

DOI: 10.11779/CJGE201809014

# 二段线弹性海床上悬链线立管触地段贯入响应解析解

王 腾, 杜宝平

(中国石油大学(华东)船舶与海洋工程系, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 钢悬链线立管触地段管土作用对管线埋深及管线寿命的影响显著。对触地段管土相互作用  $p$ - $y$  曲线用二段线弹性近似, 考虑了土体刚度的非线性, 更好地反映土体刚度随管线贯入深度增大而降低的特性。根据贯入深度建立了多段管线控制微分方程, 结合边界条件求得静力状态下管线贯入响应的解析表达式。在验证解析解正确的基础上, 对土体刚度变化、泥线处土体不排水抗剪强度、土体强度梯度、外部弯矩荷载及管线自重下的管线贯入响应进行了分析。结果表明二段线弹性模型中得到的土体阻力与  $p$ - $y$  曲线更接近。管线贯入深度随泥线处土体不排水抗剪强度、土体强度梯度的增大而减小。外部弯矩荷载的增大会使管线贯入深度及触地段管线的最大剪力变大。管线自重增加会使管线贯入深度增加, 弯矩增大。

**关键词:** 悬链线立管; 管土相互作用; 土体弹簧刚度; 解析解

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)09-1676-08

作者简介: 王 腾(1973-), 男, 山东海阳人, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: wteng73@upc.edu.cn。

## Analytical solution for penetration response of steel catenary riser at touchdown zone on bilinear seabed

WANG Teng, DU Bao-ping

(Department of Offshore Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The pipe-soil interaction at touchdown zone (TDZ) of steel catenary riser (SCR) has important influences on the penetration depth and fatigue life of pipelines. A model considering non-linearity of soil stiffness is established by using bilinear linear soil stiffness approximation of  $p$ - $y$  curve. The model reflects the characteristics of the soil stiffness decreasing with the increase of the penetration depth of the pipelines. The differential equation for pipelines is established and the analytic expression for the penetration response of pipelines in static state is obtained based on boundary conditions. After justifying the correctness of the model, four factors that influence the penetration response of pipelines are analyzed: the shear strength of mudline, the gradient of soil shear strength, the external bending moment load and the weight of pipelines. The results show that the penetration depth of pipelines increases with the decrease of the shear strength of mudline and the gradient of the soil shear strength. And if the external bending moment load increases, the penetration depth of pipelines will increase and the maximum shear force will also increase. Due to the increase of weight of pipelines, the penetration depth of pipelines and bending moment will increase.

**Key words:** steel catenary riser; pipe-soil interaction; soil stiffness; analytical solution

## 0 引言

随着海洋油气的开发逐步向深水及超深水发展, 钢悬链线立管 (steel catenary riser, SCR) 由于较大的柔性和低廉的造价而得到了广泛的应用, 是深水油气田开发的首选立管形式。在触地段 (TDZ), 管线会受到由悬链线形状产生的集中载荷以及由于铺管船及水动力导致的水平及垂向振动产生的动态载荷<sup>[1]</sup>。

为保证钢悬链线立管在安装和使用过程中的安全, 计算立管受力及触地点疲劳损伤预报是非常重要的。钢悬链线立管触地点 (TDP) 管土相互作用非常

复杂<sup>[2-3]</sup>。悬链线立管触地点的疲劳寿命与海床刚度有很大关系, 一般来说刚性海床要比线弹性海床预报的疲劳寿命损伤高<sup>[4]</sup>。因此, 基于传统海床模型的立管设计通常采用偏高的海床刚度以确保立管的安全性。

Bridge 等<sup>[5]</sup>总结了管土相互作用模型, 提出了立管的初始贯入  $p$ - $y$  曲线模型。Aubeny 等<sup>[6]</sup>根据  $p$ - $y$  初始贯入曲线, 将触地段管土相互作用简化为非线性弹簧地基梁模型。Lenci 等<sup>[7]</sup>提出了一个三场模型在悬

链线和弹性海床接触区域建立了一个新的过渡边界层, 触地段土体刚度采用单刚度弹簧模拟。Rezazadeh 等<sup>[8]</sup>将土体刚度简化为一常数, 采用解析法对立管在刚-塑性海床、塑性海床和沟状海床 3 种不同海床模型下的管线受力进行了研究。Yuan 等<sup>[9]</sup>假定海床土体刚度为常数, 提出了管线在弹塑性海床上管线铺设的简化的解析解。但是触地段管线在贯入过程中, 土体刚度会逐渐降低。上述文献中将土体视为单刚度弹簧不能反映土体刚度随深度降低的非线性特性。并且, 用单一刚度弹簧模拟海床土体时, 由于贯入深度未知, 土体刚度是一个近似值, 计算结果不准确。要得到比较精确的土体刚度, 须迭代计算。而且得到的土体刚度只针对某一特定的外部荷载环境, 当外部荷载发生变化时, 管线贯入深度会发生变化, 对应的土体刚度也会发生变化。因此用单一刚度弹簧模拟海床土体时, 过程复杂, 适用范围窄。

本文将 Bridge  $p-y$  曲线用二段变刚度的线弹性模型近似, 能更好地反映土体刚度随管线贯入深度增大而降低的特性, 并采用解析法对触地段立管的贯入特性进行静力分析。

## 1 触地段管土作用模型方程的求解

### 1.1 管土相互作用的二段线弹性模型

本文根据 Bridge  $p-y$  管土相互作用曲线, 如图 1 所示, 将管线贯入阻力用二段线弹性模型近似, 模拟土体刚度随管线贯入深度增加而减小的特性。当管线贯入深度小于  $u_1$  时, 土体弹簧刚度为  $k_1$ ; 当管线贯入深度大于  $u_1$  时, 土体弹簧刚度为  $k_2$ 。

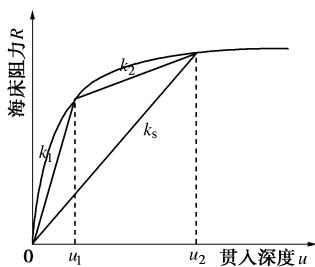


图 1 二段线弹性模型

Fig. 1 Bilinear soil stiffness model

### 1.2 触地段管线方程的求解

基于改进的管土相互作用弹簧-梁模型如图 2 所示。根据  $p-y$  管土相互作用曲线, 将触地段管线分为 1, 2, 3 段, 管段 1 处于  $(b_1, 0)$ , 贯入深度小于  $u_1$ , 土体弹簧刚度为  $k_1$ ; 管段 2 处于  $(b_2, b_1)$ , 贯入深度大于  $u_1$ , 土体弹簧刚度为  $k_2$ ; 管段 3 处于  $(L, b_2)$ , 土体弹簧刚度为  $k_1$ 。

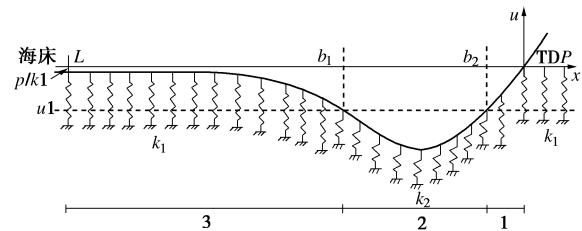


图 2 改进的管土相互作用弹簧-梁模型

Fig. 2 Improved pipe-soil interaction model

对触地段管线进行受力分析, 可以得到描述管土相互作用的控制微分方程<sup>[10]</sup>。

首先对第 1 段管线研究, 贯入深度小于  $u_1$ , 土体刚度为  $k_1$ 。根据管线静力平衡条件, 得到 1 段管线的控制方程:

$$EI \frac{d^4 U_1}{dx^4} - H \frac{d^2 U_1}{dx^2} + k_1 U_1 = p \quad (b_1 \leq x \leq 0) .$$

通解为

$$U_1(x) = \frac{p}{k_1} + C_{11} e^{\alpha_1 x} \cos(\beta_1 x) + C_{12} e^{\alpha_1 x} \sin(\beta_1 x) + C_{13} e^{-\alpha_1 x} \cos(\beta_1 x) + C_{14} e^{-\alpha_1 x} \sin(\beta_1 x) \quad (b_1 \leq x \leq 0) ,$$

式中,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{14}$  为未知系数,  $p$  为管线水下单位长度重量,  $\alpha_1 = \sqrt{\sqrt{\frac{k_1}{4EI}} + \frac{H}{4EI}}$ ,  $\beta_1 = \sqrt{\sqrt{\frac{k_1}{4EI}} - \frac{H}{4EI}}$ 。

第 1 段管线的转角、弯矩和剪力为

$$\left. \begin{aligned} \psi_1(x) &= U_1'(x), M_1(x) = -EIU_1''(x) , \\ S_1(x) &= -EIU_1''(x) . \end{aligned} \right\} \quad (1b)$$

再对第 2 段管线研究, 贯入深度大于  $u_1$ , 土体弹簧刚度  $k_2$ 。根据管线静力平衡条件, 得到第 2 段管线的控制方程:

$$EI \frac{d^4 U_2}{dx^4} - H \frac{d^2 U_2}{dx^2} + k_2 (U_2 - u_1) + k_1 u_1 = p \quad (b_2 < x < b_1) .$$

通解为

$$U_2(x) = C_{21} e^{\alpha_2 x} \cos(\beta_2 x) + C_{22} e^{\alpha_2 x} \sin(\beta_2 x) + C_{23} e^{-\alpha_2 x} \cos(\beta_2 x) + C_{24} e^{-\alpha_2 x} \sin(\beta_2 x) + \frac{(k_2 - k_1)u_1 + p}{k_2} \quad (b_2 < x < b_1) . \quad (2a)$$

式中  $C_{21}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$  为未知系数;  $\alpha_2 = \sqrt{\sqrt{\frac{k_2}{4EI}} + \frac{H}{4EI}}$ ;  $\beta_2 = \sqrt{\sqrt{\frac{k_2}{4EI}} - \frac{H}{4EI}}$ 。

同样可得到第 2 段管线的转角、弯矩和剪力:

$$\left. \begin{aligned} \psi_2(x) &= U_2'(x), M_2(x) = -EIU_2''(x) , \\ S_2(x) &= -EIU_2''(x) . \end{aligned} \right\} \quad (2b)$$

最后对第 3 段管线研究, 在流线段管线贯入深度减小到  $u_1$  时, 土体弹簧刚度为  $k_1$ 。根据管线静力平衡条件得到第 3 段管线控制方程为

$$EI \frac{d^4 U_3}{dx^4} - H \frac{d^2 U_3}{dx^2} + k_1 U_3 = p \quad (L \leq x \leq b_2) .$$

通解为

$$\begin{aligned} U_3(x) &= \frac{p}{k_1} C_{31} e^{\alpha_3 x} \cos(\beta_3 x) + C_{32} e^{\alpha_3 x} \sin(\beta_3 x) + \\ &C_{33} e^{-\alpha_3 x} \cos(\beta_3 x) + C_{34} e^{-\alpha_3 x} \sin(\beta_3 x) \quad (L \leq x \leq b_2) . \end{aligned} \quad (3a)$$

式中  $C_{31}$ ,  $C_{32}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{34}$  为未知系数;  $\alpha_3 = \sqrt{\sqrt{\frac{k_1}{4EI}} + \frac{H}{4EI}}$ ;  $\beta_3 = \sqrt{\sqrt{\frac{k_1}{4EI}} - \frac{H}{4EI}}$ 。

得到第 3 段管线的转角、弯矩和剪力:

$$\left. \begin{aligned} \psi_3(x) &= U'_3(x), M_3(x) = -EIU''_3(x), \\ S_3(x) &= -EIU'''_3(x) . \end{aligned} \right\} \quad (3b)$$

上述方程中  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$ ,  $C_{i3}$ ,  $C_{i4}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为未知数, 共 12 个未知数。根据管线在  $b_1$ ,  $b_2$  处的连续性条件可建立 8 个方程, 同时根据管线首尾两端的边界条件可以建立 4 个方程, 一共 12 个未知数 12 个方程, 上述方程可求解。

首先由  $x=b_1$ ,  $b_2$  处管线的连续性条件, 得到

$$\begin{bmatrix} U_1(b_1) \\ \psi_1(b_1) \\ M_1(b_1) \\ S_1(b_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_2(b_1) \\ \psi_2(b_1) \\ M_2(b_1) \\ S_2(b_1) \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} U_2(b_2) \\ \psi_2(b_2) \\ M_2(b_2) \\ S_2(b_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_3(b_2) \\ \psi_3(b_2) \\ M_3(b_2) \\ S_3(b_2) \end{bmatrix} . \quad (4)$$

将式(1)、(2)、(3)代入式(4)中, 得到系数  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$ ,  $C_{i3}$ ,  $C_{i4}$  的矩阵方程组:

$$\begin{aligned} T_2(b_1) \cdot Y_2 + \left[ \frac{(k_2 - k_1)u_1 + p}{k_2}, 0, 0, 0 \right]^T \\ = T_1(b_1) \cdot Y_1 + \left[ \frac{p}{k_1}, 0, 0, 0 \right]^T , \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_3(b_2) \cdot Y_3 + \left[ \frac{p}{k_1}, 0, 0, 0 \right]^T \\ = T_2(b_2) \cdot Y_2 + \left[ \frac{(k_2 - k_1)u_1 + p}{k_2}, 0, 0, 0 \right]^T . \end{aligned} \quad (6)$$

式中,

$$Y_1 = (C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14})^T; \quad Y_2 = (C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24})^T;$$

$$Y_3 = (C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34})^T; \quad T_i(x) = \begin{bmatrix} t_{11}^i & t_{12}^i & t_{13}^i & t_{14}^i \\ t_{21}^i & t_{22}^i & t_{23}^i & t_{24}^i \\ t_{31}^i & t_{32}^i & t_{33}^i & t_{34}^i \\ t_{41}^i & t_{42}^i & t_{43}^i & t_{44}^i \end{bmatrix} .$$

矩阵中各元素为 ( $i=1, 2, 3$ )

$$\begin{aligned} t_{11}^i &= e^{\alpha_i x} \cos(\beta_i x); \quad t_{12}^i = e^{\alpha_i x} \sin(\beta_i x); \\ t_{13}^i &= e^{-\alpha_i x} \cos(\beta_i x); \quad t_{14}^i = e^{-\alpha_i x} \sin(\beta_i x); \\ t_{21}^i &= \alpha_i t_{11}^i - \beta_i t_{12}^i; \quad t_{22}^i = \alpha_i t_{12}^i + \beta_i t_{11}^i; \\ t_{23}^i &= -\alpha_i t_{13}^i - \beta_i t_{14}^i; \quad t_{24}^i = -\alpha_i t_{14}^i + \beta_i t_{13}^i; \\ t_{31}^i &= -EI(\alpha_i^2 t_{11}^i - 2\alpha_i \beta_i t_{12}^i - \beta_i^2 t_{11}^i); \\ t_{32}^i &= -EI(\alpha_i^2 t_{12}^i + 2\alpha_i \beta_i t_{11}^i - \beta_i^2 t_{12}^i); \\ t_{33}^i &= -EI(\alpha_i^2 t_{13}^i + 2\alpha_i \beta_i t_{14}^i - \beta_i^2 t_{13}^i); \\ t_{34}^i &= -EI(\alpha_i^2 t_{14}^i - 2\alpha_i \beta_i t_{13}^i - \beta_i^2 t_{14}^i); \\ t_{41}^i &= -EI(\alpha_i^3 t_{11}^i - 3\alpha_i^2 \beta_i t_{12}^i - 3\alpha_i \beta_i^2 t_{11}^i + \beta_i^3 t_{11}^i); \\ t_{42}^i &= -EI(\alpha_i^3 t_{12}^i + 3\alpha_i^2 \beta_i t_{11}^i - 3\alpha_i \beta_i^2 t_{12}^i - \beta_i^3 t_{11}^i); \\ t_{43}^i &= -EI(-\alpha_i^3 t_{13}^i - 3\alpha_i^2 \beta_i t_{14}^i + 3\alpha_i \beta_i^2 t_{13}^i + \beta_i^3 t_{14}^i); \\ t_{44}^i &= -EI(-\alpha_i^3 t_{14}^i + 3\alpha_i^2 \beta_i t_{13}^i + 3\alpha_i \beta_i^2 t_{14}^i - \beta_i^3 t_{13}^i) . \end{aligned}$$

将式(5)代入式(6), 等式两边求逆, 可得到  $Y_1$  关于  $Y_3$  的表达式:

$$Y_3 = N \cdot Y_1 + h , \quad (7)$$

其中,  $N$ ,  $h$  为式(5)代入式(6)中化简为式(7)后各项对应的矩阵。

利用管线在 TDP 处及末端的边界条件求解  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$ ,  $C_{i3}$ ,  $C_{i4}$ 。

在 TDP 处,  $x=0$ ,  $M_1(0)=M_0$ ;  $U_1(0)=0$ :

$$\begin{bmatrix} U_1(0) \\ M_1(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -EI(\alpha_1^2 - \beta_1^2) & -2EI\alpha_1\beta_1 & -EI(\alpha_1^2 - \beta_1^2) & 2EI\alpha_1\beta_1 \end{bmatrix} \cdot Y_1 + \begin{bmatrix} p/k_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ M_0 \end{bmatrix} . \quad (8)$$

立管末端:  $x_3=L$  时,  $U_3(L)=p/k_1$ ;  $\psi_3(L)=0$ :

$$\begin{bmatrix} U_3(L) \\ \psi_3(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^3 & t_{12}^3 & t_{13}^3 & t_{14}^3 \\ t_{21}^3 & t_{22}^3 & t_{23}^3 & t_{24}^3 \end{bmatrix} \cdot Y_3 + \begin{bmatrix} p/k_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p/k_1 \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)得到

$$\begin{bmatrix} U_3(L) \\ \psi_3(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot Y_1 + \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} , \quad (10)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^3 & t_{12}^3 & t_{13}^3 & t_{14}^3 \\ t_{21}^3 & t_{22}^3 & t_{23}^3 & t_{24}^3 \end{bmatrix} \cdot N , \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^3 & t_{12}^3 & t_{13}^3 & t_{14}^3 \\ t_{21}^3 & t_{22}^3 & t_{23}^3 & t_{24}^3 \end{bmatrix} \cdot h . \quad (12)$$

联立式(8)、(10)可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -EI(\alpha_1^2 - \beta_1^2) & -2EI\alpha_1\beta_1 & -EI(\alpha_1^2 - \beta_1^2) & 2EI\alpha_1\beta_1 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1 \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p/k_1 \\ 0 \end{bmatrix} .$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p/k_1 \\ M_0 \\ -d_{31} \\ -d_{41} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

解得

$$C_{14} = \frac{a_2[-d_{41} + (p/k_1)m_{41}] - m_{42}[M_0 + (p/k_1)a_1]}{a_2(m_{43} - m_{41}) - m_{42}(a_3 - a_1)} - \frac{a_2m_{44} - m_{42}a_4}{a_2(m_{43} - m_{41}) - m_{42}(a_3 - a_1)} - \frac{a_2m_{34} - m_{32}a_4}{a_2(m_{33} - m_{31}) - m_{32}(a_3 - a_1)} - \frac{a_2[-d_{31} + (p/k_1)m_{31}] - m_{32}[M_0 + (p/k_1)a_1]}{a_2(m_{33} - m_{31}) - m_{32}(a_3 - a_1)} - \frac{a_2(m_{33} - m_{31}) - m_{32}(a_3 - a_1)}{a_2(m_{43} - m_{41}) - m_{42}(a_3 - a_1)} - \frac{a_2m_{34} - m_{32}a_4}{a_2(m_{33} - m_{31}) - m_{32}(a_3 - a_1)}, \quad (14)$$

$$C_{13} = \frac{a_2[-d_{31} + (p/k_1)m_{31}] - m_{32}[M_0 + (p/k_1)a_1]}{a_2(m_{33} - m_{31}) - m_{32}(a_3 - a_1)} - \frac{a_2m_{34} - m_{32}a_4}{a_2(m_{33} - m_{31}) - m_{32}(a_3 - a_1)} - C_{14}, \quad (15)$$

$$C_{12} = \frac{M_0 + (p/k_1)a_1}{a_2} - \frac{a_3 - a_1}{a_2} C_{13} - \frac{a_4}{a_2} C_{14}, \quad (16)$$

$$C_{11} = -p/k_1 - C_{13}, \quad (17)$$

式中,  $a_1 = -EI(\alpha_1^2 - \beta_1^2)$ ,  $a_2 = -2EI\alpha_1\beta_1$ ,  $a_3 = -EI(\alpha_1^2 - \beta_1^2)$ ,  $a_4 = 2EI\alpha_1\beta_1$ 。

至此, 便得到了  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{14}$  关于  $b_1$  及  $b_2$  的解。再由式 (5)、(6) 可以解得所有的未知系数  $C_{21}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ;  $C_{31}$ ,  $C_{32}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{34}$  关于  $b_1$  及  $b_2$  的解。因此只要得到  $b_1$ ,  $b_2$  就可以得到  $U_i(x)$  的表达式。

$b_1$ ,  $b_2$  可以通过两个已知条件得到, 即当  $x=b_1$  时, 立管的贯入深度达到  $u_1$ ; 当  $x=b_2$  时, 立管贯入深度为  $u_1$ 。即

$$\left. \begin{array}{l} U_1(b_1) = U_2(b_1) = u_1, \\ U_2(b_2) = U_3(b_2) = u_1. \end{array} \right\} \quad (18)$$

利用式(18)求得  $b_1$ ,  $b_2$  的具体数值带入到式(5)、(6)、(14)~(17) 中, 得到触地段管线方程的解析解。

当管线在自重下的贯入深度  $p/k_1 > u_1$  时, 如图 2 所示, 第 3 段管线与第 2 段管线处于同一土层中。此时可将 2, 3 段管线视为同一段管线, 因此, 将原模型的第 2 段管线的控制方程替换第 3 段管线的控制方程。然后, 按照文中的求解方法即可求得结果。

## 2 模型验证

为验证上述模型的正确性, 分别对基于有限元软

件 ANSYS 和本文模型的管线贯入响应进行比较。管线参数<sup>[11]</sup>为外径  $D$  为 0.324 m, 壁厚  $\tau$  为 0.0205 m, 抗弯刚度  $EI$  为  $4.67 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, 管线密度  $\rho_p$  为 7850 kg/m<sup>3</sup>, 管线水下质量  $m_s$  为 100 kg/m, 水深  $Y_0$  为 1600 m, 铺设角  $\varphi_0$  为 78°。土体为黏土, 泥线处不排水抗剪强度  $S_{u0}=2.6$  kPa, 强度梯度  $S_{ug}=1.25$  kPa/m。根据 Aubeny<sup>[12]</sup>,  $a=6.73$ ,  $b=0.29$ , 取  $u_1=0.01$  m 可以比较合理的拟合  $p$ - $y$  曲线, 得到二段线弹性海床土体弹簧刚度  $k_1=207$ ,  $k_2=19.214$  kN/m<sup>2</sup>, 如图 3 所示。在 ANSYS 软件中, 管线用单元 PIPE288 模拟, 土体用非线性弹簧单元 COMBINE39 模拟。得到管线的贯入深度和土体阻力如图 4 所示, 结果非常吻合, 验证本文的解析解的正确性。

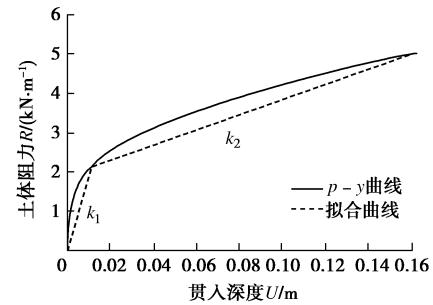


图 3 土体阻力及拟合曲线

Fig. 3 Soil resistances and fitting curves

## 3 参数分析

为了进一步阐释本文的二段线弹性模型, 分别基于二段线弹性模型和单刚度模型对管线的贯入深度、弯矩、剪力和土体阻力进行对比。管线参数同前。

管线在 TDP 处施加的外部弯矩荷载  $M_0$ <sup>[13]</sup>:

$$\frac{M_0}{\lambda^2 p} \approx 1 - \frac{1}{1 + (T_0/\lambda p)^{0.9}}, \quad (19)$$

$$\text{式中, } \lambda = \sqrt{\frac{EI}{T_0}}, \quad T_0 = Y_0 m_s g \frac{\cos \varphi_0}{1 - \cos \varphi_0}.$$

海床阻力  $R$  为

$$R = a(u/D)^b (S_{u0} + S_{ug}u)D. \quad (20)$$

式中  $S_{u0}$  为泥线处土体不排水抗剪强度;  $S_{ug}$  为土体强度梯度;  $a$ ,  $b$  为经验系数。

### 3.1 改进的模型与线弹性模型的对比

土体参数及管线参数与第 2 部分模型验证中的参数一致。得到二段线弹性海床土体弹簧刚度  $k_1=207$  kN/m<sup>2</sup>,  $k_2=19.214$  kN/m<sup>2</sup>。通过式 (19) 得到弯矩  $M_0=107.2$  kN·m。

根据 Bridge<sup>[14]</sup>, 单刚度模型中, 海床刚度  $k_s$  为

$$k_s = \frac{R_c}{z_p} = \frac{m_s g \sqrt{\frac{EI}{T_0}}}{z_p} \quad (21)$$

式中  $R_c$  为 TDP 处管土相互作用力;  $z_p$  为骨干曲线上土体阻力等于  $R_c$  时管线的贯入深度。

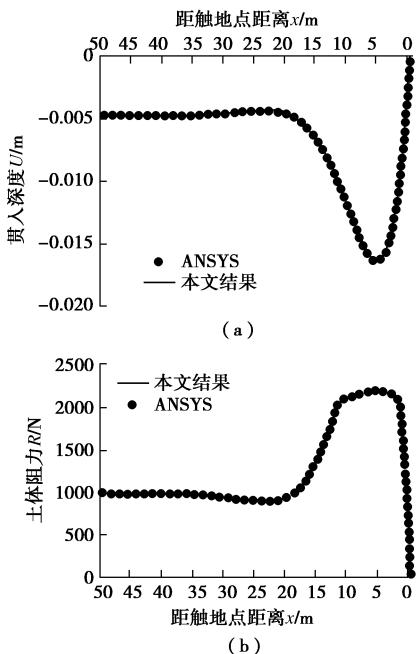


图 4 模型验证

Fig. 4 Model verification

得到单刚度模型初次刚度  $k_{s1}=12.532 \text{ kN/m}^2$ , 对应的贯入深度  $z_p=0.833 \text{ m}$ 。据此刚度计算得到的管线贯入深度为 0.096 m, 管线贯入深度相差较大。为了得到比较精确的土体刚度, 需进行迭代计算, 迭代过程如图 5 所示。贯入深度 0.096 m 时的单刚度模型刚度  $k_{s2}=43.417 \text{ kPa}$ , 计算得到管线贯入深度为 0.038。依次类推, 得到  $k_{s10}=139.026 \text{ kPa}$ , 对应的贯入深度为 0.0177 m, 等于计算得到的贯入深度。

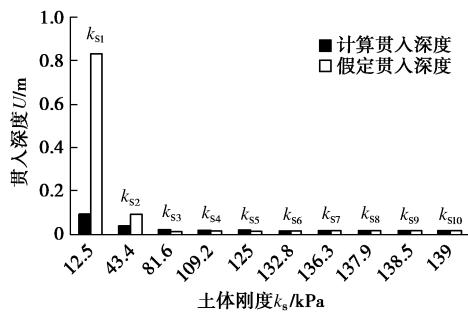


图 5 线弹性弹簧刚度的迭代

Fig. 5 Iteration of linear elastic spring stiffness

通过二段线弹性模型、单刚度模型  $k_{s10}$  及  $k_{s1}$  计算得到的管线贯入响应如图 6 所示。二段线弹性模型中管线在  $x=-5.4 \text{ m}$  处达到最大贯入深度  $u=-0.01635 \text{ m}$ ; 单刚度模型  $k_{s1}$  中管线在  $x=-15.6 \text{ m}$  处达到最大贯入深

度  $u=-0.0961 \text{ m}$ , 是二段线弹性模型最大贯入深度的 4.8 倍; 基于迭代后单刚度模型  $k_{s10}$  管线在  $x=-5.7 \text{ m}$  处达到最大贯入深度  $u=-0.0177 \text{ m}$ , 比二段线弹性模型中管线的最大贯入深度大 7.9%。从图 6 (b) 中可以看出, 在管线贯入过程中, 二段线弹性模型中海床阻力的增加速率随管线贯入深度的增加而减小, 当管线贯入深度较小时, 土体阻力迅速增加; 当土体产生塑性变形时, 土体阻力增加变小, 更加符合  $p-y$  曲线。从图 (c)、(d) 中可以看出迭代后单刚度模型  $k_{s10}$  中管线的剪力、弯矩与二段线弹性模型上的剪力、弯矩相差不大, 而单刚度模型  $k_{s1}$  中管线弯矩要比其他两个模型的弯矩大很多。

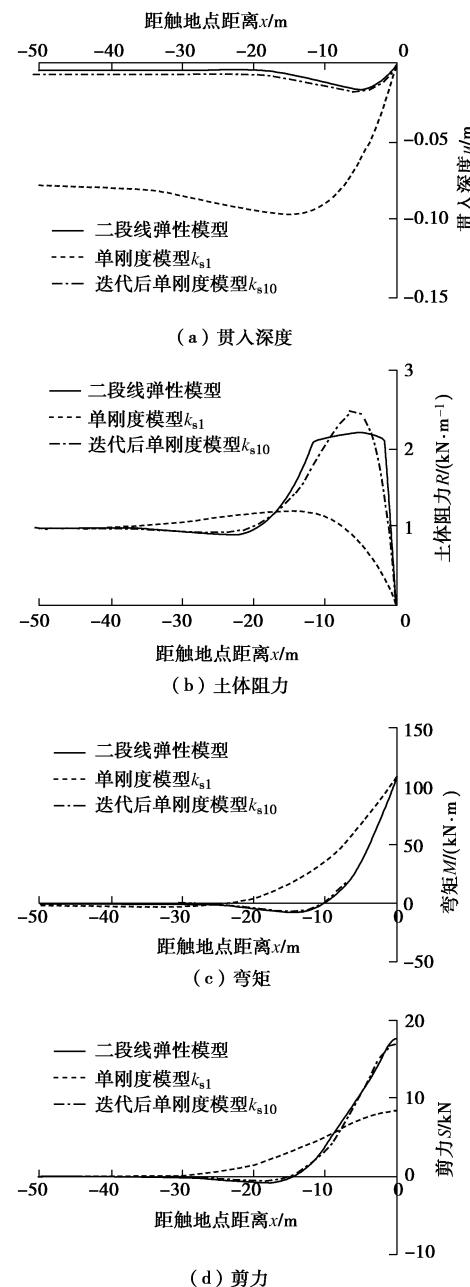


图 6 3 种模型的管线

Fig. 6 Comparison among three models

### 3.2 泥线处不排水抗剪强度 $S_{u0}$ 对管线贯入的影响

土体阻力  $R$  与经验系数  $a, b$ , 管线直径  $D$ 、泥线处土体不排水抗剪强度  $S_{u0}$ 、土体强度梯度  $S_{ug}$  及管线的贯入深度  $u$  有关。为了研究泥线处  $S_{u0}$  对管线贯入的影响, 选取泥线处  $S_{u0}=2.0, 2.6, 3.8, 4.2 \text{ kPa}$  对管线进行分析, 土体强度梯度  $S_{ug}=1.25 \text{ kPa/m}$ 。图 7 给出了不同  $S_{u0}$  下管线的贯入深度、剪力及弯矩的变化曲线。随  $S_{u0}$  的增加, 管线的最大贯入深度逐渐减小。当  $S_{u0}=2 \text{ kPa}$  时, 最大贯入深度  $u=0.0226 \text{ m}$ ; 当  $S_{u0}=4.2 \text{ kPa}$  时, 最大贯入深度  $u=0.0105 \text{ m}$ , 管线最大贯入深度减小了 53.7%。同时管线的最大贯入深度的位置距 TDP 的距离从  $S_{u0}=2 \text{ kPa}$  时的 6.4 m 减小到  $S_{u0}=4.2 \text{ kPa}$  时的 4.3 m, 减小了 32.8%。随  $S_{u0}$  的增大, 管线的最大剪力逐渐增大,  $S_{u0}=2 \text{ kPa}$  时  $S_{\max}=15.4 \text{ kN}$ ;  $S_{u0}=4.2 \text{ kPa}$  时  $S_{\max}=21.3 \text{ kN}$ , 增大了 27.7%。

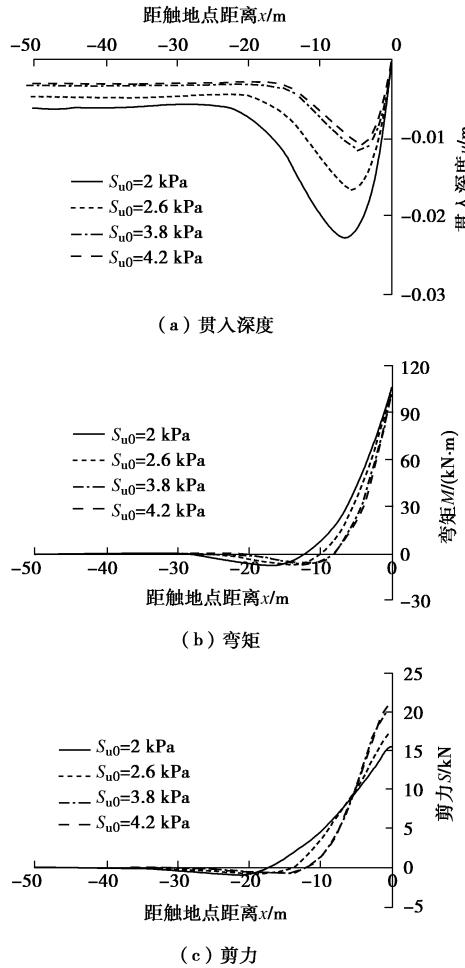


图 7 不同  $S_{u0}$  下的管线

Fig. 7 Comparison under different shear strengths of mudline

### 3.3 土体强度梯度 $S_{ug}$ 对管线贯入的影响

为研究土体强度梯度对管线贯入响应的影响, 选取  $S_{ug}=1.25, 3, 5, 7 \text{ kPa/m}$  对管线进行分析,  $S_{u0}=2.6$

$\text{kPa}$ 。管线的贯入深度、剪力、弯矩如图 8 所示。随着土体强度梯度  $S_{ug}$  的增加, 管线的贯入深度逐渐减小, 但减小的量非常小, 仅从 0.0164 m 减小到 0.0157 m, 减小 4.3%。土体强度梯度  $S_{ug}$  的变化对管线的剪力、弯矩的影响也不明显。

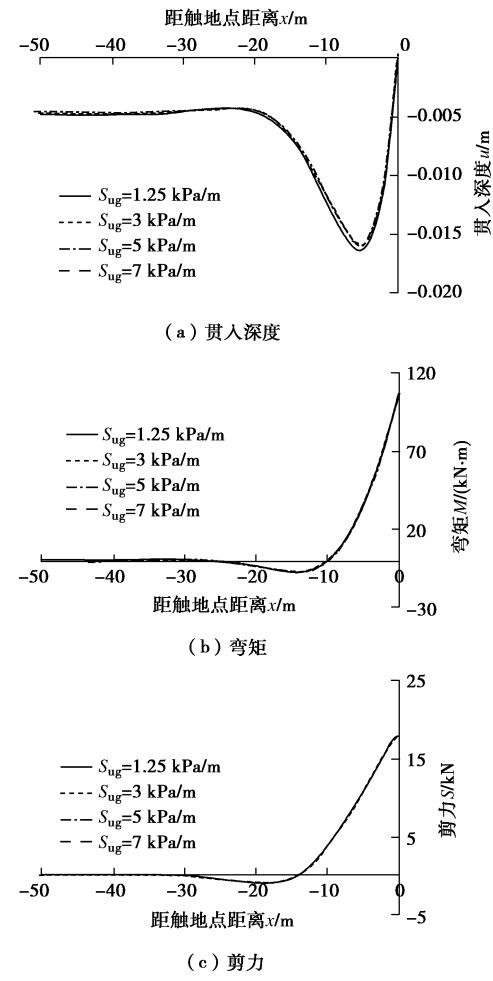


图 8 不同  $S_{ug}$  下的管线

Fig. 8 Comparison under different gradients of shear strength

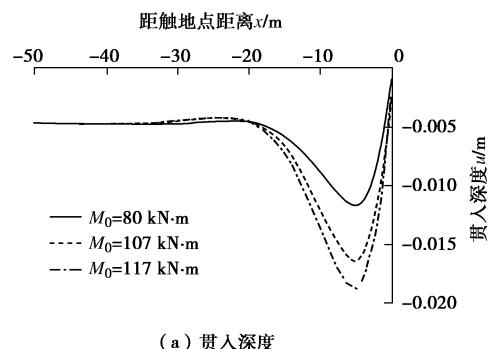
### 3.4 外部弯矩荷载对管线贯入的影响

管线在铺设过程中或工作过程中, 顶部船体在波浪、流等作用下会产生垂荡等运动, 会对立管形态及受力产生很大影响, 对管线的外部弯矩荷载影响很大。本文分别选取  $M_0=117, 107, 80 \text{ kN}\cdot\text{m}$  3 种不同的外部弯矩荷载研究外部弯矩荷载对管线贯入响应的影响。取  $S_{u0}=2.6 \text{ kPa}$ ,  $S_{ug}=1.25 \text{ kPa/m}$ 。计算结果如图 9 所示, 外部弯矩荷载的变化对管线的贯入响应影响很大。管线的贯入深度随弯矩的增大而增大, 但弯矩的变化对最大贯入点的位置影响不明显。同时, 管线的最大剪力随弯矩的增大而增大。

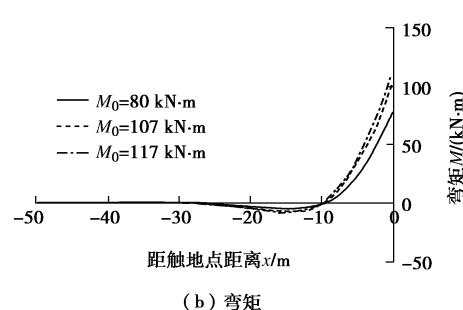
### 3.5 管线自重对管线贯入的影响

由式 (19) 可知, 管线的外部弯矩荷载及水平张

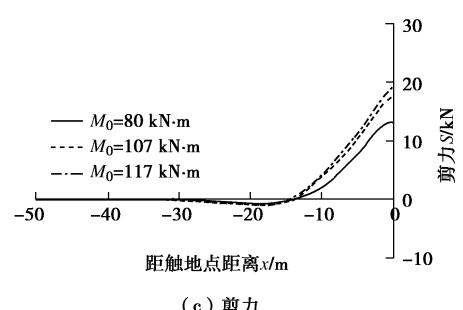
力都与管线自重有关。如 3.4 节中介绍的, 外部弯矩荷载对管线贯入响应的影响很大。因此研究管线自重对管线贯入响应的影响很有必要。本文分别选取管线自重(水下重量)  $p=980, 1500, 2000 \text{ N/m}$  对管线的贯入响应进行分析。取  $S_{u0}=2.6 \text{ kPa}$ ,  $S_{ug}=1.25 \text{ kPa/m}$ , 结果如图 10 所示, 管线自重对管线贯入响应的影响较大。随管线自重的增加, 管线贯入深度及弯矩会变大, 同时管线在自重下的贯入深度也会增大。



(a) 贯入深度



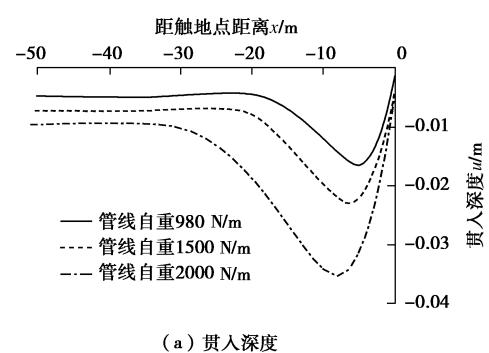
(b) 弯矩



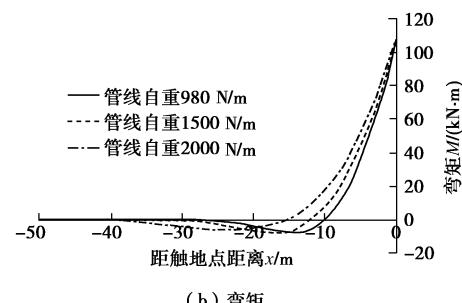
(c) 剪力

图 9 不同外部弯矩荷载下管线

Fig. 9 Comparison under different bending moments



(a) 贯入深度



(b) 弯矩

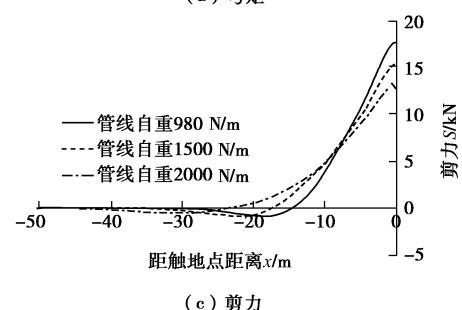


图 10 不同管线自重下管线

Fig. 10 Comparison under different weights of pipelines

## 4 结 论

采用解析法对触地段钢悬链线立管静力贯入响应进行了研究, 得到以下 4 点结论。

(1) 用二段线弹性模型近似触地段管土相互作用, 建立了多段管线控制微分方程, 结合边界条件求得管线贯入响应的解析表达式。

(2) 泥线处不排水抗剪强度  $S_{u0}$  的变化对管线贯入特性的影响较大, 管线贯入深度随  $S_{u0}$  的增大而减小, 剪力随  $S_{u0}$  的增大而增大; 在贯入深度较小的情况下, 土体强度梯度  $S_{ug}$  的变化, 对管线贯入响应的影响不明显。

(3) 随外部弯矩荷载的增大, 管线的贯入深度逐渐增大, 同时管线剪力也随之增大。外部弯矩荷载的变化对触地段管线最大贯入点的位置影响较小。

(4) 随管线自重的增大, 管线贯入深度增加, 弯矩增大。

## 参 考 文 献:

- [1] WHITE D J, RANDOLPH M F. Seabed characterisation and models for pipeline-soil interaction[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2007, 17(3): 193 - 204.
- [2] THETI R. Soil interaction effects on simple-catenary riser response[J]. Pipes & Pipelines International, 2001, 46(3): 15 - 24.
- [3] WILLIS N R T, WEST P T J. Interaction between deepwater catenary risers and a soft seabed: large scale sea trials[C]// Offshore Technology Conference. Houston, 2001.

- [4] ELOSTA H, INCECIK A, HUANG S. Seabed interaction modeling effects on the global response of catenary pipeline: a case study[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2014, **136**(3): 52 - 68.
- [5] BRIDGE C, LAVER K, CLUKEY E, EVANS T. Steel catenary riser touchdown point vertical interaction models[C]// Offshore Technology Conference. Houston, 2004.
- [6] AUBENY C P, BISCONTIN G. Seafloor-riser interaction model[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, **9**: 133 - 141
- [7] LENCI S, CALLEGARI M. Simple analytical models for the J-lay problem[J]. Acta Mechanica, 2005, **178**(1): 23 - 39.
- [8] REZAZADEH K, 陆钰天, 白 勇, 等. 钢悬链线立管与海底相互作用和疲劳分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, **35**(2): 155 - 160. (REZAZADEH K, LU Yu-tian, BAI Yong, et al. The interaction between the steel catenary riser and the seabed and the analysis of fatigue[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, **35**(2): 155 - 160. (in Chinese))
- [9] YUAN F, RANDOLPH M F, WANG L Z, et al. Refined analytical models for pipe-lay on elasto-plastic seabed[J]. Applied Ocean Research, 2014, **48**(4): 292 - 300.
- [10] HETENYI M. Beams on elastic foundation[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1946.
- [11] SHIRI H. Influence of seabed trench formation on fatigue performance of steel catenary risers in touchdown zone[J]. Marine Structures, 2014, **36**: 1 - 20.
- [12] AUBENY C P, SHI H, MURFF J D. Collapse loads for a cylinder embedded in trench in cohesive soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, **5**(4): 320 - 325.
- [13] RANDOLPH M F, WHITE D. Pipeline embedment in deep water: processes and quantitative assessment[C]// Offshore Technology Conference. Houston, 2008.
- [14] BRIDGE C. Effects of seabed interaction on steel catenary risers[D]. Surrey: University of Surrey, 2005.

## 《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院承办, 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理论和工程实践成果等。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.cgejournal.com](http://www.cgejournal.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)