

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.19

# 嵌固于多种地层的抗滑桩设计计算方法

肖世国<sup>1,2</sup>, 杨 豪<sup>1</sup>, 陈廷君<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在采用抗滑桩加固边坡或滑坡的工程中通常会出现桩体嵌固段位于多种地层的情况, 嵌固段桩体的受力对所加固坡体的稳定性有极为重要的影响。现行规范建议采用等效地基系数法计算桩体嵌固段, 其计算结果往往与实际不符。针对实际工程中常见的嵌固段地层为 3 种及以下地层的情况, 将其分为全土型、土土岩型、土岩岩型和全岩型 4 类, 基于侧向受荷的弹性地基梁分析模型, 采用嵌固段实际各地层的弹性抗力系数, 考虑桩体嵌固段在各地层界面处的内力和变形连续性, 给出了这 4 类典型情况下抗滑桩嵌固段的内力和位移计算公式。工程实例分析表明, 本文提出的计算方法与数值模拟法、桩体有限差分算法的所得结果较为接近, 但本文的计算过程更为简单, 更便于实际操作。

**关键词:** 抗滑桩; 嵌固段; 多种地层; 地基弹性抗力系数; 内力

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-8035(2018)05-0116-10

## A calculation method for design of the stabilizing piles embedded in various strata

XIAO Shiguo<sup>1,2</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>, CHEN Tingjun<sup>1</sup>

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Stabilizing piles embedded in various strata are extensively used for practical slope reinforcement or landslide control. Mechanical behaviors of the fixed segment in various strata have significant influence on stability of the reinforced slope. Equivalent ground coefficient of elastic resistance is suggested to solve this problem in current specifications in China. But the corresponding calculation results are not generally consistent with the actual pile responses. The slide-resistant piles are usually embedded in four basic types of strata including the soil-soil-soil type, soil-soil-rock type, soil-rock-rock type, and rock-rock-rock type. Based on analysis model of laterally loaded beam on elastic foundation, internal forces and displacements of the fixed segment are provided respectively with considering actual ground coefficient of elastic resistance of each strata and continuity of internal forces and displacements of the pile at interfaces of adjacent strata. Analysis of some practical engineering examples show that the calculation results obtained using the proposed method are in good agreement with those computed using numerical simulation method and finite difference algorithm for the pile. In particular, the computation procedure of the proposed method is easier and more convenient for practical application than the existing methods.

收稿日期: 2018-01-29; 修订日期: 2015-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(51578466); 四川省交通运输科技项目(2013 A1-3, 2014-C-1)

第一作者: 肖世国(1973-), 男, 辽宁东港人, 博士, 教授, 博导, 主要从事滑坡防治、边坡与基础工程研究。E-mail: shgxiao3852@sina.com

**Keywords:** stabilizing pile; fixed segment; various strata; elastic resistance coefficient of ground; Internal force

抗滑桩是一种常用的深入到稳定地层的加固边坡或滑坡的工程结构。由于受地层条件决定,抗滑桩嵌固段有位于单一地层和多种地层两大类情况。在我国普遍采用的悬臂梁法<sup>[1-2]</sup>分析模型中,嵌固段按弹性地基梁<sup>[1-3]</sup>计算,对于单一地层,因只涉及一个地基水平弹性抗力系数,概念较为清晰且计算过程也较为简单。然而,对于嵌固段位于多种地层的情况,将涉及多个地层的弹性抗力系数<sup>[4]</sup>,现行的处理方法通常为采用等效地基系数法<sup>[2, 5]</sup>,即将多个地层的地基系数通过某种加权计算转换为类似于单一地层的一个地基系数。这种处理方法虽然计算过程较为简单,但其概念不够清晰,而且计算结果也不甚合理<sup>[6]</sup>。基于连续介质理论的抗滑桩分析方法<sup>[7-9]</sup>,虽然具有用于分析嵌固段位于多地层的抗滑桩的可能性,但其用于单一地层的情况已显现复杂的计算过程,并不十分方便于实际工程的应用,对于多种地层其分析过程将更加复杂与不便实际操作。基于试验的  $p$ - $y$  曲线法<sup>[10-13]</sup>,对此种多层情况也可以作为一种可以参考的分析方法。但是,由于此法是基于具体实际工程的试验结果获得桩侧抗力与侧向位移的关系曲线,对于缺乏试验资料的实际问题,其计算依据往往不够充分,且计算结果也经常与实际不符<sup>[14-15]</sup>。

对于嵌固段地层是多种岩层的情况,文献[16]采用分段弹性地基梁的方法,分析了抗滑桩嵌固段的内力和位移,但其计算结果中关于桩身转角存在不合理之处。同时,对于嵌固段地层是多种土层的情况,文献[16]的具体计算表达式并不成立(即各层的地基系数不是常数,传统的  $k$  法不成立)。文献[6]则按实际地层地基系数采用有限差分法和弹性地基杆系有限单元法计算了土体地层桩身位移和内力,为实际工程中土层中抗滑桩的计算提供了参考方法。然而,在实际工程中,嵌固段除了位于全部是岩层或全部是土层的地层中外,还可能存在土层与岩层混合的情况,但这种情况下抗滑桩嵌固段的计算方法在以往研究中鲜见报道。

有鉴于此,本文针对实际中嵌固段位于多地层的抗滑桩,兼顾计算操作过程简单和概念清晰的原则,以便于工程技术人员操作,采用实际各地层弹性抗力系数的弹性地基梁法,并考虑实际工程中常见的嵌固段可能的地层分布特征,将嵌固段地层分为全土型、土岩

复合型(上土下岩)、全岩型,分别具体阐述抗滑桩嵌固段的内力和位移计算分析方法。

## 1 分析模型

考虑实际工程中常见的情况,这里以抗滑桩嵌固段位于3种地层为典型情况(包括了两种地层和单一地层,它们属于3种地层的特例)(图1),地层自上而下依此编号为1、2、3。嵌固段顶端作用有弯矩  $M_0$  和剪力  $Q_0$ (可对受荷段按悬臂梁模型计算得到<sup>[1]</sup>,这里不赘述),嵌固段顶面距地层1、地层2底面的深度分别为  $h_1$ 、 $h_2$ ,嵌固段长度为  $h_3$ 。同时,鉴于实际工程中一般的地层沉积特征,这里取如图2所示的4类具体地层组合类型作为嵌固段所在的地层,即:3种地层均为土体类型(全土型)、上面2层为土体下面1层为岩体类型(土-土-岩型)、上面1层为土体下面2层为岩体类型(土-岩-岩型)、3种地层均为岩体类型(全岩型),分别进行分析。图2中的  $m_i$  和  $k_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别表示土质地层的水平弹性抗力系数的比例系数和岩质地层的水平弹性抗力系数,  $z$  轴表示沿桩体深度方向(起点位于嵌固段顶端),  $y$  轴表示桩体侧向水平位移方向。

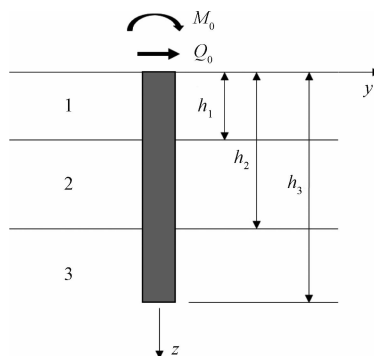


图1 抗滑桩嵌固段位于多种地层的一般分析模型

Fig. 1 General analysis model of a stabilizing pile embedded in various strata

## 2 计算方法

根据弹性地基梁理论,对于图1所示的位于三段地层的抗滑桩,桩体每一段(共3段)均可采用初参数法<sup>[1]</sup>确定其内力和位移的一般表达式为:

$$y = y_{i-1}A_{ij} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{ij} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{ij} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{ij} \quad (1)$$

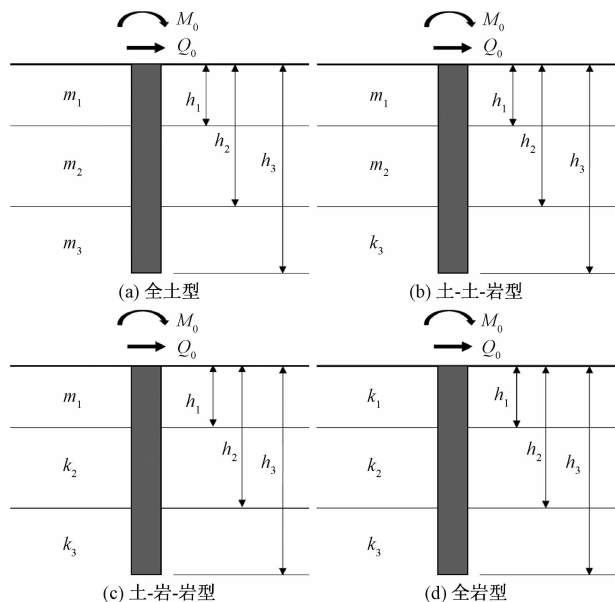


图 2 抗滑桩嵌固段位于 3 种地层的 4 类具体分析模型

Fig. 2 Four specific analysis models of three strata in which a stabilizing pile embedded

$$\frac{\varphi}{\alpha_i} = y_{i-1}A_{ij} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{ij} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{ij} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{M}{\alpha_i^2 EI} = y_{i-1}A_{ij} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{ij} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{ij} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{Q}{\alpha_i^3 EI} = y_{i-1}A_{ij} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{ij} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{ij} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{ij} \quad (4)$$

其中,  $y$ 、 $\varphi$ 、 $M$  和  $Q$  分别为桩体侧向水平位移、转角、弯矩和剪力;  $\alpha_i$  ( $i=1,2,3$ ) 为在 3 段地层中桩体的变形系数;  $EI$  为桩身截面抗弯刚度; 无量纲系数  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $C_{ij}$  和  $D_{ij}$  都是关于  $\alpha_i(z-h_{i-1})$  的函数 ( $z$  为距嵌固段顶面的深度, 记  $h_0=0$ ), 分别表示第  $i$  段桩体的第  $j$  项无量纲系数 ( $j=1,2,3,4$ , 分别表示求解  $y$ 、 $\varphi$ 、 $M$ 、 $Q$  的各个系数), 该系数包括了适于土层的  $m$  法和适于岩层的  $k$  法, 见表 1~表 4。

需要注意的是, 在上下相邻两地层的界面处, 桩体的侧向水平位移  $y$ 、截面转角  $\varphi$ 、截面弯矩  $M$  以及截面剪力  $Q$  均应保持连续性。根据这个条件和式 (1)~(4), 抗滑桩嵌固段在三段地层底端处的  $y_i$ 、 $\varphi_i$ 、 $M_i$  和  $Q_i$  可表示为式 (5)~(8) 所示。

$$y_i = y_{i-1}A_{i1} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{i1} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{i1} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{i1} \Big|_{z=h_i} \quad (5)$$

$$\varphi_i = \alpha_i \left( y_{i-1}A_{i2} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{i2} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{i2} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{i2} \right) \Big|_{z=h_i} \quad (6)$$

$$M_i = \alpha_i^2 EI \left( y_{i-1}A_{i3} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{i3} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{i3} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{i3} \right) \Big|_{z=h_i} \quad (7)$$

$$Q_i = \alpha_i^3 EI \left( y_{i-1}A_{i4} + \frac{\varphi_{i-1}}{\alpha_i}B_{i4} + \frac{M_{i-1}}{\alpha_i^2 EI}C_{i4} + \frac{Q_{i-1}}{\alpha_i^3 EI}D_{i4} \right) \Big|_{z=h_i} \quad (8)$$

由式 (5)~(8) 的递推关系可得到, 各段桩体的位移和内力均为嵌固段顶端的位移和内力的函数。如前所述, 嵌固段顶端的内力 ( $M_0$  和  $Q_0$ ) 可由受荷段计算确定, 因此, 只需确定出嵌固段顶端的位移 ( $y_0$  和  $\varphi_0$ ), 即可确定出各段桩体的位移和内力。这时, 可以引入桩底端的边界条件, 来确定嵌固段顶端的位移。把桩底无论视为自由端、铰支端或固定端, 均有两个已知的边界条件, 联立便可定解嵌固段顶端的侧向位移和转角。

根据上述方法, 并采用级数表达式法<sup>[1]</sup> (考虑满足工程精度需要即可, 对级数表达式截取前 4 项, 以简化计算, 见表 1~表 4), 可以得到前述全土型、土土岩型、土岩岩型和全岩型 4 类典型地层情况下的各无量纲系数, 具体计算过程可通过 Matlab 编程实现 (为避免长桩时  $m$  法计算误差, 可对各段地层的桩段顶端记为  $z$  坐标起点), 限于篇幅, 这里不予赘述。

采用级数截断法, 在全土型、土土岩型、土岩岩型和全岩型地层情况下, 各无量纲系数如表 1~表 4 所示。为简化表达并旨在说明方法, 这里只给出桩底端为自由端的结果。

#### (1) 全土型

对于 3 个地层都为土质地层时, 抗滑桩嵌固段被“分割”的三段桩体均应采用  $m$  法计算, 其中从上到下第  $i$  段地层桩体变形系数  $\alpha_i$  为<sup>[1]</sup>:

$$\alpha_i = \sqrt[5]{\frac{m_i \cdot B_p}{EI}} \quad (9)$$

式中,  $E$ —桩的弹性模量,

$I$ —桩的截面惯性矩,

$B_p$ —抗力计算宽度,

$m_i$ —第  $i$  层地基侧向抗力系数随深度变化的比例系数。

此时各无量纲计算系数  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $C_{ij}$  和  $D_{ij}$  如表 1 所示 (考虑满足工程精度需要即可, 对级数表达式截取前 4 项<sup>[1]</sup>, 以简化计算)。

#### (2) 土-土-岩型

对于上 2 个地层都为土体时, 最下一层为岩体时,

抗滑桩的上两段均采用 m 法计算,最下一段采用 k 法计算。此时,  $\alpha_i$  ( $i=1,2$ ) 同式(9),但  $\alpha_3$  则为<sup>[1]</sup>:

$$\alpha_3 = \sqrt[4]{\frac{k_3 \cdot B_p}{4EI}} \quad (10)$$

式中:  $k_3$ ——第 3 层地基的侧向抗力系数。

这时,当  $i=1$  和 2 时的无量纲系数同表 1;当  $i=3$  时,各无量纲系数如表 2 所示。

### (3) 土-岩-岩型

对于上一层为土体、下两层为岩体时,抗滑桩上一段采用 m 法计算,下两段采用 k 法计算。此时  $\alpha_1$  同式(9),但  $\alpha_i$  ( $i=2,3$ ) 则为<sup>[1]</sup>:

$$\alpha_i = \sqrt[4]{\frac{k_i \cdot B_p}{4EI}} \quad (11)$$

式中:  $k_i$ ——第  $i$  层地基的侧向抗力系数。

这时,无量纲系数在  $i=1$  和 3 时的同土-土-岩型的计算公式,但当  $i=2$  时,无量纲计算系数如表 3 所示。

### (4) 全岩型

三段地层都是岩体时,三段抗滑桩均采用 k 法计算。此时,  $\alpha_i$  ( $i=1,2,3$ ) 同式(11),无量纲计算系数在  $i=2$  和 3 时的同土-岩-岩型,在  $i=1$  时,计算系数如表 4 所示。

表 1 全土层时无量纲计算系数汇总表

Table 1 Dimensionless coefficients of a pile in the case of soil-soil-soil type

| 计算内容 | 计算系数                                                                                                                                                                                                                 |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 侧向位移 | $A_{i1} = 1 - \frac{(\alpha_i z)^5}{5!} + 6 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{10}}{10!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{15}}{15!}$                                                                                    |
|      | $B_{i1} = \alpha_i z - 2 \cdot \frac{(\alpha_i z)^6}{6!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{11}}{11!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{16}}{16!}$                                                   |
|      | $C_{i1} = \frac{(\alpha_i z)^2}{2} - 3 \cdot \frac{(\alpha_i z)^7}{7!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{12}}{12!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{17}}{17!}$                                     |
|      | $D_{i1} = \frac{(\alpha_i z)^3}{6} - 4 \cdot \frac{(\alpha_i z)^8}{8!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{13}}{13!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{18}}{18!}$                                     |
| 转角   | $A_{i2} = -\frac{(\alpha_i z)^4}{4!} + 6 \cdot \frac{(\alpha_i z)^9}{9!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{14}}{14!} + 6 \cdot 11 \cdot 16 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{19}}{19!}$                                 |
|      | $B_{i2} = 1 - 2 \cdot \frac{(\alpha_i z)^5}{5!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{10}}{10!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{15}}{15!}$                                                            |
|      | $C_{i2} = \alpha_i z - 3 \cdot \frac{(\alpha_i z)^6}{6!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{11}}{11!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{16}}{16!}$                                                   |
|      | $D_{i2} = \frac{(\alpha_i z)^2}{2} - 4 \cdot \frac{(\alpha_i z)^7}{7!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{12}}{12!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{17}}{17!}$                                     |
| 弯矩   | $A_{i3} = -\frac{(\alpha_i z)^3}{6} + 6 \cdot \frac{(\alpha_i z)^8}{8!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{13}}{13!} + 6 \cdot 11 \cdot 16 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{18}}{18!}$                                  |
|      | $B_{i3} = -2 \cdot \frac{(\alpha_i z)^4}{4!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\alpha_i z)^9}{9!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{14}}{14!} + 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 17 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{19}}{19!}$ |
|      | $C_{i3} = 1 - 3 \cdot \frac{(\alpha_i z)^5}{5!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{10}}{10!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{15}}{15!}$                                                            |
|      | $D_{i3} = \alpha_i z - 4 \cdot \frac{(\alpha_i z)^6}{6!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{11}}{11!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{16}}{16!}$                                                   |
| 剪力   | $A_{i4} = -\frac{(\alpha_i z)^2}{2} + 6 \cdot \frac{(\alpha_i z)^7}{7!} - 6 \cdot 11 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{12}}{12!} + 6 \cdot 11 \cdot 16 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{17}}{17!}$                                  |
|      | $B_{i4} = -2 \cdot \frac{(\alpha_i z)^3}{6!} + 2 \cdot 7 \cdot \frac{(\alpha_i z)^8}{8!} - 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{13}}{13!} + 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 17 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{18}}{18!}$ |
|      | $C_{i4} = -3 \cdot \frac{(\alpha_i z)^4}{4!} + 3 \cdot 8 \cdot \frac{(\alpha_i z)^9}{9!} - 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{14}}{14!} + 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot 18 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{19}}{19!}$ |
|      | $D_{i4} = 1 - 4 \cdot \frac{(\alpha_i z)^5}{5!} + 4 \cdot 9 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{10}}{10!} - 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot \frac{(\alpha_i z)^{15}}{15!}$                                                            |

注:当  $0 \leq z \leq h_1$  时,即为  $i=1$  时,直接用表中公式计算各系数;当  $h_1 \leq z \leq h_2$  时(即  $i=2$  时),用  $z-h_1$  代替  $z$  计算各系数;当  $h_2 \leq z \leq h$  时(即  $i=3$  时),用  $z-h_2$  代替  $z$  计算各系数。

表 2 土-土-岩型  $i=3$  时 ( $h_2 \leq z \leq h$ ) 的无量纲计算系数表Table 2 Dimensionless coefficients of a pile in the case of soil-soil-rock type ( $i=3$  or  $h_2 \leq z \leq h$ )

| 计算内容 | 计算系数                                                                                                                                           |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 侧向位移 | $A_{31} = \cos(\alpha_3(z - h_2)) \cdot \cosh(\alpha_3(z - h_2))$                                                                              |
|      | $B_{31} = \frac{1}{2} \cdot (\sin(\alpha_3(z - h_2)) \cdot \cosh(\alpha_3(z - h_2)) + \cos(\alpha_3(z - h_2)) \cdot \sinh(\alpha_3(z - h_2)))$ |
|      | $C_{31} = \frac{1}{2} \sin(\alpha_3(z - h_2)) \cdot \sinh(\alpha_3(z - h_2))$                                                                  |
|      | $D_{31} = \frac{1}{4} \cdot (\sin(\alpha_3(z - h_2)) \cdot \cosh(\alpha_3(z - h_2)) - \cos(\alpha_3(z - h_2)) \cdot \sinh(\alpha_3(z - h_2)))$ |
| 转角   | $A_{32} = -4 \cdot D_{31}$                                                                                                                     |
|      | $B_{32} = A_{31}$                                                                                                                              |
|      | $C_{32} = B_{31}$                                                                                                                              |
|      | $D_{32} = C_{31}$                                                                                                                              |
| 弯矩   | $A_{33} = -4 \cdot C_{31}$                                                                                                                     |
|      | $B_{33} = -4 \cdot D_{31}$                                                                                                                     |
|      | $C_{33} = A_{31}$                                                                                                                              |
|      | $D_{33} = B_{31}$                                                                                                                              |
| 剪力   | $A_{34} = -4 \cdot B_{31}$                                                                                                                     |
|      | $B_{34} = -4 \cdot C_{31}$                                                                                                                     |
|      | $C_{34} = -4 \cdot D_{31}$                                                                                                                     |
|      | $D_{34} = A_{31}$                                                                                                                              |

表 3 土-岩-岩型  $i=2$  时 ( $h_1 \leq z \leq h_2$ ) 的无量纲计算系数表Table 3 Dimensionless coefficients of a pile in the case of soil-rock-rock type ( $i=2$  or  $h_1 \leq z \leq h_2$ )

| 计算内容 | 计算系数                                                                                                                                           |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 侧向位移 | $A_{21} = \cos(\alpha_2(z - h_1)) \cdot \cosh(\alpha_2(z - h_1))$                                                                              |
|      | $B_{21} = \frac{1}{2} \cdot (\sin(\alpha_2(z - h_1)) \cdot \cosh(\alpha_2(z - h_1)) + \cos(\alpha_2(z - h_1)) \cdot \sinh(\alpha_2(z - h_1)))$ |
|      | $C_{21} = \frac{1}{2} \sin(\alpha_2(z - h_1)) \cdot \sinh(\alpha_2(z - h_1))$                                                                  |
|      | $D_{21} = \frac{1}{4} \cdot (\sin(\alpha_2(z - h_1)) \cdot \cosh(\alpha_2(z - h_1)) - \cos(\alpha_2(z - h_1)) \cdot \sinh(\alpha_2(z - h_1)))$ |
| 转角   | $A_{22} = -4 \cdot D_{21}$                                                                                                                     |
|      | $B_{22} = A_{21}$                                                                                                                              |
|      | $C_{22} = B_{21}$                                                                                                                              |
|      | $D_{22} = C_{21}$                                                                                                                              |
| 弯矩   | $A_{23} = -4 \cdot C_{21}$                                                                                                                     |
|      | $B_{23} = -4 \cdot D_{21}$                                                                                                                     |
|      | $C_{23} = A_{21}$                                                                                                                              |
|      | $D_{23} = B_{21}$                                                                                                                              |
| 剪力   | $A_{24} = -4 \cdot B_{21}$                                                                                                                     |
|      | $B_{24} = -4 \cdot C_{21}$                                                                                                                     |
|      | $C_{24} = -4 \cdot D_{21}$                                                                                                                     |
|      | $D_{24} = A_{21}$                                                                                                                              |

表 4 全岩型  $i=1$  时 ( $0 \leq z \leq h_1$ ) 的无量纲计算系数表

Table 4 Dimensionless coefficients of a pile in the case of rock-rock-rock type ( $i=1$  or  $0 \leq z \leq h_1$ )

| 计算内容 | 计算系数                                                                                                               |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 侧向位移 | $A_{11} = \cos(\alpha_1 z) \cdot \cosh(\alpha_1 z)$                                                                |
|      | $B_{11} = \frac{1}{2} \cdot (\sin(\alpha_1 z) \cdot \cosh(\alpha_1 z) + \cos(\alpha_1 z) \cdot \sinh(\alpha_1 z))$ |
|      | $C_{11} = \frac{1}{2} \cdot \sin(\alpha_1 z) \cdot \sinh(\alpha_1 z)$                                              |
|      | $D_{11} = \frac{1}{4} \cdot (\sin(\alpha_1 z) \cdot \cosh(\alpha_1 z) - \cos(\alpha_1 z) \cdot \sinh(\alpha_1 z))$ |
| 转角   | $A_{12} = -4 \cdot D_{11}$                                                                                         |
|      | $B_{12} = A_{11}$                                                                                                  |
|      | $C_{12} = B_{11}$                                                                                                  |
|      | $D_{12} = C_{11}$                                                                                                  |
| 弯矩   | $A_{13} = -4 \cdot C_{11}$                                                                                         |
|      | $B_{13} = -4 \cdot D_{11}$                                                                                         |
|      | $C_{13} = A_{11}$                                                                                                  |
|      | $D_{13} = B_{11}$                                                                                                  |
| 剪力   | $A_{14} = -4 \cdot B_{11}$                                                                                         |
|      | $B_{14} = -4 \cdot C_{11}$                                                                                         |
|      | $C_{14} = -4 \cdot D_{11}$                                                                                         |
|      | $D_{14} = A_{11}$                                                                                                  |

3 实例分析

如图 3 所示的某采用单排抗滑桩加固的坡体,该坡体主要由 4 类地层组成,上部为碎石土,下部依次为强风化、弱风化和微风化的砂岩,地质勘查表明碎石土与强风化砂岩界面为坡体的潜在滑动面,坡体和桩体的主要物理力学参数如表 5 所示,桩体为 2 m × 3 m × 30.2 m 的钢筋混凝土 (C30 砼) 抗滑桩,桩间距为 5 m,其他几何参数如图 3 中所示。为了便于说明问题,对于图 3 所示的实例,采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立数值模拟模型如图 4 所示。在设计稳定性系数为 1.1 的情况下,得到滑面处 (基岩顶面) 桩体弯矩与剪力分别为 45 200 kN·m 和 5 520 kN。

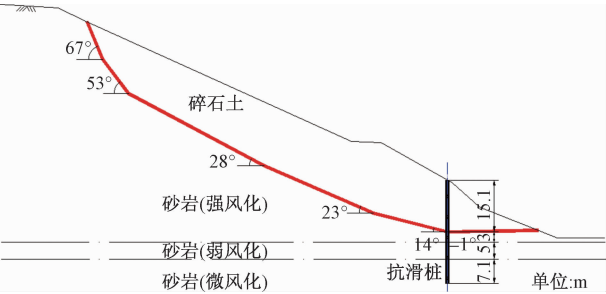


图 3 工程实例横断面示意图

Fig. 3 Cross section of a practical slope reinforced with stabilizing piles

表 5 抗滑桩加固坡体实例的主要物理力学参数

Table 5 Main physical and mechanical parameters of the slope reinforced with stabilizing piles

|       | 重度/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 黏聚力/<br>kPa | 内摩擦<br>角/( $^\circ$ ) | 弹性模<br>量/MPa | 泊松比  |
|-------|--------------------------------------------|-------------|-----------------------|--------------|------|
| 碎石土   | 22                                         | 14.5        | 22                    | 50           | 0.33 |
| 强风化砂岩 | 23                                         | 100         | 35                    | 300          | 0.28 |
| 弱风化砂岩 | 23                                         | 500         | 38                    | 600          | 0.25 |
| 微风化砂岩 | 23                                         | 1 000       | 40                    | 1 000        | 0.23 |
| 抗滑桩   | 25                                         | —           | —                     | 30 000       | 0.22 |

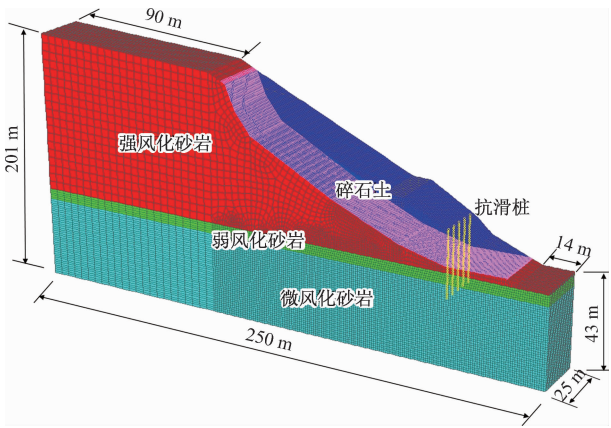


图 4 实例三维数值模型

Fig. 4 Three dimensional numerical simulation model of a practical slope

由于嵌固段地层由强、弱和微风化砂岩 3 段组成,因而可将其视为“全岩型”,把桩体嵌固段顶端的弯矩和剪力计算值代入前述的相关公式中,可得到嵌固段的内力和侧向位移计算结果如图 5 所示。可见,抗滑桩嵌固段内力和位移的理论计算与数值模拟结果较为接近,且理论计算结果略偏于安全。

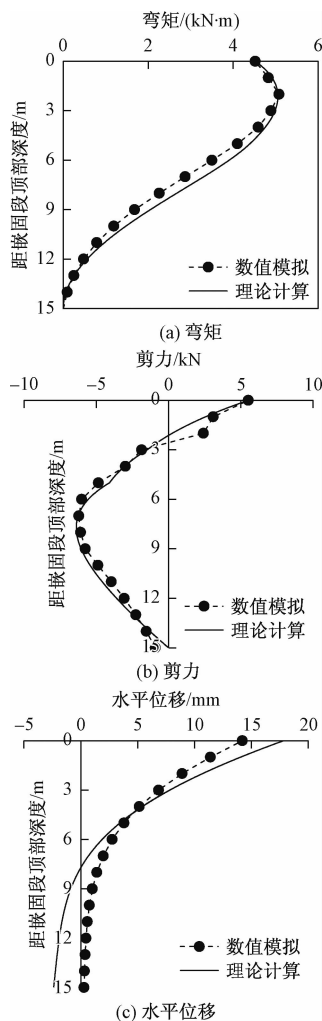


图 5 实例边坡抗滑桩嵌固段内力和位移计算结果

Fig. 5 Internal forces and displacements of the fixed segment of piles of the practical example

## 4 讨论

### (1) 数值模型中地基抗力系数的处理

工程实践中,一般可采用侧向载荷试验确定地基的水平弹性抗力系数。但是,由于试验中采用的荷载板尺寸较小(直径或边长不超过 1 m),对于实际工程的数值模拟而言,受到单元划分尺度和模型尺度的影响,有时不便于模拟实际的载荷试验。因此,这里采用简化处理方法,取数值模型中所模拟各地层的中点处

(厚度方向)的节点侧向应力与位移之间的比值,作为该地层的水平弹性抗力系数平均值。对于前述的实例坡体(图 3),滑床所包括的 3 类地层(强风化、弱风化、微风化砂岩)的节点侧向应力与位移之间关系数值模拟结果(FLAC<sup>3D</sup>)如图 6 所示。因此,可得到这 3 类地层的平均水平弹性抗力系数分别为: $k_1 = 62.33$  MPa/m,  $k_2 = 79.21$  MPa/m,  $k_3 = 186.17$  MPa/m。将其代入前述的计算公式,即可得到图 5 所示的桩体嵌固段相关计算结果。

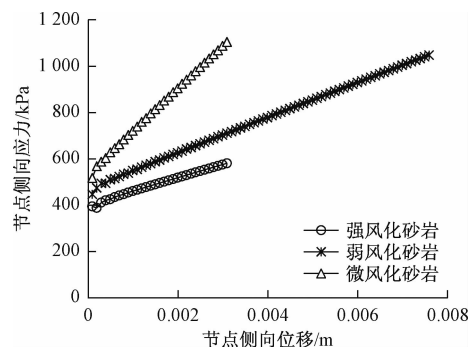


图 6 实例坡体滑床的侧向平均应力与位移的关系

Fig. 6 Relationship between lateral average stress and displacement of the sliding bed in practical slope

### (2) 全土型算例分析

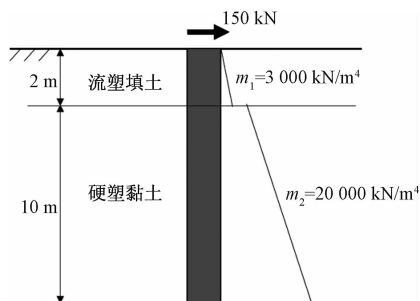
如图 7 所示的实例<sup>[6]</sup>,置于两层土层中直径为 1 m 的灌注桩,桩顶弯矩为零,水平剪力为 150 kN,桩体混凝土弹性模量 32.35 GPa,上层与下层土体的弹性抗力系数的比例系数分别为 3 000 kN/m<sup>4</sup> 和 20 000 kN/m<sup>4</sup>。采用本文方法计算得到的桩顶水平位移、桩身最大弯矩及其位置如表 6 所示,本文方法得到的桩身最大弯矩为 335.89 kN·m,与有限差分法<sup>[6]</sup>、等效 m 法相差分别约 0.5% 和 41%。可见,本文方法与有限差分法的计算结果十分接近,但二者均与等效 m 法的结果有较大差异。

表 6 某两层土体地层算例计算结果

Table 6 Calculation results of the pile embedded in two layers of soil

| 计算方法                 | 桩顶位移/<br>mm | 最大弯矩/<br>kN·m | 最大弯矩位置<br>距桩顶深度/m |
|----------------------|-------------|---------------|-------------------|
| 有限差分法 <sup>[6]</sup> | 4.298 9     | 337.60        | 3.0               |
| 等效 m 法               | 3.027 3     | 237.89        | 2.72              |
| 本文方法                 | 4.336 0     | 335.89        | 3.00              |

如图 8(a)所示的福州市某工程桩位于 3 层土体中<sup>[6]</sup>,上、中、下 3 层土体的弹性抗力系数的比例系数分别为 10 000 kN/m<sup>4</sup>、2 000 kN/m<sup>4</sup> 和 20 000 kN/m<sup>4</sup>。桩顶荷载及桩体几何条件同图 8 所示的实

图7 某两层土地层计算实例<sup>[6]</sup>Fig. 7 An example of a laterally loaded pile embedded in two layers of soil<sup>[6]</sup>

例。如图8(b)、(c)、(d)所示,本文方法与有限差分法计算的桩身弯矩、剪力和侧向位移沿桩轴向变化规律几乎完全一致,但均与等效 m 法有一定的差异;本文方法得到的最大弯矩值与有限差分法相差 0.32%,均显著小于等效 m 法的结果(分别相差 25.5%、25.3%);本文算法得到的桩身下半部分最大剪力接近于有限差分法和等效 m 法计算结果(分别相差 2.37%、2.42%),且均小于桩顶处剪力;本文算法得到的桩顶位移十分接近于有限差分法结果(相差 0.7%),但显著小于等效 m 法结果(相差 27.5%)。

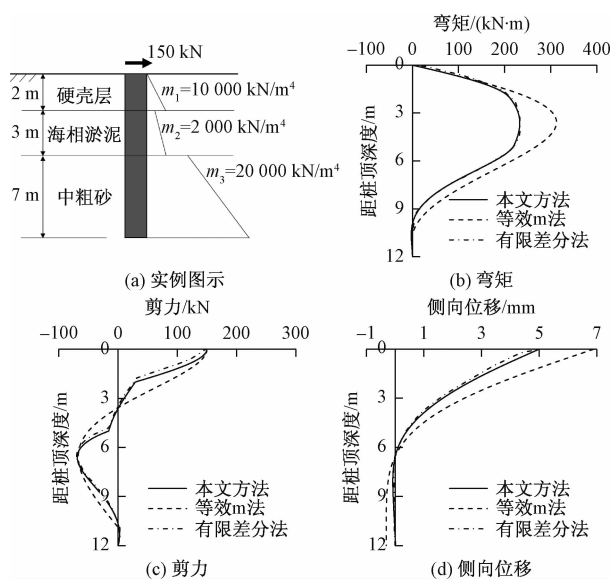


图8 某位于3层土体的侧向受荷桩工程实例与计算结果  
Fig. 8 An example of a laterally loaded pile embedded in three layers of soil and its calculation results

### (3) 全岩型算例分析

湖北省秭归县马家沟 I 号滑坡滑床由上而下为 3 段岩体地层<sup>[16]</sup>,分别为厚 1 m 的粉砂质泥岩、厚 6 m 的长石英英砂岩和厚 1 m 的粉砂质泥岩,地层侧向抗力系数分别为  $1.5 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 、 $3.9 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$  和

$2.5 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 。采用 C30 混凝土浇筑抗滑桩加固,桩截面为  $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,桩间距为 7 m,主滑断面处滑坡推力为 1 062.66 kN/m,桩长为 22 m(嵌固段长 8 m),其余参数详见文献[16]。桩身内力、位移及地层抗力计算结果如图 9 所示。可见,除了桩截面转角外,本文方法的计算结果与文献[16]的结果较为接近,但在量值上二者均与等效 k 法有一定的差异;同时,本文方法与等效 k 法计算得到的桩身截面转角在分布规律上有一致性,但均与文献[16]的结果差异很大。

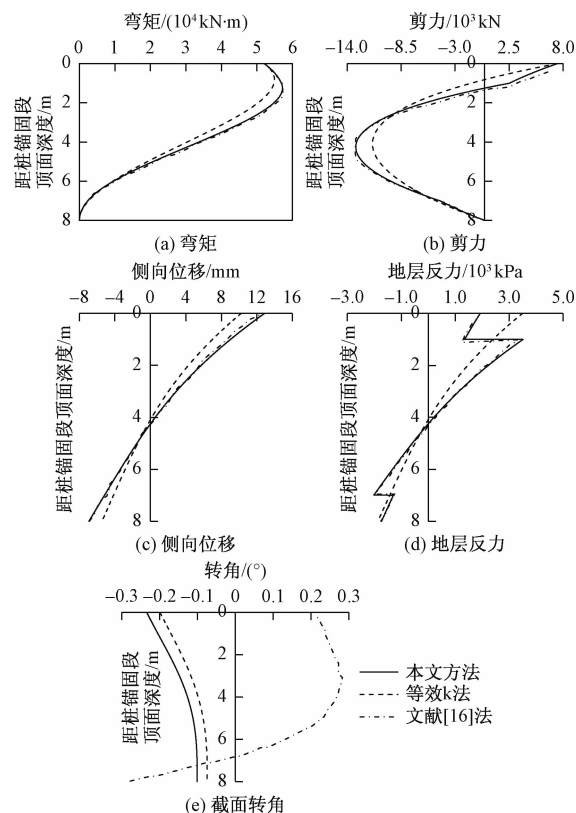


图9 位于3层岩体的抗滑桩嵌固段计算结果  
Fig. 9 Calculation results of the fixed end of the pile in three layers of rock strata

### (4) 土岩复合型

如图 10(a) 所示,某基桩置于 3 层地层中,上、中、下 3 层分为硬壳层、海相淤泥和粉质泥岩,各地层水平抗力系数如图中所示,此类地层属于前述的“土土岩型”地层。桩体顶部作用有横向弯矩 600 kN·m 和水平力 150 kN,桩体几何及物理参数同图 7 所示的算例。采用本文方法算得桩体、弯矩、剪力和侧向位移分布图如图 10(b)、(c)、(d) 所示。由于各地层物理力学性质差异较大,桩身剪力分布图呈明显的非光滑性。图 11(a) 则给出了某基桩位于“土岩岩型”地层的算例,桩周地层由上而下依次为硬壳土层、粉质泥岩和强风化砂岩,桩顶

承受荷载及桩体相关参数同图 10 所示的算例。采用本文方法可计算得到如图 11(b)、(c)、(d) 所示的桩体侧向位移、弯矩和剪力分布图,与图 10 相应结果对比可见,此时桩体最大侧向位移小于前者,但桩身最大剪力和弯矩均大于前者,其原因在于此时桩周地层对桩体的约束作用强于前者,尤其是桩体大部分位于水平抗力系数相对较高的强风化砂岩地层中。

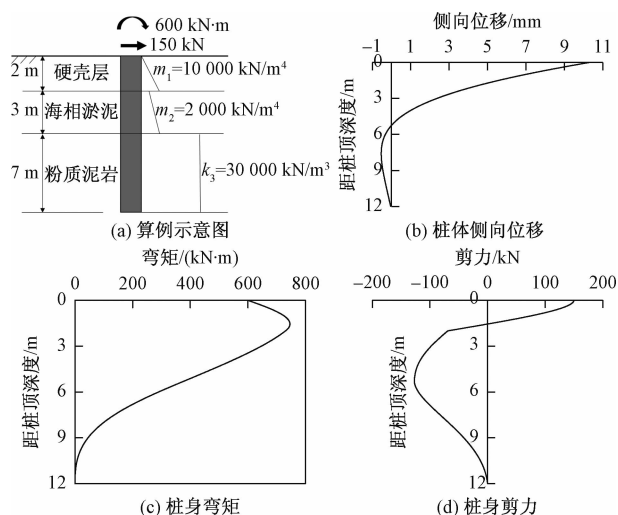


图 10 基桩位于“土土岩型”地层算例与计算结果

Fig. 10 An example of a pile embedded in soil-soil-rock strata and the calculation results of pile responses

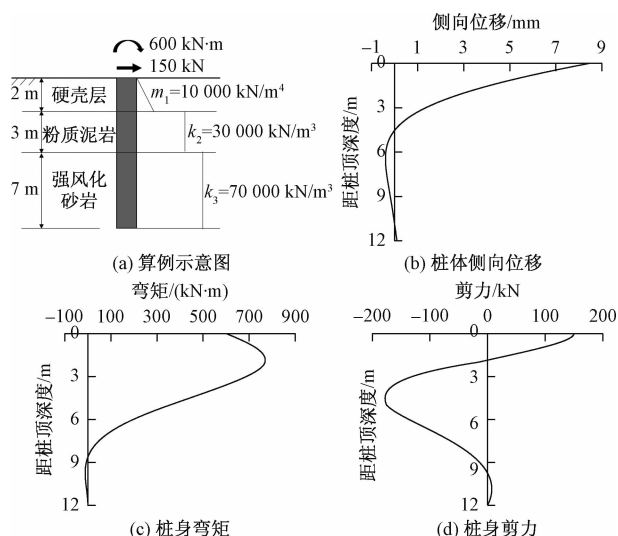


图 11 基桩位于“土岩岩型”地层算例与计算结果

Fig. 11 An example of a pile embedded in soil-rock-rock strata and the calculation results of pile responses

## 5 结论

对于嵌固段位于多种地层的抗滑桩,应考虑实际

地层特点计算分析抗滑桩嵌固段的内力和位移。针对抗滑桩嵌固段地层为 3 层(含少于 3 层)的常见情况,本研究将其分为全土型、土土岩型、土岩岩型和全岩型 4 种典型类型(或称之为全土型、土岩复合型、全岩型),主要得到如下结论:

(1) 嵌固段位于多种地层的抗滑桩,其嵌固段内力与位移分析可以采用基于实际地基系数的弹性地基梁法,可以得到明确的计算公式,从而可方便快捷地计算分析抗滑桩嵌固段,便于实际工程应用。

(2) 对于工程实践中常见的嵌固段位于全土型、土岩复合型与全岩型等 4 类典型地层的抗滑桩,采用基于实际地基系数的弹性地基梁法计算抗滑桩嵌固段,比传统的等效地基系数法概念更加清晰且计算结果也更加合理。同时,相对于有限差分法等数值分析方法,本文所提出的方法计算过程更加简单。

(3) 对于地层条件较为复杂的土岩复合型地层情况,传统的计算方法一般难以方便地获得解答,而采用本文方法,根据推导的相关计算公式可较为便捷地得到桩体的内力和位移以及地层侧向抗力。

## 参考文献:

- [1] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
The second institute of survey and design of Chinese Railway Ministry. Design and calculation of stabilizing piles[M]. Beijing: China Railway Press, 1983.
- [2] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63—2007 [S].  
Specifications for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts: JTG D63—2007 [S].
- [3] 张浩, 石名磊, 郭院成, 等. 不平衡堆载作用下邻近结构桩的侧向受力机制[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2226—2235.  
ZHANG Hao, SHI Minglei, GUO Yuancheng, et al. Lateral mechanical behaviors of structural piles adjacent to imbalanced surcharge loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2226—2235.
- [4] 鲁子爱. 多层地基横向荷载桩  $K_s$  值分布研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 48—56.  
LU Ziai. Study on modulus of subgrade reaction for lateral loaded piles in multiple layered foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 48—56.

- [5] 董曼曼, 王亮清, 葛云峰, 等. 考虑滑床复合倾斜岩体综合地基系数的抗滑桩受力特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3000–3008.
- DONG Manman, WANG Liangqing, GE Yunfeng, et al. Study on mechanical characters of anti-sliding pile considering the integrated foundation coefficient of sliding bed on composite inclined rockmass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 3000–3008.
- [6] 戴自航, 陈林靖. 多层地基中水平荷载桩计算 m 法的两种数值解[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 690–696.
- DAI Zihang, CHEN Linjing. Two numerical solutions of laterally loaded piles installed in multi-layered soils by m method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 690–696.
- [7] POULOS H G. Behavior of laterally loaded piles: I-single piles [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(SM5): 711–731.
- [8] GUO W D, LEE F H. Load transfer approach for laterally loaded piles [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods for Geomechanics, 2001, 25(11): 1101–1129.
- [9] GUO Weidong. Pu-Based solutions for slope stabilizing piles [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(3): 292–310.
- [10] CHORE H S, INGLE R K, SAWANT V A. Non-linear analysis of pile groups subjected to lateral loads using ‘p-y’ curve [J]. Interaction and Multiscale mechanics, 2012, 5(1): 57–73.
- [11] ALIASGER E, HAIDERALI, GOPAL MADABHUSHI. Evaluation of curve fitting techniques in deriving p-y curves for laterally loaded piles [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(5): 1453–1473.
- [12] CHOO Y W, KIM D. Experimental development of the p-y relationship for large-diameter offshore monopiles in sands: centrifuge tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 04015058;1–12.
- [13] 凌道盛, 任涛, 王云岗. 砂土地基斜桩水平承载特性 p-y 曲线法[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 155–162.
- LING Daosheng, REN Tao, WANG Yungang. A p-y curve method for horizontal bearing characteristics of single batter pile in sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 155–162.
- [14] ANDERSON J B, TOWNSEND F C, GRAJALES B. Case history evaluation of laterally loaded piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(3): 187–196.
- [15] KIM T K, KIM N K, LEE W J. et al. Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong river sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, 130(4): 416–425.
- [16] 詹红志, 王亮清, 王昌硕, 等. 考虑滑床不同地基系数的抗滑桩受力特征研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 250–256.
- ZHAN Hongzhi, WANG Liangqing, WANG Changshuo, et al. Study of mechanical characters of anti-sliding piles considering different foundation coefficients of sliding bed [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 250–256.