

# 预应力锚索抗滑桩中预拉力合理值的探讨<sup>1)</sup>

郑明新<sup>2)</sup>

(华东交通大学道桥与岩土工程研究所, 南昌 330013)

**摘要** 结合目前抗滑工程设计现状及预应力锚索抗滑桩桩土相互作用特征, 引入接触单元并改进有限元 FCEP2D 软件进行计算, 得到抗滑桩锚固段的受力、弯矩和位移规律; 进而分析了不同预应力、不同滑坡推力工况下的抗滑效果, 提出了预应力锚索抗滑桩的最佳预应力, 对工程设计具有一定的指导意义。

**关键词** 桩土接触问题, 预应力锚索, 抗滑桩, 最佳预应力

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)05-016-05

## THE OPTIMUM PRESTRESS OF ANTI-SLIDE PILE WITH ANCHORING CABLE<sup>1)</sup>

ZHENG Mingxin<sup>2)</sup>

(Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract** Based on the design methods and the interaction characteristics of anti-slide pile and soil, a program of improved FEM with contact element is developed. A calculation model is set up to calculate the bending moment and displacements along the pile with different cable's prestresses and different thrusts. The optimum prestress is discussed, which is important for the landslide control.

**Key words** problem of pile-soil contact, anti-slide pile, cable with prestress, optimum prestress

大量工程实践已证明, 预应力锚索抗滑桩工程的锚索预应力过大将使抗滑桩外侧长期受到拉力作用且造成浪费; 过小则将使抗滑桩内侧长期处于受拉状态, 不能很好发挥预应力锚索应有的作用, 因此其大小关系到抗滑桩的受力状态和设计的安全合理性。究竟选择多大合适值得做深入的探讨。本文将对目前锚索预应力计算方法讨论的基础上, 采用通过改编 FCEP2D 软件并考虑桩土接触单元来探讨不同预应力、不同滑坡推力工况下预应力锚索抗滑桩的最佳预应力。

### 1 目前有关锚索预应力的确定方法

结合目前发表的一些文献, 可将锚索预应力的计算方法分为以下 4 种方法:

(1) 根据作用在抗滑桩上的滑坡推力和预先确定的锚索设置位置, 计算出当桩身正负弯矩大致相等

时锚索所承担的拉力  $N$ , 然后根据桩与锚索协调变形条件求出锚索在不施加预应力时所需承担的拉力  $N'$ , 则锚索需要施加的预应力<sup>[1]</sup>为  $F = N - N'$ 。

(2) 用控制桩顶位移的方法来确定锚索拉力  $F$ 。前苏联学者金布格和不申柯<sup>[2]</sup>提出用控制桩顶水平位移的方法计算锚索拉力。设在锚索拉力和滑坡推力共同作用下, 允许桩顶最终产生的水平位移为  $u$ , 其中在滑坡推力  $E$  作用产生的位移为  $u^E$ , 在锚索拉力  $F$  作用下产生的位移为  $u^F$ , 则  $u = u^E - u^F$ 。

将  $u^E$  和  $u^F$  表达式代入上式, 即可解出锚索预拉力  $F$ 。

(3) 以抗滑桩在滑面处的弯矩等于零为条件来确定锚索设计张拉力<sup>[3]</sup>: 将抗滑桩视为悬臂桩, 滑坡推力 (根据实测滑坡推力多为梯形分布形式可概化为矩形均布<sup>[4]</sup>) 和锚索张拉力为外载荷, 计算出使桩在滑面处的弯矩等于零时的张拉力  $F$ , 即使滑面

2010-12-31 收到第 1 稿, 2011-05-20 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金资助项目 (51068006)。

2) 郑明新, 男, 1966 年生, 教授, 博士, 从事地质与岩土工程的教学, 主研滑坡与路基病害防治。E-mail: zhengmx2002@yahoo.com.cn

$O$  点的弯矩为零, 桩身受力简化为图 1(a) 所示, 其弯矩及剪力图见图 1(b) 和 1(c) 所示. 根据滑坡推力  $q_c$ , 利用  $M_c = 0$ , 即有

$$F \cdot \sin \alpha \cdot H = \frac{1}{2} q_c H^2 \quad (1)$$

从而得到锚索所需的预张拉力为

$$F = \frac{q_c \cdot H}{2 \sin \alpha} \quad (2)$$

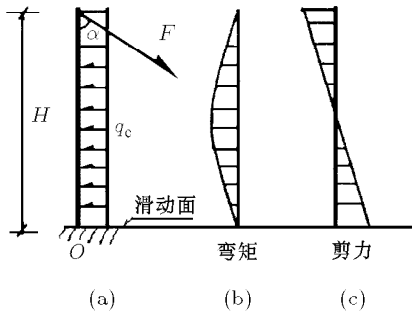


图 1 抗身受力及内力图

(4) 铁道科学研究院西北研究所推荐的方法<sup>[5]</sup>: 根据抗滑桩在滑床顶面处所受的剪力  $Q_0$  来确定锚索设计拉力, 即将锚索作用点视为铰性支点, 抗滑桩看作类似简支梁式结构, 采用作用在每根桩上的滑坡推力  $E_T$ , 桩前滑面上岩土抗力  $E_p$ , 计算出滑面处剪力  $Q_0$ , 再确定锚索设计拉力  $F$

$$Q_0 = E_T - F - E_p \quad (3)$$

$$M_0 = E_T \frac{h_1}{2} - E_p \frac{h_2}{3} - F h_1 \quad (4)$$

式中  $Q_0$ ,  $M_0$  为滑面处剪力和弯矩;  $h_1$  为滑体厚度,  $h_2$  滑面以下嵌固的深度;  $F$  为预应力锚索提供的锚固力.

由于预应力锚索抗滑桩在滑动面以下埋置较浅, 故桩类似于上端铰支、下端为弹性铰的简支梁, 而滑坡推力在桩上分布近似矩形,  $E_T$  和  $E_p$  之合力作用点大致在桩身的  $1/2$  处, 因此锚索锚固力  $F$  一般取  $(1/2 \sim 4/7)Q_0$ . 采用式 (2) 即令  $H = h_1$ , 一般  $\alpha = 70^\circ \sim 75^\circ$ , 从而  $F$  约为  $Q_0/2$ , 结果基本一致.

以上 4 种方法中, 方法 (1) 考虑了桩与锚索的协调变形, 同时也考虑了桩身在预应力和滑坡推力作用下的受力状态, 理论上较为完善. 方法 (2) 适于对桩顶位移有严格控制时适用. 方法 (3) 和方法 (4) 虽然未考虑桩与锚索的协调变形问题, 但简便易于应用. 但由于着眼点不同, 对于在不同预应力、不同滑坡推力工况下的抗滑效果尚未展开较为深入的讨论, 最佳预应力究竟选择多大合适? 正是本文讨论的要点.

## 2 有限元数值计算确定合理的锚索预应力

上述方法是以力或力矩平衡理论为基础, 诸多假定必然造成一定的误差, 加上未考虑桩土相互作用对坡体稳定性的积极影响而显保守. 有必要从桩土相互作用及其变形协调问题出发, 对桩土接触问题、结合现场工程设计, 引入接触单元分析抗滑桩锚固段的受力特征, 探讨不同预应力、不同滑坡推力工况下预应力锚索抗滑桩的最佳锚索预应力.

### 2.1 有限元计算中桩土接触问题

本文引入接触单元采用改进了有限元程序 FCEP2D. 单元类型包括: 四节点平面单元、两节点杆单元和反映桩土相互作用的接触单元. 为了模拟滑面错动及桩土之间可能的滑移、张开, 在滑床和滑体之间、桩土之间设置了接触单元<sup>[6]</sup>. 桩和滑床相互作用的锚固段视为刚性法向接触, 采用修正的有厚度 Goodman 单元, 其本构关系是在 Goodman 单元  $K_n$  和  $K_s$  的基础上引入 Desai 单元<sup>[7]</sup> 的嵌入控制方法, 将接触面超余应力和由嵌入调整产生的等效荷载一起进行迭代<sup>[8]</sup>.

预应力的模拟通过在顶部锚杆单元 I 节点和锚固段顶部锚杆单元 J 节点施加一对大小相等、方向相反的集中荷载, 这比以往只是在杆端加一个集中力模拟预应力更为优越. 因为预应力锚索是通过滑床锚固段和锚索固定端 (桩) 自锚实现的, 这时锚索预应力只是一个内力, 可模拟滑床锚索锚固段因锚索预应力作用所受到的拉力<sup>[7]</sup>.

程序算法视岩土体为非线性弹塑性材料, 考虑接触单元因压缩、张开和滑移而使刚度发生变化<sup>[8]</sup>. 针对这种非线性弹塑性问题, 并考虑接触单元非线性比较复杂, 包括嵌入控制、滑移及张开后的超余应力等, 采用修正的增量-初应力法求解.

### 2.2 计算模型的建立

由于抗滑桩属于侧向受荷桩, 是靠锚固段的锚固作用和被动抗力、滑动面以上桩前滑坡土体抗力来支撑滑体推力, 从而锚固段成为主要承受滑面以上滑坡推力所产生的弯矩. 因此, 本文采用接触有限元法, 重点分析在不同滑床接触单元极限应力、不同刚度系数时锚固段桩前、桩后滑床与桩相互作用力分布特征.

对普通抗滑桩在桩顶设置锚索并施加反向拉力来模拟预应力锚索抗滑桩, 计算模型见图 2. 设某滑坡滑体厚度为 30 m, 相应滑面以上桩长 30 m, 宽 2 m, 将钢筋混凝土桩按均质材料对待, 将其分成两

列单元, 单元大小为  $1\text{m} \times 1\text{m}$ ; 反映桩土接触采用接触单元, 长  $1\text{m}$  厚度取  $5\text{cm}$ , 其法向和切向刚度系数由滑床岩体力学性质决定, 其中密度  $\rho = 2.2\text{t/m}^3$ ,  $E = 2.4\text{GPa/m}$ ,  $\mu = 0.18$ ; 桩体单元 80 个, 桩前侧、桩后侧接触单元各 10 个, 桩后从上至下为 90~81 号单元, 桩前为 91~100 号单元, 编号见图 3 所示。

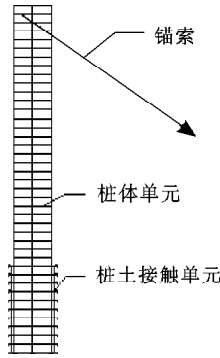


图 2 计算模型

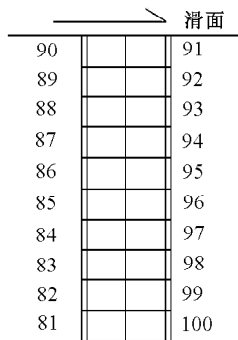


图 3 接触单元编号

计算参数的确定: 其中混凝土标号为 C30, 混凝土内钢筋采用 A3 钢, 根据文献 [10-11] 中组合弹模计算公式, 并按高配筋率桩 ( $\rho \geq 0.65\%$ ) 考虑, 得到钢筋混凝土的组合弹性模量公式为

$$E_{sc} = 0.303E_s, \quad E_{sc} = 2.082E_c \quad (5)$$

式中,  $E_{sc}$  为钢筋混凝土组合弹性模量,  $E_c$  为混凝土弹性模量,  $E_s$  为钢筋弹性模量. 参照文献 [11-12],  $E_c$  取  $31\text{GPa}$ ,  $E_s$  为  $210\text{GPa}$ , 代入式 (5) 得到均值  $E_{sc}$  为  $64\text{GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.2$ ; 接触单元参数  $K_{N0} = 2.2\text{GPa/m}$ ,  $K_{S0} = 1.0\text{GPa/m}$ ,  $f = 0.5$ ,  $c = 0.1\text{MPa}$ .

边界条件: 滑面以上桩后受到滑体水平推力, 受力形式近似于悬臂梁, 并设桩下端锚固, 锚固段长度  $10\text{m}$ ; 分成 10 步均匀增量加载。

锚索预应力据上述在锚索端部施加一个等效集中力来模拟, 并在每个增量步对锚索应变进行计算, 随时调整其预应力大小. 预张力初值采用文献 [5]

确定. 据模型滑坡推力取  $0.1\text{MN/m}$ , 总值  $E_T = 3.1\text{MN}$ , 利用方法 (3) 得到锚索预张力取值范围为  $1.033 \sim 1.130\text{MN}$ , 在此取其上限  $1.130\text{MN}$ .

### 2.3 锚索预拉力合理值分析

#### 2.3.1 有无锚索预应力对桩身弯矩分布的影响

有无预应力桩身弯矩分布对比见图 4. 可以看出: 桩体在预应力锚索的拉力作用下, 其最大弯矩明显减小, 桩前受拉最大弯矩发生在锚索预拉力和滑体推力相等处,  $M_{\max} = 5.8\text{MN}\cdot\text{m}$ ; 桩后受压  $M_{\max} = 13.1\text{MN}\cdot\text{m}$ , 出现在锚固段靠近滑面处. 而悬臂抗滑桩时  $M_{\max}$  达到  $46.5\text{MN}\cdot\text{m}$ . 同时其接触单元法向应力应力值明显减小, 桩前靠近滑面处接触单元最大应力  $\sigma_{\max}$  由  $9.219\text{MPa}$  减小为  $3.038\text{MPa}$ , 可见锚索预应力使抗滑效果更好. 那么, 究竟锚索预应力多大合适?

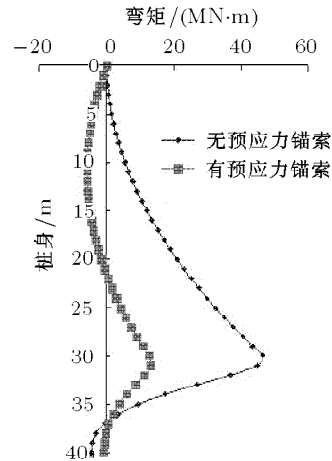


图 4 有无预应力锚索情况下弯矩对比

#### 2.3.2 锚索预拉力合理值探讨

文献 [4] 和 [13] 认为, 锚索张拉力应设计为: 雨季滑坡推力最大时靠山侧桩体受拉, 而在其他季节则桩前 (河侧) 受拉, 这样可通过两侧受拉条件的改变来实现桩体拉力不至于太大且桩身基本保持在不发生水平位移状态. 据此, 本文通过试算得到此状态下的锚索拉力为  $1.350\text{MN}$ , 此时桩体水平位移最小, 桩端弯矩接近于 0, 同时桩前滑床抗力也变小. 此时锚索拉力  $F$  和滑坡推力  $E_T$  之比为  $1350/3100 = 0.43$ . 见图 5 和图 6.

为了验证是否具有普遍性, 以下采用锚索拉力与滑体推力不同比例、不同滑坡推力进行计算。

(1) 采取锚索拉力与滑体推力不同比例进行计算, 相应的桩身弯矩见图 7. 可见此时锚索拉力  $F$  和滑坡推力  $E_T$  之比为  $0.43$  左右较为合理。

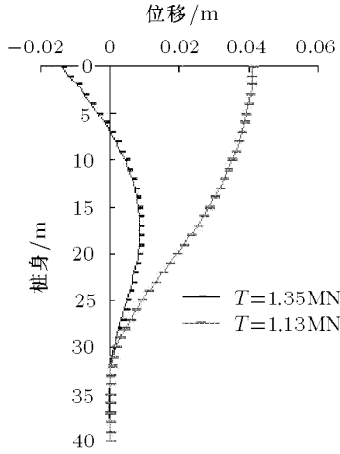


图 5 桩身位移

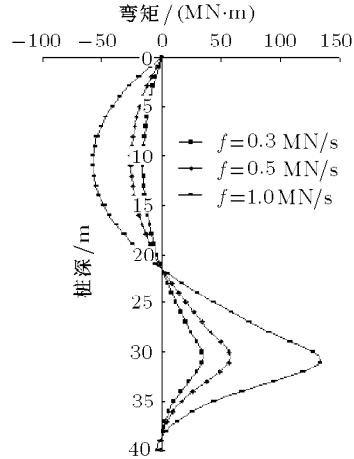


图 8 不同推力桩身弯矩图

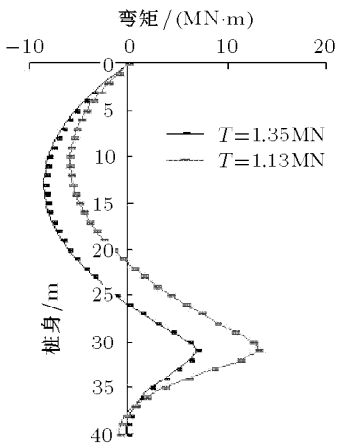


图 6 桩身弯矩

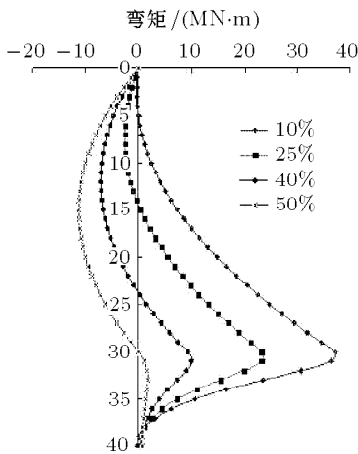


图 7 不同锚索拉力下的桩身弯矩

(2) 滑坡推力分别取值为：(1) 0.3 MN/m; (2) 0.5 MN/m; (3) 1.0 MN/m 三种情况，接触单元强度假定为 25 MPa，预应力分别采用  $0.43E_T$ ，得到各工况下弯矩分布图 8 所示。从图 8 可以看出，3 种工况下其弯矩分布规律大致相同，只是当滑坡推力达到 1.0 MN/m 时，载荷增量加到第 8 步，桩前靠近

滑面处的 91 号单元达到强度极限 25 MPa，单元进入塑性状态并发生应力重分配，靠近桩端部分出现较大的反弯矩。

通过对比表明，锚索拉力采用  $0.43E_T$  比前述方法 (3)，方法 (4) 确定的锚索预应力值要大一些，大约是 1.15~1.2 倍。

可以看出：在抗滑桩下端锚固并且不考虑桩前滑体抗力的情况下，预张拉力  $F$  取滑坡推力的 0.43 倍可使桩前、桩后正负弯矩基本一致，最大弯矩达到最小，可使工程设计效果达到最佳。

### 3 主要认识与结论

(1) 本文引入接触单元，通过编制有限元程序计算，在桩下端锚固且不考虑桩前滑体抗力情况下，将抗滑结构与滑体作整体分析，通过数值计算来评价不同锚索预应力、不同滑坡推力工况的抗滑效果，初步证明是评价防治效果的有效途径之一。

(2) 计算表明锚索预拉应力可以明显改善抗滑桩的受力形式，锚索预应力合理的取值可使桩体两侧受拉并且正负弯矩大致相等，在桩下端锚固且不考虑桩前滑体抗力的情况下，锚索预拉力与滑体推力之比为 0.43 时可使工程设计合理。当然针对具体工程设计，其取值还应结合锚固段的锚固能力、滑坡推力沿桩身分布形式综合确定。

### 参 考 文 献

- 邹兴普. 锚索抗滑桩的设计计算. 路基工程. 2000, 89 (2): 9-11 (Zou Xingpu. The design and calculation of anti-slide pile with prestressing cable. *Embankment Engineering*, 2000, 89(2): 9-11 (in Chinese))
- 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向. 见: 滑坡文集 (第 13 集). 北京: 中国铁道出版社, 1998, (13): 60-64 (Wang Gongxian. The trends of anti-slide structure. In: *Landslide Corpus*.

- Beijing: The Press of China Railway, 1998, (13): 60-64 (in Chinese))
- 3 田景贵, 范草原. 预应力锚索抗滑桩的初步机理及设计. 重庆交通大学学报, 1998, 17(4): 59-64 (Tian Jinggui, Fan Caoyua. The principle and design of retaining piles with prestressing cable. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 1998, 17(4): 59-64 (in Chinese))
  - 4 郑明新. 滑坡防治工程效果的后评价方法研究. 南京: 河海大学出版社, 2007 (Zheng Mingxin. The Study of Post Evaluation Methods of Landslide Control' Effectiveness. Nanjing: The Press of Hohai University, 2007 (in Chinese))
  - 5 王化卿, 李传珠, 刘励忠等. 预应力锚索抗滑桩设计与施工. 见: 滑坡文集 (第七集), 北京: 中国铁道出版社, 1990, (7): 34-41 (Wang Huaqing, Li Chuazhu, Liu Lizhong. The design and construction of anti-slide pile with prestressing cable. In: Landslide Corpus. Beijing: The Press of China Railway, 1990, (7): 34-41 (in Chinese))
  - 6 Sharma KG, Desai CS. Analysis and implementation of thin layer element for inter faces and joints. *J Geotech Eng ASCE*, 1992, 118(12): 2442-2462
  - 7 Desai CS, Zaman M. Thin layer element for Interfaces and joints. *Int Journal for Num & Analy Meth in Geomech*, 1984, 8(1): 19-43
  - 8 蒋新龙, 郑明新. 预应力锚索抗滑桩受力状态的有限元分析. 华东交通大学学报, 2004, 22(2): 24-27 (Jiang Xinlong, Zheng Mingxin. The application of numerical analysis in pre-

- stressed anchor rope anti-slide pile design. *Journal of East China Jiaotong University*, 2004, 22(2): 24-27 (in Chinese))
- 9 郑明新, 蒋新龙. 预应力锚索抗滑桩工程效果的数值计算评价. 岩土力学, 2007, 28(7): 1381-138 (Zheng Mingxin, Jiang Xinlong. Evaluation of effectiveness of prestressed anti-slide cable piles by numerical simulations. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1381-138 (in Chinese))
- 10 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算. 北京: 中国铁道出版社, 1983. 23-31 (China railway 2nd survey and design Institute. The Design and Calculation of Anti-Slide Pile. Beijing: The Press of China Railway, 1983. 23-31 (in Chinese))
- 11 黄棠, 王效通. 结构设计原理. 北京: 中国铁道出版社, 1988 (Huang Tang, Wang Xiaotong. The Design Principle of Structure. Beijing: The Press of China Railway, 1988 (in Chinese))
- 12 Juirnarongrit T, Ashford SA. Soil-pile response to blast induced lateral spreading. II: analysis and assessment of the  $p-y$  method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132 (2): 163-172
- 13 余振锡. 预应力锚索抗滑桩在滑坡治理中的应用. 金属矿山, 1998, 4: 10-12 (Yu Zhenxi. Application of prestressed anchor cable anti-slide piles in slope sliding control. *Metal Mine*, 1998, 4: 10-12 (in Chinese))

(责任编辑: 张 静)

(上接第 15 页)

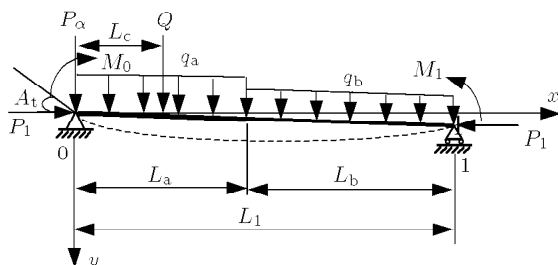


图 7 钻头侧向力和钻头倾角计算

更好地指导 BHA 设计和现场应用, 提高井斜控制技术水平。

## 4 结 论

(1) 建立了典型的变刚度梁柱力学模型, 得到了求解梁柱变形和端部转角的解析计算公式, 发展了梁柱理论, 并拓展了“纵横弯曲法”的应用范围;

(2) 本文分析方法简单, 成功地解决了油气井工程中存在的变刚度 BHA 力学分析问题, 为井下控制工具设计、BHA 优化和使用提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 白家祉, 苏义脑. 井斜控制理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 1990. 129-134
- 2 Chandra U. Basic concepts in static BHA analysis for directional drilling. SPE 15467, 1986
- 3 唐雪平. 变截面 (变刚度) 纵横弯曲梁. 力学与实践, 1999, 21(4): 47-50 (Tang Xueping. Timoshenko beam of variable cross-section (variable stiffness). *Mechanics in Engineering*, 1999, 21(4): 47-50 (in Chinese))
- 4 苏义脑, 唐雪平, 陈祖锡. 初弯曲纵横弯曲梁的等效载荷法及其应用. 力学与实践, 2004, 26(1): 42-44 (Su Yinao, Tang Xueping, Chen Zuxi. Equivalent loading method for solving beam-column with initial bending and its application in drilling engineering. *Mechanics in Engineering*, 2004, 26(1): 42-44 (in Chinese))
- 5 唐雪平, 苏义脑, 陈祖锡. 求解中短半径弯螺杆钻具的纵横弯曲法. 力学与实践, 2011, 33(3): 20-24 (Tang Xueping, Su Yinao, Chen Zuxi. Beam-column theory for bent housing PDM assemblies with medium-short radius of building capability. *Mechanics in Engineering*, 2011, 33(3): 20-24 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)