

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.011

张中流, 刘慈军, 何宁, 等. 基于 MATLAB-GUI 的刚性桩复合地基沉降计算[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 76-82. (ZHANG Zhong-liu, LIU Ci-jun, HE Ning, et al. Settlement calculation for rigid pile composite foundation based on MATLAB-GUI algorithm[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 76-82.)

基于 MATLAB-GUI 的刚性桩复合地基沉降计算

张中流¹, 刘慈军², 何 宁¹, 周彦章¹, 国建飞², 周玉娟²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 宁波市高等级公路建设指挥部, 浙江 宁波 315192)

摘要: 随着刚性桩复合地基技术的广泛应用, 沉降计算在其设计中越来越重要。目前刚性桩复合地基沉降计算主要采用复合模量法, 但在处理软土地基时, 该方法夸大了桩的作用, 尚不能精确反应地基土的沉降。针对这一问题, 从沉降产生机理出发, 考虑刚性桩复合地基的沉降主要由土拱效应下土顶承担的荷载和桩的侧壁摩阻力两部分引起, 根据土力学基本原理, 结合已有的土拱效应和桩身荷载传递的研究成果, 提出一种正方形布桩下的刚性桩复合地基沉降计算方法并利用 MATLAB-GUI 编译成可视化程序。通过实例验证, 程序计算结果与工程实测值吻合较好, 说明该程序计算方法具有一定可行性, 并将程序计算结果与传统方法比较, 结果表明该计算方法精确性较高, 计算过程简便, 易于普及。

关 键 词: 复合地基; 土拱效应; 桩侧摩阻力; 沉降; 可视化程序

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)02-0076-07

刚性桩复合地基指在软基加固中设置刚性桩来支撑路堤填土荷载的新型路堤形式, 具有工期短、沉降小、经济性好等优点, 近年来应用广泛。路堤荷载作用下, 桩与桩间土的不均匀沉降使得路堤填土的竖向荷载逐步转移到桩帽, 这种现象被称为路堤的土拱效应。目前有关土拱效应计算方法的研究已经获得了一些成果^[1-3], 并在相应工程实际中得到了验证。在桩身荷载的传递规律方面, 桩顶竖向荷载主要以侧壁摩阻力的形式传递给土, 杨敏^[4]和何宁^[5]等通过研究提出桩侧壁摩阻力的简化计算方法。现行规范^[6](《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012))采用复合模量法计算复合地基沉降, 该方法夸大了桩的作用, 可能导致沉降计算结果过小。目前同时考虑土拱效应和桩身荷载传递规律的沉降计算方法尚不多见。本文结合以上两个方面的研究成果, 提出一种刚性桩复合地基沉降计算方法, 利用 MATLAB-GUI 编写成计算程序, 并用杭州湾南岸接线工程的实测资料进行验证。

1 程序模块及计算方法

本文对正方形布桩形式下的刚性桩复合地基沉降进行计算, 计算步骤和程序界面均分为 3 个部分: 改进 Hewlett 算法土拱效应模块; Boussinesq 算法中心土顶沉降计算模块; Geddes 系数算法沉降修正模块。

1.1 改进 Hewlett 算法土拱效应模块

正方形布桩形式见图 1(a)。首先根据土拱效应计算模型, 求得桩帽与桩间土上分担的应力。目前计算模型以 Hewlett 的半球拱理论模型^[7]研究和应用较为广泛: 假设土拱为半球壳形, 将土拱直径简化为桩间距大小, 同时塑性点出现在土拱顶部中心点或桩帽上方的土拱处, 推求出桩土应力的计算公式。但忽略了土拱的空间尺寸, 针对这一局限性, 陈福全等^[8]假定土拱是以对角桩的桩心连线为直径的半球环(图 1(b))对

收稿日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51579152); 宁波市交通科技委科技计划项目(201312)

作者简介: 张中流(1991—), 男, 江苏建湖人, 硕士研究生, 主要从事地基处理研究。E-mail: sanityben@163.com

Hewlett 算法进行改进, 而本程序该模块也采用其改进之后的算法, 计算方法如下:

$$\text{桩顶压力为: } P_u = \frac{4K_p \sigma_s (s-b)^2}{K_p + 1} \left[\left(\frac{s}{s-b} \right)^{K_p+1} - 2 \left(\left(s - \frac{b}{2} \right) / (s-b) \right)^{K_p+1} + 1 \right] \quad (1)$$

$$\text{总平衡条件下有: } s^2 \gamma H = P_u + \sigma_s (s-b)^2 \quad (2)$$

$$\text{则桩的荷载分担比为: } E = \frac{P_u}{s^2 \gamma H} = \frac{P_u}{P_u + \sigma_s (s-b)^2} \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)中, 可得:

$$E = D / (D + C) \quad (4)$$

其中,

$$C = (1 + \delta) (K_p + 1) \quad (5)$$

$$D = 4K_p (1 - \delta) \left[\left(\frac{1}{1 - \delta} \right)^{K_p+1} - 2 \left(\left(1 - \frac{\delta}{2} \right) / (1 - \delta) \right)^{K_p+1} + 1 \right] \quad (6)$$

式中: γ 为路堤填土重度, 程序默认为 20 kN/m^3 ; b 为桩帽宽度, 程序默认为 1 m ; s 为桩间距, H 为路堤填土高度, 均通过滑条设置; K_p 为填土被动土压力系数, 默认为 3 ; δ 为桩帽宽度与桩间距的比值。联合式(2)和(4)可解得桩间土压强 σ_s 和桩顶压力 P_u 。

设置完相关参数后, 点击试算按钮, 程序会将该算法的计算结果显示在此模块下方。

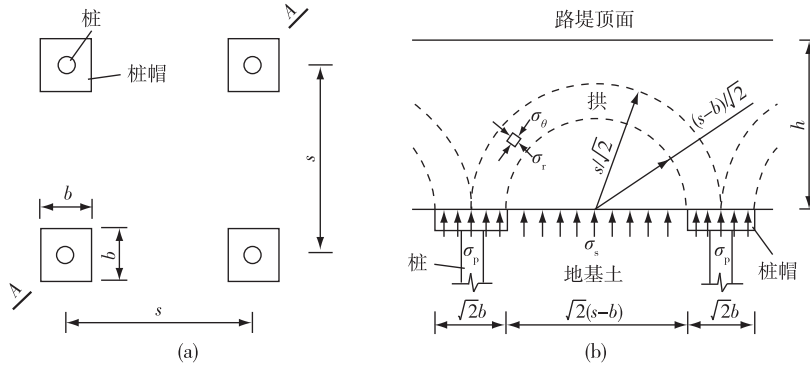


图1 正方形布桩土拱分析

Fig. 1 Analysis of soil arching in pile's square layout

1.2 Boussinesq 算法中心土顶沉降计算模块

根据上一模块求得的桩间土分担应力, 计算该部分应力产生的沉降。布桩区域由若干个大小相等的正方形区域(如图2(a)虚线区域)构成。本模块用中心土顶的沉降代表整个布桩区域土的平均沉降, 中心土顶压强为上一模块求得的桩间土分担应力。并假设桩端土为持力层, 土的压缩性较差, 桩端以下土的沉降忽略不计, 只计算桩长范围内土的沉降, 其计算方法如下: 虚线区域(图2(a))沿中心线划分为4个大小相等的小正方形, 单个小正方形角点的平均附加应力系数采用叠加法(如图2(b)), 等于区域1角点加上区域2角点减去区域3角点的平均附加应力系数, 其中每一个的附加应力系数由 Boussinesq 法求得。

区域1和区域2角点的平均附加应力系数相等为:

$$\bar{\alpha}_{1,2} = \frac{1}{2\pi z} \left[\text{zarctan} \frac{sd}{2z\sqrt{s^2 + d^2 + 4z^2}} + \frac{s}{2} \ln \frac{(\sqrt{s^2 + d^2 + 4z^2} - d)(\sqrt{s^2 + d^2} + d)}{(\sqrt{s^2 + d^2 + 4z^2} + d)(\sqrt{s^2 + d^2} - d)} + \frac{d}{2} \times \right. \\ \left. \ln \frac{(\sqrt{s^2 + d^2 + 4z^2} - s)(\sqrt{s^2 + d^2} + s)}{(\sqrt{s^2 + d^2 + 4z^2} + s)(\sqrt{s^2 + d^2} - s)} \right] \quad (7)$$

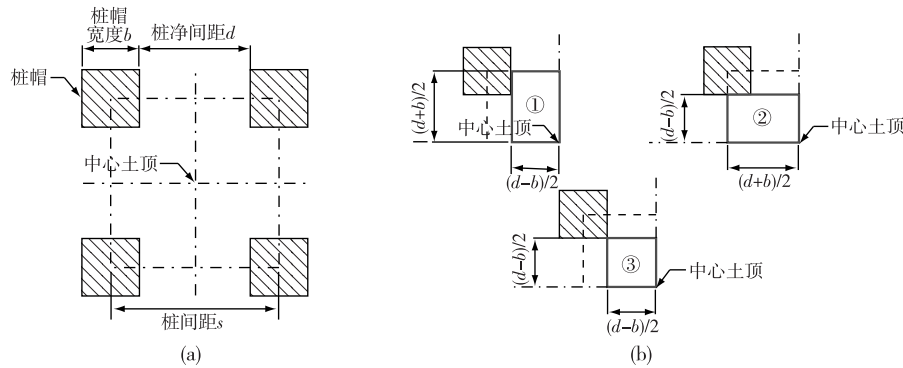


图 2 附加应力系数求解

Fig. 2 Solution of additional stress coefficients

区域 3 角点的平均附加应力系数为:

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{1}{2\pi z} \left[z \arctan \frac{d^2}{2z\sqrt{2d^2 + 4z^2}} + d \ln \frac{(\sqrt{2d^2 + 4z^2} - d)(3 + 2\sqrt{2})}{(\sqrt{2d^2 + 4z^2} + d)} \right] \quad (8)$$

$$\text{推导得中心土顶的附加应力系数为: } \bar{\alpha} = 8\bar{\alpha}_{1,2} - 2\bar{\alpha}_3 \quad (9)$$

式中: d 为桩净间距, 等于桩间距 s 和桩帽宽度 b 之差; z 为计算点离路堤基础底面的垂直距离。再通过分层总和法得到中心土顶的沉降为:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{P_s}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (10)$$

式中: P_s 为中心土顶压强; E_{si} 为各土层的压缩模量, 可在模块二的土层信息栏进行添加, 程序最多支持 5 层不同的土层信息, 输入完毕后点击试算按钮, 沉降计算结果将显示在此模块的最下方。

1.3 Geddes 系数算法的沉降修正模块

最后根据侧壁摩阻力的分布对上一模块的沉降计算结果做出修正。桩间土中的附加应力除了来自土顶的竖向荷载, 还来自于桩的侧壁摩阻力, 因此还需加上由桩侧摩阻力引起的沉降。其中桩侧摩阻力以中性点为界有正负之分, 中性点处桩侧土体下沉量与桩身位移量相等, 此处的侧摩阻力为零, 在此深度以上, 桩侧土下沉量大于桩体位移, 桩侧摩阻力为负, 反之在此深度以下的侧摩阻力为正。假设桩侧摩阻力 τ 与桩土相对位移 δ 为理想弹塑性关系(图 3(a))。研究表明除在中性点位置附近较短长度范围内, 桩土接触面土体单元发生弹性形变, 其余大部分位置为塑性形变^[9-10], 为此桩侧摩阻力全部按极值计算, 得到刚性桩复合地基桩侧摩阻力 τ 的简化分布(图 3(b))。

Geddes 根据 Mindlin 解^[11]得到刚性桩复合地基在路堤荷载作用下, 矩形桩侧摩阻力在桩间土中产生的竖向附加应力系数为^[12]:

$$K_r = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[-\frac{2(2-\mu)}{A} + \frac{2(2-\mu) + 2(1-2\mu)\left(\frac{m}{n}\right)\left(\frac{m}{n} + \frac{1}{n}\right)}{B} - \frac{2(1-2\mu)\left(\frac{m}{n}\right)^2}{F} + \frac{n^2}{A^3} + \right]$$

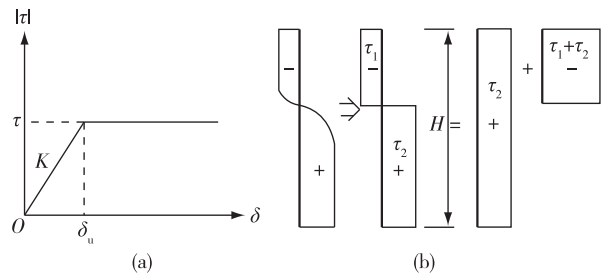


图 3 桩侧摩阻力简化方法

Fig. 3 Simplified distribution of pile's skin friction

$$\begin{aligned} & \frac{4m^2 - 4(1 - \mu) \frac{m^4}{n^2}}{F^3} + \frac{4m(1 + \mu)(m + 1) \left(\frac{m}{n} + \frac{1}{n} \right)^2 - (4m^2 + n^2)}{B^3} + \\ & \left[\frac{6m^2 \left(\frac{m^4 - n^4}{n^2} \right)}{F^5} + \frac{6m(mn^2 - \frac{(m + 1)^5}{n^2})}{B^5} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $n=r/L$; $m=z/L$; $A^2=n^2+(m-1)^2$; $B^2=n^2+(m+1)^2$; μ 为桩间土泊松比,程序默认为 0.25。程序中 r 为中心土点至桩侧壁的水平距离, L 为负摩阻力或正摩阻力的分布长度。再根据图 3(b) 所示的桩侧摩阻力简化形式,可得桩侧摩阻力在桩间土中产生的附加应力为:

$$\sigma_i = K_{r2}\tau_2 - K_{r1}(\tau_1 + \tau_2) \quad (12)$$

式中: τ_1, τ_2 分别为负、正桩侧摩阻力密度,程序默认为 -10 和 15 kPa,实际工程中取静力触探的侧壁摩阻力 f_s 或无侧限强度 q_u 的一半; K_{r1}, K_{r2} 分别为负、正摩阻力的附加应力系数。同时受周围 4 根桩影响,由分层总和法得桩侧摩阻力引起的沉降为:

$$S_2 = 4 \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{E_{si}} \Delta h_i \quad (13)$$

结合模块二式(10)的计算结果,可知修正以后的土沉降为 $S=S_1+S_2$ 。

中性点位置由桩土相对位移为零来确定。其中中性点土的沉降计算方法同上,而桩的沉降由两部分构成,一是桩身轴力产生的压缩沉降,二是桩端的刺入沉降。桩身压缩沉降计算为:

$$u = \int_{L_m}^L \frac{P_u - U \int_0^z \varepsilon dz}{E_p A_p} dz \quad (14)$$

式中: L_m 为中性点位置深度; L 为桩长; U 为桩横截面周长; ε 为侧摩阻力; E_p 为桩的弹性模量,程序默认为 0.6 GPa; A_p 为桩的横截面积。

桩端轴力 P_b 及桩端轴力 P_b 作用下的刺入沉降分别为^[13]:

$$P_b = P_u + \rho g L A_p - U \sum \varepsilon_i L_i \quad (15)$$

$$u_{pb} = \frac{P_b(1 - \mu_s)}{4rG_s} \xi \quad (16)$$

式中: ρ 为桩密度,程序默认为 2 400 kg/m³; ε_i 为侧摩阻力密度; L_i 为侧摩阻力长度; μ_s 为桩端土体泊松比,默认为 0.25; G_s 为桩端土体剪切模量,默认为 6 MPa; ξ 为深度影响系数,一般取值 0.85~1,默认为 1。

点击本模块下半部分的试算按钮,程序将计算出模块上半部分假设中性点位置处桩和桩间土的沉降,得到两者的沉降差,沉降差越接近于零,表示假设中性点位置越精确,通过反复假设和试算最终确定中性点的位置。此时修正沉降为程序拟合的最终沉降。

2 实例计算及验证

2.1 工程概况

程序验证实例取自杭州湾跨海大桥南岸接线试验工程高速公路桥头的 N2 段落,该工程段落位于浙江慈北冲积平原,地基主要由冲海积黏土、亚黏土和亚砂土组成。区域内共含 5 个土层,其中 4 层为软土,软土层最大厚度达 36 m。自地表向下分别为:②₁ 亚黏土层:浅层为耕植土,大部分呈软塑状,少部分呈可塑状;②₂ 淤泥质亚砂土层:饱和,呈流塑状;③₁ 淤泥质亚黏土层:饱和,呈流塑状;③₂ 亚黏土层:饱和,以流塑状为主,少数为软塑状;⑤₂ 细砂、粉砂层。其土层详细信息及主要物理学指标见表 1。

N2 段落采用刚性桩(预应力管桩)复合地基进行处理,桩间距为 2.4 m,正方形布置,管桩桩径 0.4 m,桩

顶设置 1 m×1 m 桩帽,打设深度 36 m,其垫层由 50 cm 厚碎石和一层双向拉伸聚丙烯土工格栅构成,其施工工艺为:先将一层 30 cm 厚碎石摊铺并压实,在其上铺设土工格栅后再摊铺并压实另一层 20 cm 厚碎石。试验段工程路堤填土高度 4.26 m,填料为夹砾粉土,根据现场试验资料得知其重度 $\gamma=19.8\text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c=6\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ 。

N2 段落的重点监测断面为 K118+593,其中桩土应力的监测方法为:在半幅路面的桩顶和桩间土中分别均匀布置钢弦式界面土压力计和钢弦式二次膜土中土压力计各 10 个。沉降的监测方法为:分层沉降方面,采用铁环式分层沉降仪测量,铁环沿地基深度根据软土层厚度布置 10~12 个;地表沉降方面,路堤左、中、右位置各安装地表沉降标 1 个,采用水准仪测量。均取实测值的平均值代表该断面的实际状况。

表 1 N2 段土层主要物理力学指标

Tab. 1 Main physical and mechanical indices of soil layers in section N2

土层代号	土层标高/m	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	液限指数 I_L	压缩系数 $a_v/(\text{MPa}^{-1})$
② ₁	0~2	30.8	1.90	0.874	33.6	12.8	0.79	0.35
② ₂	2~11	38.1	1.83	1.037	30.4	9.7	1.82	0.46
③ ₁	11~33	41.9	1.79	1.165	36.2	13.8	1.44	0.54
③ ₂	33~36	32.9	1.88	0.930	30.8	11.5	1.26	0.29
⑤ ₂	>36	28.5	1.85	0.870	—	—	—	—

2.2 结果验证及分析

首先根据路堤填土信息和布桩情况设置模块 1(见图 4)相关参数,再结合 N2 段土层物理力学指标(见表 1)将土层信息填入模块 2,其中各软土层的压缩模量分别为:5.35,4.43,4.00 和 6.70 MPa。最后将由静力触探得到的桩侧壁正负摩阻力 17.5 和-13.5 kPa 填入模块 3,其他参数保持默认。通过反复试算,最终确定中性点位置在距离基础底面 8.93 m 处,程序计算结果与 N2 段重点监测断面实测资料对比见表 2。



图 4 程序设置和运行

Fig. 4 The program's setting and operation

表 2 实测值与程序计算值比较

Tab. 2 Comparison between measured and calculated values

N2 路段	桩顶 土压力/kPa	桩间 土压力/kPa	桩体承载 比例/%	沉降 /mm
实测值	351	26.2	74.5	96
计算值	378.42	22.57	77.89	94.43
误差	7.8%	13.9%	4.6%	1.6%
复合模量法	—	—	—	7.49

由表 2 可见,两者误差大多在 10% 以内,说明本程序采用的计算方法对正方形布桩下刚性桩复合地基的沉降拟合较好。再通过模块 2 沉降值 S_1 与最后的修正沉降值 $S_{总}$ 对比发现,复合地基的沉降大部分由桩侧摩阻力产生,即路堤填土荷载主要通过桩身传递给土,反映了土拱效应对地基土沉降产生的影响。同时对比复合模量法

的计算结果,发现该计算结果过小,本程序采用的计算方法相比传统方法更为精确。

3 结 语

(1)刚性桩复合地基的沉降主要由土拱效应下土顶分担的荷载和桩身侧壁摩阻力的传递所引起,且沉降的大部分由桩侧摩阻力产生。

(2)本文结合以上两方面的研究成果,提出一种正方形布桩下的复合地基沉降计算方法,并利用 MATLAB-GUI 语言编译成可视化程序。

(3)通过程序计算结果与实测资料、复合模量法的对比,发现此计算方法拟合较好,具有不错的可行性和更好的精确性,同时程序略去了中间繁琐的计算过程,便于推广与应用。

参 考 文 献:

- [1] 陈云敏,贾宁,陈仁鹏. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1-6. (CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil arch analysis of pile-supported embankments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 1-6. (in Chinese))
- [2] 强小俊,赵有明,胡荣华. 桩网结构支承路堤土拱效应改进算法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 7-12. (QIANG Xiao-jun, ZHAO You-ming, HU Rong-hua. Improved algorithm for the soil arching effect of pile-net supported embankment[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 7-12. (in Chinese))
- [3] 芮瑞,夏元友. 桩承式路堤荷载传递计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(13): 73-77. (RUI Rui, XIA Yuan-you. Research on load transfer mechanism and calculation method of embankment supported by piles[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(13): 73-77. (in Chinese))
- [4] 杨敏,王树娟,王伯钧,等. 使用 Geddes 应力系数公式求解单桩沉降[J]. 同济大学学报, 1997, 25(4): 379-385. (YANG Min, WANG Shu-juan, WANG Bo-jun, et al. On analysis of single pile by using Geddes' stress formula[J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(4): 379-385. (in Chinese))
- [5] 何宁,娄炎. 路堤下刚性桩复合地基的设计计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 797-802. (HE Ning, LOU Yan. Design and calculation method for rigid pile composite foundation under embankments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 797-802. (in Chinese))
- [6] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. (JGJ79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. (in Chinese))
- [7] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [8] 陈福全,李阿池,吕艳平. 桩承式路堤中土拱效应的改进 Hewlett 算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1278-1283. (CHEN Fu-quan, LI A-chi, LV Yan-ping. An improved solution of Hewlett's method for soil arching effect on piled embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1278-1283. (in Chinese))
- [9] 楼晓明,孙晓峰,陈广. 大面积路堤荷载下带承台桩的荷载传递分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 98-104. (LOU Xiao-ming, SUN Xiao-feng, CHEN Guang. Analysis of load transfer for caped piles under large area of embankment[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 98-104. (in Chinese))
- [10] 亓乐,施建勇. 产生刺入的复合地基摩阻力计算方法[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(4): 31-35. (QI Le, SHI Jian-yong. Method for calculating skin friction of composite ground with penetration[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(4): 31-35. (in Chinese))
- [11] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-205.
- [12] GEDDES J D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface load[J]. Geotechnique, 1966, 16(3): 231-255.
- [13] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. Geotechnique, 1979, 29(4): 423-439.

Settlement calculation for rigid pile composite foundation based on MATLAB-GUI algorithm

ZHANG Zhong-liu¹, LIU Ci-jun², HE Ning¹, ZHOU Yan-zhang¹, GUO Jian-fei², ZHOU Yu-juan²

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Ningbo Highway Construction Headquarters, Ningbo 315192, China*)

Abstract: With the wide use of rigid pile composite foundation, the calculation method for its settlement becomes much and more important. Currently, we mainly take the results of the composite modulus method as a designing reference, but this method is still not accurate yet when we handle soft ground for its exaggeration in pile's function. From the aspect of settlement generation mechanism, the settlement is caused by two main components: one is the distributed stress on the top surface of the soil determined by soil arching effect; the other is the skin friction distributed along the depth of the pile influenced by pile-soil relative displacement. According to the fundamental principles of soil mechanics, a more accurate calculation method for the settlement in pile's square layout is proposed based on current research achievements about soil arching effect and pile's load transfer mechanism; meanwhile, it is programmed with MATLAB-GUI algorithm language for convenience. Through the validation by engineering cases, the calculated results of the program well agree with the observed ones, so the calculation method is feasible in some degree. Furthermore, by comparison with the traditional method, this method has better accuracy. Last but not the least, the program is also easily promoted in practice as it doesn't need to go through the complex process of calculation.

Key words: composite foundation; soil arching; pile's skin friction; settlement; visual program