

上覆硬壳层地基极限承载力特性研究

卞桂荣¹,李富有²,钱晓彤³,谢珂³

(1.中交三航局第三工程有限公司,江苏 南京 210000;2.浙江华恒交通建设监理有限公司,浙江 绍兴 312000;
3.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210000)

摘要:针对上覆硬壳层地基极限承载力的计算,该文基于迈耶霍夫和汉纳冲剪破坏理论,综合考虑上覆硬壳层的封闭作用和应力扩散作用,推导出适用于上覆硬壳层双层地基的极限承载力计算公式,并通过实际工程算例验证。汉森加权平均法、扩散角法、迈耶霍夫和汉纳法的计算值与实测值相比最大误差分别为74.2%、31.5%和15.2%,而采用该文的改进算法,计算误差在6%以内。表明在计算上覆硬壳层地基极限承载力时,考虑上覆硬壳层封闭作用及应力扩散作用的必要性。同时,此法也可供上覆硬壳层地基的极限承载力计算参考。

关键词:非均质地基;上覆硬壳层;软土地基;极限承载力

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 引言

地基承载力是指地基能承受荷载的能力,即地基所能承受的极限荷载。目前土力学经典理论中的地基极限承载力计算公式基本都是基于均质地基而言的,如太沙基承载理论、汉森承载理论以及传统的极限平衡法等^[1-3]。然而在实际工程中,地基一般是由性质差异较大的非均质地基土组成,特别是对于上覆硬壳层的双层地基^[4-6],以及采用就地固化工艺形成的人工硬壳层的双层地基^[7-8],上、下土层性质差异很大,上述理论显然已不再适用。

基于上述情况,国内外学者对上覆硬壳层双层地基的极限承载力计算进行了研究。问延煦^[9]考虑了硬壳层地基的封闭作用和应力扩散作用,采用应力路径法,从机理上分析并推导出上覆硬壳层地基的临塑荷载计算公式;Reddy等^[10]假定黏性土是各向异性的,土体强度满足Casagrande-Carillo关系,最终得出了适用于各向异性且呈层状、饱和状态的双层黏性土地基的承载力计算公式;Meyerhof^[11]也采用极限平衡方法进行了多种不同的假定,得到了多层土体地基的极限承载力;Chen等^[12]研究的是上下限

定理在多层土体中的应用,将计算结果与实际工程的实测结果进行对比,得到弹塑性地基的破坏荷载更接近于真实情况下的破坏荷载的结论。

目前常用的非均质地基承载力计算方法有扩散角法、汉森加权平均法以及迈耶霍夫和汉纳冲剪破坏理论^[12],但是这3种理论计算结果往往相差很大。为了使计算结果更接近实际,本文在迈耶霍夫和汉纳理论基础上综合考虑硬壳层的封闭作用、反压护道作用以及应力扩散作用得到上覆硬壳层地基的极限承载力计算公式,并通过实际工程算例来验证该改进公式的合理性。

1 上覆硬壳层地基承载力计算方法的改进

比较3种非均质地基极限承载力的计算方法,扩散角法主要用于刚性基础作用下的地基极限承载力的计算,对于上覆硬壳层的地基应力扩散作用比较复杂,因此扩散角法难以用于上覆硬壳层的地基极限承载力计算;汉森加权平均法主要用于各个土层物理力学性质差异不大的情况,广泛用于港口工程的成层地基中,而上覆硬壳层地基,硬壳层与下卧软

作者简介:2022-06-11

基金项目:浙江省交通运输厅科研计划项目(编号:2014H28);中交三航局第三工程有限公司2019年科技研发项目(编号:2019-39)

作者简介:卞桂荣,男,大学本科,高级工程师.E-mail:1414072583@qq.com

土层物理力学性质相差较大,故汉森加权平均法也不适用。

迈耶霍夫和汉纳的冲剪破坏理论主要用来计算上硬下软的两层土地基的极限承载力,但是该理论假设的是上部较硬土层发生剪切破坏,并且假设剪切破坏面的方向是竖直向下。在上覆硬壳层的地基中,正是由于硬壳层的存在,对上方荷载起到了应力扩散等作用,使得地基极限承载力有很大提高。因此,本文综合考虑硬壳层的封闭作用,反压护道作用和应力扩散作用,对迈耶霍夫和汉纳冲剪破坏理论计算公式进行修正改进,得到适用于上覆硬壳层地基的极限承载力计算公式。

1.1 上覆硬壳层地基临塑荷载的计算

针对上覆硬壳层这种上硬下软的复杂地基情况,为了便于计算公式的推导,作如下假设:

(1) 大面积荷载作用下把硬壳层的自重假设为大面积的均布荷载。

(2) 硬壳层与下卧软土层相比,其本身的物理力学性质较为良好,故假设忽略硬壳层的压缩变形,即在一定范围的荷载作用下,硬壳层不会产生剪切变形,或者变形很小,可以忽略不计。

开始计算前,为了便于计算,首先将大面积的梯形荷载等效换算成高度相等的矩形荷载。等效原则可以按照梯形荷载与换算后的矩形荷载作用于上覆硬壳层地基上的附加应力相同来进行^[13]。等高度的矩形荷载计算宽度可按式(1)、(2)确定:

$$E_{s1}/E_{s2} \leq 3 \text{ 时, } B = b_1 + (b_2 - b_1)/3 \quad (1)$$

$$E_{s1}/E_{s2} > 3 \text{ 时, } B = b_1 + (b_2 - b_1)/4 \quad (2)$$

式中: E_{s1} 为上覆硬壳层的压缩模量(kPa); E_{s2} 为下卧软土层的压缩模量(kPa); b_1 、 b_2 分别为原梯形荷载的上、下底宽度(m); B 为等价换算后矩形荷载的计算宽度(m)。

要推导出上覆硬壳层地基临塑荷载的计算公式,首先要推导出考虑硬壳层重力与软土层重力共同作用下的塑性区边界方程,推导过程如下:

在均布荷载 P 作用下(荷载宽度为 B),地表以下深度 Z 处任一点 M 的最大和最小主应力计算公式为:

$$\sigma_3^1 = \frac{P}{\pi} [2\alpha \pm \sin(2\alpha)] \quad (3)$$

式中: 2α 为视角。

由于硬壳层与软土层本身重力作用的影响而产生的最大和最小主应力分别为: $\sigma_1' = \gamma_1 h + \gamma_2 z$, $\sigma_3' = k_0(\gamma_1 h + \gamma_2 z)$, 其中 γ_1 、 γ_2 分别为硬壳层和下卧软弱层的重度(kN/m³); h 为硬壳层的厚度; z 为计算点深度(m); k_0 为静止侧压力系数,一般情况下的 $k_0 < 1$,但硬壳层由土体固化后形成,固化土的力学性质介于土壤和岩石之间,其固结特性介于固结土和超固结土之间,所以其 k_0 值大于常规土体,故假定 k_0 值为 1.0。则考虑重力作用后 M 点的最大和最小主应力为:

$$\sigma_3^1 = \frac{P}{\pi} [2\alpha \pm \sin(2\alpha)] + \gamma_1 h + \gamma_2 z \quad (4)$$

当 M 点受到的应力达到极限平衡状态时, M 点必位于塑性区的边界上,此时,由极限平衡理论可以得到, M 点的应力状态应满足式(5):

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + c_2 \cdot \cot \varphi_2 \right] \sin \varphi_2 \quad (5)$$

式中: c_2 、 φ_2 分别为软土层黏聚力(kPa)和内摩擦角(°)。

将式(4)代入式(5),整理后可以得出考虑硬壳层和软土层重力作用下的塑性区边界方程:

$$Z = \frac{P}{\gamma_2 \pi} \left[\frac{\sin(2\alpha)}{\sin \varphi_2} - 2\alpha \right] - \frac{c_2 \cdot \cot \varphi_2}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1 h}{\gamma_2} \quad (6)$$

将式(6)对 α 进行求导,可以求得塑性区在下卧软土层的最大开展深度 Z_{\max} :

$$Z_{\max} = \frac{P}{\gamma_2 \pi} \left(\cot \varphi_2 - \frac{\pi}{2} + \varphi_2 \right) - \frac{c_2 \cdot \cot \varphi_2}{\gamma_2} - \frac{\gamma_1 h}{\gamma_2} \quad (7)$$

当 $Z_{\max} = 0$ 时,公式中的荷载 P 就是要求的临塑荷载 P_{cr} ,最终上覆硬壳层地基的临塑荷载计算公式为:

$$P_{cr} = \frac{\pi}{\cot \varphi_2 - \frac{\pi}{2} + \varphi_2} \cdot \gamma_1 h + \frac{\pi \cot \varphi_2}{\cot \varphi_2 - \frac{\pi}{2} + \varphi_2} \cdot c_2 \quad (8)$$

1.2 考虑硬壳层封闭作用对极限承载力的影响

硬壳层具有较好的物理力学性质,其相对于软弱下卧层来说是一种类似“板”的结构,如图1所示。当荷载作用于硬壳层上时,由于硬壳层的封闭作用和周围的约束,会在软土层中产生影响范围较大的超孔隙水压力。产生类似封闭液体向周围土体挤压

的现象称为“类帕斯卡效应”。正是因为这种“类帕斯卡效应”或硬壳层的封闭作用,改变了土体中的应力分布,使得荷载作用范围以外的硬壳层起到了限制土体自由挤出的作用,最终在一定范围内会存在较大的水平作用力。

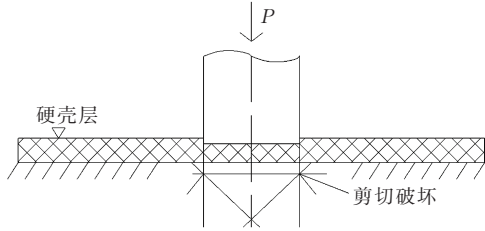


图1 考虑硬壳层封闭作用的地基破坏简图

实际工程中,修筑路堤时,若路堤坡脚处的硬壳层被破坏,则该处的淤泥会被挤出,硬壳层的封闭作用就会减小,从而该处的填土高度会降低。这就说明硬壳层的封闭作用会提高一部分地基承载力^[14]。

在上文迈耶霍夫和汉纳冲剪破坏理论的基础上,对上覆硬壳层地基极限承载力进行改进修正。假设迈耶霍夫和汉纳理论中地基发生破坏时,破坏面上被动土压力的方向与水平面的夹角为 β ,那么硬壳层的封闭作用对地基极限承载力的影响主要来自两个方面:①硬壳层本身的重力;②硬壳层自身的抗剪强度。因此,硬壳层封闭作用提高的那部分地基承载力 P_2 可用下式计算确定:

$$P_2 = k_0 \gamma_1 h + \tau \sin \beta \quad (9)$$

式中: β 为破坏面上被动土压力方向与水平面夹角。

计算硬壳层剪切破坏面上的抗剪强度 τ ,然后代入式(9)即可,黏性土的剪切破坏满足摩尔库仑准则,硬壳层剪切破坏面上的抗剪强度满足 $\tau = c_1 + \sigma_1 \tan \varphi_1$,其中, c_1 、 φ_1 分别为硬壳层的黏聚力(kPa)和内摩擦角($^\circ$)。

硬壳层处于极限状态时,剪切破坏面上的应力为: $\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi_1$, $\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi_1$ 。

破裂面与大主应力面的夹角 $\alpha = 45^\circ + \varphi_1/2$,故破裂面上的法向应力可近似等于 $\sigma_f = 2c_1 \tan(45^\circ + \varphi_1/2)$,代入抗剪强度计算公式后可得 $\tau_f = c_1 + 2c_1 \tan(45^\circ + \varphi_1/2) \tan \varphi_1$ 。将 τ_f 的计算公式代入式(9),得到由于硬壳层封闭作用提高的那部分地基承载力计算公式:

$$P_2 = k_0 \gamma_1 h + \left[c_1 + 2c_1 \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2}\right) \tan \varphi_1 \right] \sin \beta \quad (10)$$

1.3 考虑硬壳层应力扩散作用对极限承载力的影响

由于硬壳层是一种板体结构,所以基底处的附加应力通过硬壳层向下卧软土层传播时会扩散到面积较大的软土层上,并且分布得更加均匀,这就使得地基的极限承载力有一定的提高,这种现象称为硬壳层的应力扩散作用。迈耶霍夫和汉纳的冲剪破坏理论认为,当上硬下软这种复杂地基达到极限承载力时,上部较硬土层发生的是剪切破坏,并且认为该破坏面上发生的是竖直向下的剪切破坏,没有考虑到上覆硬壳层的应力扩散作用,所以在计算地基极限承载力时认为作用在下卧软土层上的荷载宽度仍然是 B 。

然而对于上覆硬壳层的双层地基,考虑硬壳层的应力扩散作用,最终作用在软土层界面上的荷载宽度设为 B' 。首先将梯形荷载简化为矩形荷载,荷载宽度 $B = (b_1 + b_2)/2$,其中 b_1 、 b_2 分别为梯形荷载的上底、下底宽度。按照硬壳层应力扩散作用前后的总压力相等的原理,有 $\sigma_z(B + 2h \tan \theta) = pB$,则扩散角 θ 的计算公式如下:

$$\theta = \arctan \left[\frac{B}{2h} \left(\frac{p}{\sigma_z} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

式中: σ_z 为基底竖向附加应力(kPa); p 为基础顶面荷载(N/m^2)。

王晓谋^[15-16]根据式(11)计算了在特定尺寸下的应力扩散角的值,如表1所示。

表1 应力扩散角取值

B/h	不同 a 值时的应力扩散角/ $^\circ$				
	1.0	2.0	4.0	6.0	10.0
10.00	1.8	2.4	3.0	3.4	5.3
5.00	5.2	8.2	11.5	14.6	23.5
2.50	12.0	17.3	23.3	27.8	35.8
1.25	20.5	26.3	33.3	37.8	43.7
1.00	22.9	28.5	34.9	38.8	44.8

注: a 为上、下土层的压缩模量比。

扩散角的大小同时也受地质条件的影响,对于上覆硬壳层这种双层地基而言,根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),建议扩散角 θ 取 30° 。应力扩散图如图2所示,因此,应力扩散作用后作用在软土

层界面上的荷载宽度 B' 可表示为 $B' = B + 2h \tan \theta$, 故硬壳层的应力扩散作用改变了荷载作用宽度, 对地基的极限承载力也有一定影响。

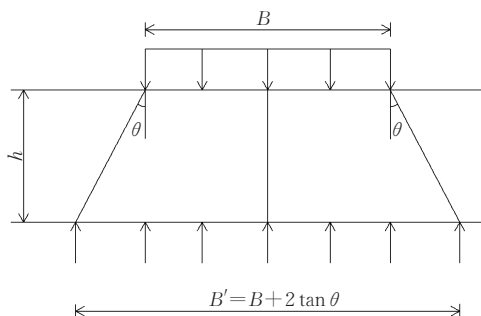


图2 应力扩散图

将修正后的 B' 代入式(9)可以得到考虑应力扩散作用下的下卧软土层的极限承载力 q'_b 计算公式:

$$q'_b = c_2 N_c + \gamma_1 h N_q + \frac{1}{2} (B + 2h \tan \theta) \gamma_2 N_r \quad (12)$$

式中: N_c 、 N_q 、 N_r 为承载力系数, 可通过查表获取, 无量纲。

综合上述分析, 为了使对上覆硬壳层地基极限承载力特性的理论研究更加接近实际, 以便应用于实际工程中, 在迈耶霍夫和汉纳冲剪破坏理论的基础上, 充分考虑了硬壳层的封闭作用和应力扩散作用, 对迈耶霍夫和汉纳理论进行修正, 得到修正后的地基极限承载力 q_u 计算公式如下:

$$q_u = q'_b + 2c_a h/B + 2P_p \sin \delta/B - \gamma_1 h + P_2 \quad (13)$$

式中: c_a 为剪切破坏面上的黏聚力(kPa); P_p 为上层硬壳层剪切破坏面上的被动土压力(kPa); δ 为水平面与被动土压力作用线的夹角($^\circ$)。

2 算例分析

为了验证修正后改进公式的正确性, 利用无锡某工地进行现场试验研究。

该地区上部为一层厚 75 cm 的硬壳层, 下部为软黏土层, 各土层的力学性能指标如表 2 所示。选取边长分别为 0.707 m、1 m、2 m、3 m 的不同方形荷载板进行荷载试验, 按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 要求进行加载, 现场试验中当 24 h 内沉降速率不能达到稳定时停止加载, 并取前一级荷载为极限荷载。具体荷载变形曲线如图 3 所示。现场试验测得对应不同边长荷载板的地基极限承载力

分别为 150 kPa、120 kPa、80 kPa、65 kPa。

表2 土层力学性能指标

土层分类	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
硬壳层	19.5	7.0	19
软土层	10.0	5.0	19

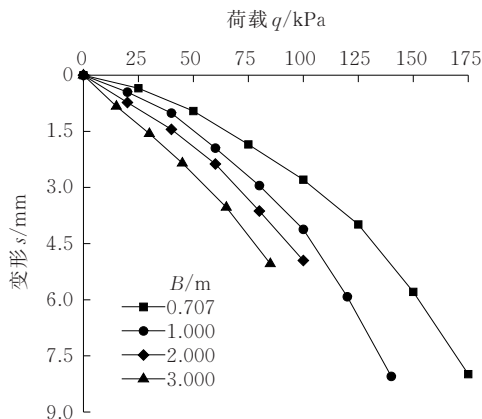


图3 荷载-变形曲线

运用扩散角法计算时, 土层的扩散角取为该层土体的内摩擦角(19.5°), 根据传统的扩散角理论可计算出地基的极限承载力, 得到不同边长荷载板的地基极限承载力分别为 168.42 kPa、30.21 kPa、92.38 kPa、85.46 kPa。

根据汉森加权平均法理论计算公式, 可先算出各个平均强度指标, 如表 3 所示 (其中 φ 、 c 、 γ 分别为土层的平均内摩擦角、平均黏聚力和平均重度; Z_{\max} 为有效计算深度; B 为荷载板宽度)。

表3 汉森加权平均强度指标

B/m	Z_{\max}/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
0.707	0.55	19.0	0.95	19.5
1.000	0.80	19.0	0.93	18.9
2.000	1.36	19.0	0.94	15.2
3.000	1.97	19.0	0.79	13.6

利用汉森加权平均法、迈耶霍夫和汉纳理论计算公式及改进公式计算地基的极限承载力。

扩散角法、汉森加权平均法、迈耶霍夫和汉纳理论法以及改进公式法计算出的地基极限承载力结果对比分析如图 4 所示, 这 4 种方法计算结果的误差如表 4 所示。

从图 4 可以看出: 由汉森加权平均法计算得到的结果与实测值相比误差最大, 这是由于硬壳层与软土层的土体强度指标相差较大, 因而采用汉森加权

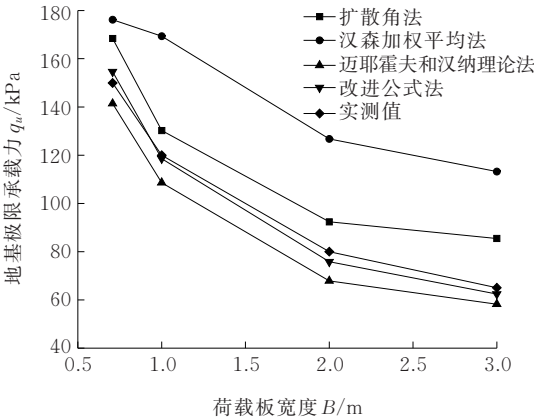


图4 地基极限承载力计算结果对比分析图

表4 扩散角法、汉森公式、迈耶霍夫和汉纳公式及改进公式计算误差

B/m	极限承载力计算误差/%			
	扩散角法	汉森公式	迈耶霍夫和汉纳公式	改进公式
0.707	12.3	17.4	5.7	3.1
1.000	8.5	41.1	9.5	1.2
2.000	15.5	58.4	15.2	5.2
3.000	31.5	74.2	10.4	4.0

平均法将整个地基基础当作均质地基来计算必然会产生很大的误差;而扩散角法及迈耶霍夫和汉纳理论将各个土层分开进行计算,较好地克服了这个问题,因此计算结果也比较接近实测值。此外,运用扩散角法计算上覆硬壳层地基极限承载力时,其计算结果与实测值较为接近,但是都要比实测值偏大,偏于危险;采用迈耶霍夫和汉纳理论计算上覆硬壳层地基极限承载力时,计算结果均比实测值偏小;当运用考虑了硬壳层的封闭作用、反压护用以及应力扩散作用后的改进算法进行计算时,计算结果与实测值最为接近,且基本略小于实测值,偏于安全。因此,基于迈耶霍夫和汉纳理论修正后的改进算法具有较好的适用性。

3 结论

(1) 在迈耶霍夫和汉纳理论基础上,综合考虑了硬壳层的封闭作用和应力扩散作用,改进了上覆硬壳层地基极限承载力的计算公式。

(2) 结合实际工程算例,通过现场原位荷载试验

结果对扩散角法、汉森加权平均法、迈耶霍夫和汉纳理论以及推导的改进公式进行对比分析,结果表明本文改进算法更接近工程实际,且偏于安全,有较好的实用性。

参考文献:

[1] 曹亮,刘长武,康亚明,等.考虑硬壳层抗剪作用的软土地基极限荷载计算[J].四川建筑科学研究,2010,36(2):139-142.

[2] BANDINI P M, PHAM S M. Bearing capacity of embedded strip footings in two-layered clay soil[C]//Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering,2011:332-341.

[3] 徐洋,谢康和,梁仕华.复合地基的平面应力扩散效应[J].土木工程学报,2002,35(2):57-60,69.

[4] 戴范,刘枫,黄希望,等.一级公路高液限土水泥改良试验研究[J].中外公路,2020,40(1):240-242.

[5] 刘海鹏,陈冠一,杨和平.酶石灰技术加快稳定软土路基试验研究[J].中外公路,2019,39(6):24-29.

[6] 侯芮,陈四利,马啸,等.铁尾矿砂水泥复合土的力学性能研究[J].中外公路,2019,39(1):206-209.

[7] 陈永辉,王颖,程潇,等.就地固化技术处理围海工程吹填土的试验研究[J].水利学报,2015,46(S1):64-69.

[8] 张其一,栾茂田.复合加载情况下双层地基极限承载力研究[J].岩土力学,2009,30(4):1131-1136.

[9] 问延煦.双层地基承载与变形特性研究[D].上海:同济大学,2007.

[10] REDDY A S, SRINIVASAN R J. Bearing capacity of footings on layered clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1969, 95(1):83-99.

[11] MEYERHOF G G. Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(2):223-229.

[12] CHEN W F, Davidson H L. Bearing capacity determination by limit analysis[J]. Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1973, 99(6):433-449.

[13] 刘怡林,黄茂松.公路路基地基承载特性及破坏模式[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):84-89.

[14] 毛成琦.路堤荷载作用下软土硬壳层地基变形特征分析和沉降计算[D].北京:北京交通大学,2011.

[15] 王晓谋,袁怀宇.河滩相软土地基路堤施工[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(3):26-29.

[16] 王晓谋,尉学勇,魏进,等.硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的数值分析[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(3):37-41.