维普资讯 http://www.cqvip.com

第23卷第3期
1995年6月

同济大学学报
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY

Vol.23 No. 3
Jun. 1995

软土地基承载力的确定方法

高大钊

(同济大学地下建筑与工程系，上海，200092)

摘要　讨论了软土地基承载力的确定方法和软土抗剪强度参数的测定方法，论证了Hansen公式和Skempton公式用以估计软土地基极限承载力的适用性，表明所估计承载力的安全度符合于软土地区的工程经验，给出了若干用以估计软土不排水抗剪强度参数的经验关系式。

关键词　软土；地基承载力；土；抗剪强度
中图法分类号　TU47

我国工程结构设计规范已采用概率极限状态设计原则，地基基础设计原则亦需作相应的改变.但我国长期采用容许承载力设计方法，缺乏使用地基极限承载力公式的经验，给采用概率极限状态设计原则带来了困难.研究地基极限承载力确定方法的问题已提到日程上来.

软土地基的破坏模式有其特殊的形态，需要加以研究.本文研究了Hansen公式和Skempton公式在软土地区的适用性，软土强度指标的测定与取值方法，安全系数的取用，并与已有的工程经验进行对比分析.

研究结果表明，Hansen公式和Skempton公式均可用以估计软土地基极限承载力，其安全度与现有的工程经验相当.

1　软土地基极限承载力计算公式

软土地基的承载性状可从图1所示的载荷试验的$p-s$曲线上看出，在曲线上没有明显的起始直线段，随着荷载增大，压板的沉降急剧增长，没有第一拐点和第二拐点出现，呈刺入破坏或局部剪切破坏模式.

在软土地区，曾采用Skempton公式来估计油罐充水预压加固地基时承载力的增长，并用以控制加荷速率，证明比较符合实际.Skempton公式是建立在$\varphi=0$的假定基础上，采用不排水抗剪强度指标c_u，用以估计地基在施工结束时短期的稳定性，公式的形式如下[1]：

$$f_u=5.14\,c_u\left(1.0+0.2\frac{b}{l}\right)\left(1.0+0.2\frac{d}{b}\right) \tag{1}$$

式中：b为基础宽度；d为基础埋深；l为基础长度.

Hansen公式是比较通用的地基极限承载力公式，如不采用考虑基础埋深和合力倾斜两个因素的修正系数，Hansen公式如式(2)所示[2].

本文收到日期：1994年9月18日　　作者：男，1935年生，教授，博士生导师

$$f_u=\frac{1}{2}N_r\zeta_r\gamma_r b_r+N_q\zeta_q\gamma_0 d+N_c\zeta_c c \quad (2)$$

式中：N_q，N_c和N_r均为承载力系数，是内摩擦角φ的函数$N_q=\exp(\pi\,\mathrm{tg}\,\varphi)\,\mathrm{tg}^2(45^\circ+\frac{\varphi}{2})$，$N_c=(N_q-1)\,\mathrm{ctg}\,\varphi$，$N_r=1.5(N_q-1)\,\mathrm{tg}\,\varphi$；$\zeta_r$，$\zeta_c$和$\zeta_q$为基础形状系数，$\zeta_r=1.0+0.4\frac{b}{l}$，$\zeta_c=1.0+\frac{b}{l}\frac{N_q}{N_c}$，$\zeta_q=1.0+\frac{b}{l}\mathrm{tg}\varphi$.

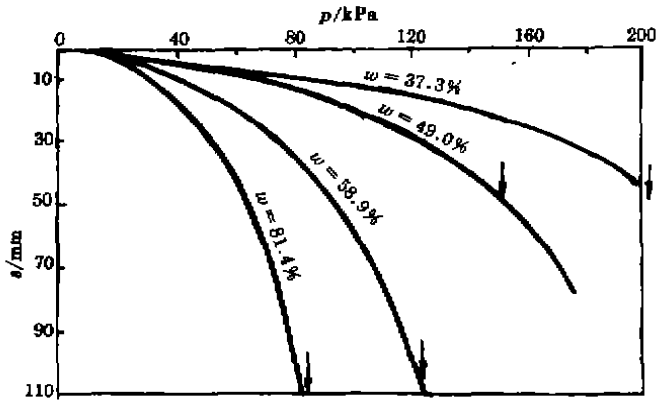


图 1 载荷试验荷载—沉降曲线

如令总安全系数为K，则地基设计表达式分别如公式(3)和(4)所示，用 Skempton 公式计算地基极限承载力时

$$p\leqslant\frac{f_u}{K}+\gamma_0 d \quad (3)$$

用 Hansen 公式计算地基极限承载力时

$$p\leqslant\frac{f_u}{K} \quad (4)$$

式中：p为基础底面平均压力值.

当采用概率极限状态设计方法时，基础底面平均压力由荷载设计值求得，用p_d表示；地基极限承载力的设计值用f_{ud}表示，则设计表达式如公式(5)、(6)所示：

Skempton 公式： $p_d\leqslant f_{ud}+\gamma_0 d$ (5)

Hansen 公式： $p_d\leqslant f_{ud}$ (6)

计算地基极限承载力的设计值时，土的抗剪强度指标c，φ或c_u都采用其设计值c_d，φ_d或c_{ud}计算，抗剪强度指标的设计值由其标准值除以相应的分项系数求得.分项系数可由可靠性分析得到，一般在设计规范中给出.

2 软土抗剪强度指标的测定与取值

根据上海地区的工程经验，计算地基容许承载力时抗剪强度指标用直剪固快试验求得，并取峰值强度的70%计算c，φ值，所求得的地基容许承载力比较符合实际.

用 Hansen 公式计算地基极限承载力时，抗剪强度指标是否需要按70%计算是一个有待明确的问题.根据 Terzaghi 的意见[3]，对于呈整体破坏模式的土可用峰值强度指标计算，对于呈局部破坏模式的土应当用峰值强度指标的2/3来计算.如前所述，软土地基呈局部剪切破坏模式，因此建议仍采用按峰值强度的70%求得的c，φ值计算极限承载力.

用 Skempton 公式计算时，关键是正确估计软土的不排水抗剪强度指标.用三轴不固结不排水剪或无侧限抗压强度试验都可以测定不排水强度c_u，但室内试验结果往往偏低.其原因一是取土扰动，二是取土卸荷膨胀、

维普资讯 http://www.cqvip.com

我国常用取土器壁厚一般为 5～6mm，当压入土中时对土的结构产生较大的扰动，使不排水强度降低；薄壁取土器的壁厚只有 1.25～2mm，取土扰动小，是软粘土的理想取土器。两种取土器取土试验的结果对比示于图 2 和图 3，从图可见用厚壁取土器取土试验的不排水强度明显低于薄壁取土器的结果，两者的破坏应变也有显著的差别。

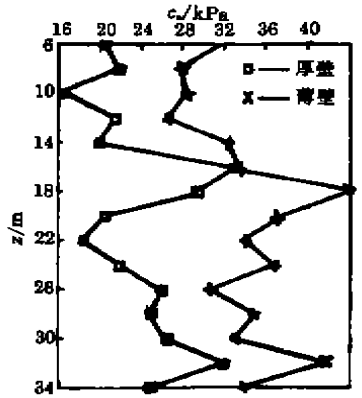


图 2　两种取土器取土试验结果的比较

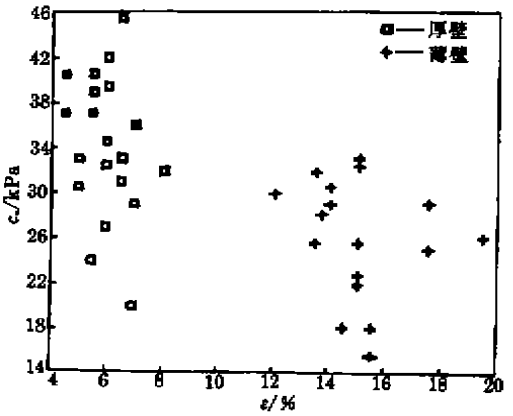


图 3　不排水强度与破坏应变的散点图

表 1 给出了用两种取土器取土试验的对比，表中 Δ^* 为薄壁的 q_u 值对应于厚壁的增量百分比，可达 50%～60%。

表 1　两种取土器取土的无侧限抗压强度对比

取土器	上海	上海	上海	上海	上海	天津	天津	连云港	广州	广州	深圳
	抗压强度/kPa										
厚　壁	59.5	55.8	39.6	35.8	36.7	25.6	33.0	8.0	46.0	24.0	8.8
薄　壁	95.5	85.5	54.0	51.9	60.0	38.6	53.4	13.0	76.0	36.0	13.0
Δ^*/%	61	53	36	45	63	51	62	62	65	50	48

从以上分析可知，采用薄壁取土器可以有效地减轻取土扰动的影响，使不排水强度避免因取土扰动而下降。

钻探取土对土样来讲是一个卸荷膨胀的过程，土样膨胀改变了物理状态。卸荷时土样轴向应变如小于 1%，对强度并没有太多的影响；如超过 1%，则会破坏土的结构。试验数据表明，当伸长应变为 5.8% 时，强度降低 20%[4]。土样埋藏越深，上覆压力越大，卸荷膨胀影响越大。

为了消除卸荷膨胀对不排水强度的影响，可在三轴仪中对土样在 K_0 条件下排水固结，使其恢复到原生应力状态。然后在恢复后的应力条件下测定其不排水强度，这种试验称为 K_0UU 试验，测定的强度比较接近于原生状态的强度。

表 2　软土抗剪强度试验对比

指　标	试　验		
	CU	UU	K_0UU
内摩擦角/(°)	14	0	1.5
内聚力/kPa	30	22	53

注：CU 为固结不排水试验；UU 为不固结不排水试验；K_0UU 为 K_0 固结后的不固结不排水试验。

由于软土的结构强度非常小，在实施 K_0 固结时可能会使土样破坏，为了避免破坏，可以

维普资讯 http://www.cqvip.com

用 K_0 等向固结来代替 K_0 固结.

曾对上海软土进行对比试验，土样为淤泥质粘土，塑性指数 18.5，天然含水量 35.4%，试验结果见表 2.试验结果表明，K_0UU 试验的强度远大于 UU 试验的结果.

3 不排水强度的一些经验关系

如果缺乏直接测定的不排水强度数据，可以用经验关系来估计软土的天然强度.

式(7)给出了用天然含水量估计软土不排水强度的经验公式，含水量用小数代入，求得的 c_u 值是相当于用薄壁取土器取土，由无侧限抗压强度试验测定的结果.

$$c_u=11w^{-1.13} \quad (\text{kPa}) \tag{7}$$

根据静力触探试验的比贯入阻力 p_s 值可以用式(8)估计不排水强度值，适用于 $p_s<1\,000$ kPa 的土，p_s 的单位为 kPa.

$$c_u=38(1.02-\frac{112}{p_s})^{1.11} \quad (\text{kPa}) \tag{8}$$

4 安全度复核

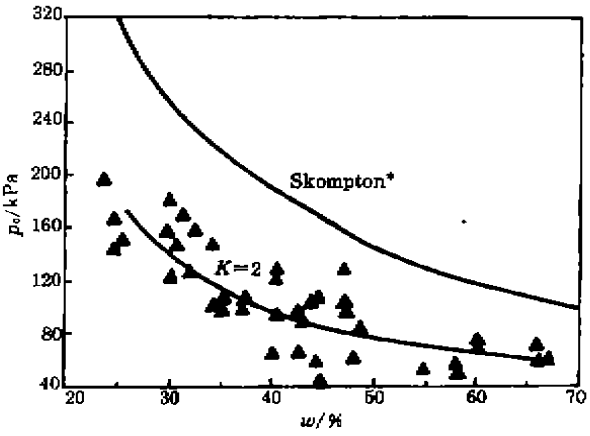


图 4 软土临界荷载与含水量的散点图

用图 1 所示的 4 个载荷试验资料进行复核，其结果见表 3.表明用 Skempton 公式计算的极限承载力与试验所得的容许承载力相比，安全系数为 1.8～2.5.

表 3 Skempton 公式计算值与试验结果的比较

天然含水量/%	$p_{s,0}$/kPa	f_u/kPa	K	S_u/b
37.3	104	206	1.98	0.07
49.0	84	152	1.81	0.07
58.0	50	125	2.50	0.15
81.4	38	85.6	2.25	0.185

注：S_u 为相应于极限承载力 f_u 的压板沉降值.

图 4 上方的曲线是用 Skempton 公式估算的极限承载力，下方的曲线是除以安全系数 2 以后的容许承载力，此曲线穿过散点群，且略偏于散点群重心之下.说明用 Skempton 公式计算并除以安全系数 2 的结果与软土地区载荷试验结果有非常好的一致性.

上海地基基础设计规范推荐的容许承载力公式和附录三的土工参数经验值反映了上海地区的工程经验[6]，是校核安全度的基准.图 5 的纵坐标值是 Skempton 公式计算的 f_u 值，横坐标是用上海地基规范公式计算的 p_0 值，散点群的斜率为 2，说明取安全系数 2 与上海工程经验是一致的.图 6 是用 Hansen 公式计算的结果，散点比较分散，斜率在 2～3 之间.

下面用三个工程实例和足尺试验来校核 Skempton 公式.

4.1 沉降正常、安全度足够的实例

某高层建筑箱形基础设置在第 4 层淤泥质粘土层上，天然含水量为 51.8%，直剪固快 $\varphi=8°$，$c=8$kPa，基础平面尺寸为 17.9m×45.5m，埋深为 5.45m.到施工结束时的沉降为

维普资讯 http://www.cqvip.com

17.27cm，此时基底总压力为 155kPa.按式(7)得 c_u=23.13kPa，按式(1)得 f_u=136kPa;取 K=2，按式(3)得容许承载力为 166kPa，大于基底总压力，实测沉降小于规范容许值，建筑物使用正常，说明有足够的安全度.

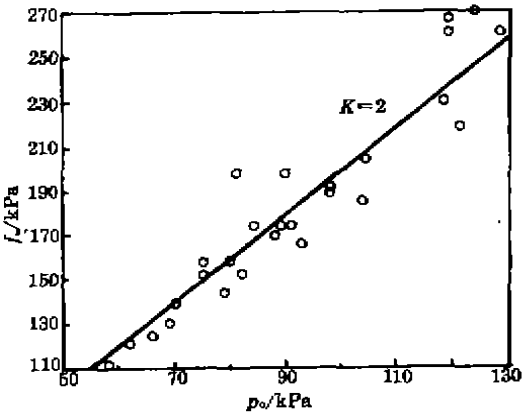


图 5　Skempton 公式计算结果与上海地基规范公式计算结果的散点

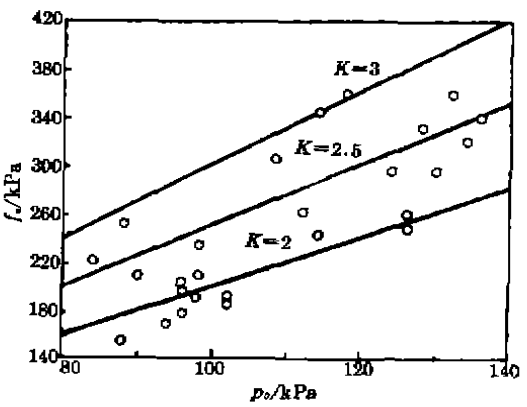


图 6　Hansen 公式计算结果与上海地基规范公式计算结果的散点

4.2　安全度不足、沉降与倾斜过大的实例

某配煤房采用 10.7m×46.5m 的片筏基础，埋深 1.5m，恒载 3 800t，活载 2 150t，基础底面下的褐黄色粉质粘土厚度只有 1.5m，故起控制作用的是淤泥质粘土，含水量为 54.2%，三轴不排水强度 φ_u=1°，c_u=20kPa.竣工后投入使用时在 5d 内加煤 2 150t，基底压力因施加活载产生的增量为 43kPa，使结构发生了过量的沉降与倾斜.最大沉降速率达 2.7～4.5mm·d^{-1}，并以 0.52mm·d^{-1} 等速沉降持续 18 个月.在加荷最初 15d 内倾斜达 10%，3 个月内沉降 64.7cm，预计最终沉降可超过 110cm.

按式(7)得 c_u=22kPa，按式(1)得 f_u=122kPa.未加活载时，基底压力为 76kPa，如取安全系数为 2，按式(3)得容许承载力 88kPa 大于基底压力，故建筑物有足够安全度，但当 5d 内施加 21 500t 活载后，基底压力已达 119kPa，安全系数下降到 1.33，安全度严重不足，过量的沉降与倾斜已危及构筑物的安全和正常使用.

4.3　足尺试验实例

某大型堆载试验，堆载面积 22m×30m，埋深为零，地基土三轴不排水强度 c_u=31kPa，十字板强度为 40kPa，分 4 级加载，荷载累加值及累计沉降值见表 4.按式(1)得 f_u=183kPa，每级荷载相应的安全系数亦列于表 4 中.施加第 3 与第 4 级荷载时安全度已严重不足，沉降急剧增大.第 4 级荷载作用下不仅沉降超过 600mm，而且已发生较大的水平位移，离堆载边缘 0.7m 处地面下 7m 深度处测得水平位移达 810mm，已经发生深层侧向挤出.

表 4　堆载试验结果

P/kPa	S/cm	K
60	9.3	3.90
90	25.7	2.60
120	44.4	1.97
150	60.6	1.57

上述三个实例以不同水平的安全度，不同量级的沉降量表明了用 Skempton 公式计算的结果能反映软土的承载能力，安全系数在 2 左右保证了足够的安全度，沉降

维普资讯 http://www.cqvip.com

量也不大，建筑物处于正常使用状态.而当安全系数过小时，沉降过大且有较大的倾斜与水平位移，危及了建筑物的正常使用与安全.

5 结论和建议

Skempton 公式和 Hansen 公式均可用以估计软土地基的极限承载力，安全系数可取 2(对 Skempton 公式)和 2～3 (对 Hansen 公式)，与软土地区工程经验相符.

用 Hansen 公式时，可用直剪固快试验，取峰值强度的 70% 计算 c，φ 值;用 Skempton 公式时，用土的不固结不排水强度 c_u 值;当采用薄壁取土器取土时可用无侧限抗压强度试验测定 c_u 值;当取土扰动较大时宜用 K_0 等向固结后的三轴不固结不排水强度 c_u;本文建议的经验公式也可用以估计土的不固结不排水强度.

参考文献

1 Skempton A W. The bearing capacity of clay. In: Building Research Congress eds. Selected Papers on Soil Machanics, London: Thomas Telford Limited, 1984

2 Hansen J B. A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geoechnical Institute Bulletin, 1970(28): 5～11

3 Terzaghi K, Pack R B. Soil mechanics in engineering practice. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1967

4 陈永福，曹名葆.上海地区软粘土的卸荷－再加荷变形特性.岩土工程学报，1990，12(2):9～18

5 上海市工程建设标准化办公室.DBJ 08－11－89, 地基基础设计规范.上海：上海市工程建设标准化办公室，1989

Determination Method of Soft Soil's Bearing Capacity

Gao Dazhao

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

Abstract In this paper, the determination method of bearing capacity of soft soil and the measurement of shear strength parameters are discussed. The Hansen formula and the Skempton formula have been proved to be applicable to the evaluation of the ultimate bearing capacity of soft soils. The safety of evaluated bearing capacity is in accordance with the engineering experience in soft soils regions. Some empirical relationships have been given to provide estimating approach on the bearing capacity and shear parameters.

Keywords Soft soil; Foundation bearing capacity; Soils; Shear strength