

对静力触探地基承载力公式的分析研究*

梁允尚

(浙江省水利水电勘测设计院, 杭州)

一、前言

静力触探是一种轻便、快速、精确的原位测试方法。在我国使用二十多年来,已取得了丰富的实践经验,并积累了大量实测对比资料,从而建立了近五十个地区性的静力触探地基承载力计算公式。归纳起来可分为高值线、中值线、低值线三大类:高值线以《工业与民用建筑工程地质勘察规范》^[1]公式为代表, $[R]=0.1043p_s+0.2687$;中值线以《静力触探使用技术暂行规定》^[2]公式为代表, $[R]=0.58\sqrt{p_s}-0.46$;低值线以河南建筑研究院公式为代表, $[R]=1.5011g p_s-0.544$ 。砂土的静力触探地基承载力公式,也有高中低之分,实际上是反映砂粒的粗细及级配情况。高值线和低值线公式都以《工业与民用建筑工程地质勘察规范》为代表,即 $[R]=0.2381p_s^{0.64}-0.12$ 及 $[R]=0.0197p_s+0.6559$;中值线以《静力触探使用技术暂行规定》公式为代表, $[R]=0.162p_s^{0.68}+0.144$ 。这些计算公式除极少数外都是在与静荷载试验 σ 、实测对比资料的基础上建立的,有一定的可靠性和实用价值。

但据各公式计算结果, $[R]$ 差距悬殊,如粘性土,当 $p_s=60\text{kg/cm}^2$ 时,三个代表性公式 $[R]$ 分别为6.53, 4.30, 2.12 kg/cm^2 ,数差成倍数比。又如砂土,当 $p_s=60\text{kg/cm}^2$ 时,三个代表性公式 $[R]$ 分别为3.15, 2.28, 1.84 kg/cm^2 ,数差达38~71%。故在工程勘察中,如何正确选用静力触探计算公式十分重要,它关系到工程的安全、造价及施工期等问题,很值得重视和研究。

在实践中又发现,各公式都存在着一定的局限性,不能普遍适用。其原因是这些公式都受到地区性限制,没有反映各种土类及其变化特性。所以每个公式只适用于与其本来性状大致相似的土层,若超越了这一范围,就会产生不能允许的误差。对此有的公式已注明了使用范围,但有些公式未作说明,问题仍客观存在。笔者针对这个问题,将所有公式进行了分析研究,发现系列公式之间有一定的关系,即有内在规律性。认为可以建立一个适用范围较广的静力触探地基承载力计算公式,这就是本文要进行研讨的课题。

二、导致各公式差异的原因分析

1. 地质因素

由于我国幅员广阔,第四系地层十分发育,各种成因类型的土都有,广布于不同的地理位置。其土质成分、沉积年代、地层厚度、埋深及结构构造等千差万别。同时受地形、地

*本文沿用了各规范的经验公式,故采用米制,而未采用国际制。

貌、气候、水文等自然环境因素的影响,地质条件极为复杂。而各个静力触探地基承载力计算公式,正是在这些差异性很大的不同地区、不同土类及状态下建立起来的,由于基础资料不同,所以必然回归方程不同。

在此要特别提出的一点是,静力触探承载力公式的地区性差异,只是表面现象,其工程地质性质的差异才是实质^[8]。故应多研究地层性质上的差异,而不必强调地区性差异。

2. 土质因素

与地基承载力密切相关的是抗剪强度指标,其凝聚力 c 和内摩擦角 φ 都随土的颗粒级配及结构构造变化而变化。在密湿度相同条件下的规律为:粘土 c 大 φ 小,砂土 φ 大 c 小。经对比试验证明, c 、 φ 对地基承载力 $[R]$ 及对静力触探贯入阻力 p_s 的作用不一样。在密湿度相同时的各类土 $[R]$ 明显有别,经静荷载试验知粘土高,砂类土低,亚粘土次之。而静力触探 p_s 正好相反,粘土小,砂类土大,亚粘土次之。其原因可由两种试验方法的破坏机理来说明。静荷载试验的加荷速率缓慢,作用力由承压板传递给地基,土体先产生压缩变形(即弹性变形),继而产生塑性变形,最后剪切破坏。这是一个较长时间的形变过程,土体内部的颗粒结构可以重新排列组合,因此土的 c 、 φ 同时在起作用。静力触探是快速强力贯入,土体来不及压密就被剪切破坏(不过砂及含砂量高的土可以在瞬间压缩增密),同时要立即产生超静水压力(指饱和的粘性土),对 c 的影响很大,这样起主要作用的是 φ , φ 值越大, p_s 值也越大。由于静力触探地基承载力公式基本上代表各类土,故回归方程自然不同。

3. 土的密湿因素

在自然界中,可以说各种类型的土皆为非均质体,这除了土的颗粒级配及夹杂物等随处都在变化外,其密实程度(e)和相对湿度(I_L)亦随处不同。如淤泥质土,天然含水量大于液限,孔隙比大于1,处于软塑及流塑状态。一般粘性土的天然含水量都小于流限而大于塑限,孔隙比小于1,呈可塑状态(有时为硬塑状态)。当粘性土的含水量接近及小于塑限,孔隙比小于0.75时,为硬塑及坚硬状态。各类土从这一状态到另一状态,往往是渐变的,即使不同土层,其层面之间都存在着过渡(即渐变)的性质。又从实践中知, Q_3 以前的地层不全是硬的, Q_4 的地层也不全是较松软的。可是静力触探地基承载力公式总是按土类及状态分别建立的,当然回归方程是不可能相同的。

4. 数据选取因素

因静力触探地基承载力公式是与静荷载试验资料比较而建立的,故存在着两个参数 σ_0 及 p_s ,如何选择对回归方程的影响很大。由于各地区及部门的取值方法往往不同,因此出现了土类相同,状态一致,而方程各异的情况。

此外,各单位采用静荷载试验承压板的面积有差异,静力触探头的规格也有大小,加荷速率不一致,这对试验成果同样是有影响的^[4],从而亦导致了承载力公式的差异。

5. 其他因素

如探头的类型(单桥和双桥)、规格、工艺及质量的不同,仪器灵敏度的差异,以及地区及季节性温差影响等因素,同样造成了地基承载力公式的差别。

三、新的静力触探地基承载力公式表达方法

经笔者反复分析研究,认为静力触探地基承载力公式用线性方程表达较为合适,一则便于计算,二则符合土的一般变化规律(指同一类土)。其式为

$$[R] = a \cdot p_s + b$$

该式的 a 项是地基承载力增量,对同类土其增量是等速的, p_s 随着土的密度增加湿度减小成比例地增大。反之,随着土的密度减小湿度增大而成比例地减小(砂土只与密度相关)。因此, a 大体为一个常数。但对不同类土而言,其增量是不等速的,如粘性土假定密湿度不变,其 $[R]$ 会随着 I_p 的增大而增大,但 p_s 正相反,会随着 I_p 的减小而增大。故 p_s 相等 $[R]$ 不等, $[R]$ 相等 p_s 不等,所以, a 不是一个常数。

该式的 b 项是地基承载力的起始定值,它与土的类别、密湿程度、结构特性及应力历史密切相关。一般地说,土的结构强度大, b 值就大,反之则小,同时土的粗颗粒多, b 值亦大,反之亦小。可见 b 不是一个常数,但对同一类土的状态变化可作常数处理。

为了使该公式能普遍适用于各类土,必须对 a 、 b 两系数根据土质情况进行修正,特引进了 β 、 α 两个修正系数,则

$$[R] = \beta \cdot a \cdot p_s + \alpha \cdot b$$

这就是本文提出的静力触探地基承载力计算公式。现先确定 a 、 b 两回归系数的具体赋值,主要选取现有十几个高值线公式,加以算术平均,得 $a=0.1$, $b=0.3$ 。然后据此对所有五十几个公式进行复回归分析,求得 $\beta \cdot \alpha$ 的修正系数值(同时结合塑性指数 I_p),见表1。

表1 各土类的 β 、 α 修正系数表

土的类别 修正系数	砂 土 类			粘 土 类																		特殊土类					
	粉 细 砂	细 中 砂	中 粗 砂	轻 亚 粘 土						亚 粘 土						粘 土						黄 土	红 土				
I_P	< 3			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	>21	9 ~ 12	< 17			
β	0.2	0.3	0.4	0.3			0.4			0.5			0.6			0.7			0.8			0.9			1.0	0.5 ~ 0.6	0.9
α	2.0			1.5						1.0						1.0						*1.5	3.0				

注:有*者可用于老粘土。

四、新公式的可信度分析

(一)适用范围的分析比较

假设静力触探的贯入阻力 $p_s = 10, 30, 50 \text{ kg/cm}^2$ 三个数值,现分别按各类土作地基承载力计算比较,结果见表2。

表2 $p_s = 10, 30, 50 \text{ kg/cm}^2$ 时的 $[R](\text{kg/cm}^2)$ 分析比较表

回 归 方 程	土 类	砂 土			轻亚粘土			亚 粘 土				粘 土		黄 土		红 土
		α			β			1.0				1.5		3.0		
		0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.5	0.6	0.9	
$[R] = 0.1\beta \cdot p_s + 0.3\alpha$	10	0.80	0.90	1.00	0.75	0.85	0.95	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	0.95	1.05	1.80	
	30	1.20	1.50	1.80	1.35	1.65	1.95	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	1.95	2.25	3.60	
	50	1.60	2.10	2.60	1.95	2.45	2.95	3.30	3.80	4.30	4.80	5.30	2.95	3.45	5.40	

表2中可说明以下几点:

1. p_s 相等各土类的 $[R]$ 明显有别。中粗砂大于细中砂, 细中砂大于粉细砂。粘土大于亚粘土, 亚粘土大于轻亚粘土。红土有较大的结构强度, 所以有较高的地基承载力。这符合土类变化的强度特性。

2. $[R]$ 随 p_s 的增加而增大, 其土类不同速度不等。粘土最快, 亚粘土次之, 轻亚粘土及砂土最慢。这又符合各土类的强度变化特性。

3. p_s 相等, 各土类的 $[R]$ 差随着土的密湿程度增减而增减。土越软, ΔR 越小。土越密实坚硬, ΔR 越大。除红土外, 粘土类有 $p_s = 10 \text{ kg/cm}^2$, $\Delta R = 73.3\%$; $p_s = 30 \text{ kg/cm}^2$, $\Delta R = 144.4\%$; $p_s = 50 \text{ kg/cm}^2$, $\Delta R = 171.8\%$, 这符合土的状态变化的强度特性。

由上述三点可见本文公式能广泛适用于不同状态的各类土, 基本上达到了预期之目的。

(二) 可信度分析比较

主要与全国及部门规范公式或其他代表性公式比较, 结果见表3。

从表3可知, 本文公式与全国及部门公式的表达方式虽然不同, 但计算结果除极少数外基本一致, 证明本文公式有一定的可靠性。在表中稍有误差的主要是亚粘土及轻亚粘土。它们在 $p_s < 30 \text{ kg/cm}^2$, 本文公式计算的 $[R]$ 略小, 而 $p_s > 30 \text{ kg/cm}^2$ 时, 则相反。其原因是《静力触探使用技术暂行规定》公式包括软粘土、一般粘性土及轻亚粘土、粉细砂等。所以为非线性方程, 故认为在 $p_s = 30 \text{ kg/cm}^2$ 以前, 基本上反映粘土强度, 而 $p_s = 30 \text{ kg/cm}^2$ 以后, 逐步过渡到砂性土强度。而本文公式始终代表亚粘土强度, 必然前段比其小, 后段比其大, 并不矛盾。与河南建筑研究院公式的误差原因亦相同。

这进一步证明了本文公式能够适用于各种土, 便于按照土质变化(即塑性指数)详细计算地基承载力, 能提高精度, 减少误差, 具有较大的优越性。

(三) 工程应用实例

在一幢驻杭省武警总队干部住宅楼地基勘察中(建筑面积 $10 \times 40 \text{ m}$, 高六层), 用本文公式进行了计算比较。该地基土层分布尚均匀, 且资料较全(土的层次及性质指标见图1), 同时进行地基承载力计算比较的公式有

I 本文 $[R] = \beta \cdot a \cdot p_s + \alpha \cdot b$ (各种土)

II. 《工业与民用建筑工程地质勘探规范》

$[R] = 0.1043 p_s + 0.2687$ (粘性土)

$[R] = 0.0197 p_s + 0.6559$ (砂土)

III. 《静力触探使用技术暂行规定》

$[R] = 0.58 \sqrt{p_s} - 0.46$ (粘性土)

$[R] = 0.162 p_s^{0.68} + 0.144$ (砂土)

IV. 《上海市地基基础设计规范》^[6]

$[R] = N_D \cdot r \cdot D + N_C \cdot C$ ($D = 1.0 \text{ m}$)

计算结果见表4。

各层土用不同公式计算结果很接近, 原则

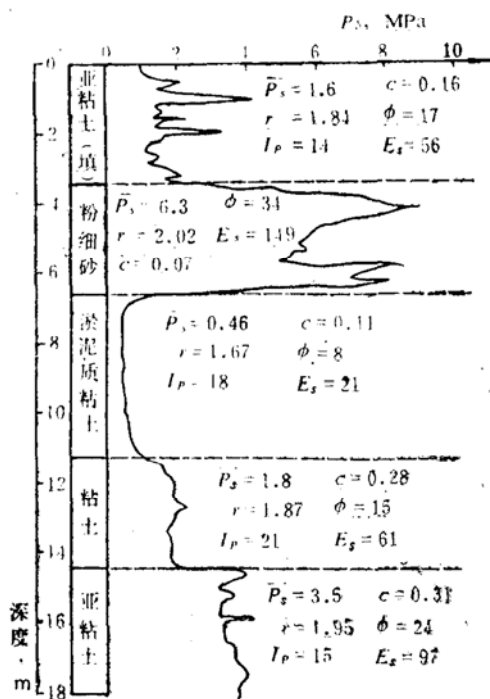


图1

表3 各代表性公式 $[R](\text{kg}/\text{cm}^2)$ 分析比较

单 位 或 部 门	回 归 方 程	适 用 范 围	在下列 p 下的 $[R]$ 值							
			5	10	15	20	30	40	50	60
《工业与民用建筑工程地质勘探规范》 本 文	$[R] = 0.1043p_s + 0.2387$	粘 土	0.79	1.31	1.83	2.35	3.40	4.44	5.48	6.53
	$[R] = 0.1 \times 1.0p_s + 0.3 \times 1.0$		0.80	1.30	1.80	2.30	3.30	4.30	5.30	6.30
	$[R] = 0.58\sqrt{p_s} - 0.46$	亚粘土	0.84	1.37	1.79	2.13	2.72	3.21	3.64	4.03
《静力触探使用技术暂行规定》 本 文	$[R] = 0.1 \times 0.8p_s + 0.3 \times 1.0$		0.70	1.10	1.50	1.90	2.70	3.50	4.30	5.10
	$[R] = 1.5011g p_s - 0.544$	轻 亚	0.51	0.93	1.12	1.41	1.67	1.86	2.01	2.13
	$[R] = 0.1 \times 0.4p_s + 0.3 \times 1.5$	粘 土	0.65	0.85	1.05	1.25	1.65	2.05	2.45	2.85
《工业与民用建筑工程地质勘探规范》 本 文	$[R] = 0.2381p_s^{0.84} - 0.12$	中粗砂	0.55	0.82	1.25	1.50	1.8	2.40	2.79	3.15
	$[R] = 0.1 \times 0.4p_s + 0.3 \times 2.0$		0.80	1.00	1.20	1.40	1.80	2.20	2.60	3.00
	$[R] = 0.162p_s^{0.63} + 0.144$	细中砂	0.59	0.84	1.00	1.21	1.52	1.80	2.05	2.28
《静力触探使用技术暂行规定》 本 文	$[R] = 0.1 \times 0.3p_s + 0.3 \times 2.0$		0.75	0.90	1.05	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40
	$[R] = 0.0197p_s + 0.6559$	粉细砂	0.75	0.85	0.95	1.05	1.25	1.44	1.64	1.84
	$[R] = 0.1 \times 0.2p_s + 0.3 \times 2.0$		0.70	0.80	0.90	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
《红土规范》 本 文	$[R] = 0.09p_s + 0.9$	红 土	1.35	1.80	2.25	2.70	3.50	4.50	5.40	6.30
	$[R] = 0.1 \times 0.6p_s + 0.3 \times 3.0$		1.35	1.80	2.25	2.70	3.60	4.50	5.40	6.30
	$[R] = 3.2p_s^{0.568}$		0.80	1.18	1.40	1.75	2.21	2.60	2.95	3.27
《黄土规范》 本 文	$[R] = 0.1 \times 0.6p_s + 0.3 \times 1.5$	黄 土	0.75	1.05	1.35	1.65	2.25	2.85	3.45	4.05
	$[R] = 0.72p_s + 0.42$		0.78	1.14	1.50	1.86	2.58	3.30	4.00	4.74
		铁道部第二设计院								

表4

各土层 $[R]$ (kg/cm^2) 值

公式号 \ 土名	亚粘土 (填土)	粉细砂	淤泥质 粘土	粘土	亚粘土
I	1.4	1.9	0.71	2.1	2.9
II	1.9	1.9	0.75	2.1	3.9
III	1.9	2.3	0.78	2.0	3.0
IV	1.3	2.1	0.69	1.3	2.8
采用值	1.4	2.0	0.70	2.1	3.0

上按本文公式的数据提交设计, 楼房建成已二年多, 经观测情况与地质结论相符。

五、结 语

用静力触探试验资料来计算地基承载力, 是我国普遍使用的方法, 实践证明是可行的。但由于我国土类繁多, 不得不建立许多计算公式, 这给实际使用带来了困难, 有时计算结果达到了难以相信的程度, 主要是选择公式不当或公式适应范围太小造成的。本文公式可以较好地解决这个问题, 使用方便, 计算简单, 适应性广, 相对误差小。但使用本文公式必须搞清土的性质, 特别是土名即颗粒级配及塑性指数等。因此需有适量的钻探及土工试验来配合, 不然要有附近工程的地质资料可类比。在此还要指出的一点是, 静力触探要用一个地基承载力公式来代替大量公式, 确是一个十分复杂的大课题, 本文提出的方法仅是一种探索, 难免有不周之处, 当待今后工程实践中验证、补充、修改完善之, 以便更好地为我国工程建设服务。

参 考 文 献

- [1] 《工业与民用建筑工程地质勘察规范》, TJ21—77(试行), 中国建筑工业出版社, 1978年2月。
- [2] 《静力触探使用技术暂行规定》(试用), 铁道科学研究院出版, 1980年4月。
- [3] 蔡守璋、江文善、柴鑒之, 关于粘性土静力触探承载力计算公式的研究, 工程勘察, 1982年第2期。
- [4] 《工程地质手册》, 中国建筑工业出版社, 1975年7月。
- [5] 《上海市地基基础设计规范》(试行), 上海科学技术出版社, 1973年3月。