

关于成层土地基极限承载力的计算方法

袁凡凡¹, 闫澍旺¹, 孙万禾²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津港湾工程研究所, 天津 300222)

摘要: 目前, 成层地基尚缺乏成熟的计算方法, 本文在迈耶霍夫和汉纳的成层土地基极限承载力理论的基础上对他们的极限承载力公式初步进行了探讨和改进, 同时讨论了汉森的加权平均法、扩散角法等不同的地基极限承载力计算方法, 并根据在天津港进行的大规模荷载实验结果对这些计算方法进行了检验。其结果表明对于成层土地基极限承载力的计算, 由迈耶霍夫和汉纳的理论所得的计算结果与实测值比较接近, 今后应进一步研究该方法的应用。

关键词: 成层土地基; 极限承载力; 计算方法

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1003-3688(2001)02-0026-04

Methods for Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Stratified Soils

YUAN Fan-fan¹, YAN Shu-wang¹, SUN Wan-he²

(1. Architectural Engineering Faculty of Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Tianjin Port Engineering Institute, Tianjin 300222)

Abstract: There still lack mature methods for calculation of stratified soils. On the basis of Meyerhof and Hanna's theory of ultimate bearing capacity of stratified soils, the authors made herein discussions and improvement on the expressions for ultimate bearing capacity proposed by Meyerhof and Hanna. At the same time, they have also made discussions on the methods for calculation of the ultimate bearing capacity of soils, such as Hanson's weighted average method and the projected area method. The methods were also checked and verified with the results of the large-scale loading tests carried out at the Port of Tianjin and the verification indicates that, for calculation of the ultimate bearing capacity of stratified soils, the calculated results derived from Meyerhof and Hanna's theory are more closer to the measured results. Therefore, it is necessary to further study the use of the methods in future.

Key words: stratified soil; ultimate bearing capacity; calculation method

1 引言

地基的承载力是指通过计算分析确定地基所能承受的极限荷载。在土力学的许多经典的理论中, 提供了许多极限承载力的计算公式, 如太沙基、汉森的极限承载公式等等, 但这些计算公式大多数是针对均质地基而言的, 对于非均质的成层土地基

来说就不能适用。事实上, 地基通常是非均质的层状土 (尤其是对于港口工程来说), 而且土层之间的力学性状指标的差别较大。成层土地基的破坏模式与均质土地基的破坏模式往往有很大的差别, 其相应的承载力计算方法也必然有很大的差别。但到目前为止, 有关成层土地基实际的破坏模式人们还不太了解, 对于成层土地基的承载力计算在理论上还没有得到很好的解决, 只能采用近似的方法进行计算处理。在我国, 成层土地基的极限承载力常用扩散角法和汉森的加权平均法这两种方法进行计

收稿日期: 2000-04-03

作者简介: 袁凡凡 (1977-), 男, 天津大学建筑工程学院博士研究生, 从事岩土工程方面的研究。

算,但是其计算结果往往有很大的误差。

本文重点介绍了迈耶霍夫和汉纳的成层土地基极限承载力理论,并在其双土层地基极限承载力计算公式的基础之上,对其理论进行推广,得到了多层土地基极限承载力的计算公式。

2 成层土地基极限承载力的几种理论计算方法

2.1 扩散角法

在我国和日本等国的工民建设计规范之中,常常推荐使用扩散角理论对成层土地基极限承载力进行计算。该理论假定上部基底压力沿较硬土层向下线性扩散(如图1),在两土层交界表面有一个长度、宽度都变大的等效基础,在这个基础上的极限承载力即可等效为作用在上部较软土层基础的整体极限承载力。承载力可由下式进行计算:

$$q_u = \frac{q_0}{B^2} (B + 2H \tan \alpha)^2 \quad (1)$$

式中: q_0 为下卧土层的极限承载力; B 为基础宽度; H 为上部土层的厚度。

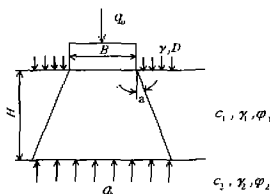


图1 扩散角法计算示意图

2.2 汉森加权平均法

汉森加权平均的方法在我国主要用于港口工程中的成层土地基设计之中,该理论分以下几个步骤对地基极限承载力进行求解,首先求得持力层的最大深度即有效深度 z_{max} ,可由下式计算:

$$z_{max} = \lambda B \quad (2)$$

式中: B 为基础宽度; λ 为深度系数。然后取有效深度范围内不同土层的厚度或面积的加权平均强度而直接用均质土的汉森公式计算极限承载力。容重和强度指标的计算如下:

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i / z_{max} \\ \bar{c} &= \sum_{i=1}^n c_i h_i / z_{max} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\bar{\varphi} = \sum_{i=1}^n \varphi_i h_i / z_{max}$$

式中: γ_i 、 φ_i 、 c_i 分别为第 i 层土的容重、凝聚力和内摩擦角; h_i 为第 i 层土的厚度。

因而成层土极限承载力可由下式计算得到:

$$q_u = \bar{c} N_{c,s} d_i i_s g_s b_s + \bar{\gamma} N_{q,s} d_q i_q g_q b_q +$$

$$\frac{1}{2} \bar{\gamma} B N_{\gamma} i_{\gamma} g_{\gamma} b_{\gamma} \quad (4)$$

式中: s_c 、 s_q 、 s_{γ} 为基础形状修正系数; i_c 、 i_q 、 i_{γ} 为荷载倾斜修正系数; d_c 、 d_q 、 d_{γ} 为基础埋深修正系数; g_c 、 g_q 、 g_{γ} 为地面倾斜修正系数; b_c 、 b_q 、 b_{γ} 为基底倾斜修正系数; N_c 、 N_q 、 N_{γ} 为承载力系数。

2.3 迈耶霍夫和汉纳提出的剪切破坏理论

迈耶霍夫和汉纳提出的剪切破坏理论早在1978年就以提出来了。国内外学者进行了大量的模型实验对这个理论进行检验,其结果都表明运用该理论计算成层土地基极限承载力是合理的。迈耶霍夫和汉纳的剪切破坏理论主要解决由两层土体(硬土层下卧有软土层)组成的地基的极限承载力问题,它假设地基基础中软弱土层上部的较硬土层发生剪切破坏,并假定剪切破坏面为竖直向下(如图2所示),地底面与土层分界面之间的土体垂直地插入软土层,下卧软土发生弹塑性破坏。中间柱状土体受到两侧的被动土压力 P_p 、基础上部压力 Q 及下部软土层的反力 q_0 ,由极限平衡方程即可求得基础极限承载力。基础的承载力将由上下两层联合组成,即

$$q_u = q_0 + \frac{2P_p \sin \delta}{B} - \gamma_1 H \quad (5)$$

式中: q_0 为下卧土层的极限承载力; γ_1 为上层土的容重; P_p 为上层剪切破坏面上的被动土压力; δ 为被动土压力作用线与水平面的倾角。

下卧土层的极限承载力由式(6)确定,即

$$Q_0 = c_2 \cdot N_c + \gamma_2 D N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma} \quad (6)$$

式中: N_c 、 N_q 、 N_{γ} 为承载力系数; γ_2 为下层土的容重; c_2 为下卧软土的凝聚力; D 为基础埋深。

被动土压力可由下式确定,即

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 (1 + \frac{2D}{H}) \frac{k_p}{\cos \delta} \quad (7)$$

式中: k_p 为被动压力系数。

将式(7)代入式(5)可得:

$$q_u = q_0 + 2c_u \frac{H}{B} + \gamma_i H^2 \left(1 + \frac{2D}{H}\right) \frac{k_i \tan \varphi}{B} - \gamma_i H \quad (8)$$

式中: k_i 为冲剪系数, $k_i = \frac{k_{pi} \tan \varphi}{\tan \varphi}$ (9)

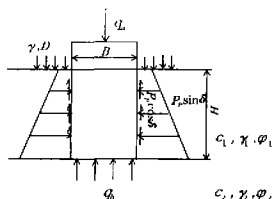


图2 迈耶霍夫、汉纳理论计算示意图

2.4 剪切破坏理论的改进

我们遇到的实际工程项目中,地基基础往往由两层以上的土体组成,破坏面也贯通经过多层土体,因而上文2.3中给出的公式(8)就不再适用。对于由两层以上土体组成地基基础共同承受荷载的情况下,我们假设土体破坏的机制与两层的情况下是相同的,如图3所示,即也是上部土层发生剪切破坏,下部土体弹塑性破坏,因而可得到多层土的极限承载力计算公式:

$$q_u = q_0 + 2 \sum_{i=1}^n c_{ui} \frac{H_i}{B} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{H_i}{B} (\gamma_i H_i + 2 \sum_{j=1}^{i-1} H_j \gamma_j) \cdot K_n \tan \varphi_i - \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i H_i \quad (10)$$

式中: c_{ui} 为第 i 层土的粘聚力; H_i 为第 i 层土的土层厚度; K_n 为第 n 层土的冲剪系数,可由式(11)确定:

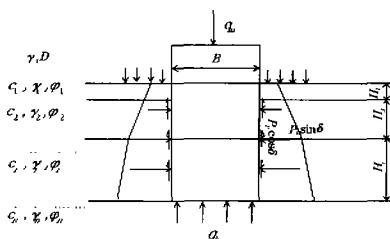


图3 两层以上土层的计算简图

$$k_n = \frac{k_{pn} \tan \varphi}{\tan \varphi} \quad (11)$$

式中: φ_i 为第 i 层土的内摩擦角; γ_i 为第 i 层土的容重。

当地基基础由多个土层组合而成,在基础承载力达到极限值,地基发生破坏时,破坏可能仅仅发生在上部第一层中,也可能发生在上部两层之中或是贯穿了多个土层,这是由土层的性质和荷载板的宽度所决定的。所以在计算地基极限承载力之前,我们必须大致估算出土体的破坏深度。这里我们可运用 Tcheng 提出的公式(式(12)),估算各个土层的临界厚度。如果土层的厚度小于这个厚度,那么破坏面就要贯穿这个土层,如果土层的厚度大于这个厚度,那么破坏面就仅限于这个土层之中。

$$(H/B)_{cr} = \frac{3 \ln(q_0/q'_0)}{2(1+B/L)} \quad (12)$$

式中: q'_0 为上层土无限厚时的承载力; q_0 为下层土无限厚时的承载力; B/L 为荷载板的宽长比。

在大致估算出土体的破坏深度之后,我们就可以由式(10)来计算地基的极限承载力。但是由于荷载板是正方体的,所以式(10)需要乘以一个形状修正系数得到最终的极限承载力计算公式:

$$q_u = q_0 + 2 \left(1 + \frac{B}{L}\right) \sum_{i=1}^{n-1} L c_{ui} \frac{H_i}{B} + 2 \left(1 + \frac{B}{L}\right) \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}_i H_i \cdot \left(1 + \frac{2 \sum_{j=1}^{i-1} H_j}{H_i}\right) K_n \tan \varphi_i - \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i H_i \quad (13)$$

3 各理论计算公式的验证

为了验证上面的计算公式,将天津新港地基强度的大型荷载板实验得到的数据与我们用理论公式计算得出的结果进行比较。该实验现场上部有一层约75cm厚的硬土层,下部为软粘土,在这样的地基条件下,分别针对天然软基(如图4(a))、天然地基上有砂垫层(如图4(b))、天然地基有砂垫层和碎石垫层(如图4(c)),这四种条件下用边长为0.707m、1.0m、2.0m、3.0m的方型荷载板进行载荷实验。

各层土体的具体力学性能指标如表1所示。

由上面的计算数值图我们可以看出,利用迈耶霍夫、汉纳理论和扩散角法的计算结果与实际测量值基本吻合,而由汉森公式得出的计算结果与实测

值比较误差较大。这是由于地基基础各层之间土体的强度指标相差较大,因而用汉森加权平均的方法,将整个地基基础当作均质地进行计算必然会产生很大的误差,而迈耶霍夫、汉纳的理论计算方法和扩散角法将各个土层分开进行计算,正好克服了这个问题,因而结果也趋于合理。

表 1

	ϕ (°)	$C/t \cdot m^{-2}$	$\gamma/t \cdot m^{-2}$
硬层	19.5	0.7~0.95	1.9
软土层	10	0.5~0.7	1.9
砂土层	30~34		1.8
碎石垫层	40~45		1.8

计算结果如图 5~7 所示:

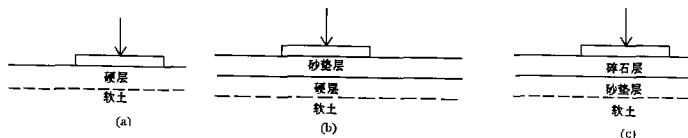
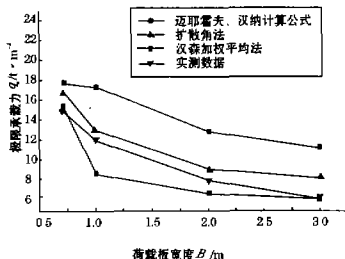
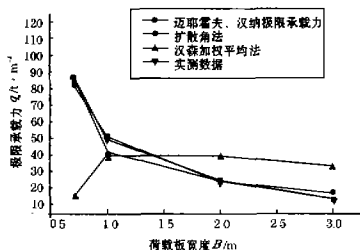


图 4

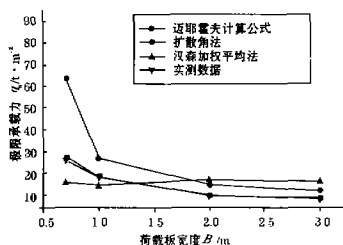
图 5 天然地基条件下 $B-q_k$ 关系图图 7 碎石垫层条件下 $B-q_k$ 关系图

4 结论

(1) 垫层地基的极限承载力可按式(13)计算,其计算结果与实际值相比基本吻合,其中冲剪系数 K_s 值可按文献[1]中图 8~22 取值,承载力系数可取迈耶霍夫公式的承载力系数值。

(2) 运用汉森加权平均法计算成层土地基的极限承载力时,如果土体的强度变化较大,其计算结果与实际值的有较大的差距。

(3) 运用扩散角法计算成层土地基的极限承载

图 6 砂垫层条件下 $B-q_k$ 关系图

力时,计算结果与实际值相近,对无边载的砂垫层地基,由于砂子的挤出(边缘边)扩散角减小至 20° ,用 30° 计算要比实际值偏大。

(4) 对砂子垫层地基在荷载板宽为 1.0m 时,用式(13)理论计算值要小于实际测量值,这是由于上下两土层的强度变化较大,且土体破坏时的破坏机制也不一样了。建议此时用扩散角法进行计算。

参考文献:

- [1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996. 371~378.
- [2] H. F. 温特科恩,方晓阳. 基础工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1975. 190~196.
- [3] 侯利,陈环. 天津软土地基[M]. 天津:天津科学技术出版社,1987. 337~347.
- [4] Meyerhof & Hanna. Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay [J]. Can. GEOTEC. J., 1980, 17.
- [5] Meyerhof & Hanna. Design Ultimate bearing capacity of foundations on a three-layers soil [J]. Can. GEOTEC. J., 1979, 16.