

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1626

关于偏心荷载下地基承载力的验算方法

宋二祥, 陈星屹, 林世杰

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对偏心荷载作用下的地基承载力验算, 以条形基础为例, 介绍了 Meyerhof 提出的考虑荷载偏心的地基承载力计算方法, 并通过与有限元上下限极限分析这一极限荷载精细数值计算方法的比较验证了其正确性和准确性。所考虑的地基既包括排水条件下的一般地基, 也包括不排水强度随深度近似线性增大的饱和黏性土地基。依据有关机理深入分析了基础埋深对偏心荷载下地基承载力计算精度的影响, 明确了可以考虑基础埋深有利作用的偏心距上限。进而采用本课题组所提出计算地基承载力的改进公式, 通过计算并结合理论分析比较了国内规范验算方法与按 Meyerhof 方法的验算, 表明采用后一方法更为合理。

关 键 词: 地基承载力; 偏心荷载; Meyerhof 方法; 验算方法

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2022) 07—1925—08

On the checking methods for bearing capacity of foundation under eccentric loading

SONG Er-xiang, CHEN Xing-yi, LIN Shi-jie

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the checking of bearing capacity of foundation under eccentric loading, the method given by Meyerhof is first introduced, and validated for its accuracy through comparison with calculations by using the finite element upper and lower bound limit analysis method which can compute general limit loads accurately. The foundation soil considered can be either general c - ϕ soil under drained conditions or undrained cohesive soil with its undrained strength increasing linearly along depth. In particular, the influence of the footing embedment depth on the calculation accuracy is discussed according to the understanding of relevant mechanism, and the largest eccentricity below which the bearing capacity due to footing embedment depth can be taken fully into account is clarified. Thereafter, the checking method proposed in the Chinese design code is compared with the Meyerhof method through calculations by using the improved bearing capacity formulae given by the authors, which indicates that the latter method is more reasonable.

Keywords: bearing capacity of foundation; eccentric loading; Meyerhof method; checking method

1 引 言

实际工程中经常遇到基础所受荷载有偏心的情况, 包括各种建筑及构筑物基础。在某些情况下偏心距还可能较大, 比如履带吊车在吊装过程中经履带、路基箱施加给地基的荷载。在偏心荷载作用下, 基底压力分布不对称, 较之压力对称的情况地基承载力会减小。如何较准确地计算或可靠验算荷载偏心情况下的地基承载力, 显然是类似工程地基设计或处理中的重要课题。

关于偏心荷载下地基承载力的计算, 国际上多用 Meyerhof 提出的方法^[1], 该方法的基本思路是考虑荷载偏心距将基础宽度折减得出基础的有效宽度, 再用有效基础宽度计算地基承载力, 双向偏心时则折减两个方向的基底尺寸。而我国的现行建筑地基基础规范则采用一种不同的思路^[2], 即要求基底平均压力小于地基的容许承载力, 同时要求按直线分布计算的基底最大压力小于 1.2 倍的地基容许承载力, 并限制建筑基础偏心距的大小。

Meyerhof 计算方法的精度如何, 按 Meyerhof

收稿日期: 2021-09-23

修回日期: 2022-04-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (No. 2014CB047003); 国家自然科学基金项目 (No. 51778339)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB047003) and the National Natural Science Foundation of China (51778339).

第一作者简介: 宋二祥, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土力学及工程方面的教学及科研工作。E-mail: songex@tsinghua.edu.cn

方法和国内规范方法进行验算的安全储备差异如何, 本文将对这些问题进行讨论。下面先对 Meyerhof 方法予以简要介绍, 之后通过与有限元极限分析方法的计算对比, 对其正确性和计算精度进行检验。此外, 还依据基础埋深提高地基承载力的作用机理, 特别讨论了基础有埋深时偏心荷载下地基承载力的计算精度, 明确了可以完全考虑埋深对地基承载力贡献的偏心距上限。最后, 采用本课题组所提出的承载力计算的改进公式, 通过计算将 Meyerhof 方法与我国规范方法进行比较, 明确其差异情况。

2 Meyerhof 方法及其计算检验

2.1 Meyerhof 方法简介

这里以条形基础为例介绍此方法。图 1 为条形基础受偏心荷载作用的示意图, 其中地基土的摩擦角、黏聚力和重度分别为 φ 、 c 和 γ , 基础宽度为 B , 作用于其上荷载的合力为 P , 荷载偏心距为 e 。

由于荷载偏心, 基底压力或对应的地基反力不对称, 按直线分布计算的基底反力在左侧为 $p_{\min}$, 右侧为 $p_{\max}$ 。实际基底压力分布不是直线, 且随荷载增大, 地基塑性区发展, 基底压力一般将向基底中部集中。但其不对称程度由平衡条件决定, 偏心距给定则基底压力的不对称程度不会随荷载大小而变化。所以, 对此类问题一般应称为不对称荷载问题, 而不应称为非均匀压力问题, 因为, 对称荷载下的基底压力分布也往往是不均匀的。同时可理解, 这里的基础应具有足够的刚度, 这样才可能在基础所受荷载分布不变的情况下, 基底压力随地基塑性区发展而调整, 从而保证地基的承载力充分发挥。也就是说, 这里考虑的是在实际工程中常见具有足够刚度的基础。

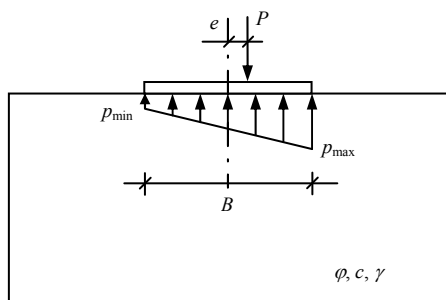


图 1 偏心荷载下的地基基础示意图

Fig.1 Schematic figure of ground foundation under eccentric loads

对此种承受偏心荷载的条形基础, Meyerhof 经研究提出可将基础宽度折减 $2e$, 给出有效宽度 B' ,

即

$$B' = B - 2e \quad (1)$$

之后用有效基础宽度 B' 按中心荷载计算地基的承载力 p_u' , 而地基承载力的合力 P_u 则为

$$P_u = p_u' B' \quad (2)$$

上述基底宽度的折减实际是将远离荷载一侧宽度为 $2e$ 的部分去除, 这样对于折减宽度后的基础荷载是作用在基底形心的。对于双向偏心的矩形基础等, 按同样的原则减小基底面积得出有效面积, 使荷载对于有效基底面积的基础为中心荷载, 之后按有效基底面积的基础受中心荷载的情况计算承载力的合力。

有效基底面积基础在中心荷载下的地基承载力计算可采用土力学教科书^[3-4]中提供的计算公式, 建议采用计算精度相对较好的汉森公式。但更精确的计算可采用有限元方法, 或对排水条件下黏聚力和摩擦角取一般值的土 (以下称为 c - φ 土) 地基采用笔者课题组提出的改进计算公式^[5], 而对饱和黏性土地基按不排水条件进行计算时, 其不排水强度 c_u 随深度增大, 可采用笔者课题组提出的另一简化计算公式^[6]。

2.2 计算精度检验

Meyerhof 所提出偏心荷载下地基承载力计算方法直观、简明, 并已写入欧洲规范等国际技术标准^[7], 但其计算精度到底如何, 是这里要回答的问题。为检验该方法的正确性和计算精度, 这里直接施加偏心荷载, 采用精细数值方法计算地基承载力的合力 P_u , 再与有效宽度基础在中心荷载下的承载力合力进行对比。当考虑地基重度影响时, 由于目前已有计算公式计算结果有较大误差^[3], 且不能考虑饱和黏性土不排水强度随深度增大的情况, 尽管文献^[5-6]提出的计算公式具有较高精度, 但为严格检验 Meyerhof 方法, 对中心荷载下的地基承载力计算也采用精细数值方法。已有研究表明, 对于这里所考虑问题的计算, 有限元极限分析方法具有很高的计算精度, 故这里采用基于该方法的商用有限元软件 OptumG2 进行计算^[8-9]。该软件依据结构极限分析的上下限定理进行有限元计算, 可同时给出极限荷载或安全系数的上下限, 还利用自适应算法据计算误差情况细化有限元网格, 从而使上下限结果不断接近, 此时两者的均值基本可看成精确解。笔者课题组此前就地基承载力等问题的研究过程中, 曾对此软件的计算进行检验, 表明其计算结果的正确性和高精度^[5-6]。

计算采用的有限元网格大体如图 2 所示，此网格是经自适应分析将滑移面附近细化后的网格。为保证荷载偏心距较大（大于 $B/6$ ）时，基底与地基之间不出现不符合实际的拉应力，这里在基底布设不允许拉应力的界面单元，而界面的抗剪强度与地基土相同，以此反映粗糙基底。

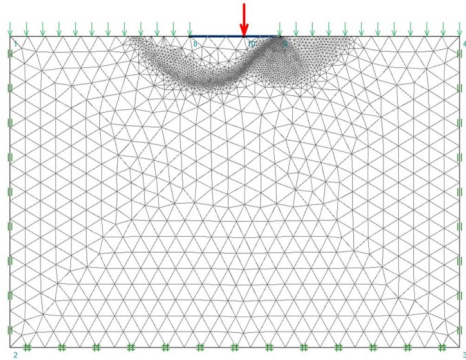


图 2 计算采用的有限元网格
Fig.2 Finite element meshes

以下取不同计算参数进行计算对比，所考虑的地基土强度参数包括排水条件下 c - φ 土的 c 、 φ 值，与不排水条件下饱和黏性土的不排水强度 c_u （用其

在土层顶面的值 c_0 与随深度的增长率 c_{inc} 表示）。此外，本文研究发现，基础埋深对偏心荷载下的承载力计算有着较特殊的影响，故以下分有埋深和无埋深的情况分别进行检验、讨论。

2.2.1 基础无埋深的情况

表 1 和表 2 分别给出基础无埋深时，排水条件下一般 c - φ 土地基和不排水条件下饱和黏性土地基，在偏心荷载下的承载力，采用有限元极限分析方法直接计算的结果与采用有效宽度基础计算结果的对比，可见 Meyerhof 方法具有很高的精确性。

由平衡分析知道，偏心距比 $1/6$ 为偏心距大小的一个分界点。偏心距比大于此值时，在远离荷载等效集中力作用点一侧的部分面积上基底压力为 0。由表 1、2 的计算结果看，偏心距比是否大于此分界值，计算的精度没有明显差异。

由地基承载力计算理论知道，对于黏聚力为常值的地基，当土的摩擦角为 0 时，地基承载力的分布值与基础宽度无关，且可用 Prandtl-Reissner 公式精确计算，这样相同偏心距比下的承载力合力之比等于折减前或折减后的基础宽度之比，比如表 1 中的第 1、2 算例的计算结果即完全符合这理论关系。

表 1 基础无埋深时 Meyerhof 方法计算的 c - φ 土地基承载力

Table 1 Bearing capacity of c - φ soil foundation without embedment by Meyerhof method

算例编号	φ /(°)	c /kPa	γ /(kN · m ⁻³)	B /m	偏心距比 e/B	直接计算的 P_u /(kN · m ⁻¹)	按折减宽度计算的 P_u /(kN · m ⁻¹)	相对误差/%
1	0	10	—	3	0.10	125.95	123.16	-2.22
2	0	10	—	6	0.10	251.78	246.26	-2.19
3	10	5	20	3	0.17	127.38	124.93	-1.93
4	10	20	20	6	0.17	871.71	852.31	-2.23
5	15	0	20	3	0.30	11.85	11.47	-3.26
6	10	20	20	6	0.30	394.85	382.96	-3.01
7	20	5	20	6	0.45	65.79	64.11	-2.55
8	15	20	20	9	0.45	226.63	221.11	-2.44
9	30	10	20	6	0.49	43.40	40.41	-6.88
10	15	30	20	9	0.49	62.61	60.16	-3.91
11	30	10	20	9	0.50	4.29	0	—

表 2 基底无埋深时 Meyerhof 方法计算饱和黏性土地基的承载力

Table 2 Bearing capacity of saturated cohesive soil foundation without embedment by Meyerhof method

算例编号	c_0 /kPa	c_{inc} /(kPa · m ⁻¹)	B /m	偏心距比 e/B	直接计算的 P_u /(kN · m ⁻¹)	按有效宽度计算的 P_u /(kN · m ⁻¹)	相对误差/%
1	10	1	3	0.10	135.76	133.37	-1.77
2	10	1	6	0.10	288.52	284.25	-1.48
3	10	1	3	0.17	111.94	109.92	-1.81
4	20	2	6	0.17	471.52	464.68	-1.45
5	10	1	3	0.30	54.49	53.21	-2.35
6	20	2	6	0.30	224.48	219.39	-2.27
7	10	2	6	0.45	32.99	32.16	-2.51
8	20	4	9	0.45	98.72	98.25	-0.48
9	20	1	6	0.49	12.63	12.30	-2.65
10	20	4	9	0.49	19.62	18.71	-4.63
11	20	4	9	0.50	3.05	0	—

对于饱和黏性土地基不排水情况下的承载力,这里首先需指出,尽管地基土的摩擦角为 0,但由于其黏聚力随深度增大,地基承载力的值仍是与基础宽度有关的^[6],由表 2 所示计算结果的第 1、2 行亦可看出此论断的正确性。

由表 1 和表 2 的结果可见,对于基底无埋深时的一般 $c-\varphi$ 土地基和不排水条件下的饱和黏性土地基, Meyerhof 计算方法精度很高,误差多在 3% 以内,且误差为负;虽然在偏心距比 e/B 很大以至接近极限值 0.5 时,计算结果出现稍大些的误差,但此时的地基承载力绝对数值小,加上此时数值计算本身较有难度,产生一定的绝对误差难以避免,故依然可认为计算结果支持上述判断。

2.2.2 基础有埋深的情况

现考虑基础有埋深但埋深相对较小的情况,即一般所说的浅基础,埋深不大于 1 倍基础宽,从而可忽略埋深范围内土的强度,而将埋深范围内的土重作为基础周围的超载 q 来考虑埋深对地基承载力的贡献。

取表 1 中算例 4 的 $c-\varphi$ 土参数及基础宽度,和表 2 中算例 4 的饱和黏性土参数及基础宽度,但设基础有埋深,并由小到大取一系列不同荷载偏心距分别按前述思路进行计算对比,给出 Meyerhof 方法的误差。前一组算例中基础埋深为 6 m,相应超载 $q=120$ kPa;后一组算例中基础埋深为 3 m,相应超载 $q=60$ kPa。两组算例按 Meyerhof 方法的计算误差随荷载偏心距比的变化情况分别示于图 3、4。图中还给出由有限元极限分析方法计算所给极限荷载 P_u 按直线分布计算的基底压力最小值 $p_{\min}$ 。

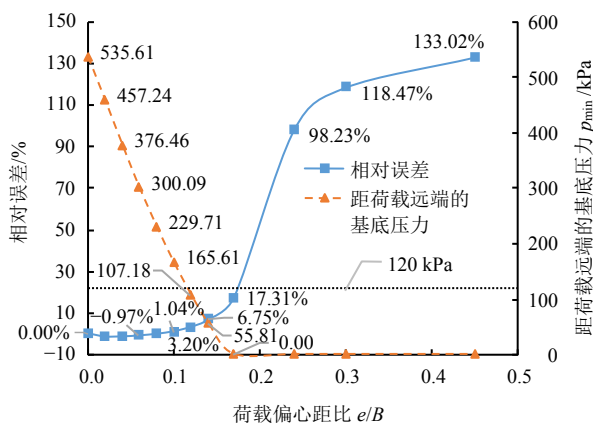


图 3 $c-\varphi$ 土地基承载力计算误差随偏心距的变化
Fig.3 Calculation errors of bearing capacity of $c-\varphi$ soil foundation with e/B

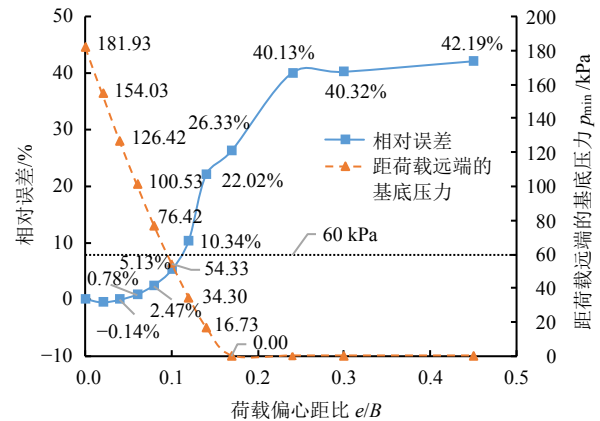


图 4 饱和黏性地基承载力计算误差随偏心距变化
Fig.4 Calculation errors of bearing capacity of saturated cohesive soil foundation with e/B

由图 3、4 可见,随荷载偏心距比的增大,基底压力在远离荷载侧的值 $p_{\min}$ 减小,当 $p_{\min}$ 减小到小于超载 q (分别为 120 kPa 和 60 kPa) 后, Meyerhof 方法的误差开始快速增大。从误差情况看,偏心距比大时 Meyerhof 方法的计算结果严重偏大,亦即此时采用该方法来计算是偏危险的。

上述现象可以依据我们对承载力机理的理解予以解释^[5]。超载 q 之所以能提高地基承载力,是因为它与基底压力中等于 q 的部分共同组成满布于地基持力层顶面的均布荷载。这种荷载显然对地基承载力没有任何不利作用,所以它使地基承载力至少提高 1 倍 q ,而在土的摩擦角大于 0 的情况下进一步提高地基承载力。但当荷载偏心大于一定值时, $p_{\min} < q$,则不可能从基底压力中分出等于 q 的压力,也就不可能与基础周围超载 q 构成满布于持力层顶面的均布荷载。此时实际承载力会小于按 Meyerhof 方法计算的值,亦即按 Meyerhof 方法计算的承载力将偏大,但埋深的有利作用并非为 0。比如表 1 例 4 给出无埋深情况下荷载偏心距比为 0.17 时的承载力合力为 871.71 kN/m;而在图 3 所示那组基础有埋深的算例中,同样的地基参数、基础宽度及偏心距比我们计算的承载力合力为 1 751.55 kN/m。而取有效基础宽度按中心荷载计算有埋深情况下的承载力合力为 2 054.67 kN/m。此算例的偏心距比为 0.17,按直线分布计算的基底压力最小值 $p_{\min}$ 已为 0,远小于 $q=120$ kPa。

此外,从表 3、4 仔细考察基础有埋深情况下 Meyerhof 方法的计算误差随偏心距比变化的过程可见,当按直线分布计算的基底压力最小值 $p_{\min}$ 大于但接近 q 时,计算误差就开始有所增大了。不过,对那里数值很小的相对误差不能认定就是 Meyerhof 方法的误差。因为对荷载有偏心的情况,我们是比

较两数值计算结果给出“相对误差”, 而这两数值结果均非精确。

对于基础有埋深的情况, 偏心距比较大时, Meyerhof 方法计算的地基承载力会严重偏大的问题, 以往文献中(比如文献[3]、[7])均未提及, 但由上列计算对比及本文依据有关机理的解释可见, 此问题确实存在, 需要引起重视。

3 与我国规范方法的比较

本节就偏心荷载作用下的条形基础, 比较地基承载力按 Meyerhof 理论与按国内规范的验算方法。

3.1 理论分析

上一节是从计算地基极限承载力的角度来介绍 Meyerhof 方法, 如从承载力验算角度来讲, 则按 Meyerhof 理论应要求:

$$\frac{P_1}{B-2e} \leq f' \quad (3)$$

式中: f' 为中心荷载下基础宽度为 $B-2e$ 时的地基承载力容许值; P_1 为荷载合力, 取等号时即为按 Meyerhof 方法确定的容许荷载。式(3)可转换为

$$P_1 \leq (B-2e)f' \quad (4)$$

而国内规范的承载力验算公式是:

$$\frac{P_2}{B} \leq f \quad (5)$$

式中: f 为中心荷载下基础宽度为 B 时的地基承载力容许值; P_2 为荷载合力, 取等号时即为按规范方法确定的容许荷载。同时要求:

$$p_{\max} \leq 1.2f \quad (6)$$

为比较两种验算公式本身, 应设确定容许承载力时所采用的安全系数相同。这样, 容许承载力 f' 和 f 的比值与对应极限承载力的比值相等。随后的讨论中即利用了这一关系。当然, 国内规范确定地基承载力容许值的方法及其对应的安全储备与国际上是有差异的, 但在本文比较的基础上再考虑这一差异, 可看清最终设计结果的差异。

对于条形基础, 据偏心距大小, 式(6)可成为以下两式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_2}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) &\leq 1.2f \quad (e/B \leq 1/6) \\ \frac{4P_2}{3(B-2e)} &\leq 1.2f \quad (B/6 < e < B/2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

亦即

$$\left. \begin{aligned} P_2 &\leq \frac{1.2fB}{1+6a} \quad (a \leq 1/6) \\ P_2 &\leq 0.9(1-2a)fB \quad (1/6 < a < 1/2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $a = e/B$, 为偏心距比。

以下按偏心距比的大小逐一讨论。

(1) 当 $a \leq 1/30$

由式(8)第1式可知, 当 $a \leq 1/30$ 时, 规范要求的第2个条件不起控制作用, 亦即不需要式(6)及其等价式(7)、(8), 此时由式(4)、(5), 两式均取等号有:

$$\frac{P_1}{P_2} = (1-2a) \frac{f'}{f} \quad (a \leq 1/30) \quad (9)$$

可见, 国内规范较按 Meyerhof 理论的验算要偏于危险, 因为 $f' \leq f$, 而 $(1-2a) < 1$ 。当 $a = 1/30$ 时, 容许荷载之差不小于 6.7%。

(2) 当 $1/30 < a \leq 1/6$

此时, 由式(4)和式(8)第1式, 两式均取等号有:

$$\frac{P_1}{P_2} = (1+4a-12a^2) \frac{f'}{1.2f} = b \frac{f'}{f} \quad (1/30 < a \leq 1/6) \quad (10)$$

式(10)右端的系数 b 在偏心距比 a 的上列取值范围内随 a 增大从 0.933 增大到 1.111。当 $a < (5-\sqrt{10})/30$ (约为 0.061) 时, $b < 1$, 从而 $P_2 > P_1$, 也就是规范方法较按 Meyerhof 理论的验算偏于危险; 而当 $a > 0.061$ 时, $b > 1$, 但不超过 1.111, 由于 $f' < f$, 规范方法仍然可能略偏危险。

(3) 当 $1/6 < a < 1/2$

此时, 由式(4)和式(8)第2式, 两式均取等号有:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{f'}{0.9f} \quad (1/6 < a < 1/2) \quad (11)$$

这相当于式(10)中系数 b 恒为 1.111, 此时究竟哪种方法偏于保守, 要看 f' 较 f 小多少。不过, 注意到此时偏心距较大, f' 会较 f 小得多, 规范方法一般会偏于危险。

下面选取典型参数计算 f' 和 f 的值, 再据偏心距比大小, 由上列对应公式计算两种方法所得容许荷载的比值, 从而定量比较两种方法的验算公式。

3.2 计算对比

3.1 节直接通过比较两种方法的验算公式, 对规范方法的合理性进行了初步分析。但由于两种方法中所用容许承载力 f' 和 f 的比值未知, 所以还不能全面给出定量的比较。本节通过计算得出一些典型情况下两者的比值, 从而给出定量的比较。

在假定确定容许承载力时采用安全系数相同的前提下, 可直接用极限承载力 p'_u 和 p_u 进行比较, 即有 $p'_u/p_u = f'/f$ 。为提高计算的效率和准确性,

这里利用本课题组提出的地基极限承载力改进公式^[5-6]进行计算,分别考虑一般 c - φ 土地基和不排水强度随深度线性增大的饱和黏性土地基。

3.2.1 一般 c - φ 土地基

考虑一般常见基底粗糙的条形基础,相应地基承载力改进计算公式为^[5]

$$\left. \begin{aligned} p_u &= (c + q \tan \varphi + 0.5 \beta \gamma \tan \varphi Z_{\max}) N_c + q \\ Z_{\max} &= \alpha Z_{PR} = \alpha e^{\left(\frac{\pi + \varphi}{4}\right) \tan \varphi} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) B \\ \alpha &= 1 - \exp(-k^{-0.5} - 0.8 \sin 2\varphi) \\ \beta &= 1 + \frac{1}{\sqrt{2} N_c (k^{-0.5} + 1.5 \tan \varphi)} \\ k &= \frac{B \gamma \tan \varphi}{c + q \tan \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: N_c 为 Prandtl 地基承载力系数; $Z_{\max}$ 为滑移面最大深度; Z_{PR} 为 Prandtl 滑移面深度; α 和 β 分别为滑移面深度和形状修正系数; k 为表征等效黏聚力深度增长率的无量纲参数。

取一些典型情况下的地基基础参数进行计算,两种方法计算结果的对比见表 3。

对于砂土地基且基础埋深很小,即 $c = 0$, $q = 0$ 时(见表 3 算例 9),地基承载力 p_u 受基础宽度影响很大,此时规范方法始终偏于危险,且偏心距越大,地基承载力高估得越严重。而对于一般的黏性土,若黏聚力大而摩擦角小,则偏心距比在一定范围时规范方法偏于保守($P_1/P_2 > 1$),否则偏于危险($P_1/P_2 < 1$),但两种方法差别不大;若摩擦角大而黏聚力小,则与砂土地基类似,规范方法始终偏于危险。

表 3 c - φ 土地基承载力验算的两种方法对比

Table 3 Comparison of the two checking methods for c - φ soil foundations

算例编号	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	B / m	q / kPa	偏心距比 a	p'_u / kPa	p_u / kPa	P_1 / P_2
1	2	20	20	6	0	0.050	120.1	120.9	0.969
2	2	20	20	6	0	0.250	117.0	120.9	1.075
3	10	20	20	6	0	0.167	209.7	226.9	1.027
4	10	20	20	12	0	0.250	226.9	273.0	0.924
5	10	40	20	6	0	0.167	380.9	400.8	1.056
6	20	20	20	6	0	0.490	304.3	568.9	0.594
7	20	20	10	6	0	0.167	401.7	446.3	1.000
8	30	20	20	6	0	0.167	1 433.0	1 793.8	0.888
9	30	0	20	6	0	0.333	283.8	850.7	0.371
10	30	0	20	6	20	0.167	1 149.9	1 493.1	0.856

为更加直观地展现两种方法计算地基容许荷载的比值 P_1/P_2 随偏心距比 a 的变化情况,固定 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 、 $B = 6 \text{ m}$ 、 $q = 0$,选取地基土的不同强度指标 φ 和 c ,绘制图 5 所示曲线。对比可见, φ 增大或 c 减小时,曲线将整体向下移动,说明规范方法在很多偏心荷载情况下偏于危险。

另外, B 增大或 γ 增大时,曲线变化趋势与 φ 增大时一致; q 增大时,曲线变化趋势与 c 增大时一致。

3.2.2 饱和黏性土地基

对于饱和黏性土地基在不排水条件下的承载力,需采用不固结不排水强度指标进行计算,摩擦角 $\varphi_u = 0$,黏聚力 c_u 随深度近似线性增大,即 $c_u = c_0 + c_{inc} z$,其中 c_0 为地基持力层顶面的黏聚力值, c_{inc} 为黏聚力随深度的增长率, z 为自地基顶面向下计算的深度。对于基底粗糙的情况,本课题组

提出的承载力计算公式为^[6]

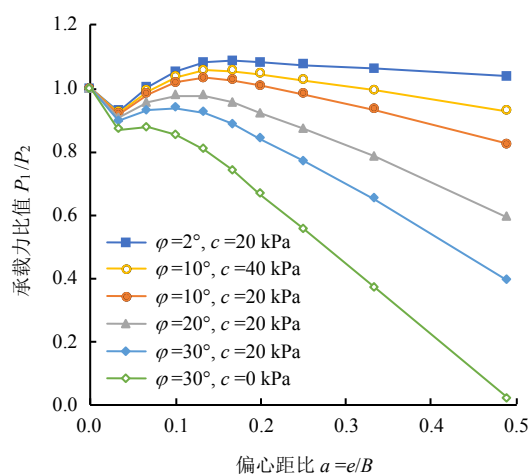


图 5 两种验算方法给出 c - φ 土地基承载力合力容许值的比

Fig.5 Ratios of allowable loads of c - φ soil foundation by the two methods

$$\left. \begin{aligned} p_u &= (c_0 + 0.5\beta c_{inc} Z_{max}) N_c + q \\ Z_{max} &= \alpha Z_{PR} = \alpha \frac{\sqrt{2}}{2} B \\ \alpha &= 1 - \exp(-k^{0.5}) \\ \beta &= 1 + \frac{k^{0.5}}{\sqrt{2} N_c} \\ k &= \frac{c_{inc} B}{c_0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由于摩擦角为 0, Prandtl 地基承载力系数 N_c 在这里为 $2+\pi$ 。给定地基土的不固结不排水强度 c_u 之后, 不再需要地基土的重度值。

选取典型参数进行计算, 两种方法的计算对比见表 4。

对于 $c_{inc} = 0$ 即 $k = 0$ 的土 (表 4 算例 1、2), 地

基承载力分布值与基础宽度无关, $p'_u = p_u$, 当偏心距比 $a < 0.061$, 规范方法偏于危险, 否则偏于保守。

当基础无埋深, 即 $q = 0$ 时, 由式 (9) ~ (11)、(13) 容易推知, 容许荷载比值 P_1/P_2 仅与无量纲参数 k 和偏心距比 a 有关 (见表 4 算例 3~5), 可绘制如图 6 的关系曲线。由图可知, 当 k 增大, 即当 c_{inc} 增大或 B 增大或 c_0 减小时, 曲线将整体向下移动, 说明规范方法在很多情况下偏于危险。当 q 增大时, 曲线变化趋势与 k 减小时一致。

由 3.1、3.2 节可见, 国内规范建议的验算方法在多数情况下偏于危险, 特别是偏心距较大时更是如此。但在高层建筑地基基础的设计中, 规范规定 $p_{min} \geq 0$, 亦即要求偏心距比 $a \leq 1/6$ 。在此条件下, 规范方法与相对精确的 Meyerhof 方法差异不是很大。

表 4 饱和黏性土地基承载力验算的两种方法对比

Table 4 Comparison of the two checking methods for saturated cohesive soil foundations

算例编号	c_0/kPa	$c_{inc}/(\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1})$	B/m	q/kPa	无量纲参数 k	偏心距比 a	p'_u/kPa	p_u/kPa	P_1/P_2
1	20.0	0	5	0	0.0	0.050	102.8	102.8	0.975
2	20.0	0	5	0	0.0	0.250	102.8	102.8	1.111
3	20.0	4	5	0	1.0	0.167	121.9	129.0	1.050
4	10.0	2	5	0	1.0	0.167	60.9	64.5	1.050
5	10.0	1	10	0	1.0	0.167	60.9	64.5	1.050
6	10.0	5	5	0	2.5	0.250	66.9	77.3	0.961
7	1.0	2	5	0	10.0	0.490	5.49	12.2	0.499
8	0.2	2	5	0	50.0	0.167	4.49	5.76	0.866
9	0.0	2	5	0	∞	0.333	0.86	2.55	0.376
10	0.0	2	5	0	∞	0.167	1.71	2.55	0.744

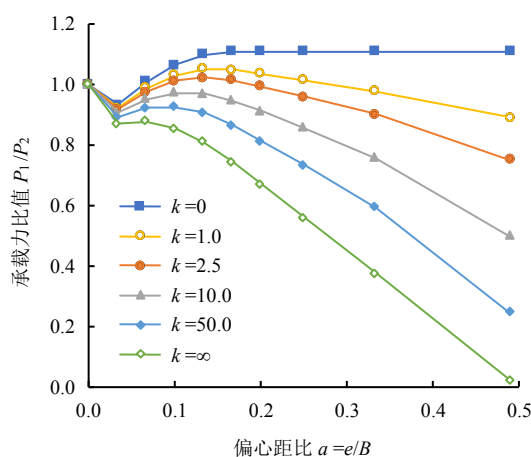


图 6 两种验算方法给出饱和黏性土地基承载力合力容许值的比

Fig.6 Ratios of allowable loads of saturated soil foundation by the two methods

此外, 2.2.2 节的计算检验表明, Meyerhof 方法在基础有埋深而偏心距比相对较大情况下误差较

大。但对此需指出, 由此误差产生的原因可知, 这误差对规范方法同样存在。因为规范方法同样按中心荷载来确定地基承载力, 且还是按未折减的基础宽度。

综上所述, 对于偏心荷载下地基承载力的验算, Meyerhof 方法更为合理。

4 结 论

本文介绍了 Meyerhof 所提出的偏心荷载下地基承载力的验算方法, 对其计算精度进行了检验, 包括基础有埋深和无埋深两种情况, 考虑的地基既有一般 $c-\varphi$ 土地基, 也有不排水强度随深度近似线性增大的饱和黏性土地基。之后, 又采用地基承载力计算的改进公式, 结合理论分析, 将国内规范方法与 Meyerhof 方法进行了比较。主要结论如下:

(1) Meyerhof 所提出的偏心荷载下的地基承载力计算方法简单明了, 在基础无埋深, 或有埋深但

偏心距较小的情况下是精确的。

(2) 在基础有埋深的情况下, 对于给定埋深超载 q , 当偏心距达到一定值而使得按直线分布计算的基底最小压力 $p_{\min} < q$ 时, Meyerhof 方法计算的承载力相对误差开始快速增大, 且误差为正, 偏于危险。对此误差文献中均未提及, 须引起重视。同时需指出, 此问题对于国内规范中确定地基承载力的方法同样存在。

(3) 比较了国内规范方法与 Meyerhof 方法, 发现国内规范方法在多数情况下偏于危险, 且随偏心距比的增大偏于危险的程度加剧。但建筑地基基础设计中同时还严格限制偏心距比的大小, 在此条件下两种方法的差异不是很大。

(4) 基于以上分析讨论所得认识, 对于一些允许偏心距较大的临时性工程, 在地基承载力的验算中本文建议采用 Meyerhof 方法, 并注意基底最小压力 $p_{\min}$ 小于埋深超载 q 时的误差。

参考文献

- [1] MEYERHOF G G. Some recent research on the bearing capacity of foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1963, 1(1): 16-26.
- [2] 中国建筑科学研究院. GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China Academy of Building Research. GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [3] CRAIG R F. Soil mechanics[M]. London: [s. n.], 1983.
- [4] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
LI Guang-xin, ZHANG Bin-yin, YU Yu-zhen. Soil mechanics[M]. 2nd Ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [5] 宋二祥, 付浩, 李贤杰. 地基承载力机理及新计算方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 37-44.
SONG Er-xiang, FU Hao, LI Xian-jie. Mechanism and new calculation method for bearing capacity of foundations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(1): 37-44.
- [6] 宋二祥, 付浩, 李贤杰. 饱和黏性土地基不排水条件下承载力计算方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 2919-2924+2952.
SONG Er-xiang, FU Hao, LI Xian-jie. A calculation method for the bearing capacity of saturated soil under undrained conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(11): 2919-2924+2952.
- [7] European Committee for Standardization. EN 1997-1 Eurocode7 Geotechnical design-part 1: general rules[S]. London: BSI, 2004.
- [8] KRABBENHOFT K. OPTUM G2: Theory[M]. Copenhagen: Optum Computational Engineering, 2019.
- [9] 宋二祥, 孔郁斐, 杨军. 土工结构安全系数定义及相应计算方法讨论[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 1-10.
SONG Er-xiang, KONG Yu-fei, YANG Jun. Discussion of safety factor definitions and computation methods for geotechnical structures[J]. **Engineering Mechanics**, 2016, 33(11): 1-10.
- [26] NISHIMATSU Y, OKUNO N, HIRASAWA Y. The rock cutting with roller cutters[J]. **Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan**, 1975, 91(1052): 653-658.
- [27] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(3): 153-161.
- [28] NELSON P, O'ROURKE TD, KULHAWY F H. Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks[C]// The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Texas: [s. n.], 1983: 227-237.
- [29] GRAHAM P C. Rock exploration for machine manufacturers[J]. **Exploration for Rock Engineering**, 1976, 6(1): 173-180.
- [30] FUKUI K, OKUBO S. TBM cutting forces with particular reference to cutter and tunnel diameters[C]// The 10th ISRM Congress. Sandton: [s. n.], 2003.

上接第 1883 页