

DOI: 10.11779/CJGE202202019

# 多层土中根桩的非线性沉降简化计算方法

罗晓光<sup>1,2</sup>, 任伟新<sup>3\*</sup>, 殷永高<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;  
3. 深圳大学土木与交通工程学院滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室(筹), 广东 深圳 518060)

**摘要:** 根桩是一种新型桩基础, 它通过从桩身预留位置将一定数量的水平根键顶入桩周土体中来提高桩基承载力。为分析多层土中根桩的非线性沉降问题, 基于双曲线函数提出了土-根键的荷载传递模型, 并推导建立了一种多层土中根桩的非线性沉降简化计算方法, 基于 MATLAB 编制了根桩的非线性沉降分析程序。以安徽省池州长江公路大桥工程两根现场试桩为例, 对该方法与现场荷载试验结果以及其它分析方法进行了比较。结果表明, 该方法与实测结果吻合较好, 较其它分析方法更符合根桩的荷载沉降曲线特性。根桩参数分析表明, 根桩的荷载沉降特性对根键的布置形式以及根键侧壁土的荷载传递参数取值不敏感, 但对根键底部土的荷载传递参数取值较敏感。

**关键词:** 根桩; 多层土; 非线性沉降计算; 根键; 双曲线荷载传递函数; 荷载试验; 参数分析

中图分类号: TU476.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)02-0368-09

作者简介: 罗晓光(1983—), 男, 博士, 主要从事基础工程及桩基检测方面的研究。E-mail: 2017010051@mail.hfut.edu.cn。

## Simplified nonlinear method for settlement of root piles in multi-layered soils

LUO Xiao-guang<sup>1,2</sup>, REN Wei-xin<sup>3</sup>, YIN Yong-gao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 3. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities, Ministry of Education, School of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The root pile is a new type of pile, which improves the bearing capacity by penetrating a certain number of horizontal roots into soils from the reserved position of the piles. The load transfer model for the roots of a root pile is proposed based on the hyperbolic function, and a simplified nonlinear method for settlement of the root piles in multilayered soils is derived. An effective computer program based on MATLAB is developed for nonlinearly analyzing the load-settlement behavior of the root piles. The comparisons among the proposed method, other analytical methods and the root pile load test results on sites are carried out in terms of two real case root piles in Chizhou Yangtze River Highway Bridge in Anhui Province, China. It is demonstrated that the proposed method can achieve a good agreement with the measured results, and the load-settlement curve calculated by this method is more consistent with the real load-settlement characteristics of the root piles compared with that of the other analysis methods. The parameter study of the root piles shows that the load-settlement behavior of the root piles is not sensitive to the layout of roots and the load transfer parameters selected at root side-soil interface, but sensitive to the load transfer parameters selected at root base-soil interface.

**Key words:** root pile; multi-layered soil; nonlinear settlement analysis; root; hyperbolic load transfer function; pile load test; parameter study

## 0 引言

桩基础作为一种深基础被广泛应用于房屋、桥梁、海洋平台等结构, 因此提高桩基承载力一直是桩基工程中的一个重要课题。近几十年来, 国内外对桩的结构型式进行了大量的研究, 提出了诸如扩底桩<sup>[1]</sup>、挤扩支盘桩<sup>[2]</sup>、静钻根植竹节桩<sup>[3]</sup>等新型桩基型式。而根桩是近年来提出的一种新型桩基<sup>[4-8]</sup>, 它采用专用的根键顶进装备将预制根键从桩身预留孔处向桩周土体

中水平顶入, 待完成根键顶入后, 将根键尾端与桩身注浆固结或同时浇筑桩身混凝土固结, 从而完成根桩施工<sup>[6]</sup>。根桩适用于深厚软弱覆盖土层, 如中国东部沿海及长江中下游地区, 已被成功应用于安徽省马鞍

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102702); 国家自然科学基金项目(51778204)

收稿日期: 2020-04-15

\*通信作者(E-mail: renwx@szu.edu.cn)

山长江公路大桥及池州长江公路大桥等实际工程<sup>[4, 8]</sup>。现场试桩的荷载试验表明, 根桩的竖向承载力相对同桩长、桩径的传统圆截面桩高 80%~115%<sup>[4]</sup>。

对传统圆截面桩在竖向荷载作用下的荷载沉降理论分析通常分为以下 5 类: 闭式解的简化方法<sup>[9]</sup>、剪切位移法<sup>[10]</sup>、有限元法<sup>[11-12]</sup>、边界元法<sup>[13]</sup>以及荷载传递法<sup>[14-15]</sup>。其中, 荷载传递法应用广泛, 而双曲线模型作为简单实用的荷载传递函数常被用于考虑桩周土界面的非线性荷载沉降关系<sup>[15-16]</sup>以及桩端土界面的非线性荷载沉降关系<sup>[17]</sup>。

然而作为一种新型桩基, 针对根桩的研究尚不多见。殷永高等<sup>[4]</sup>采用数值分析方法对根桩的荷载沉降特性进行了分析, 并采用桩基荷载试验手段<sup>[5]</sup>对根桩与传统圆截面桩的承载力进行了比较分析。在理论分析方面, 胡丰等<sup>[18]</sup>将根键简化为温克勒地基梁, 基于荷载传递法采用线弹性方法研究了根桩在较低荷载工况下的荷载沉降特性。Huang 等<sup>[19]</sup>利用理想弹塑性模型来考虑桩侧土界面的滑移, 利用线弹性模型来考虑桩端土及根键底部土的变形, 研究了较高荷载工况下根桩的荷载沉降特性。

有限元法作为一种数值分析方法, 虽应用广泛但十分耗时且存在较多的模拟不确定性; 而荷载试验法虽直观有效却耗时耗资。在理论分析方面, 针对传统圆截面桩的理论分析方法由于未考虑根键, 显然不适合用来分析根桩。胡丰等<sup>[18]</sup>仅考虑了根桩荷载沉降关系中的线弹性阶段。Huang 等<sup>[19]</sup>虽考虑了桩侧土界面的滑移, 却忽略了根键底部土及桩端土的非线性变形特性以及桩侧土变形曲线中的临塑阶段。事实上, 根桩中由于根键沿桩身由上至下多层布置, 不同层根键其沉降值均不同, 线弹性模型显示不适合描述根键底部土的变形性状。另一方面, 荷载试验<sup>[4, 8]</sup>表明根桩的荷载沉降曲线通常表现为缓降型, 其极限承载力并不明显, 在工程中通常视上部结构要求而定, 这与大直径桩的荷载沉降特性<sup>[15-16]</sup>是相类似的。因此, 在根桩的土-桩以及土-根键间的荷载传递模型中, 其非线性的临塑阶段不容忽视。

本文基于双曲线函数提出了土-根键的荷载传递模型, 并推导建立了一种简单、意义明确的根桩在多层土中的非线性沉降简化计算方法。随后将该方法应用于安徽池州长江公路大桥的两根试桩中, 与荷载试验结果以及其它分析方法进行了对比验证。结果表明, 该方法与实测结果吻合较好, 较其它分析方法更能描述根桩的荷载沉降特性。随后, 基于该方法对根桩进行参数分析, 以进一步了解根桩的荷载沉降特性。

## 1 根桩的非线性沉降分析

根桩基础利用专用设备将预制好的钢筋混凝土根键从桩身的设计根键位置顶入桩周土中, 然后将根键尾端与桩身浇筑成一体<sup>[6]</sup>, 其结构型式如图 1 所示。根桩在承受竖向荷载时, 根键将随桩身一同发生沉降, 由此产生的根键底部地基反力以及根键侧壁的摩擦阻力迅速降低了桩身轴力的向下传递。然而由于根键沿不同深度布置, 因此每层根键的沉降均不同, 通常布置于上层的根键其沉降值大于布置于下层的根键。显而易见, 根键的存在使桩-根键-土的相互作用问题变得复杂, 其相互作用系统模型如图 2 所示。

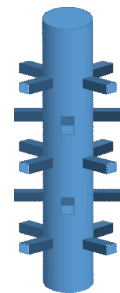


图 1 根桩结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of root pile

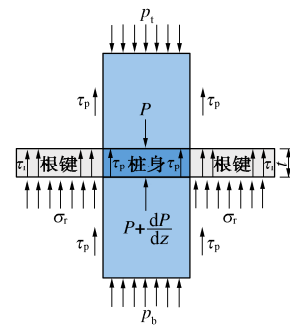


图 2 桩-根键-土相互作用系统模型

Fig. 2 Pile-roots-soil interaction model

### 1.1 基于传递矩阵法理论

如图 2 所示, 对根桩单元进行分析。在竖向荷载作用下根桩单元的力平衡式可表达为

$$\frac{dP}{dz} + U_p \tau_p + \overline{p_r} = 0 \quad (1)$$

式中  $P$  为竖向轴力;  $U_p$  为桩身周长;  $z$  为桩身深度;  $\tau_p$  为桩周摩擦应力;  $\overline{p_r}$  为单位长度的根桩单元中由根键提供的抵抗力, 由根键侧壁的摩擦阻力以及根键底部反力组成。对于单层根键而言,  $\overline{p_r}$  为

$$t \overline{p_r} = t U_r \tau_r + A_r \sigma_r \quad (2)$$

式中  $U_r$  为根键侧壁线长,  $U_r = 2ml$ ;  $A_r$  为根键投影面积,  $A_r = mlb$ ,  $m$  为单层中根键数量,  $l$ ,  $b$ ,  $t$  分别为单个根键的长度、宽度和高度。

故根桩的基本控制平衡方程为

$$\frac{dP}{dz} + U_p \tau_p + U_r \tau_r + \frac{A_r \sigma_r}{t} = 0 \quad (3)$$

当桩单元为不带根键的普通桩单元时： $A_r=0$ ， $U_r=0$ ，式(3)退化成普通等截面桩的基本控制平衡方程形式。因此，在对根桩进行单元划分时，除了在不同土层交界面位置应进行单元划分外，带根键与不带根键的桩身截面交界处也须进行单元划分。

由胡克定律知，在任意单元处存在

$$EA \frac{dS(z)}{dz} = -P \quad (4)$$

因此式(1)可改写为

$$\frac{d^2 S(z)}{dz^2} - \lambda^2 S(z) = 0 \quad (5)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{(U_p k_s + U_r k_r)t + A_r k_v}{EA t}} \quad (6)$$

式中  $A=A_p+A_r$ ， $A_p$ 为桩身截面积； $S(z)$ 为深度  $z$  位置处的桩身沉降值； $E$ 为桩身及根键的弹性模量； $k_s$ ， $k_r$ ， $k_v$ 分别为桩周土界面的剪切刚度、根键侧壁土界面的剪切刚度以及根键底部土的变形刚度。

式(5)的通解为

$$S(z) = a_1 e^{\lambda z} + a_2 e^{-\lambda z} \quad (7)$$

式中， $a_1$ ， $a_2$ 为积分常数，可由桩顶及桩端的边界条件确定。在桩顶存在如下边界条件：

$$\left. \begin{aligned} [S]_0 &= S_0 = a_1 + a_2, \\ [S']_0 &= -\frac{P_0}{EA} = a_1 - a_2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中， $P_0$ ， $S_0$ 分别为桩顶荷载及桩顶沉降。

求解式(8)后代入式(7)中，即得到基桩任意截面位置的沉降表达式：

$$\begin{Bmatrix} S(z) \\ P(z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\lambda h) & -\frac{\sinh(\lambda h)}{EA} \\ -EA\lambda \sinh(\lambda h) & \lambda_i \cosh(\lambda h) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} S_0 \\ P_0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中  $h$ 为桩长，将根桩划分为  $n$ 个单元，则每个单元的长度为  $h_i$ ，假设各单元内的各刚度为常数，则可得第  $i$ 个单元底、顶部状态向量之间的表达式如下：

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} S \\ P \end{Bmatrix}_{b,i} &= \begin{bmatrix} \cosh(\lambda_i h_i) & -\frac{\sinh(\lambda_i h_i)}{EA_i} \\ -EA_i \lambda_i \sinh(\lambda_i h_i) & \lambda_i \cosh(\lambda_i h_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} S \\ P \end{Bmatrix}_{t,i} \\ &= [\Psi]_i \cdot \begin{Bmatrix} S \\ P \end{Bmatrix}_{t,i} \quad (10) \end{aligned}$$

式中， $S_{b,i}$ ， $S_{t,i}$ 分别为第  $i$ 个单元底部及顶部沉降； $P_{b,i}$ ， $P_{t,i}$ 分别为第  $i$ 个单元底部及顶部轴力； $[\Psi]_i$ 为第  $i$ 个单元的传递子矩阵。

根据位移连续条件，相邻两个单元间存在如下关系：

$$\begin{Bmatrix} S \\ P \end{Bmatrix}_{b,i} = \begin{Bmatrix} S \\ P \end{Bmatrix}_{t,i+1} \quad (11)$$

而在桩端处存在边界条件关系： $P_B=k_b S_B$ ， $P_B$ ， $S_B$ 分别为桩端反力与桩端沉降； $k_b$ 为桩端土变形刚度。因此桩端与桩顶状态向量之间的关系可表达如下：

$$\begin{Bmatrix} S \\ P \end{Bmatrix}_B = \begin{Bmatrix} S_B \\ k_b S_B \end{Bmatrix} = [F] \cdot \begin{Bmatrix} S_0 \\ P_0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n [\Psi]_i \quad (13)$$

式中  $P_0$ ， $S_0$ 分别为桩顶荷载及桩顶沉降； $[F]$ 为根桩桩顶与桩端的传递矩阵。因此，桩顶的沉降为

$$S_0 = \frac{f_{22} - k_b f_{12}}{k_b f_{11} - f_{21}} P_0 \quad (14)$$

且同理根桩任意截面处的沉降均可求解。

### 1.2 非线性计算程序

上述分析是基于每个单元的各刚度均为常数的假定，而实际中荷载沉降关系是关于桩身沉降值的非线性函数。采用割线刚度并用迭代法可计算这一非线性问题。当桩身单元划分合适，收敛值较小时，可获得较高的计算精度。程序流程图见图3。

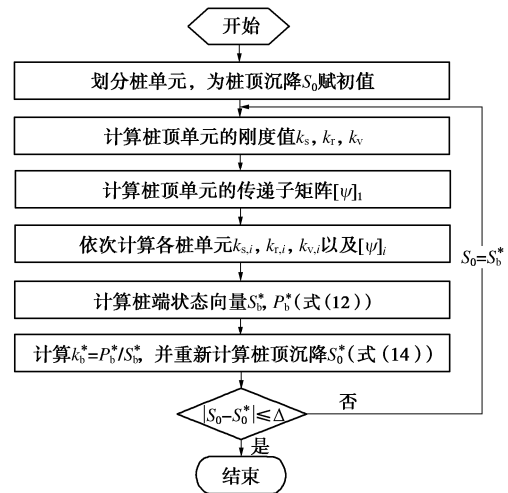


图3 非线性计算程序流程图

Fig. 3 Flow chart of nonlinear calculation process

具体计算步骤如下：①将根桩沿土层及截面交界处划分单元，单元应划分均匀，等截面的同一土层内可划分多个单元；②赋任意桩顶沉降  $S_0$  初值；③计算桩顶单元的各刚度值  $k_s$ ， $k_r$ ， $k_v$ （计算公式见后文）；④计算桩顶单元的传递子矩阵  $[\Psi]_1$ ；⑤依次分别计算各单元的刚度值  $k_s$ ， $k_r$ ， $k_v$ ，以及各单元的传递子矩阵  $[\Psi]_i$ ；⑥利用式(12)计算桩端状态向量  $S_b^*$ ， $P_b^*$ ；⑦计算  $k_b^* = P_b^* / S_b^*$ ，并利用式(14)重新计算得到桩顶沉降值  $S_0^*$ ；⑧设定一个较小收敛值  $\Delta$ ，例如： $\Delta = 1 \times 10^{-5}$ ，判断

$$|S_0 - S_0^*| \leq \Delta \quad (15)$$

是否成立。不成立则令  $S_0 = S_0^*$ ，并重新计算步骤 (3)~(7)，直至收敛条件成立。

## 2 荷载传递模型

由于根键沿桩身不同高度布置，竖向受荷下不同层根键的沉降值均不同，因此本文采用双曲线函数来建立土 - 根键的荷载传递模型。同时，双曲线模型在本文中也用来描述土 - 桩的荷载传递关系。

Seed 等<sup>[14]</sup>提出用双曲线模型来描述桩侧摩阻力与桩身沉降的荷载传递关系，同时双曲线模型也被用于描述桩端反力与桩端沉降之间的关系<sup>[17]</sup>。如图 4 所示，双曲线函数表达割线刚度为

$$k_{(s,b,r,v)} = \frac{1}{a + bS} \quad (16)$$

式中  $a, b$  分别为荷载传递参数；下标  $s, b, r, v$  分别代表桩周、桩端、根键侧壁以及根键底部。

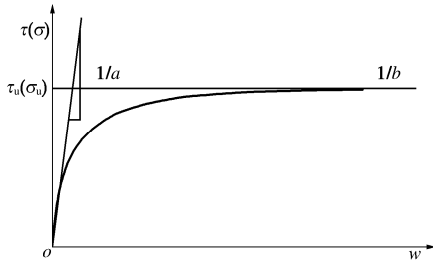


图 4 双曲线荷载传递函数模型

Fig. 4 Hyperbolic load transfer function model

### 2.1 桩周土的荷载传递参数

桩周土的双曲线荷载传递参数可表示为<sup>[9, 13]</sup>

$$a_s = 1/k_{ini} = \frac{R_p \ln(R_m/R_p)}{G_0} \quad (17)$$

$$b_s = 1/\tau_f = \frac{1}{c + K_a \gamma z \tan \phi} \quad (18)$$

式中  $k_{ini}$  为桩周土的初始剪切刚度； $G_0$  为土体初始剪切模量； $R_p, R_m$  分别为桩身半径以及剪切影响半径， $R_m = 2.5L(1-\mu)$ ， $L$  为桩长， $\mu$  为土体泊松比；一般可取  $\ln(R_m/R_p) = 3 \sim 5$ <sup>[20]</sup>； $\tau_f$  为桩侧极限摩阻力； $c$  为土体黏聚力； $K_a$  为主动侧土压力系数； $\gamma$  为土体重度； $\phi$  为桩 - 土界面摩擦角。

### 2.2 根键影响及周围土的荷载传递参数

根键施工是从桩孔内将预制根键水平静压顶入桩周土中<sup>[6]</sup>。根键顶入土体会引起根键周围土体的变形，使根键周围土体变得密实。因此根键周围及根键端部周围一定范围的土体会发生不同程度的扰动和重塑。挤土桩的研究表明：随着桩周土体结构的逐渐恢复，相对于原状土，静压挤扩施工最终提高了桩周土的相对密度、内摩擦角、不排水强度以及变形模量等

土体参数<sup>[9, 21]</sup>。同时周围土体对结构产生了额外的侧向约束应力。对于根键而言：一方面，根键对周围土体的扰动及重塑，以及土体对根键的侧向约束应力会随着根键尺寸的增大而增大，这与挤土桩类似；另一方面，随着根键与根键之间横向距离的缩小，该影响进而又产生重叠、耦合效应。因此，根键的挤扩作用十分复杂。由于该作用于根桩的承载力是有益的，在本文的理论分析中忽略该作用的影响。

另一方面，由于根键的厚度相对桩长较小，根键的长度相对桩周土的剪切影响半径也较小。因此可忽略根键顶进施工对桩周土的径向影响，并假定根键的存在并不改变桩周土的剪切影响半径。

因此，对于桩周土的荷载传递参数计算仍采用原状土参数。在忽略根键顶进施工改变根键周围土体性质的前提下，对根键侧壁土的荷载传递参数可保守取  $a_r = a_s, b_r = b_s$ ；对于根键底部土的荷载传递参数仍采用原状土参数进行计算， $a_v, b_v$  可表示为

$$a_v = \frac{1}{k_0} \left( 1 - \frac{P_c}{P_u} \right) \quad (19)$$

$$b_v = 1/P_u \quad (20)$$

式中  $k_0$  为根键底部土的初始变形刚度； $P_u, P_c$  分别为根键底部土的地基极限承载力及临塑承载力；在双曲线函数中可令  $P_c = 0$ <sup>[22]</sup>。 $k_0$  的计算表达式为<sup>[9]</sup>

$$k_0 = \frac{BE_0}{(1-\mu^2)\omega} \quad (21)$$

$P_u$  的计算表达式为<sup>[23]</sup>

$$P_u = C_1 \gamma_1 B + C_2 \gamma_2 z + C_3 c \quad (22)$$

式中  $B$  为根键底宽； $E_0$  为土体变形模量； $\omega$  为根键底部形状系数<sup>[22]</sup>，见表 1； $C_1, C_2, C_3$  分别为与基础底部土体性质有关的系数<sup>[23]</sup>，见表 2； $\gamma_1, \gamma_2$  分别为根键底部以上土体的平均重度及底部以下土体重度。

表 1 基础形状系数

		Table 1 Geometrical coefficients of foundation					
形状系数	圆形	L/B					
		1	1.5	2	3	4	5
$\omega$	0.79	0.88	1.08	1.22	1.44	1.61	1.72

## 3 试验验证

### 3.1 试验条件

两根试桩均位于安徽池州长江公路大桥南岸。工程场地土层参数中黏聚力、内摩擦角、泊松比及变形模量通过现场取原状土样后在实验室进行三轴压缩试验获得。试验将土样在不同围压下完成固结并施加偏应力进行剪切，获得应力 - 应变曲线以及破坏偏应力。通过应力 - 应变曲线求得变形模量及泊松比，通过绘制应力莫尔圆，计算出黏聚力及内摩擦角。试验获得

表2 系数  $C_1, C_2, C_3$

Table 2 Coefficients  $C_1, C_2$  and  $C_3$

内摩擦角/ $^\circ$	$C_1$ (砂土)	$C_1$ (黏土)	$C_2$	$C_3$
2	0.07	0.04	1.20	5.63
4	0.16	0.09	1.43	6.19
6	0.28	0.16	1.72	6.81
8	0.44	0.25	2.06	7.53
10	0.64	0.36	2.47	8.35
12	0.87	0.50	2.97	9.29
14	1.26	0.69	3.59	10.37
16	1.73	0.95	4.34	11.63
18	2.33	1.27	5.26	13.10
20	3.14	1.70	6.40	14.84
22	4.22	2.26	7.82	16.88
24	5.70	3.01	9.60	19.32
26	7.70	4.07	11.85	22.25
28	10.16	5.38	14.72	25.80
30	14.26	7.32	18.40	30.14
32	19.51	9.90	23.18	35.49
34	27.27	13.83	29.44	42.17
36	37.32	18.92	37.75	50.59
38	54.75	27.10	48.93	61.35
40	77.85	38.20	64.20	75.31

相应的土层参数见表3, 桩位土层示意图见图5。荷载传递参数按式(16)~(22)计算。#1试桩桩径为1.5 m, 桩长为44 m, 由上至下共布置20层根键, 每层根键由4个根键组成, 每个根键尺寸为0.35 m×0.16 m, 相邻层根键以45°角交错布置; #2试桩桩径为2.5 m, 桩长为57 m, 由上至下共布置35层根键, 每层根键由4个根键组成, 每个根键尺寸为0.65 m×0.3 m×0.3 m, 相邻层根键以45°角交错布置。试桩结构图见图6。

表3 工程场地土层参数

Table 3 Soil layers and parameters for real case soils

土层	厚度 /m	$c$ /kPa	$\varphi$ / $^\circ$	$\mu$	$\gamma$ /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E_0$ /MPa
粉质黏土	4.25	13.2	5.9	0.42	1860	4.36
淤泥质粉质黏土	5.60	13.8	6.7	0.42	1980	3.66
粉细砂	30.00	7.0	30.0	0.3	2000	31.00
中粗砂	3.40	5.0	33.0	0.25	2000	36.00
卵石土	4.30	1.0	36.0	0.24	2150	60.00
圆砾土	7.50	1.0	38.0	0.23	2150	61.00
中风化泥质粉砂岩	—	50.0	25.0	0.35	2450	300.00

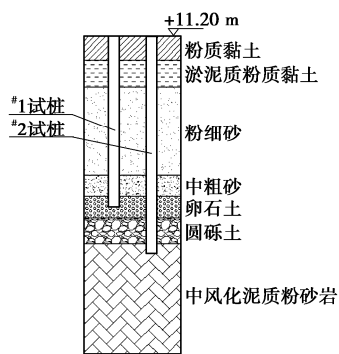


图5 桩位土层示意图

Fig. 5 Soil stratigraphy for the real case root pile site

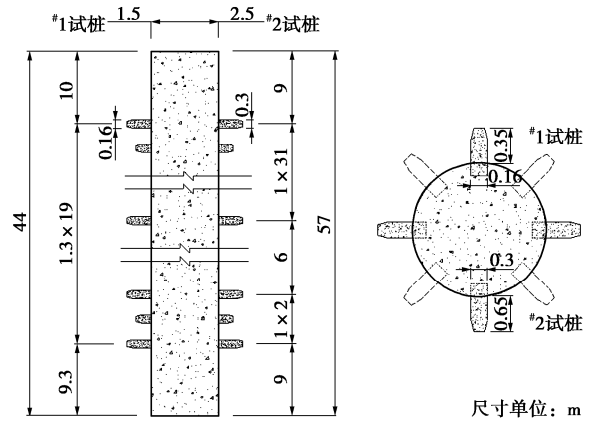


图6 #1, #2试桩桩身结构图

Fig. 6 Schematic details for root piles No. 1 and No. 2

#1试桩采用堆载法进行荷载试验。试验使用8台液压千斤顶在桩顶进行反力分级加载, 采用4只机械百分表进行桩顶沉降量测; 沿桩身等间距布置16层, 每层4支钢筋计用以测试桩身轴力分布。桩端反力通过底层钢筋计直接测试, 桩端刚性沉降则先通过各桩身截面位置的轴力计算出桩身弹性压缩总量, 并联合直接测得的桩顶沉降计算得到。

#2试桩采用自平衡法进行荷载试验。试验在距离桩端5 m处布置一个环形荷载箱, 荷载箱由10只3400 kN千斤顶组合而成。采用6只电子位移计进行位移量测, 其中2只用于量测荷载箱处的桩身向上位移, 2只用于量测荷载箱处的桩身向下位移, 2只用于量测桩顶向上位移。试验过程及结果详情见荷载试验报告<sup>[24]</sup>。试验照片见图7。



(a) #1试桩荷载试验照片



(b) #2试桩荷载试验照片

图7 荷载试验照片

Fig. 7 Photography of site pile load tests

### 3.2 试验结果及验证分析

试验结果及计算分析结果见图8, 9。

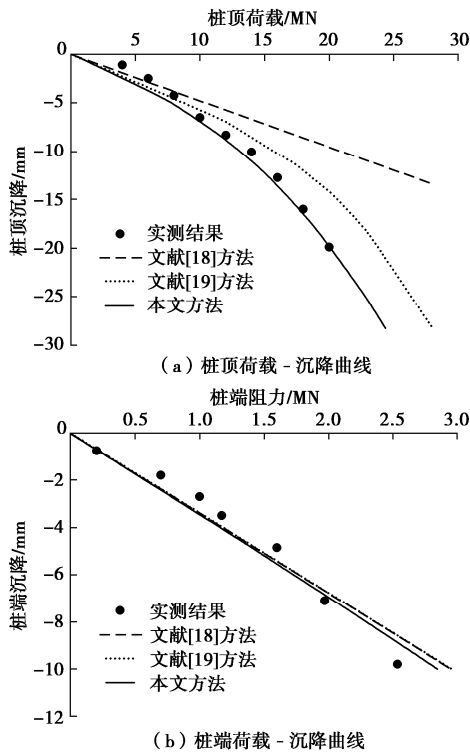


图 8 #1 试桩荷载 - 沉降曲线比较结果

Fig. 8 Comparisons of load-settlement curves for site root pile No. 1

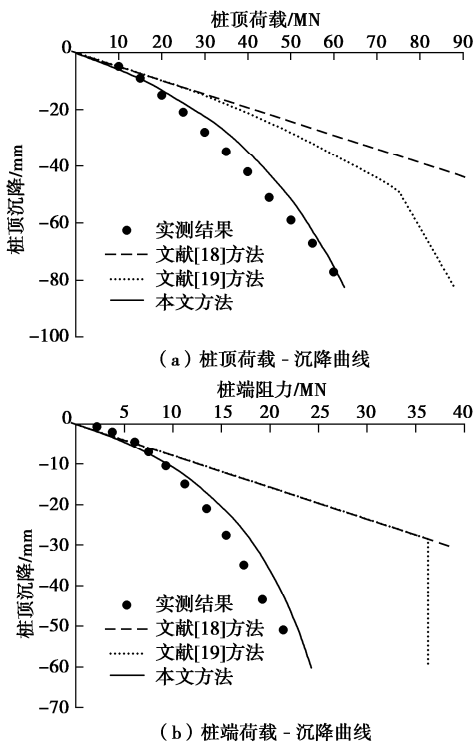


图 9 #2 试桩荷载 - 沉降曲线比较结果

Fig. 9 Comparisons of load-settlement curves for site root pile No. 2

#1 试桩: 由于堆载法加载条件限制, 最大荷载工况为 20 MN, 对应最大实测桩顶沉降为-19.92 mm; 由本文方法的计算值为-19.8 mm, 误差为 1%; 文献[18]

方法的计算值为-9.6 mm, 误差为 52%; 文献[19]方法的计算值为-14.2 mm, 误差为 29%。而采用本文方法计算桩顶荷载沉降曲线的最大计算误差发生在初始加载阶段。在第一级荷载工况 (4 MN) 作用下, 本文方法最大计算误差为 126%, 而文献[19]方法的最大计算误差为 105%。

对于桩端的荷载沉降曲线, 由于荷载工况较小, 3 种计算方法均能与实测曲线有较好的吻合度。

#2 试桩: 对应-40 mm 沉降的桩顶荷载值为 42.1 MN; 由本文方法的计算值为 43.5 MN, 误差为 3%; 文献[18]方法的计算值为 82.5 MN, 误差为 96%; 文献[19]方法的计算值为 64.9 MN, 误差为 54%; 本文方法的桩顶荷载沉降曲线最大计算误差为 16%, 对应荷载工况为 30 MN; 文献[19]方法的最大计算误差为 68%, 对应荷载工况为 40 MN。

对于桩端的荷载沉降曲线, 本文方法的最大计算误差为 56%, 对应荷载工况为 2.2 MN; 文献[19]方法的最大计算误差为 126%, 对应荷载工况为 15.5 MN。

由图 8, 9 可知: 由本文方法计算的荷载沉降曲线最大计算误差通常发生在前几级加载工况, 这里有因沉降值较小而存在量测误差的因素, 还有初始刚度计算偏低的原因。随着荷载增大, 本文方法的计算误差相对其它计算方法更小, 且荷载沉降曲线相对文献[19]方法的桩顶荷载位移曲线更符合实测曲线。而文献[18]方法由于采用线弹性计算, 随着荷载的增大, 计算的桩顶荷载沉降曲线显然失真。

### 4 根桩参数分析

为更好地了解根桩的受力特性, 在本文方法得到验证后, 对根桩的不同布置型式及根键侧壁及底部土的荷载传递参数取值进行参数分析。分析基于一根桩径 1.5 m、桩长 20 m 的虚拟桩进行, 根键尺寸及桩体结构型式见表 4。为方便参数分析, 土层设置为单层均质土, 并不考虑土体性质随深度变化。荷载传递参数采用上节工程场地中第三层土的土层参数进行平均计算, 结果见表 5。

#### 4.1 不同桩体结构型式的影响

图 10 (a) 为不同结构型式的桩顶荷载沉降曲线。由图 9 (a) 可知, 根桩的承载力与同桩长、桩径的无根键普通桩相比有较大程度的提高, 在上述计算参数下其荷载沉降曲线大致与 1.4D 的无根键普通桩相近, 但根桩的荷载位移曲线斜率更低。在均质土的前提下, 根桩的荷载沉降性状与根键布置型式无关。

图 10 (b) 为桩顶荷载为 8 MN 工况下的桩身轴力曲线。由图 9 (b) 可知, 在根键所处位置桩身轴力发生阶梯状降低, 使得桩端阻力得以大幅降低。在根

键总数一定的前提下,不同根键布置型式仅改变轴力突变的位置及幅度,并不改变桩端位置的轴力。

表4 虚拟桩结构型式

Table 4 Structural types of fictitious piles

桩体布置型式	根键数量	根键层数	每层根键数量	根键层间距/m	顶层根键距桩顶/m	根键几何尺寸/m
无根键圆桩	0	0	0	—	—	—
无根键圆桩(1.4D)	0	0	0	—	—	—
根桩型式A	40	10	4	1	6	0.35×0.16×0.16
根桩型式B	40	5	8	2	6	0.35×0.16×0.16
根桩型式C	40	5	8	1	2	0.35×0.16×0.16
根桩型式D	40	5	8	1	9	0.35×0.16×0.16

表5 虚拟桩的荷载传递参数

Table 5 Load transfer parameters of fictitious piles

$1/a_s$	$1/b_s$	$1/a_b$	$1/b_b$	$1/a_r$	$1/b_r$	$1/a_v$	$1/b_v$
$/(MN \cdot m^3)$	$/MPa$	$/(MN \cdot m^3)$	$/MPa$	$/(MN \cdot m^3)$	$/MPa$	$/(MN \cdot m^3)$	$/MPa$
86.96	0.05	57.47	7.46	86.96	0.05	111.73	4.50

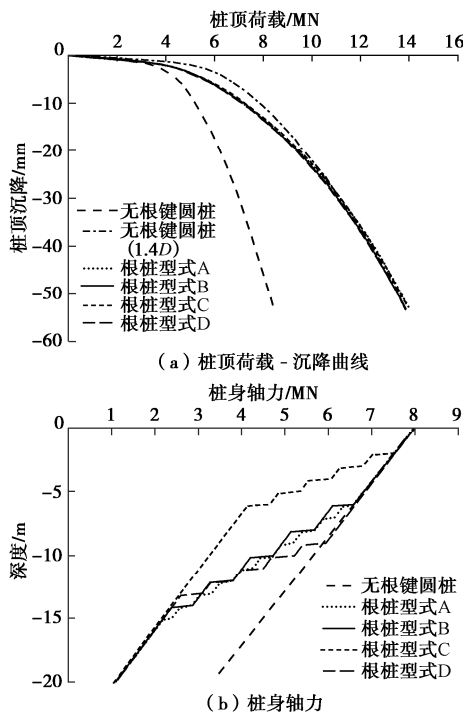


图10 不同桩体结构型式的影响

Fig. 10 Influences of different structural types of root piles

4.2 根键 - 土荷载传递参数影响

分析基于型式A的虚拟根桩进行,采用不同荷载传递参数计算的桩顶荷载沉降曲线见图11。如图11(a)所示:当 $a_r$ 降低到 $0.1a_r$ 时,根桩的桩顶荷载沉降曲线几无变化;如图11(b)所示:当 $b_r$ 降低到 $0.1b_r$ 时,对应40 mm沉降值的桩顶荷载由12.54 MN提高到14.16 MN,提高幅度13%。可见根桩的荷载沉降曲线对根键侧壁的荷载传递参数取值不敏感。

如图11(c)所示:当 $a_v$ 降低到 $0.1a_v$ 时,对应40 mm沉降值的桩顶荷载由12.54 MN提高到16.41

MN,提高幅度为31%;如图11(d)所示:当 $b_v$ 降低到 $0.1b_v$ 时,对应40 mm沉降值的桩顶荷载由12.54 MN提高到15.94 MN,提高幅度为27%。除此之外,根键底部土的荷载传递参数变化显著改变了根桩荷载沉降曲线的形态,其曲线斜率发生较大变化。可见根桩的荷载沉降曲线对根键底部土的荷载传递参数取值较敏感。

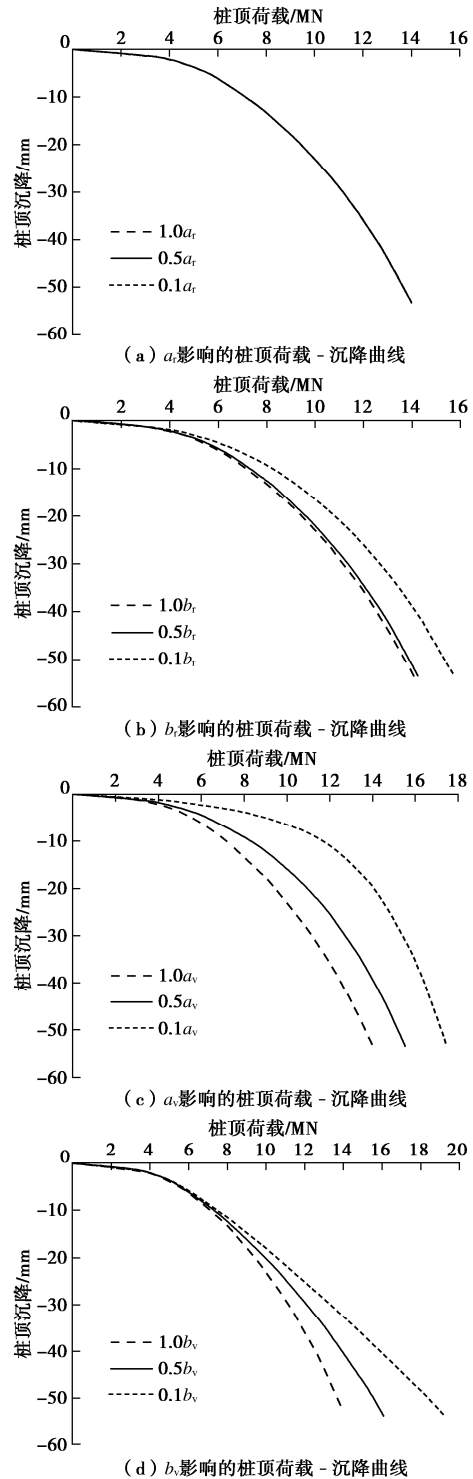


图11 根键 - 土荷载传递参数影响

Fig. 11 Influences of load transfer parameters selected at root-soil interface

## 5 结 论

根桩是近年来发展起来的一种新型桩基, 它通过将沿桩身水平布置的根键顶入桩周土体来获取更高的承载力。本文基于双曲线函数提出了土-根键的荷载传递模型, 并推导建立了根桩在多层土中的非线性沉降简化计算方法。方法应用于池州长江公路大桥两根现场试桩, 并与荷载试验结果以及其它计算方法进行了验证及对比。通过本文的研究, 主要得到了如下两点结论。

(1) 本文提出的根桩中土-根键的双曲线荷载传递函数模型, 以及推导建立的根桩在多层土中的非线性沉降计算方法是可行的, 其计算结果与荷载试验结果取得了良好的一致性。与其它分析方法相比, 基于本文方法计算得到的荷载沉降曲线更符合根桩的荷载沉降特性。

(2) 由于根键与土的相互作用, 根桩相对同桩长及桩径的普通桩具有更高的承载力。参数分析表明, 在相同根键尺寸及数量的前提下, 根桩的荷载沉降特性对不同根键布置型式以及根键侧壁土的荷载传递参数取值不敏感, 对根键底部土的荷载传递参数取值较敏感。

### 参考文献:

- [1] 孔纲强, 周 航. 扩底楔形桩沉桩挤土效应理论分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 9 - 16. (KONG Gang-qiang, ZHOU Hang. Theoretical analysis of soil compaction effect of belled wedge pile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 9 - 16. (in Chinese))
- [2] 王伊丽, 徐良英, 李碧青, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 2): 158 - 162. (WANG Yi-li, XU Liang-ying, LI Bi-qing, et al. Finite element numerical study on the axial bearing behaviors and factors of squeezed branch pile[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 158 - 162. (in Chinese))
- [3] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 570 - 576. (ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 570 - 576. (in Chinese))
- [4] 龚维明, 胡 丰, 童小东, 等. 根式基础竖向承载性能的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1789 - 1795. (GONG Wei-ming, HU Feng, TONG Xiao-dong, et al. Experimental study on vertical bearing capacity of root foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1789 - 1795. (in Chinese))
- [5] 殷永高, 孙敦华, 龚维明. 根式基础承载特性的试验与数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 162 - 169. (YIN Yong-gao, SUN Dun-hua, GONG Wei-ming. Experiment and numerical simulation of the bearing characteristics of root foundations[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 162 - 169. (in Chinese))
- [6] 杨光武, 黄茂松, 张陈蓉. 根式沉井基础力学分析与施工工艺[J]. 桥梁建设, 2011, 41(2): 50 - 54. (YANG Guang-wu, HUANG Mao-song, ZHANG Chen-rong. Mechanical analysis and construction technology of root type caisson foundations[J]. Bridge Construction, 2011, 41(2): 50 - 54. (in Chinese))
- [7] 龚维明, 王 磊, 殷永高. 厚覆盖土层地区根式基础应用与试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 2): 69 - 74. (GONG Wei-ming, WANG Lei, YIN Yong-gao. Applied and experimental study on the root foundation in the thick covering stratum region[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 69 - 74. (in Chinese))
- [8] 余 竹, 殷永高, 杜宪亭. 池州长江公路大桥根式基础承载力试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 13 - 17. (YU Zhu, YIN Yong-gao, DU Xian-ting. Experimental study of bearing capacity of rooted foundation for Chizhou Changjiang river highway bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(4): 13 - 17. (in Chinese))
- [9] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(12): 1465 - 1488.
- [10] GUO W D, RANDOLPH M F. Rationality of load transfer approach for pile analysis[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 23(1/2): 85 - 112.
- [11] SHENG D C, EIGENBROD K D, WRIGGERS P. Finite element analysis of pile installation using large-slip frictional contact[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(1): 17 - 26.
- [12] COMODROMOS E M, PAPADOPOULOU M C, RENTZEPERIS I K. Pile foundation analysis and design using experimental data and 3-D numerical analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5): 819 - 836.
- [13] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundation Analysis and Design [M]. New York: John Wiley and Sons; 1980.
- [14] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1957, 122(1): 731 - 754.



- [15] 肖宏彬. 竖向荷载作用下大直径桩的荷载传递理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005. (XIAO Hong-bin. Theoretical and Application Research on Load Transfer of Vertically Loading Large Diameter Piles[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese))
- [16] 黄明, 江松, 许德祥, 等. 超大直径变截面空心桩的荷载传递特征与理论模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2370 - 2383. (HUANG Ming, JIANG Song, XU De-xiang, et al. Load transfer mechanism and theoretical model of step tapered hollow pile with huge diameter[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2370 - 2383. (in Chinese))
- [17] WANG Z J, XIE X Y, WANG J C. A new nonlinear method for vertical settlement prediction of a single pile and pile groups in layered soils[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 45: 118 - 126.
- [18] 胡丰, 龚维明, 童小东, 等. 含受弯根键的根式沉井承载性能分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 505 - 510. (HU Feng, GONG Wei-ming, TONG Xiao-dong, et al. Analysis of bearing capacity of root-caisson with flexural roots[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 505 - 510. (in Chinese))
- [19] HUANG M S, ZHANG C R, MU L L, et al. Analysis of anchor foundation with root caissons loaded in nonhomogeneous soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(2): 234 - 246.
- [20] BAGUELIN F, FRANK R. Theoretical studies of piles using the finite element method[J]. Numerical Methods in Offshore Piling, 1980, 11: 83 - 91.
- [21] RANDOLPH M F, CARTER J P, WROTH C P. Driven piles in clay—the effects of installation and subsequent consolidation[J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 361 - 393.
- [22] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 679 - 686. (YANG Guang-hua. New computation method for soil foundation settlements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 679 - 686. (in Chinese))
- [23] 陆培炎, 徐振华. 地基的强度与变形的计算[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1978. (LU Pei-yan, XU Zhen-hua. Calculation of Strength and Deformation of Foundation[M]. Xining: Qinghai People's Press, 1978. (in Chinese))
- [24] 南京东大自平衡桩基检测有限公司. 池州长江公路大桥南岸试桩工程试验报告[R]. 南京: 南京东大自平衡桩基检测有限公司, 2015. (Nanjing Dongda Self-balancing Pile Testing Co Ltd. Test Report on the Test Pile of the South Bank of Chizhou Yangtze River Highway Bridge[R]. Nanjing: Nanjing Dongda Self-balancing Pile Testing Co Ltd, 2015. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究所承办,国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中位于前列;本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录;本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录;本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录;本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cegejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4开, 双栏排版, 192页, 每月中旬出版, 每期定价40元, 全年定价480元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)