

# 静力触探确定地基承载力的理论公式\*\*

石明生 张智勇 魏杰

(郑州工学院) (河南省建筑职工大学) (华北水电学院)

**摘要:** 本文简要给出描述静力触探贯入过程的弹塑性计算模式并导出探头比贯入阻力及其临界深度的解析解。在此基础上建立静力触探探头比贯入阻力与地基承载力相关性的理论模式,从而导出两者相关理论公式。理论公式与现有的经验相关公式相一致并具有概括性。同时理论公式能反映经验公式所不能反映的尺寸效应,深度效应和地下水水位的影响。

**关键词:** 地基, 承载力, 静力触探

**中图分类号:** P 642

确定地基的承载力是岩土工程勘察及建筑物基础设计中的最重要问题之一。土力学创建之初 Terzaghi 即给出了经典的刚塑性理论解。此理论视土体为理想的刚塑性体并存在连续的破坏滑动面。除发生整体剪切破坏的理想浅基之外的大多数情况,特别是深基础,这种基本假定是不太适合的。尽管以此理论为基础,后人进行了大量的工作。提出了新的破坏图形和考虑了更多的影响因素,但万变不离刚塑性理想土体这一基本假定之宗。若将其承载力的基本表达式列为:

$$R = \gamma h \cdot N_q$$

其中  $R$  为地基承载力,  $\gamma h$  为土层有效自重应力,  $N_q$  为承载力因素。而各家所给出的  $N_q$  图线相差甚大(见图 1),有的超过 10 倍<sup>(1)</sup>。这样使得工程师无法把握理论,用于实践。

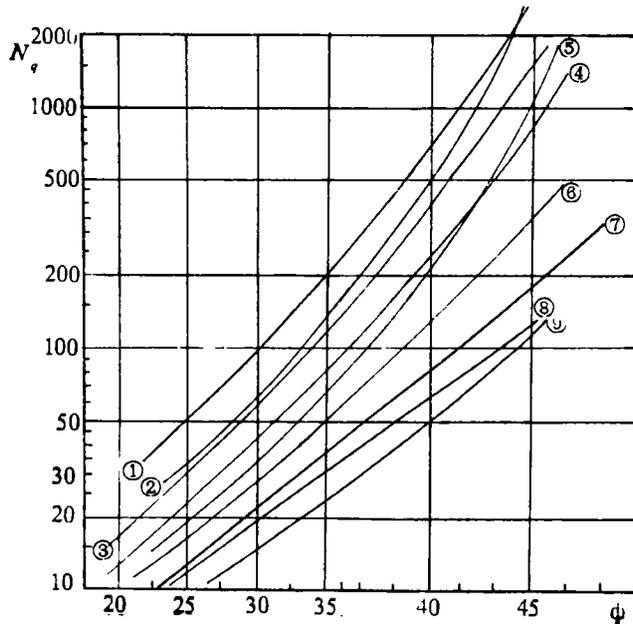
造成此问题是由于长期以来土力学领域将强度问题与变形问题截然分开的原因。但承载力这一由强度问题所引出的概念仍有其重要的实际意义。

静力触探方法作为一种主要的土工原位测试方法在我国已广泛地应用。用此方法确定地基基本承载力也已为工程界广泛重视、应用。它较理论方法可靠,较原位载荷板试验经济。但前提是进行大量的区域性的试验,进行统计,得到可靠的经验公式。但这种公式对

\* 水利水电科学研究基金资助项目

\*\* 收稿日期: 1993-03-26

子不同的区域不同的土类, 就有很大的变异性, 现将国内部分公式列于表 1。工程实践中人们戏称此类经验公式多得“成火车装”, 这极易造成误用, 不利于交流提高和技术规范化。同时对各地区、各种土的研究总结中, 由于相关性的内在机理不清, 统计方法也较盲目, 更无法反映尺寸效应、深度效应等方面的重要影响因素。解决上述问题的途径即是加强机理分析, 建立静力触探与地基承载力的理论相关公式<sup>(2)</sup>。



①德别尔 ②梅耶霍夫 ③列赫米尼尔 ④卡柯—凯里译 ⑤布林区—汉申  
⑥比阿雷兹—兰格雷 ⑦本文理论 ⑧太沙基 ⑨最小值 $e^{m\phi} r^2 (\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2})$

图1  $N_q-\phi$  曲线

本文作者之一曾对静力触探探头阻力的工作机进行了详细的分析, 得到了探头阻力及其临界深度的增量弹塑性混合解<sup>(3)</sup>。由于与本文主要内容的相关性, 在本文第二部分中简要列举其主要结论。以此结论为基础, 进一步深入研究, 所得本文的主要内容—静力触探与地基承载力相关性的理论公式。

## 1 静力触探比贯入阻力及其临界深度解析解

### 1.1 塑性区特征流线位移增量衰减方程:

$$\Delta S = \Delta S_1 \left(\frac{r_1}{r}\right)^\alpha \tag{1}$$

其中符号的意义见图 2 和图 3,  $\alpha$  为塑性区位移增量衰减指数, 其说明见文献<sup>(3)</sup>。

### 1.2 塑性区径向应力分布 (球对称空间课题静力平衡方程<sup>(4)</sup>)

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{2}$$

### 1.3 塑性区库伦极限平衡条件: (砂土 $C=0$ )

$$\sigma_r = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

1.4 弹塑性区交界面应力边界条件:

$$\sigma_{rp} = k(\varphi)\gamma h \quad (4)$$

其中  $k(\varphi) \approx 2 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ ,  $\gamma$  为土层容重,  $h$  为土层深度

静探  $p_s$ 、 $q_c$  与地基容许承载力  $[R]$  的经验关系

序	经验公式	适用范围和土层	公式来源
(1)	$[R]_{\text{规}} = 0.083p_s + 0.546$	$3 < p_s < 30$ 淤泥、淤泥质粘性土及一般粘性土	武汉静探联合研究组
(2)	$[R]_{\text{规}} = 0.079p_s + 0.76$	$30 < p_s < 60$ 老粘性土	
(3)	$R_o = 0.58\sqrt{p_s} - 0.46$	$p_s < 50$ 淤泥、淤泥质粘性土、一般粘性土及砂土	铁道部第三勘测设计院
(4)	$[R] = \frac{p_s}{\alpha}, \alpha = 2.13p_s^{0.584}$	$p_s < 50$ 淤泥、淤泥质粘性土及一般粘性土	交通部第一航务工程局
(5)	$[R] = 0.0788p_s + 1.2$	$p_s = 3-35$ 一般粘性土	湖北水利电力勘测设计院
(6)	$[R] = 0.2381p_s^{0.64} - 0.12$	$10 < p_s < 120$ 中粗砂	TJ21-77 规范编制说明(1976)
(7)	$[R] = 0.0197p_s + 0.6559$	$50 < p_s < 160$ 粉细砂	TJ21-77 规范编制说明(1976)
(8)	$[R] = 0.525\sqrt{p_s} - 1.033$	$10 < p_s < 100$ 中粗砂	《用静探测定砂土承载力》联合试验研究小组(1980)
(9)	$[R] = 0.02p_s + 0.595$	$10 < p_s < 150$ 粉细砂	《用静探测定砂土承载力》联合试验研究小组(1980)

1.5 弹、塑性区交界面位移增量:

在弹性区, 由于  $\Delta S_1$  引起应力增量为:

$$\Delta\sigma_r = \Delta S_1 \left( \frac{d\sigma_r}{dr} \right) \tag{5}$$

由弹性理论 *Lame* 解<sup>[4]</sup> 并积分得弹、塑性区交界面的弹性位移增量为:

$$\Delta S_p = \frac{1+\nu}{2E} \Delta S_1 \sigma_{rp} \tag{6}$$

其中 $\nu$ 、 $E$ 为泊松比和变形模量。

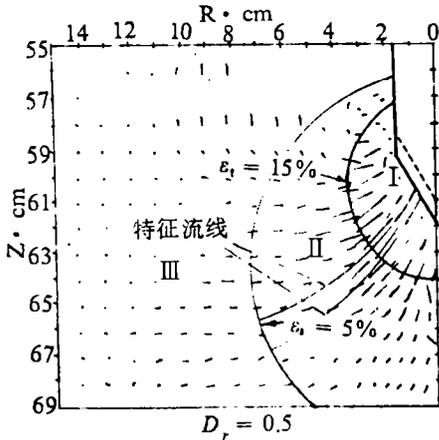


图2砂土位移增量场及特征流线

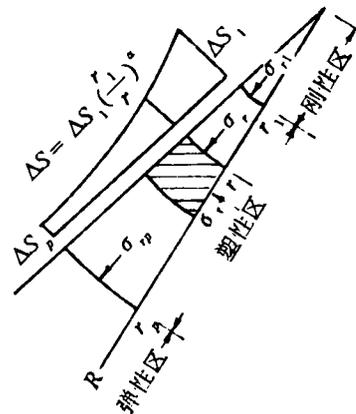


图3等效球体扩张模式

由塑性面所描述的弹、塑性区交界面位移增量为:

$$\Delta S_p = \Delta S_1 \left( \frac{r_1}{r_p} \right)^\alpha \tag{7}$$

1.6 弹、塑性区交界面位移增量协调方程:

$$\left( \frac{r_1}{r_p} \right)^\alpha = \frac{1+\nu}{2E} \sigma_{rp} \tag{8}$$

1.7 塑性区范围解析解

由上述八个方程可推导得出 (详见文献<sup>[3]</sup>) 塑性区范围解:

$$r_p = \zeta(\varphi) \cdot \left( \frac{p_s}{\gamma h} \right)^{\frac{1+\sin\varphi}{4\sin\varphi}} \cdot B \tag{9}$$

其中  $\zeta(\varphi) = \frac{2}{3} k(\varphi)^{-\frac{1+\sin\varphi}{4\sin\varphi}}$

1.8 比贯入阻力解析解:

令比贯入阻力  $p_s = \sigma_{r1}$ , 由前八个方程可推导出:

$$p_s = [k(\varphi)\gamma h]^{1-\frac{1-4\sin\varphi}{\alpha 1+\sin\varphi}} \cdot \left( \frac{2E}{1+\nu} \right)^{\frac{1-4\sin\varphi}{\alpha 1+\sin\varphi}} \tag{10}$$

1.9 比贯入阻力临界深度解析解:

由式 (9), 令其中  $h = h_{cr} = 2r_p$ , 并考虑其中  $\zeta(\varphi) = \frac{2}{3} k(\varphi)^{-\frac{1+\sin\varphi}{4\sin\varphi}}$ , 则可导出临界

深度

$$h_{cr} = F(\varphi) \cdot B^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + 5 \sin \varphi}} \cdot \left(\frac{p_s}{\gamma}\right)^{\frac{1 + \sin \varphi}{1 + 5 \sin \varphi}} \quad (11)$$

其中  $F(\varphi) = \left(\frac{2 \times 2}{3}\right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + 5 \sin \varphi}} \cdot [k(\varphi)]^{-\frac{1 + \sin \varphi}{1 + 5 \sin \varphi}}$

当  $\varphi = 30^\circ$  时:  $k(\varphi) = 2 \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = 6, F(\varphi) = 0.55$

当  $\varphi = 40^\circ$  时:  $k(\varphi) = 9, F(\varphi) = 0.52$   
 为简化可将  $F(\varphi)$  取为 0.5.

## 2 静力触探比贯入阻力与地基承载力的理论相关公式

用静力触探比贯入阻力  $p_s$  估算地基基本承载力  $R$  已在实践中应用。各地区的经验公式很多。突出的问题是深度效应、尺寸效应问题，无论是理论上，还是实用上都没有很好地解决<sup>[5]</sup>。G.Sanglerat 认为“将触探资料直接用于估算  $R$ ，在理论上是不可能的，触探探头的破坏和浅基础破坏条件相同的假设，还没有证明是正确的”。有关专家也认为，由于浅基破坏机理（特别是局部剪切破坏和冲剪破坏两种形态）的研究之不足，欲建立  $p_s$  与  $R$  之间的理论关系，自然极度困难<sup>[5]</sup>。鉴于破坏机理的差异，我们可以下面的间接方法来代替直接的方法。首先基于如下的假定：在理想的均匀深厚土层中，当基础埋深足够大时，其承载力趋于不再增加，存在临界深度  $h_{cr}$ ，在  $h_{cr}$  以下  $R = p_s$ 。如图 4 所示。这样

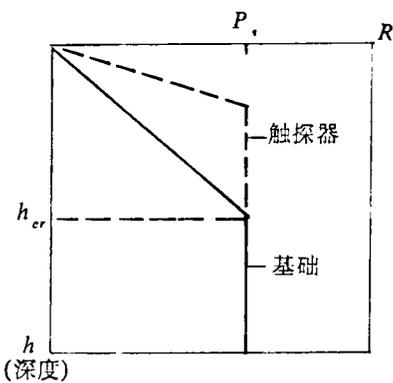


图 4 R— $q_c$  关系示意

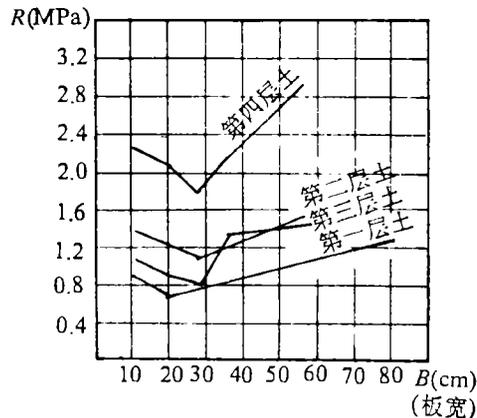


图 5 R—B 关系(铁科院等单位的荷载板试验)

在  $h < h_{cr}$  处的浅层基础的承载力可表为

$$R = h / h_{cr} \cdot p_s \quad (12)$$

根据铁科院等单位的荷载板试验<sup>[1]</sup>，有图 5 的结果，反映出  $B = 30\text{cm}$  的两侧， $R$ — $B$  的关系是完全不同的。此处的  $B$  计为  $B_{cr}$ 。分析此现象，笔者认为两种不同的机理，当  $B < B_{cr}$  时，为触探器和桩的贯入机理；当  $B > B_{cr}$  时，为压缩变形机理，故对式

(12) 修正为:

$$R = \frac{h + h_0}{h_{cr}} \cdot \frac{B}{B_{cr}} \cdot p_s \quad (13)$$

其中  $h_0$  代表当基础在  $h=0$  时:  $R \neq 0$  的特征。

将式 (11) 代入式 (13) 可得到:

$$R = F(\varphi) \cdot \frac{h + h_0}{B_{cr}} \cdot B^{\frac{1+\sin\varphi}{1+5\sin\varphi}} \cdot \gamma^{\frac{1+\sin\varphi}{1+5\sin\varphi}} \cdot p_s^{\frac{4\sin\varphi}{1+5\sin\varphi}} \quad (14)$$

根据有关文献<sup>[1]</sup> 取如下常用的数值作为实例, (为便于与原经验公式对比, 仍采用旧单位制)

$$h = 0, h_0 = 45\text{cm}, B = 70\text{cm}, \gamma = 0.0017\text{kg/cm}^3, \gamma_m = 0.0007\text{kg/cm}^3, \varphi = 38^\circ.$$

代入式 (14),  $F(\varphi)$  取 0.5, 可得到:

$$R = 0.22 \cdot p_s^{0.6} \quad (15)$$

作为对比, 在此列举两个统计经验公式<sup>[1]</sup>:

湖北电力设计院的中粗砂经验公式:

$$[R] = 0.238 \cdot p_s^{0.64} - 0.12$$

铁道部第三设计院根据河北、河南、江苏三省、西北地区 60 份轻亚粘土、饱和砂资料由计算机统计选用的最佳方程为:

$$\sigma_0 = 0.16 \cdot p_s^{0.63} + 0.14$$

上两式与式 (15) 的对比如图 6。

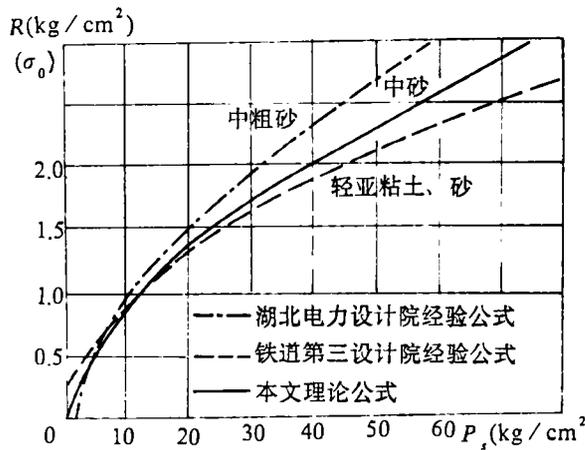


图 6 本文理论公式与实际经验公式的对比

公式 (14) 并非源于直接的机理分析和理论推导, 故需进一步检验修正。特别是式中

的  $\frac{h + h_0}{B_{cr}} \cdot B^{\frac{1+\sin\varphi}{1+5\sin\varphi}}$  项作为深宽修正还不能有足够的实验资料加以验证。但式中所反映

的  $R - P$  关系与有关的统计经验公式还是很接近的。

## 参 考 文 献

- 1 唐贤强. 叶启民编. 静力触探. 中国铁道出版社. 1981
- 2 俞季民, 魏杰. 砂土桩端阻力深度影响机理分析. 岩土工程学报. 1991年9月No.5:46—53
- 3 魏杰. 静力触探比贯入阻力增量弹性解析解. 水利学报. 1993
- 4 Vesic, A.S. Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. Proc. ASCE. Vol. 98, SM3, 1972:265
- 5 长沙铁道学院静力触探协作组. 砂类土静力触探机理的模型试验. 长沙铁道学院学报. 1984年. No.1:2—3

## Theoretical Formula for Determing the Bearing Capacity of Foundations with Cone Penetration Test

Shi Mingsheng   Zhang Zhirong   Wei Jie  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, the analytical solutions of cone resistance and its critical depth of cone penetration test are given briefly. Based on these solutions, the theoretical model of the correlation between the bearing capacity and the cone resistance is established. From this model, the theoreticl fromula of the correlation is derived.

**Keywords:** Foundation, Bearing Cpacpity, Cone Penetration Test.