

基于荷载传递法的单桩非线性受力性状 分析软件开发及其应用

林 鹏¹, 李术才¹, 张乾青^{1,2}, 李利平¹, 张 骞¹, 许振浩¹, 孙超群¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件, 可灵活选用不同的荷载传递函数如双曲线模型和软化模型等分析单位侧阻与桩土相对位移间的关系及桩端位移和桩端阻力间的关系, 并将桩分成若干桩段以考虑地基土的成层性, 且在分析单桩的非线性受力性状的过程中可考虑地下水的影响。该软件得出的单桩受力性状与实际情况吻合较好, 提出的基于荷载传递法的单桩非线性受力性状的分析软件是合理可行的, 在单桩非线性受力性状的分析上具有一定的实用价值。

关 键 词: 单桩; 非线性; 荷载传递函数; 成层土

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Development of software for nonlinear analysis of single pile response based on load transfer method and its application

LIN Peng¹, LI Shu-cai¹, ZHANG Qian-qing^{1,2}, LI Li-ping¹, ZHANG Qian¹,
XU Zhen-hao¹, SUN Chao-qun¹

(1. Geotechnical & Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Software for nonlinear analysis of a single pile response based on load transfer method is presented in this paper. Different load transfer functions such as a hyperbolic model and a softening model can be adopted in the present software to capture the relationship between unit skin friction and pile-soil relative displacement and the relationship between unit tip resistance and pile tip displacement. In the present software, the single pile is divided into different segments to consider layers of soil, and the influence of the groundwater level on the single pile response can be taken into account. The single pile response derived from the present software is generally in good agreement with the field-observed behavior. The proposed software is efficient, and suitable for the analysis of nonlinear response of a single pile.

Key words: single pile; nonlinearity; load transfer functions; multilayered soils

1 引 言

单桩受力性状分析是一个较为复杂的问题, 主要受土层分布、地下水位、桩长、桩径、桩与土的相对压缩性、荷载水平、桩侧土和桩端土的力学性状、成桩方法等因素的影响。对竖向荷载作用下单桩受力性状的研究是进行桩基设计的基础, 单桩静荷载试验是目前使用最为广泛的一种原位试验, 可为单桩的受力性状研究提供较好的途径。然而, 单

桩静载试验的结果受人为因素影响较大, 且花费较高。由于现场静载试验多是利用工程桩进行检验性试验, 不允许对试桩加载至破坏, 不易获得单桩破坏时的真实受力性状。因此, 有必要对单桩受力性状展开理论研究。单桩沉降计算主要的方法有荷载传递法^[1-3]、剪切位移法^[4-6]、有限元法^[7-8]、边界元法^[9-10]和简化计算方法^[11-12]等。荷载传递法因其具有计算过程简便, 可灵活选用不同的荷载传递函数, 并考虑地基土成层性等优点而在单桩受力性状

收稿日期: 2013-05-30

基金项目: 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助(No. SKLGDUEK1210); 中国博士后科学基金面上项目资助(No. 2012M521339); 山东大学自主创新基金资助(No. 2012GN012)。

第一作者简介: 林鹏, 男, 1989年生, 硕士研究生, 主要从事基础工程和隧道工程的研究。E-mail: sddxytlp@163.com

通讯作者: 张乾青, 男, 1983年生, 博士, 讲师, 主要从事桩基工程、隧道工程与基坑工程的教学与研究工作。E-mail: zjuzqq@163.com

分析中得到广泛应用。荷载传递法的关键是荷载传递函数, 根据现场实测拟合或者根据一定的经验和机制分析。Kezdi^[13]将荷载传递函数假定为指数曲线; Gardner^[14]和 Kraft^[1]采用双曲线函数表示传递函数; Vijayvergiga^[15]将传递函数假定为抛物线; 李作勤^[16]对荷载传递函数进行了总结, 主要类型有线弹性-塑性模型、双折线模型、双曲线模型、指数(或对数)模型、软化模型。荷载传递法的现有模型有的能精确模拟桩土作用, 但计算参数很难从工程实践中准确测定, 求解困难, 有的公式简单明了, 但不能全面反映桩土相互作用的实际情况。因此, 如何选取既简单又能反映实际工程中桩工作性状的传递函数模型, 有待加深研究。

基于前人的研究, 本文提出了一种基于 MATLAB 语言的单桩非线性受力性状分析软件, 可灵活选用不同的荷载传递函数如双曲线模型和软化模型等来分析单位侧阻与桩土相对位移间的关系及桩端位移和桩端阻力间的关系, 可将桩分成若干桩段以考虑地基土的成层性, 在分析单桩的非线性受力性状的过程中可考虑地下水的影响。算例分析表明, 本软件的计算方法合理可行且计算简便, 易于掌握, 可较好估算实际工程中单桩的受力性状, 可供相关设计、施工等人员借鉴使用。

2 基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件

基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件根据工程实际情况, 对地基土的厚度及深度变化、桩长、桩径、桩与土的弹性模量等参数赋值, 灵活调用不同的荷载传递函数和已有的数据资料, 分析单桩的非线性受力性状, 绘制出桩顶荷载-沉降曲线。该软件主要有如下特点: (1) 计算参数赋值智能化。软件与 excel 文件格式耦合性好, 支持 excel 数据的调用和保存, 计算参数的赋值智能化, 避免了因参数的重复输入所带来的麻烦。(2) 单桩非线性受力性状分析时计算模型的可选择性。分析单桩的非线性受力性状时, 基于工程实际情况, 可灵活调用不同的荷载传递模型如双曲线荷载传递模型和软化模型等, 在不同的荷载传递模型下分别进行计算, 从而对实际工程进行有效预测。(3) 考虑地基土的成层性。支持将单桩划分为不同桩段数进行计算, 且计算过程中可以考虑地下水的影响。(4) 软件的可扩充性。为开放式软件, 在实际应用中可不断地扩充。随着荷载传递函数研究的不断加深, 既简单又能反映实际工程中桩工作性状的传递函数

模型将不断被采用。其他合理简便的单桩沉降计算方法也将在软件中得到应用, 软件功能将会不断加强。(5) 软件使用菜单控制, 界面友好, 且操作具有严谨性, 带有用户提示功能, 见图 1。



图 1 用户提示对话框
Fig.1 Prompt dialog box

3 基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件结构

基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件主要由控制层、输入层、逻辑层和输出层 4 部分组成。

3.1 控制层

控制层实现了用户对软件进行操作的功能, 使用菜单控制, 支持对地基土和单桩的桩段基本资料、桩端土参数和单桩参数的输入界面以及数值计算和绘制曲线图的运算界面的调用, 且可控制单桩桩段的划分。软件控制主界面见图 2。



图 2 软件控制主界面
Fig.2 Control interface of the present software

3.2 输入层

输入层是实现用户与软件进行信息交互的途径。该软件的输入层将地质和设计资料分为地基土和单桩的桩段基本资料、桩端土参数及单桩参数三个方面进行输入, 见图 3。

对用户未经实测而无法确定的参数, 用户可对照本区域类似工程的地质和设计参数进行比较后确定, 同时给出参数取值的置信度。

3.3 逻辑层

逻辑层是单桩非线性受力性状分析的主要部

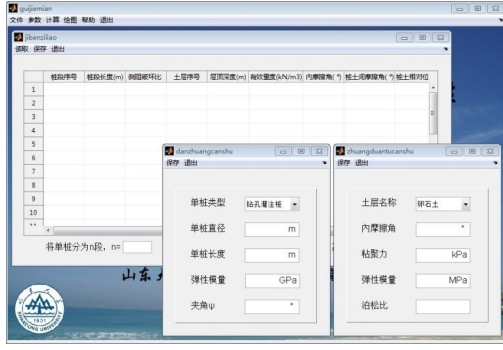


图 3 地基土和桩参数的输入界面

Fig.3 Input interface of parameters of soil and pile

分, 其核心内容是荷载传递模型的选择。实际工程中可根据具体情况灵活选择不同荷载传递函数。

3.3.1 桩侧荷载传递函数

(1) 双曲线模型

桩侧双曲线荷载传递模型可模拟桩侧阻力和桩土相对位移间的关系, 在荷载传递法中得到了广泛应用。

侧阻双曲线模型的数学表达形式^[2]为

$$\tau_s(z) = \frac{S_s(z)}{f + gS_s(z)} \quad (1)$$

式中: $\tau_s(z)$ 为深度 z 处的桩侧摩阻力; $S_s(z)$ 为深度 z 处桩土界面的桩土相对位移; f 、 g 为参数。

f 值可表示^[17]为

$$f = \frac{r_0}{G_s} \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (2)$$

式中: r_0 为桩的半径; r_m 为桩的影响半径; G_s 为桩侧土的剪切模量。

桩位于均质土中时, r_m 取值^[17]为

$$r_m = 2.5L(1 - \nu_s) \quad (3)$$

式中: L 为桩长; ν_s 为桩侧土的泊松比。

桩位于成层土中时, r_m 取值可表示^[18]为

$$r_m = 2.5 \frac{\sum_{i=1}^{n_s} G_{si} h_i}{G_{sm}} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \nu_{si} h_i}{L} \right) \quad (4)$$

式中: ν_{si} 为第 i 层土的泊松比; G_{si} 为第 i 层土的剪切模量; G_{sm} 为土层中的最大剪切模量值; h_i 为第 i 层土的厚度; n_s 为土层层数。

$1/g$ 为双曲线函数的渐近线, 即桩土相对位移为无穷大时所对应的桩侧阻力 τ_{sf} 。 τ_{sf} 的值略大于桩-土界面的极限剪切应力 τ_{su} , 两者间关系可表示为

$$\tau_{su} = R_{sf} \tau_{sf} \quad (5)$$

式中: R_{sf} 为桩侧土侧阻破坏比, 其值可取为 0.80~0.95^[19]。

桩-土界面极限剪应力 τ_{su} 可表示为

$$\tau_{su} = K \sigma'_{vz} \tan \delta \quad (6)$$

式中: σ'_{vz} 为深度 z 处的有效应力; K 为水平土压力系数; δ 为桩土界面的摩擦角, 其值和桩侧土的内摩擦角 φ 有一定的关系, 可参照文献[12]。

(2) 软化模型

侧阻双曲线荷载传递模型在荷载传递法中应用较为广泛。然而现场试验表明, 在高荷载水平作用下, 桩侧摩阻力表现出软化特性。对于侧阻软化特性, 采用双曲线模型模拟桩侧阻力和桩土相对位移间关系具有一定的局限性。

侧阻软化模型的数学表达式^[12]为

$$\tau_s(z) = \frac{S_s(z)[a + cS_s(z)]}{[a + bS_s(z)]^2} \quad (7)$$

式中: a 、 b 、 c 均为参数, 其表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\beta_s - 1 + \sqrt{1 - \beta_s}}{2\beta_s} \frac{S_{su}}{\tau_{su}} \\ b &= \frac{1 - \sqrt{1 - \beta_s}}{2\beta_s} \frac{1}{\tau_{su}} \\ c &= \frac{2 - \beta_s - 2\sqrt{1 - \beta_s}}{4\beta_s} \frac{1}{\tau_{su}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: β_s 为侧阻破坏比, 定义为残余侧阻力 τ_{sr} 与极限侧阻力 τ_{su} 的比值; S_{su} 为侧阻完全发挥时对应的桩土相对位移。

现场试验实测数据进行的统计^[20]表明, 不同土层中侧阻完全发挥时对应的桩土相对位移 S_{su} 为 5~25 mm (0.005~0.025) d , 残余桩侧阻力 τ_{sr} 与极限侧阻力 τ_{su} 的比值 β_s 为 0.83~0.97。此研究成果可用于本文提出的侧阻软化模型的研究分析及其他理论模型中。桩-土界面极限剪应力 τ_{su} 可由式 (6) 进行计算。

(3) 其他桩侧荷载传递模型

Kezdi^[13]将桩侧荷载传递函数假定为指数曲线, 佐藤悟将桩侧荷载传递函数假定为线弹性-全塑性关系。Vijayvergiga^[15]将桩侧荷载传递函数假定为抛物线。

3.3.2 桩端荷载传递函数

(1) 双折线模型

对于桩端未发生刺入破坏的桩, 桩端位移荷载关系曲线可采用双折线模型模拟。双折线荷载传递

模型的荷载传递函数可表示^[21]为

桩端阻力 τ_b :

$$\tau_b = \begin{cases} k_1 S_b, & (S_b < S_{bu}) \\ k_1 S_{bu} + k_2 (S_b - S_{bu}), & (S_b \geq S_{bu}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为第一段和第二段直线的斜率; S_b 为桩端位移; S_{bu} 为第一段直线对应的极限位移。

根据 18 根不同类型桩的现场实测数据, 笔者反分析得到了 S_{bu} 值, 不同桩端土层中不同桩型的桩端位移-桩端力曲线中第一阶段的极限位移 S_{bu} 值约为 1.0~9.0 mm^[21]。

k_1 可式 (10) 计算获得^[17]。

$$k_1 = \frac{4G_b}{\pi r_0 (1 - \nu_b)} \quad (10)$$

式中: G_b 、 ν_b 分别为桩端土的剪切模量和泊松比。

k_2 值可近似通过现场实测荷载-沉降曲线反分析获得。 k_2 值^[2]可表示为

$$k_2 = \frac{\Delta P_t}{A_b \left(\Delta S_t - \frac{\Delta P_t L}{E_p A_p} \right)} \quad (11)$$

式中: A_b 为桩端面积, 对于非扩底桩假定 $A_b = A_p$; ΔS_t 为桩顶荷载增加量 ΔP_t 引起的桩顶沉降增加量; E_p 、 A_p 分别为桩的弹性模量和桩截面面积。

(2) 双曲线模型

端阻双曲线模型的数学表达形式和侧阻双曲线模型的数学表达形式相同, 可表述为

$$\tau_b = \frac{S_b}{f_b + g_b S_b} \quad (12)$$

式中: τ_b 为单位端阻力; f_b 、 g_b 为参数; S_b 为桩端位移; S_{bu} 为单位极限端阻对应的桩端位移。

Randolph 等^[3]的研究结果 f_b 可表示为

$$f_b = \frac{\pi r_0 (1 - \nu_{sb})}{4G_{sb}} \quad (13)$$

式中: G_{sb} 、 ν_{sb} 分别为桩端土剪切模量和泊松比。

由式(14)可求得 g_b 值, 即

$$g_b = \frac{1}{R_b \tau_{bu}} \quad (14)$$

式中: R_b 为端阻破坏比; R_b 值可取 0.75~0.80^[22]; τ_{bu} 为桩端土单位极限承载力。

根据 Vesic 提出的孔洞扩张理论^[23], 可计算获得桩端土单位极限承载力 τ_{bu} , 即

$$\tau_{bu} = c N_c + \overline{\sigma'_{nb}} N_q \quad (15)$$

式中: c 为土层黏聚力; N_c 、 N_q 分别为反映土的黏聚力 c 和桩端平面处侧边土压力影响的无量纲承载力系数; N_c 、 N_q 为与土的内摩擦角 φ' 有关的参数, 其值可分别由式 (16) 和式 (17) 计算获得; $\overline{\sigma'_{nb}}$ 为桩端处侧面的平均有效压力, 其值可由式 (18) 计算。

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi' \quad (16)$$

$$N_q = \left(\tan \varphi' + \sqrt{1 + \tan^2 \varphi'} \right)^2 e^{2\psi \tan \varphi'} \quad (17)$$

$$\overline{\sigma'_{nb}} = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_{vb} \quad (18)$$

式中: σ'_{vb} 为桩端处的竖直有效应力; ψ 为 Janbu 桩端土破坏模式中桩端压密核边界与水平面的夹角, 其值随桩端土压缩性的增大而减小^[24]。

现场破坏性单桩试验^[25-27]表明, 桩端卵石层发生破坏后 S_{bu} 可取 10~17 mm。由于目前现场破坏性单桩的完整试验资料较少, 单桩桩端不同持力层发生破坏时对应的桩端位移 S_{bu} 有待进一步研究。

(3) 软化模型

对于桩身质量较好桩端持力层发生破坏的单桩而言, 桩端持力层发生破坏后桩端力降低, 桩端位移-桩端力曲线表现为软化特性。

端阻软化模型的数学表达形式^[22]可表述为

$$\tau_b = \begin{cases} \tau_{bu} \left[\frac{2S_b}{S_{bu}} - \left(\frac{S_b}{S_{bu}} \right)^2 \right], & (S_b < S_{bu}) \\ \frac{\tau_{bu} (1 - R_b)}{S_{bu} - S_{br}} S_b + \frac{\tau_{bu} (R_b S_{bu} - S_{br})}{S_{bu} - S_{br}}, & (S_b \geq S_{bu}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: S_{br} 为残余单位端阻对应的桩端位移。

3.4 输出层

输出层包括两部分: 数值结果的输出和荷载-沉降曲线的输出, 见图 4。



图 4 计算结果的输出界面

Fig.4 Output interface of calculated results

本文以桩侧采用侧阻软化模型和端阻采用双曲线模型为例, 给出了基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件的计算流程, 见图 5。

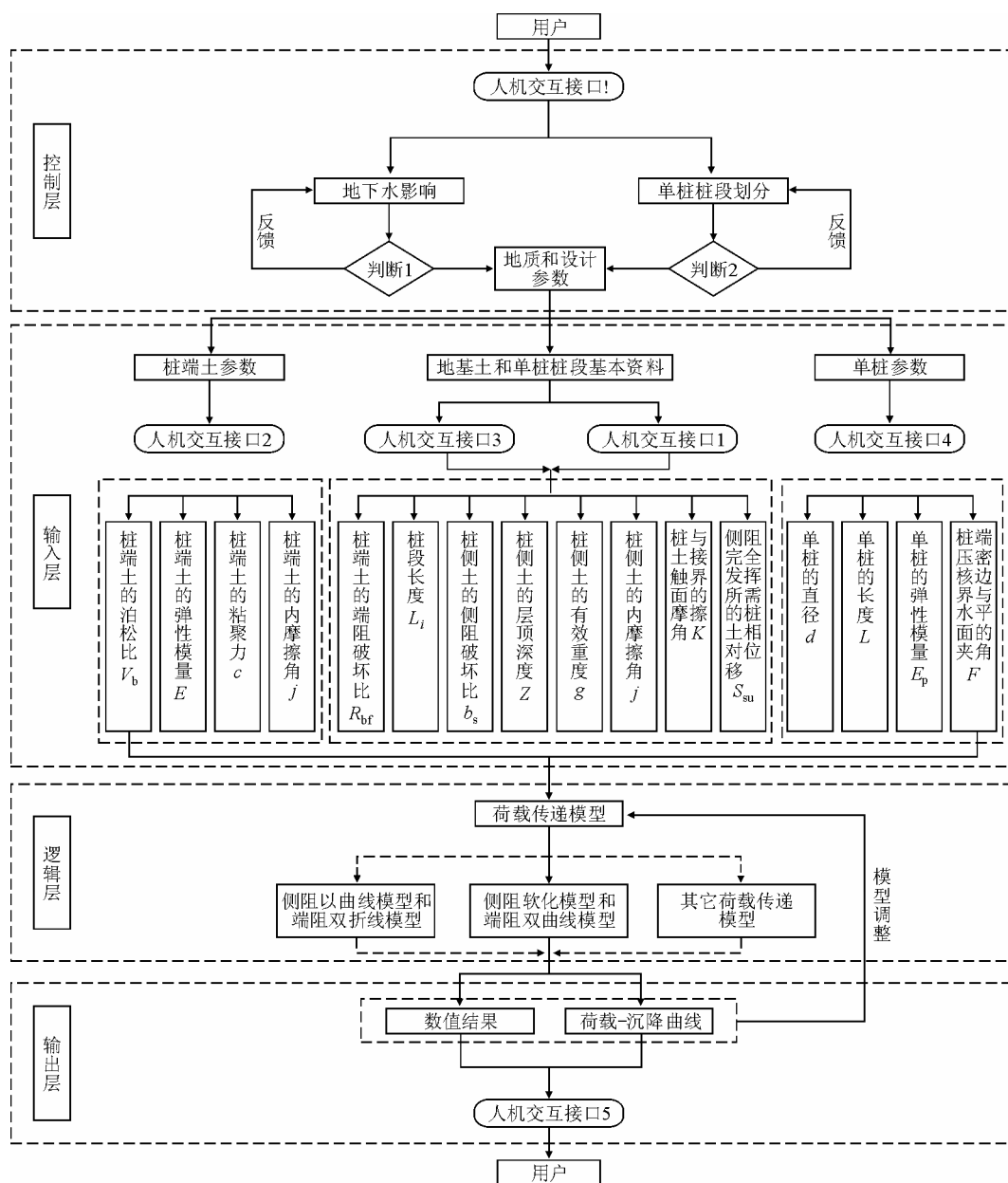


图 5 基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件结构图

Fig.5 Structural of the present software for nonlinear analysis of a single pile response based on load transfer method

4 基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件应用

为验证基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件的适用性, 分别调用软件中的侧阻软化模型和端阻双曲线模型, 侧阻双曲线模型和端阻双折线模型对单桩非线性受力性状进行分析。

4.1 基于侧阻软化模型和端阻双曲线模型的单桩非线性受力性状分析

选择 1 根单桩静载试验结果^[28]来验证本文软件的合理性。试验试桩 S1 为钻孔灌注桩, 桩径为 0.8 m, 桩身采用标号为 C35 的混凝土, 其弹性模量取 31.5 GPa, 桩端持力层为卵石土层, 桩长约 32 m,

计算时根据土层分布情况将全桩长分为 9 个计算桩段。已有研究表明^[12], 侧阻破坏比与端阻破坏比对单桩受力性状的影响较小, 该场地土的侧阻破坏比与端阻破坏比均统一取 0.95。采用侧阻软化模型分析单桩非线性受力性状时桩土相对位移对单桩受力性状的影响很小, 故各桩段的桩土相对位移统一取 8 mm, 桩端土的内摩擦角取 30.3°, 黏聚力为 35 kPa, 桩端土的弹性模量为 15 MPa, 泊松比取 0.35。将各参数赋值。场地地基土及单桩的基本资料见图 6。

调用软件中的侧阻软化模型计算得到的参数 a 、 b 、 c 值, 见图 7。

桩段序号	桩段长度/m	桩侧土体比	土层序号	层顶深度/m	有效重度/(kN/m ³)	内摩擦角/(°)	桩土间摩擦角/(°)
1	1	2	0.950	1	0	19.300	17.600
2	2	2.100	0.950	2	2	19.100	21.300
3	3	5.100	0.950	3	4.100	19.600	19.900
4	4	2	0.950	4	9.200	20	16.700
5	5	9.200	0.950	5	11.200	19.600	20.200
6	6	2.200	0.950	6	20.400	19.500	19.100
7	7	3.600	0.950	7	22.600	19.700	20.400
8	8	3.500	0.950	8	26.200	19.500	19.900
9	9	2.300	0.950	9	29.700	19.900	30.300

图6 场地地基土及单桩的基本资料
Fig.6 Parameters of soil and a single pile

桩段序号		桩段长度/m			m/kPa ⁻¹	kPa ⁻¹	kPa ⁻¹
1	1	2		1	3.063 2×10 ⁻⁸	1.712 4×10 ⁻⁵	6.647 5×10 ⁻⁶
2	2	2.100		2	6.445 9×10 ⁻⁸	3.603 4×10 ⁻⁵	1.398 8×10 ⁻⁵
3	3	5.100		3	5.087 6×10 ⁻⁸	2.844 0×10 ⁻⁵	1.104 0×10 ⁻⁵
4	4	2		4	8.288 9×10 ⁻⁹	4.633 7×10 ⁻⁶	1.798 8×10 ⁻⁶
5	5	9.200		5	9.113 4×10 ⁻⁸	5.094 5×10 ⁻⁵	1.977 7×10 ⁻⁵
6	6	2.200		6	1.090 3×10 ⁻⁸	6.095 1×10 ⁻⁶	2.366 1×10 ⁻⁶
7	7	3.600		7	1.911 8×10 ⁻⁵	1.068 7×10 ⁻³	4.148 7×10 ⁻³
8	8	3.500		8	2.794 2×10 ⁻⁸	1.562 0×10 ⁻⁵	6.063 8×10 ⁻⁶
9	9	2.300		9	1.599 7×10 ⁻⁹	8.942 5×10 ⁻⁷	3.471 5×10 ⁻⁷
10				10			

加载资料

开始计算

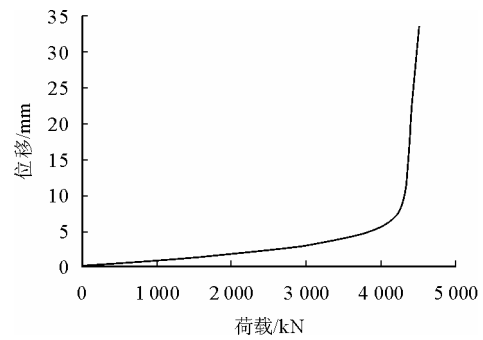
图7 本软件计算得到的参数 a 、 b 、 c 值
Fig.7 Calculated values of a , b and c derived from the present software

基于侧阻软化模型和端阻双曲线模型计算得到的单桩桩顶荷载-沉降曲线如图 8(a)所示, 实测得到的单桩桩顶荷载-沉降曲线如图 8(b)所示。桩顶荷载水平小于 4 000 kN 时, 本软件基于侧阻软化模型和端阻双曲线模型计算得到的单桩桩顶荷载-沉降曲线与实测荷载-沉降曲线较为接近。然而, 由于现场静载试验中单桩未加载至破坏, 故现场实测数据未得到单桩极限承载特性。算例 1 分析表明软件进行单桩受力性状的分析是合理可行的。

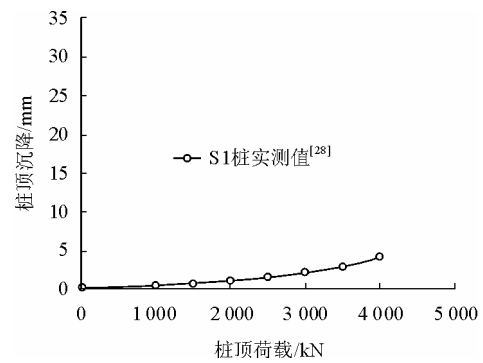
4.2 基于侧阻双曲线模型和端阻双折线模型的单桩非线性受力性状分析

选择 Briaud 等^[29]在密砂中进行的闭口钢管桩试验来验证本软件的合理性。该试验中钢管桩管壁厚 9.3 mm, 外径为 273 mm, 弹性模量为 210 GPa, 钢管桩进入密砂的深度为 9.15 m。该试验场地中土的剪切模量为 38.3 MPa, 桩侧土的剪切强度从地表处的 0 kPa 线性增加到桩端处的 45 kPa。本文计算时土泊松比取 0.35, 侧阻破坏比 R_{sf} 取 0.90。假定桩端位移-荷载模型中第一段直线对应的极限位移 $S_{bu} = 4$ mm。单桩沉降计算时可根据桩长将全桩分为 19 段, 最靠近桩端的一段计算桩长取为 0.15 m, 其余每段计算桩长取为 0.5 m。根据式 (10) 和式 (11)

可计算获得 $k_1 = 549\,899$ kPa/m, $k_2 = 447\,271$ kPa/m。



(a) 本软件计算



(b) 实测

图8 基于侧阻软化模型和端阻双曲线模型单桩桩顶荷载-沉降曲线

Fig.8 Pile head load-settlement curves of a single pile based on a softening model and a hyperbolic model

调用软件中的双曲线模型计算得到的参数 f 和 g 值, 见图 9。

桩段序号		桩段长度/m		
1	1	1	$f / \times 10^{-5}(\text{m/kPa}^{-1})$	$g / \times 10^{-2}(\text{kPa}^{-1})$
2	2	1	1.800	52.400
3	3	1	1.800	17.467
4	4	1	1.800	10.480
5	5	1	1.800	7.486
6	6	1	1.800	5.822
7	7	1	1.800	4.764
8	8	1	1.800	4.031
9	9	1	1.800	3.493
10	10	1	1.800	3.082
			10	2.758

加载资料

开始计算

图9 参数 f 和 g 计算值
Fig.9 Calculated values of f and g

基于侧阻双曲线模型和端阻双折线模型计算得到的单桩桩顶荷载-沉降曲线如图 10(a)所示, 实测得到的单桩桩顶荷载-沉降曲线如图 10(b)所示。本软件基于双曲线模型和端阻双折线模型计算得到的单桩桩顶荷载-沉降曲线与实测荷载-沉降曲线较

为接近。算例 2 分析表明, 软件进行单桩受力性状的分析是合理可行的。

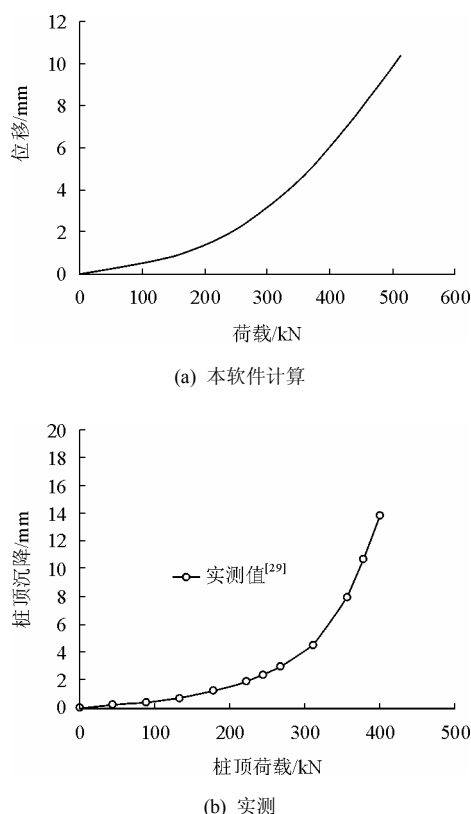


图 10 基于侧阻双曲线模型和端阻双折线模型
单桩桩顶荷载-沉降曲线

Fig.10 Pile head load-settlement curves of a single pile
derived from a hyperbolic model and a bilinear model

5 结 语

笔者建立了一个基于荷载传递法的单桩非线性受力性状分析软件, 可灵活选用不同的荷载传递函数分析单位侧阻与桩土相对位移间的关系及桩端位移和桩端阻力间的关系, 可将桩分成若干桩段以考虑地基土的成层性, 且在分析单桩的非线性受力性状的过程中可考虑地下水的影响。本文应用该软件对两个工程实例进行了计算, 得出的单桩受力性状与实际情况吻合较好, 基于荷载传递法的单桩非线性受力性状的分析软件是合理可行的, 在单桩非线性受力性状的分析上具有一定的实用价值。

参 考 文 献

[1] KRAFT L M, RAY R P, KAKAACKI T. Theoretical t - z curves[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1981, 107(11): 1543—1561.

[2] ZHANG Q Q, ZHANG Z M, HE J Y. A simplified approach for settlement analysis of single pile and pile

groups considering interaction between identical piles in multilayered soils[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37(7/8): 969—976.

[3] LIU J, XIAO H B, TANG J, et al. Analysis of load-transfer of single pile in layered soil[J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 31(2): 127—135.

[4] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(4): 423—439.

[5] LEE C Y. Discrete layer analysis of axially loaded piles and pile groups[J]. **Computers and Geotechnics**, 1991, 11(4): 295—313.

[6] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. A modified shear displacement method for calculating settlement of single pile[J]. **Advance Materials Research**, 2011, 261—263: 1804—1808.

[7] COMODROMOS E M, PAPADOPOULOU M C, RENTZEPPERIS I K. Pile foundation analysis and design using experimental data and 3D numerical analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(5): 819—836.

[8] TOSINI L, CIVIDINI A, GIODA G. A numerical interpretation of load tests on bored piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37(3): 425—430.

[9] 艾智勇, 成志勇. 层状地基中轴向受荷单桩的边界元法分析[J]. **岩土力学**, 2009, 30(5): 1522—1526.

AI Zhi-yong, CHENG Zhi-yong. Analysis of axially loaded pile in layered soils by boundary element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1522—1526.

[10] AI Z Y, HAN J. Boundary element analysis of axially loaded piles embedded in a multi-layered soil[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(3): 427—434.

[11] CASTELLI F, MAUGERI M. Simplified nonlinear analysis for settlement prediction of pile groups[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(1): 76—84.

[12] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2012, 49(11): 1256—1266.

[13] KEZDI A. The bearing capacity of pile and pile groups[C]//Proceeding of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: [s.n.], 1957: 46—51.

[14] GARDNER W S. Consideration in the design of drilled piers[M]//Design, Construction and Performance of Deep

- Foundation. San Francisco: [s.n.], 1975: 1—32.
- [15] VIJAYVERGIYA V N. Load-movement characteristics of piles[C]//Proc. 4th Symposium of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE. Long Beach, Calif.: [s.n.], 1977: 269—284.
- [16] 李作勤. 摩擦桩的荷载传递及承载力的一些问题[J]. 岩土力学, 1990, 11(4): 1—12.
- LI Zuo-qin. Some problems concerning load transfer and bearing capacity of friction piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1990, 11(4): 1—12.
- [17] RANDOLPH M F, WORTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(4): 423—439.
- [18] LEE C Y. Pile group settlement analysis by hybrid layer approach[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(6): 984—997.
- [19] CLOUGH W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1971, 97(SM12): 1657—1673.
- [20] 张乾青, 李术才, 李利平, 等. 考虑侧阻软化和端阻硬化的群桩沉降简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 615—624.
- ZHANG Qian-qing, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Simplified method for settlement prediction of pile groups considering skin friction softening and end resistance hardening[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(3): 615—624.
- [21] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. Simplified calculation approach for settlement of single pile and pile groups[J]. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2012, 26(6): 750—758.
- [22] ZHANG Q Q, LI S C, LI L P. Field study on the behavior of destructive and non-destructive piles under compression[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2013.
- [23] VESIC A S. Analysis of ultimate loads of soil mechanics and foundations[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering**, 1973, 99(SM1): 45—73.
- [24] JANBU N. Static bearing capacity of friction piles[C]//Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S.l.]: [s.n.], 1976: 479—488.
- [25] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. Complete load transfer behavior of base-grouted bored piles[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2012, 19(7): 2037—2046.
- [26] ZHANG Z M, ZHANG Q Q, YU F. A destructive field study on the behavior of piles under tension and compression[J]. **Journal of Zhejiang University-Science A**, 2011, 12(4): 291—300.
- [27] 张忠苗, 张乾青. 破坏和非破坏后注浆抗压桩受力性状现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1601—1608.
- ZHANG Zhong-miao, ZHANG Qian-qing. Field tests on behavior of destructive and non-destructive base-grouting piles under compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1601—1608.
- [28] 张乾青, 李连祥, 李术才, 等. 成层土中单桩受力性状简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3390—3394.
- ZHANG Qian-qing, LI Lian-xiang, LI Shu-cai, et al. Simplified analytical method for response prediction of single pile embedded into layered soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.1): 3390—3394.
- [29] BRIAUD J L, TUCKER L M, NG E. Axially loaded 5 pile group and single pile in sand[C]//Proceedings of the 12 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S.l.]: [s.n.], 1989: 1121—1124.