议。

【关键词】 静止土压力系数;确定方法;室内土工试验;原位测试。
【中图分类号】 TU 41

The Study on Coefficient of Earth Pressure at Rest

【Abstract】 Coefficient of earth pressure at rest is an important computation parameter in geotechnical engineering. The relation of K_0 and soil physics mechanics parameters is studied, and the methods of determining value of K_0 and some factors affecting precisely determine value of K_0 are analyzed, finally some suggestions are given to determine K_0.

【Key words】 coefficient of earth pressure at rest; determinate method; laboratory soil test; in-situ test

0　引　言

静止土压力系数 K_0 是岩土工程中一个非常重要的参数,它是确定水平场地中的应力状态和计算静止土压力的基础。能否正确确定静止土压力系数 K_0,对作用在挡土结构物上的土压力分布、工程造价、安全可靠性程度均有直接影响。为此,国内外学者进行了大量的室内和现场试验,并据此提出了若干个计算静止土压力系数 K_0 的经验公式。

本文探讨了静止土压力系数 K_0 与土体物理力学指标关系、分析了现有静止土压力系数 K_0 的确定方法和影响准确确定静止土压力系数 K_0 的一些因素,对静止土压力系数 K_0 确定方法及其选取提出了一些建议。

1　静止土压力系数 K_0 及其影响因素

土的静止土压力系数 K_0 是指土体在无侧向变形条件下固结后的水平向主应力与竖向主应力之比,也就是原始应力状态下的水平向主应力与竖向主应力之比。长期来人们遵循的是实践、总结、提高的路径,用半经验半理论的方法,解决工程实践中碰到问题,并且还未完全从"必然"向"自由"的境界过渡[1]。起初,太沙基采用总应力来定义:

$$K_0 = \sigma_h/\sigma_v \tag{1}$$

后来毕肖甫更明确地采用了有效应力的定义:

$$K_0 = \sigma_h'/\sigma_v' \tag{2}$$

鉴于任一土体都经受过一定的应力历史,为了克服由于应力变化而引起的侧向变位,静止土压力系数又被定义为增量的形式:

$$K_0 = \Delta\sigma_h'/\Delta\sigma_v' \tag{3}$$

作者简介:姜安龙,1976 年生,男,汉族,江西南昌人,硕士,主要从事岩土工程教学与科研。E-mail:jaltjdx@sohu.com。

维普资讯 http://www.cqvip.com

静止土压力系数 K_0 涉及到土的物理性质、结构特性、应力历史、加荷和卸荷路径等因素的影响,并且这些因素或隐或现地存在着相互联系甚至相互制约,这就要求对影响静止土压力系数 K_0 值的主要因素有个全面、透彻的了解,才能制定出反映工程实际的测试方法,也只有准确的静止土压力系数 K_0 值,才能确定符合实际的静止侧压力[2]。下面就 K_0 的影响因素展开讨论。

1.1 土性的影响

1.1.1 土的有效内摩擦角 φ'

有效内摩擦角反映了无粘性土内部摩阻力的大小;有效内摩擦角愈大,土体愈密实,在侧限条件下达稳定时,其竖向有效应力也就愈大,所以这种土的 K_0 往往较小;反之有效内摩擦角较小的无粘性土,其 K_0 较大。

1.1.2 土的泊松比 μ

泊松比 μ 反映了无侧限条件下土体承受竖向荷载时其横向应变与竖向应变的比值。对于正常固结土,K_0 与 μ 之间存在一一对应关系,通常 μ 值愈大,K_0 值愈小。由于土的泊松比并非常量,所以 K_0 也不是常量。超固结土,其 K_0 与 μ 之间不再有一一对应关系;不同土的 μ 值变化不大,而 K_0 的变化较大。

1.1.3 塑性指数 I_p

对于粘性土,塑性指数 I_p 是很重要的指标。I_p 愈大,表明土的颗粒愈细小,粘粒含量愈多;反之,则说明土的颗粒愈粗。

1.1.4 土的颗粒粗细

土的颗粒粗细通过其粒径反映出来,粗粒土的 K_0 往往低于细粒土的;粘性土一般颗粒较细,所以粘性土的 K_0 常常大于无粘性土的相应值。

1.1.5 土的压缩性

对于正常固结土,K_0 与其压缩性的关系是:K_0 愈大,土的压缩性愈高。但对于 $OCR>1.0$ 的超固结土,则恰好相反;K_0 愈大,则超固结作用愈强,OCR 愈大,土的压缩性愈低。所以 K_0 与土的压缩性的关系要辩证对待,具体分析。

1.2 中和应力的影响

地基中的孔隙水压力称为中和应力。中和应力有正有负:若地基受到附加荷重,会在粘土层内引起逐渐消散的超静孔隙水压力,这时的中和应力是正的;若地面挖土卸荷,粘土层中会出现负的中和应力。

当中和应力存在时,静止土压力系数应以有效应力表示。

1.3 土样扰动程度的影响

当为原状土样时,静止土压力系数 K_0 随塑性指数 I_p 的增加而增加;当为重塑土样时,静止土压力系数 K_0 随塑性指数 I_p 的增加而减少。

1.4 结构性的影响[3]

当为各向同性时,静止土压力系数可用下式表示:

$$K_0=\mu/(1-\mu) \tag{4}$$

当为轴对称的正交各向异性时,静止土压力系数可用下式表示:

$$K_0=\mu_2/(1-\mu_1) \tag{5}$$

或

$$K_0=E_h\mu_3/E_v(1-\mu_1) \tag{6}$$

式中:μ_1 为水平应力对于水平应变的影响;

μ_2 为水平应力对于垂直应变的影响;

μ_3 为垂直应力对于水平应变的影响;

E_h 为水平方向的弹性模量;

E_v 为垂直方向的弹性模量。

2 静止土压力系数 K_0 的确定方法

2.1 用经验公式求算或估算

2.1.1 用泊松比 μ 计算

不同土的泊松比并不相同;同一种土的泊松比在不同的应力阶段,其大小也不尽相同。正因为泊松比并非常量,设计中准确取值比较困难,所以工程计算中对泊松比取值主要靠经验;所幸各种土的泊松比值变化都不大,近似取值对工程计算结果影响较小,初步估算时可用此法。

维普资讯 http://www.cqvip.com

2.1.2 用有效内摩擦角 φ' 计算[4]

$$K_0 = 1 - \sin\varphi' \qquad (7)$$

有效内摩擦角必须通过取原状土样进行三轴试验加以确定，通常知道的往往是土的内摩擦角而不是有效内摩擦角。而且在理论上也很难说得通在无侧向应变状态与破坏时的有效内摩擦角之间有什么直接联系。

2.1.3 用塑性指数 I_p 计算

$$K_0 = 0.19 + 0.233\log I_p \qquad (8)$$

对于粘土，与力学性质最密切相关的综合物性指标是塑性指数 I_p，据此阿班(Alpan)于1967年将正常固结粘土的 K_0 与土的塑性指数 I_p 联系起来并建议了式(8)；从式(8)可知：I_p 愈大，K_0 也愈大；并可以得出粘土的 K_0 一般大于等于0.477。

2.1.4 利用毛细压力和孔压系数计算[5]

斯凯普敦(Skempton)从卸荷角度推导出下式：

$$K_0 = (p_k/r'H - A)/(1 - A) \qquad (9)$$

式中：p_k 为毛细压力；

$r'H$ 为上覆有效压力；

A 为孔隙水压力系数。

式(9)为既可以用来计算超固结土和静止土压力系数，也可以计算正常固结土的静止土压力系数。然而在试验室内很难直接测定土样的毛细压力数值。

2.1.5 用超固结比 OCR 计算

以上介绍的经验公式大多数是适用于正常压密的粘土的，但对于超压密土的原位静止土压力系数，在试验室内如何用仪器重现超压密土和天然应力状态，测定其 K_0 值，至今还是相当困难的。斯密特(Schmidt)据此提出了一个估计超压密土 K_∞ 的经验公式[4]：

$$K_\infty = (OCR)^\lambda K_0 \qquad (10)$$

式中：K_∞ 为超压密状态静止土压力系数；

K_0 为正常压密状态静止土压力系数；

OCR 为超固结比；

λ 为与砂土的有效内摩擦角 φ' 或与粘性土的塑性指数 I_p 有关的参数。

2.2 利用室内土工试验确定[6]

室内土工试验测定 K_0 系数的方法和仪器有多种，主要有压缩仪法和三轴仪法。压缩仪法是国内应用较早的一种。

2.2.1 压缩仪法

该法可在装有测量侧向压力传感器的有限压缩仪中进行；试验可测得土在无侧胀压缩时的轴向压力和侧向压力，然后根据 σ_h—σ_v 关系，利用式(1)则可求得 K_0 值。

针对膜不易与土贴紧和膜在受力时产生的弹性变形也要消耗部分侧压力，笔者建议：①用钢试样校正膜消耗的部分侧压力；②制样时不要偏心，轴向变形为零时，预加侧压力；③测试样中的孔隙水压力。

2.2.2 三轴仪法

三轴仪中测定 K_0 值有多种技巧和方法。

2.2.2.1 侧向变形限制法

在三轴试验中，若轴向压力和侧向压力满足关系式：

$$\sigma_3' = K_0\sigma'_1 \qquad (11)$$

土样将不会发生侧向变形，因而可根据此原理，在施加轴向压力时，同时增加侧向压力，使试样不产生侧向变形，这样可根据测得的轴向压力、侧向压力和孔隙水压力求得土的 K_0 值。对试验过程中试样侧向变形的监控有下述几种方法：

①在土样的中部放置一侧向应变仪或传感器。加载过程中，不断观察侧向应变仪(传感器)读数，并不断调整容室压力以保持侧向应变读数为常数。

②对于饱和土样的排水试验，则可通过量测土样的排水量来控制侧向变形。

③通过测定三轴室的体积变化来控制侧向变形，这种方法可在 K_0 三轴仪中进行。

2.2.2.2 Poulos 和 Davis 法

此法是一种在普通三轴仪中，不用控制侧向变形来测定土 K_0 值的特殊试验方法；其过

维普资讯 http://www.cqvip.com

程如下:

①在轴向上施加应力等于现场垂直有效应力 σ'_{vf}。

②分级施加围压,各级围压增量要小,每次增加围压时,均保持轴向应力不变,待各级固结稳定后,测量固结引起的体积变形;当围压略大于轴向应力后,终止试验。

③绘制各级压力下土样的体积变形增量 ΔV 有效围压 σ'_h 的关系曲线。曲线分为两段,转折明显。这两段曲线的拟合直线交于一点,该点的应力等于现场的水平有效应力 σ'_{hf}。

④根据式(2)可计算出土的 K_0 值,即:

$$K_0 = \sigma'_{hf}/\sigma'_{vf} \qquad (12)$$

室内试验要测出符合工程实践的 K_0 值,必须了解土的应力历史,恢复现场原位应力状态下施加符合实际工程的荷载,才能测得反映实际的结果。对于不同的情况分述如下:

1)对有一定厚度的饱和软粘土,要测定加荷后 σ_h/σ_v 变化的全过程。

2)对于正常固结粘土,恢复原位的应力状态,即 σ_v' 为上覆荷载后,在没有侧膨胀条件下施加建筑的附加荷载便可测得。

3)对于已知先期固结压力为 σ_v' 的超固结土,须先确定现场的上覆压力 σ_{v0}',保持 K_0 条件,以 σ_h' 为大主应力逐级加荷,σ_v' 紧紧跟随,当 $\sigma_v' = \sigma_{v0}'$,时,测得现场应力状态的 K_{ou},尔后,按工程实际荷载,主动增大 σ_v',测出重加荷的 K_{or},当 $\sigma_v' > \sigma_c'$ 时,$K_{or} = K_{onc}$。

4)根据工程要求分别求得卸荷土体的静止土压力系数、超固结土的静止土压力系数和正常固结土的静止土压力系数。

2.3 利用原位测试确定[7,8]

取土会引起土样扰动是众所周知的,由于取样扰动,使土工分析提供的参数不能真实地反映原位土的性质。为了使所取土样能反映原位土的性质,国内外学者进行了诸多的研究和探讨。南京水科院魏汝龙、同济大学朱小林等人经过几十年来的艰苦努力,取土器从敞口原壁取土器到固定活塞薄壁取土器及薄壁连续取土器,今天人们已经有了一套比较完善的粘土取土技术。但是企图通过改进取土技术以取得可靠的土质参数的努力在下面两点上遇到了不可克服的困难:

1)尽管可以通过努力把取样扰动和切样的扰动降低到最小的限度,但是试样从地层深部取出时因应力释放而引起的扰动是永运无法避免的。

2)精细的取土和试验技术只有少数研究单位可以做到,难以普通推广应用。沈珠江[9]认为:通过钻孔取土进行室内试验测定的参数是不怎么可靠的;要取得可靠的土质参数,只有通过原位测试,并指出地面和钻孔压板试验和钻孔旁压试验值得继续发展,简单易行的孔压静力触探的测试技术更应优先发展。

静止土压力系数 K_0,其准确性有重要的工程实践价值和理论研究意义;而原位测试具有诸多室内试验所不具有的优点;据此下面讨论测定静止土压力系数的几种原位试验方法。

2.3.1 扁铲侧胀试验

扁铲侧胀试验(DMT),也有译为扁板侧胀试验,系 20 世纪 70 年代意大利迈切帝(Silvano Marchetti)教授创立。该试验方法具有操作简便、快速、重复性好、人为影响因素小、经济、可得到近乎连续的地层剖面,一次试验能获得多个参数,试验结果与人们熟悉的土工参数相关联的特点;同时,扁平状插板避免了土体的拱效应,相对于圆柱探头和其他原位测试对土体挤压较小,使土体扰动小得多。

1979 年介绍到北美和欧洲,并列入美国 ASTM 和欧洲 EUROCODE,目前已在 40 多个国家应用。我国是在 1995 年开始扁铲侧胀试验。南光地质仪器厂在 1998 年试制了国产扁铲侧胀仪。全国、铁道部和上海等的岩土工程勘察规范都将把扁铲侧胀试验列入规范。

迈切帝(Marchetti)[10]于 1980 年建议下式:

维普资讯 http://www.cqvip.com

$K_0=(K_D/1.5)^{0.47}-0.6$ $(I_D<1.2)$ (13)

式中：K_D 为侧胀水平应力指数；

I_D 为侧胀土性指数。

路尼(Lunne)认为 K_D 与 K_0 的关系对新近粘土(<6万年)和老粘土(>7千万年)是不同的，并于1989年提出补允：

新粘性土 $K_0=0.34K_D^{0.54}$

$(c_u/\sigma'_{v0}\leqslant 0.5)$ (14)

老粘性土 $K_0=0.68K_D^{0.54}$

$(c_u/\sigma'_{v0}>0.8)$ (15)

杰米尔考斯克(Jamiolkowski)1995年提出了砂土 K_D 与 K_0 的关系式：

$$K_0=0.376+0.095K_D-0.0048q_c/\sigma'_{v0} \quad (16)$$

其结果认为是比较满意的，但在同一层中 K_D 与 q_c 难于相配。

2.3.2 旁压试验

旁压试验(PMT)是用可侧向膨胀的旁压器，用钻孔孔壁周围的土体施加径向压力的原位测试。旁压试验根据旁压仪分为预钻式旁压测试和自钻式旁压测试；预钻式旁压试验需要预先成孔，这必然会对孔壁土体产生一定的扰动，而且旁压孔的深度也会因塌孔等原因而受到限制。为了克服预先成孔所带来的一系列的缺点，自钻式旁压试验就应运而生。自钻式旁压仪是一种自行钻进、定位和测试的钻孔原位测试装置；它借助于地面上的(或水下的)回转力(通常可用于水冲正循环回转钻机作为动力)，利用旁压器内部的钻进装置，可自地面连续钻进到预定测试深度，然后在保持钻孔周围土层不受扰动的条件下测试，求得土或软岩的各项力学参数。

根据自钻式得到的旁压曲线可以得到土的原始水平应力 P_0，据此，就可用下式推求土的静止土压力系数：

$$K_0=(p_0-u)/\gamma h \quad (17)$$

式中：p_0 为土的原始水平应力，kPa；

u 为孔隙水压力，kPa；

γ 为土重度，水下要用浮重度，kN/m^3；

h 为测试点的深度，m。

2.3.3 原位应力铲试验

原位应力铲试验的直接目的是在现场直接测定土层的原位静止土压力系数 K_0。

$$K_0=(\sigma_{hc}-u_w)/(\sigma_{v0}-u_w) \quad (18)$$

式中：σ_{hc} 为应力铲测得水平衰减后稳定值；

σ_{v0} 为天然应力状态下的竖向总应力；

u_w 为静止水压力。

原位测试基本上是在工程场地的原位应力条件下对土体进行测试，其测试结果具有较好的可靠性及代表性。但是，以上几种原位测试评定土的工程参数都是建立在统计经验基础上，有很强的地区性和土类的局限性。因此以上各种公式应与地区土性相联系，对国外成熟公式要注意其适用条件，并用地区经验加以检验和修正，进而确定或建立适合本国或本地区的经验公式。

3 笔者建议的两种原位试验方法

3.1 载荷试验

一般认为，载荷试验在各种原位测试中是最为可靠的，并以此作为其他原位测试的对比依据。

浅层平板载荷试验的变形模量 E_0 按下式计算：

$$E_0=I_0(1-u^2)pd/s \quad (19)$$

深层平板载荷试验的变形模量 E_0 按下式计算：

$$E_0=\omega pd/s \quad (20)$$

据广义虎克定律，土的变形模量 E_0 与其侧限压缩模量 E_s 之间存在如下的关系：

$$E_0=E_s(1-2\nu K_0)= \quad (21)$$

$$E_s[(1+K_0-2K_0^2)/(1+K_0)] \quad (22)$$

$$\Rightarrow 2E_sK_0^2+(E_0-E_s)K_0+(E_0+E_s)=0 \quad (23)$$

根据韦达定理可得：

$$K_0=[-(E_0-E_s)+9E_s^2-10E_sE_0+E_0^2)^{1/2}]/4E_s \quad (24)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$E_s=(1+e_1)/a \tag{25}$$

式中:E_s 为侧限压缩模量;

E_0 为土的变形模量;

I_0 为刚性承压板的形态系数,圆形承压板 0.785;方形承压板取 0.886;

μ 为土的泊松比;

D 为承压板直径或边长;

p 为 $p-s$ 曲线线性段的压力;

s 为与 p 对应的沉降;

ω 为与试验深度和土类有关的系数。

3.2 静力触探

静力触探试验是用静力匀速将标准规格的探头压入土中,同时量测探头阻力,测定土的力学性质,具有勘探和测试双重功能;孔压静力触探试验除静力触探原有功能外,在探头上附加孔隙水压力量测装置,用于量测孔隙水压力增长和消散。

在临界深度以下,土层上复压力加大,静力触探贯入时,探头对周围土体施加压力,土体让出探头体积部分,主要是压缩变形所致,压力来自锥面的法线方向,故 $q_c(p_s)$ 和 E_s 在测试机理上是相近的,因而两者呈线性关系相关,一般的关系式为:

$$E_s=a_1q_c(p_s)+b_1 \tag{26}$$

式中:a 和 b 的取值和土类及其成因、时代有关,若土层时代和成因相同,则 a 和 b 应是一定的。

国内外众多的学者也认为 $q_c(p_s)$ 和 E_0 两者也呈线性关系相关,一般的关系式为:

$$E_0=a_2q_c(p_s)+b_2 \tag{27}$$

从式(26)和式(27)可推得 K_0 仅和 $q_c(p_s)$ 相关:

$$K_0=f(p_s)\text{或}\ K_0=f(q_c) \tag{28}$$

4 结 论

首先分析了静止土压力系数 K_0 及其影响因素,综述了较为公认的经验公式、室内土工试验和原位试验选取和测定静止土压力系数的方法。在此基础上建议用载荷试验和静力触探试验测算静止土压力系数。当然这两种方法还有待进一步研究和检验。

参 考 文 献

1 李作勤.影响粘土静止侧压力的一些问题.岩土力学,1995,16(1):9~16

2 王运霞.地基原状应力状态与侧压力系数 K_0 取值分析.岩土工程界,2002,4(7):60~62

3 钱家欢、殷宗泽.土工原理与计算(第二版).北京:中国水利水电出版社.1996.169~174

4 Schmidt B. Disscussion on "Earth pressure at Rest Related to Stress History". Canadian Getchnical Journal, 1996, 3(4).239~242

5 胡中雄.土力学与环境土工学.上海:同济大学出版社.1997.246~247

6 杨熙章.土工试验原理.上海:同济大学出版社.1993.98~102

7 孟高头.土体原位测试机理、方法及其工程应用.北京:地质出版社.1997. 161~265; 229~233

8 南京水科院土工所.土工试验技术手册.北京:人民交通出版社,2002. 295~305

9 沈珠江.原状取土还是原位测试.岩土工程学报,1996,18(5):90~91

10 Marchetti S. In-situ tests by fiat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, June, 1980;106(GT4):299~321

收稿日期:2003-09-15