

基于桩土作用的刚性桩复合地基承载力计算方法

姜启珍¹, 刘吉福¹, 刘运明²

(1. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 刚性桩复合地基承载力通常由单桩承载力、天然地基承载力、天然地基承载力发挥系数计算得到。现行规范对天然地基承载力发挥系数建议值不同且范围较大, 导致复合地基承载力计算困难。基于刚性桩复合地基承载极限状态时滑动面内桩土作用, 推导出考虑桩土作用的复合地基承载力公式和天然地基承载力发挥系数公式, 并分析了复合地基承载力和天然地基承载力发挥系数的变化规律。滑动面内桩土作用形式对复合地基承载力公式和天然地基承载力发挥系数公式无影响。计算表明, 当内摩擦角较小时, 复合地基承载力随基础宽度增大而减小, 否则随基础宽度增大而增大。天然地基承载力发挥系数随桩间距、内摩擦角的增大而增大, 随基础宽度、黏聚力的增大而减小, 复合地基承载力深度修正系数可能小于 1.0。地基土内摩擦角大于 0 时, 复合地基极限承载力深度修正系数大于 1.0。

关键词: 刚性桩; 复合地基; 桩土作用; 承载力发挥系数; 深度修正系数

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0032-05

作者简介: 姜启珍 (1969 -), 男, 湖南人, 高级工程师, 主要从事公路施工、监测、科研等工作。E-mail: 706644527@qq.com。

Calculation method of bearing capacity of rigid-pile composite foundation on account of pile-soil interaction

JIANG Qi-zhen¹, LIU Ji-fu¹, LIU Yun-ming²

(1. Guangdong Province Communication Planning & Design Institute Co., LTD, Guangzhou 510507, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Bearing capacity of rigid-pile composite foundation is usually calculated with bearing capacity of natural foundation, bearing capacity of pile and efficiency factor of bearing capacity of natural foundation. Bearing capacity of composite foundation is difficult to calculate since the ranges of efficiency factor of bearing capacity of natural foundation proposed by present codes are different and large. Equations for bearing capacity of composite foundation and efficiency factor of bearing capacity of natural foundation are derived basing on analysis of interaction between pile and soil when composite foundation is at bearing ultimate state. The change regulations of bearing capacity of composite foundation and efficiency factor of bearing capacity of natural foundation are analyzed. The above equations are not influenced by types of pile-soil interaction within slip surface. It is shown by calculations that bearing capacity of composite foundation decreases when width of foundation increases if internal friction angle is small. Bearing capacity of composite foundation increases when width of foundation increases if internal friction angle is big. Efficiency factor of bearing capacity of natural foundation increases when distance of piles or internal friction angle increases and decreases when width of foundation or cohesive strength increases. Depth revising factor of bearing capacity of composite foundation maybe less than 1.0. When the friction angle is greater than 0, the limit bearing depth correction coefficient of composite foundation is greater than 1.0.

Key words: rigid pile; composite foundation; pile-soil interaction; efficiency factor of bearing capacity; depth revising factor

0 前 言

刚性桩复合地基具有工期短、承载力高、沉

降小等优点, 应用广泛。利用单桩承载力、天然地基承载力计算复合地基承载力时需要确定天然

地基承载力发挥系数 β ^[1]。《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2012 规定 β 可取 0.9~1.0, 同时规定单桩承载力发挥系数可取 0.8~0.9。《复合地基技术规范》GB/T 50783-2012 建议 β 可取 0.65~0.90。《铁路工程地基处理技术规程》TB 10106-2010 建议 β 可取 0.75~0.95。《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》JTG/T D31-02-2013 规定: 当桩端土未修正的承载力特征值大于桩周土承载力的平均值时, β 可取 0.1~0.4 (差值大时取低值), 否则可取 0.5~0.9 (差值大时或设置垫层时取高值)。可见, 不同规范对 β 建议的取值不同, 且取值范围较大, 难以计算复合地基承载力。

另外, 现行规范均对复合地基承载力深度修正系数统一采用 1.0, 可能导致计算的复合地基承载力小于天然地基承载力^[2]。

虽然对复合地基承载力的研究较多^[1-4], 但基于复合地基承载极限状态时桩土相互作用的复合地基承载力研究较少。文献[3]考虑桩土相互作用, 采用稳定计算方法确定桩间土承载力, 但未考虑复合地基上设置褥垫层的情况, 也未考虑内摩擦角不等于零的情况。

高大钊指出地基承载力特征值与基础沉降完全没有关系, 地基承载力特征值不能保证基础沉降满足要求, 仍需要进行沉降计算^[5]。因此, 建议刚性桩复合地基计算极限承载力, 对极限承载力除以安全系数 k 得到复合地基承载力特征值, 基础荷载应小于复合地基承载力特征值。同时, 应计算复合地基的沉降, 复合地基沉降应满足结构正常使用要求。

在分析复合地基承载极限状态时桩土作用的基础上, 推导得到复合地基承载力公式、天然地基承载力发挥系数公式, 并分析了其变化规律。

1 复合地基承载极限状态时桩土作用

基础与刚性桩复合地基之间没有褥垫层时, 通常是刚性桩桩底端先刺入破坏, 然后桩间土地基达到承载极限状态, 出现图 1 (a) 所示 Prandtl-Reissner 提出的滑动面^[6]。当基础与刚性桩复合地基之间设置较厚的褥垫层时, 桩间土受力较大, 桩间土地基中可能先达到承载极限状态, 出现图 1 (b) 所示的滑动面而达到承载极限状态, 然后刚性桩发生桩底刺入破坏。

根据刚性桩复合地基有无褥垫层、桩土模量

比、桩土破坏顺序等, 滑动面内桩土作用可能的情况有:

(1) 无褥垫层、桩先破坏或桩土同时破坏: 滑动面内上部桩侧无摩擦力, 下部为正摩擦力, 见图 1 (a); 滑动面范围内桩侧全部为正摩擦力; 滑动面内桩侧无摩擦力。后两者是前者的特例。

(2) 有褥垫层, 桩先破坏时: 滑动面内上部桩侧为负摩擦力, 下部为正摩擦力, 见图 1 (b); 滑动面范围内桩侧全部为负摩擦力。后者是前者的特例。

(3) 有褥垫层、土先破坏: 滑动面内桩侧全部为负摩擦力。

(4) 有褥垫层、桩土同时破坏: 滑动面内上部桩侧为负摩擦力, 下部为正摩擦力, 见图 1 (b); 滑动面内上部桩侧为负摩擦力, 下部为无摩擦力; 滑动面内桩侧全部为负摩擦力。后两者是前者的特例。

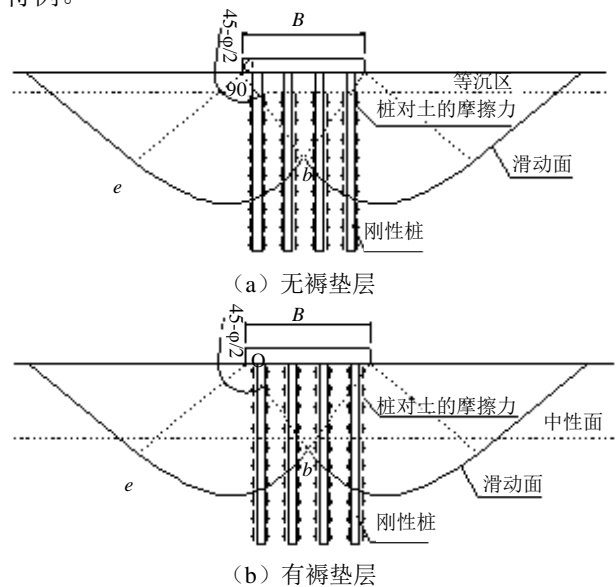


图 1 滑动面及桩土摩擦力

Figure 1 Slide surface and frictional force

2 复合地基极限承载力公式

为便于分析, 作以下假设:

- (1) 不考虑施工扰动、挤密或固结、桩土化学反应、桩的遮拦等因素对桩间土承载力的影响;
- (2) 地基土为内摩擦角为 φ 、黏聚力为 c 的均质土;
- (3) 基础为条形;
- (4) 桩侧相同土层的正、负摩阻力相等。

2.1 不考虑桩土作用时复合地基极限承载力

(1) 桩间土极限承载力

Prandtl-Reissner 无重力介质地基极限承载力

课题解已被证明是天然地基极限承载力的真解^[6]。因此,按照 Prandtl-Reissner 课题解的思路分析复合地基桩间土极限承载力。

结合 Taylor 作法,考虑地基自重的等效黏聚力为^[5]

$$c_a = c + \frac{1}{2} B \sqrt{K_p} \gamma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: c_a 为总黏聚力, c 为黏聚力, B 为基础宽度, K_p 为被动土压力系数, γ 为土体重度, φ 为内摩擦角。

将图 1 中刚性桩抽除,并将复合地基范围内的土体均化到桩位孔洞内,则复合地基范围内土体均化后的总黏聚力为 $c_a(1-m)$, m 为桩置换率。从图 1 截取图 2 所示的土体作为分析对象。

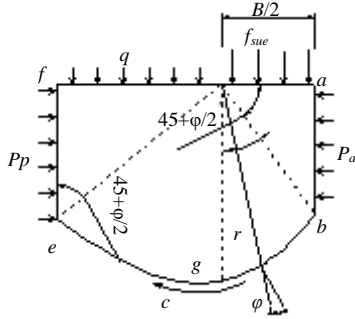


图 2 极限承载力分析受力图

Figure 2 Forces for analysis of ultimate bearing capacity

参考文献[6]天然地基极限承载力推导过程

可得

$$f_{sue} = c(N_c + N_{mc}) + \frac{1}{2} B \gamma (N_\gamma + N_{m\gamma}) + q N_q \quad (2)$$

式中: f_{sue} 为桩间土等效极限承载力,

$$N_c = \cot \varphi (K_p e^{\pi \tan \varphi} - 1),$$

$$N_{mc} = m \cot \varphi \left[1 - \frac{e^{\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \tan \varphi}}{K_0} \right],$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi,$$

$$N_\gamma = \sqrt{K_p} (K_p e^{\pi \tan \varphi} - 1),$$

$$N_{m\gamma} = m \sqrt{K_p} \left[1 - \frac{e^{\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \tan \varphi}}{K_0} \right],$$

$$N_q = K_p e^{\pi \tan \varphi} \quad (3)$$

式中: q 为边载。

将 f_{sue} 分配到桩间土顶面得到桩间土极限承载力

$$f_{su} = \frac{f_{sue}}{1-m} \quad (4)$$

式中: f_{su} 为桩间土极限承载力。

m 、 γ 均取 0 时式 (4) 与 Prandtl-Reissner 课题解相同, N_γ 与 Taylor 推导结果相同^[5]。

(2) 复合地基极限承载力

$$f_{spu} = f_{pu} m + f_{su} (1-m) \quad (5)$$

式中: f_{spu} 为复合地基极限承载力, f_{pu} 为刚性桩极限承载力。

2.2 桩侧负摩擦力+正摩擦力时

z_e 为基础范围内滑动面的等效深度。假设桩顶以下 α_e 范围内桩侧为负摩擦力, 其他部分为正摩擦力。

(1) 刚性桩极限承载力

桩侧负摩擦力不但减少刚性桩侧阻力 $\pi l \alpha_e q_s$, 而且增加桩身荷载 $\pi l \alpha_e q_s$, 因此

$$f_{pur} = \frac{Q_u - 2\pi l \alpha_e q_s}{A_p} \quad (6)$$

式中: f_{pur} 为刚性桩修正极限承载力, Q_u 为单桩极限承载力, d 为桩直径, z_e 为基础范围内滑动面等效深度, q_s 为桩侧摩擦力, A_p 为单桩横截面面积。

(2) 桩间土极限承载力

滑动面内桩侧正摩擦力对桩间土产生向下的摩擦力、增加桩间土的荷载, 从而减小桩间土极限承载力; 反之, 滑动面内桩侧负摩擦力减小桩间土的荷载, 从而增大桩间土极限承载力。为分析滑动面内桩侧正、负摩擦力对桩间土极限承载力的影响, 将滑动面内刚性桩对桩间土的摩擦力均匀分布到桩间土顶面, 以得到桩土作用等效荷载, 即

$$p_e = \frac{\pi d (1 - 2\alpha) z_e q_s}{A_u - A_p} \quad (7)$$

式中: p_e 为桩土作用等效荷载, A_u 为单桩分担面积, A_p 为单桩横截面面积。

p_e 必然减小或增大桩间土极限承载力, 因此

$$f_{sur} = f_{su} - p_e \quad (8)$$

式中: f_{sur} 为桩间土修正极限承载力。

(3) z_e 计算公式

将图 2 中 bg 之间的滑动面近似看作直线, 按照滑动面内桩侧摩擦力对 o 点的力矩与 p_e 对 o 点的力矩相等的原则, 可得

$$z_e = \frac{3B\sqrt{K_p}}{8} + \frac{Be\left(\frac{\pi-\varphi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}{8\sin\left(\frac{\pi-\varphi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (9)$$

(4) 复合地基极限承载力

将 f_{pur} 、 f_{sur} 按照面积加权平均得到

$$f_{spur} = mf_{pur} + (1-m)f_{sur} \quad (10)$$

式中： f_{spur} 为复合地基修正极限承载力。

由式 (10)、(6)、(8) 可得

$$f_{spur} = mf_{pu} + c(N_c + N_{mc}) + \frac{1}{2}B\gamma(N_\gamma + N_{\gamma m}) + qN - \frac{\pi dz_e q_s}{A_u} \quad (11)$$

2.3 桩侧无摩擦力+正摩擦力时

设桩侧无摩擦力的长度为 χz_e ，其余部分为正摩擦力。此时

$$f_{pur} = \frac{Q_u - \pi d \chi z_e q_s}{A_p} \quad (12)$$

按照 2.2 节中 (2) 的思路，此时的桩土作用等效荷载为

$$p_e = \frac{\pi d(1-\chi)z_e q_s}{A_u - A_p} \quad (13)$$

由式 (12)、(13)、(8)、(10) 可得式 (11)。

2.4 桩侧负摩擦力+无摩擦力时

设桩侧负摩擦力的长度为 δz_e ，滑动面内其余部分桩侧为无摩擦力。 δz_e 内负摩擦力不但减少桩侧阻力 $\pi d \delta z_e q_s$ ，而且增大刚性桩荷载 $\pi d \delta z_e q_s$ 。滑动面内 δz_e 以下桩侧为无摩擦力，减少桩侧阻力 $\pi d(1-\delta)z_e q_s$ 。因此

$$f_{pur} = \frac{Q_u - \pi d(1+\delta)z_e q_s}{A_p} \quad (14)$$

δz_e 范围内负摩擦力会减小桩间土荷载，因此

$$p_e = -\frac{\pi d \delta z_e q_s}{A_u - A_p} \quad (15)$$

由式 (14)、(15)、(8)、(10) 可得式 (11)。

3 天然地基承载力发挥系数公式

结合现行规范规定可得：

$$\beta = \frac{1}{1-m} + \frac{cN_{mc} + \frac{1}{2}B\gamma N_{m\gamma} - \frac{\pi dz_e q_s}{A_u}}{(1-m)\left(cN_c + \frac{1}{2}B\gamma N_\gamma + qN_q\right)} \quad (16)$$

式中： β 为天然地基承载力发挥系数。

4 算例与参数影响分析

地基软土层厚 15 m，浮重度 $\gamma = 6 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 10 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 0^\circ$ ；下面为 8 m 厚粉质粘土层，浮重度 $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 40 \text{ kPa}$ ， $\varphi = 0^\circ$ ；极限端阻力为 1200 kPa。预应力管桩长 20 m，直径 0.4 m，单桩竖向极限承载力为 591 kN。桩侧摩擦力 q_s 与 c 相等。将基础底面以上土体简化为边载 $q = 20 \text{ kPa}$ 。复合地基承载力安全系数取 2。

基础宽度 $B = 6 \text{ m}$ 、不同桩间距时采用式 (4) 计算的桩间土承载力见图 3。 m 、 γ 均取 0 时，由式 (4) 计算的天然地基承载力为 35.7 kPa。采用式 (5) 计算的复合地基承载力见图 4。

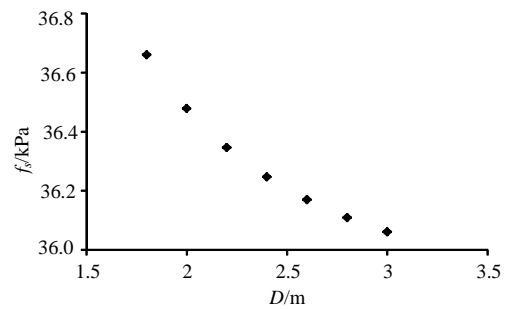


图 3 桩间土承载力与桩间距的关系

Figure 3 Relationship between bearing capacity of soil among piles and distance of piles

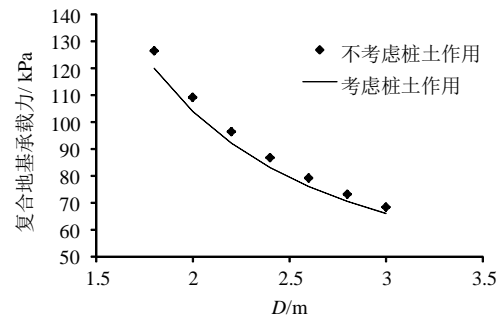


图 4 复合地基承载力与桩间距的关系

Figure 4 Relationship between bearing capacity of composite foundation and distance of piles

采用不同基础宽度、不同桩间距，根据式 (11)、(16) 计算的复合地基承载力和桩间土承载力发挥系数见表 1。

取软土 $c = 20 \text{ kPa}$ ，其他参数不变，复合地基承载力和桩间土承载力发挥系数见表 2。

取软土 $c = 20 \text{ kPa}$ 、 $q = 0 \text{ kPa}$ ，其他参数不变，复合地基承载力和桩间土承载力发挥系数见表 3。

取软土 $\varphi = 10^\circ$ ，其他参数不变，复合地基承载力和桩间土承载力发挥系数见表 4。

表1 软土 $c=10$ kPa, $\varphi=0^\circ$ 、 $q=20$ kPa 时的计算结果
Table 1 Calculation result when $c=10$ kPa, $\varphi=0^\circ$ for soft clay and $q=20$ kPa

桩间距/m	B=4		B=6		B=8	
	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β
1.8	122	0.90	120	0.84	118	0.78
2.0	106	0.92	104	0.87	102	0.82
2.2	94	0.93	92	0.89	91	0.85
2.4	84	0.95	83	0.91	82	0.88
2.6	77	0.95	76	0.92	75	0.90
2.8	71	0.96	71	0.93	70	0.91
3.0	67	0.97	66	0.94	65	0.92

表2 软土 $c=20$ kPa, $\varphi=0^\circ$ 、 $q=20$ kPa 时的计算结果
Table 2 Calculation result when $c=20$ kPa, $\varphi=0^\circ$ for soft clay and $q=20$ kPa

桩间距/m	B=4		B=6		B=8	
	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β
1.8	172	0.88	168	0.81	164	0.73
2.0	151	0.90	148	0.84	144	0.79
2.2	136	0.92	133	0.87	130	0.82
2.4	124	0.93	121	0.89	119	0.85
2.6	114	0.94	112	0.91	110	0.87
2.8	107	0.95	105	0.92	104	0.89
3.0	101	0.96	100	0.93	98	0.91

表3 软土 $c=20$ kPa, $\varphi=0^\circ$ 、 $q=0$ kPa 时的计算结果
Table 3 Calculation result when $c=20$ kPa, $\varphi=0^\circ$ for soft clay and $q=0$ kPa

桩间距/m	B=4		B=6		B=8	
	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β
1.8	162	0.85	158	0.76	154	0.67
2.0	141	0.88	138	0.81	134	0.74
2.2	126	0.90	123	0.84	120	0.78
2.4	114	0.92	111	0.87	109	0.82
2.6	104	0.93	102	0.89	100	0.85
2.8	97	0.94	95	0.90	94	0.87
3.0	91	0.95	90	0.92	88	0.89

表4 软土 $c=10$ kPa, $\varphi=10^\circ$ 、 $q=20$ kPa 时的计算结果
Table 4 Calculation result when $c=10$ kPa, $\varphi=10^\circ$ for soft clay and $q=20$ kPa

桩间距/m	B=4		B=6		B=8	
	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β	f_{spr}/kPa	β
1.8	162	0.96	165	0.94	168	0.92
2.0	146	0.97	150	0.95	153	0.94
2.2	134	0.98	138	0.96	142	0.95
2.4	125	0.98	129	0.97	133	0.96
2.6	118	0.98	122	0.97	126	0.96
2.8	112	0.99	117	0.98	121	0.97
3.0	108	0.99	112	0.98	117	0.97

由图3、图4、表1~表4, 结合式(11)(16)可知:

(1) 不考虑桩土作用时, 桩间土承载力稍大

于天然地基承载力。

(2) 考虑桩土作用时, 复合地基承载力小于不考虑桩土作用的复合地基承载力。

(3) 内摩擦角较小时, 复合地基承载力随基础宽度增大而减小; 内摩擦角较大时, 复合地基承载力随基础宽度增大而增大;

(4) 复合地基承载力随桩间距增大而减小, 随黏聚力增大而增大, 随内摩擦角增大而增大。

(5) β 随桩间距、内摩擦角的增大而增大, 随基础宽度、黏聚力的增大而减小。

(6) β 计算值范围与《复合地基技术规范》GB/T 50783-2012 和《铁路工程地基处理技术规程》TB 10106-2010 建议值范围接近, 证实了本文方法可行性。

(7) 对比表2和表3可知, 土内摩擦角为0时, 复合地基承载力深度修正系数为0.5, 即复合地基极限承载力深度修正系数为1.0。结合表1、表4可知, 土内摩擦角大于0时, 复合地基极限承载力深度修正系数大于1.0。

5 结 语

(1) 不考虑桩土作用时, 桩间土承载力稍大于天然地基承载力。

(2) 滑动面内桩土作用形式对复合地基承载力公式、桩间土承载力发挥系数公式无影响。

(3) 摩擦角较小时, 复合地基承载力随基础宽度增大而减小; 内摩擦角较大时, 复合地基承载力随基础宽度增大而增大。

(4) β 随桩间距、内摩擦角的增大而增大, 随基础宽度、黏聚力的增大而减小。

(5) 复合地基承载力深度修正系数可能小于1.0; 土内摩擦角大于零时, 复合地基极限承载力深度修正系数大于1.0。

参考文献:

- [1] 张钦喜, 王晓杰, 陶韬. CFG桩复合地基承载力计算新公式研究[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(3): 122-126, 162.
- [2] 付文光. 岩土工程规范杂议[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [3] 郭积才. 刚性桩复合地基极限承载力计算新方法[D]. 广州: 广州大学, 2017.
- [4] 王明山. 复合地基桩土承载力发挥系数的研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2005.
- [5] 高大钊. 土力学与岩土工程师[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [6] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.