

滑体段采用 m 法模型的抗滑桩计算方法

毛坚强¹, 徐 骏², 杨 磊¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司科学技术研究院, 四川 成都 610031)

摘 要: 在目前的抗滑桩设计计算方法中, 多将抗滑桩与滑体间的作用力简化为已知荷载, 而忽略了该力与桩位移直接相关的特点。对目前的计算模型进行了改进, 采用 m 法模型模拟桩前滑体对桩的抗力, 并分别对桩在滑面以上、以下的部分建立计算方程, 应用幂级数法解得其位移及内力的表达式, 再利用桩的上、下段在滑面处的变形协调条件, 求得该截面的弯矩和剪力, 最终得到整个桩的变形和内力以及桩、土之间的作用力。最后, 分别应用该方法和有限元法对一算例进行计算, 其结果吻合很好, 证明了该方法的正确性。

关 键 词: 抗滑桩; 滑体; m 法; 幂级数法

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018)04—1197—06

An improved method for stabilising pile by using m -method model to the whole pile

MAO Jian-qiang¹, XU Jun², YANG Lei¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Science and Technology Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: For the existing calculation methods for the stabilising pile, the interaction between pile and landslide body is simplified as the determined load. However, these methods all ignore the direct dependence of the interaction on the displacement of the pile. This study developed a method, in which m -method model was employed to simulate the interaction between landslide body and pile. Meanwhile, equations were established for the piles above and below the slip surface respectively, and their expressions of displacement and internal force were also solved with power series method. Meanwhile, the bending moment and shear force at the slip surface were obtained by using deformation coordinating conditions of the upper and lower piles at the sliding surface. Hence, the deformation, internal force of the pile and the interaction between pile and landslide body were easily computed. Finally, an example was calculated by the presented method and FEM, respectively. It was found that results were in good agreement, which verified the correctness of the method.

Keywords: stabilising pile; landslide body; m -method; power series method

1 引 言

抗滑桩是滑坡及边坡工程中一种广泛应用的抗滑支挡结构, 对其作用机制及计算方法的研究一直受到重视^[1-5]。桩的内力计算是抗滑桩设计中的重要内容, 本质上讲, 这属于桩-土相互作用的问题。抗滑桩计算时, 通常多采用一系列独立的弹簧模拟岩土体对桩的作用^[1, 6-8]。其中, 抗力系数反映了土(岩)抵抗桩体横向位移的能力及特性, 它可取为常数, 如 K 法; 也可假设为深度的函数, 以反映土性随深度的变化, 如 m 法等。同时, 为简化计算,

多将桩前滑面以上部分所受的土抗力简化为可预先确定的荷载, 例如, 在单排桩的计算中, 桩前土抗力常采用桩前滑体的剩余抗滑力或其被动土压力^[1], 但这显然与桩的实际受力状态存在差距。而在双排桩的设计中, 因需确定后排桩传向前方滑体的推力(即滑体对桩的抗力), 显然已不能采用这样的处理方法。

为解决后排桩对滑体推力的问题, 陈曦^[9]对桩前滑面以上的土体采用了 K 法模型, 这显然是一个进步, 但将滑体段桩的下端简化为固支约束以简化计算, 与实际相差较大。肖世国等^[10]对此进行改进,

去掉了上述约束条件, 并通过迭代法解决了滑体段桩与锚固段桩之间的变形协调问题, 但对工程计算来说, 迭代求解并不是一个理想的方法, 而且 K 法模型通常也不是描述滑体土力学性质的理想模型。除此之外, 虽然目前抗滑桩已有大量的研究工作及成果, 但针对这一问题的类似研究工作却较少。本文中, 将采用更为合理的 m 法模型模拟桩前滑体对桩的作用, 并建立相应的计算公式及方法。

2 抗滑桩的计算公式及方法

2.1 抗滑桩的计算模型

抗滑桩的计算模型如图 1 所示。其中, 假设下滑推力沿深度呈线性分布。滑体的弹性抗力系数假设为

$$k_1 = m_1 y \quad (1)$$

而滑床的抗力系数应考虑上覆土层的影响, 因此表示为

$$k_2 = k_0 + m_2(y - l_0) \quad (2)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为滑体、滑床抗力系数随深度变化的比例系数; k_0 为滑床在滑面处的抗力系数, 相应的计算方法简称为 m 法。若令式中的 $m_2 = 0$, 则 k_2 变为常数, 退化为 K 法。

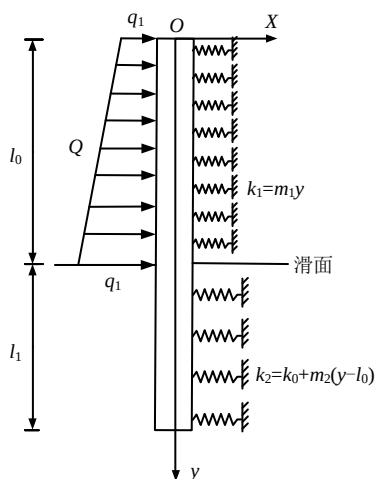


图 1 抗滑桩计算模型

Fig.1 Mechanical model of stabilizing pile

本文方法的求解思路是: ①分别建立桩在滑体段(上段)、滑床段(下段)的变形及内力表达式, 其中包含待定参数(为桩在滑面处的弯矩和剪力)。②利用上、下两段在滑面处($y = l_0$)的变形协调条件, 确定上述待定参数。③将已确定的待定参数代回①中所建立的计算公式, 最终得到抗滑桩在上、下段的变形、内力及桩前推力的计算公式。

2.2 滑体段桩的位移及内力表达式

按横向受力桩的计算理论, 滑体段(滑面以上)桩的平衡方程可表达为

$$E_p I_p \frac{d^4 X}{dy^4} + p b_0 - q = 0 \quad (3)$$

式中: X 为桩的水平位移; $E_p I_p$ 为桩的抗弯刚度; b_0 为桩的计算宽度; p 为桩前土的抗力; q 为桩所受的下推推力, 假设沿深度呈线性分布形式:

$$q = \frac{(l_0 - y)q_1 + yq_2}{l_0} \quad (4)$$

式中: p 大小与桩的水平位移成正比, 结合式(1), 有

$$p = k_1 X = m_1 y X \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)并整理后, 得

$$\frac{d^4 X}{dy^4} + \alpha_0^5 y X - (\lambda_1 + \lambda_2 y) = 0 \quad (6)$$

式中: $\alpha_0 = \sqrt[5]{\frac{m_1 b_0}{E_p I_p}}$ 为桩的变形系数(上段); $\lambda_1 = \frac{q_1}{E_p I_p}$, $\lambda_2 = \frac{(q_2 - q_1)}{E_p I_p l_0}$ 为对应于推力的系数项。

式(6)中等式左边第 3 项为 0 时, 即成为目前广为应用的抗滑桩及其他类型横向受力桩的计算方程, 通常采用幂级数法^[11]求解。对方程式(6), 也将采用此法求解。

将桩的水平位移以幂级数的形式表达为

$$X = \sum_{i=0}^{\infty} c_i y^i \quad (7)$$

式中: c_i 为待定系数。将式(7)代入式(6), 得

$$\sum_{i=4}^{\infty} i(i-1)(i-2)(i-3)c_i y^{i-4} + \alpha_0^5 \sum_{i=0}^{\infty} c_i y^{i+1} - (\lambda_1 + \lambda_2 y) = 0 \quad (8)$$

若将式(8)中 y 的同幂次的系数合并, 则为满足上式, 各系数项均应等于 0, 由此得到

$$\left. \begin{aligned} c_4 &= \frac{\lambda_1}{4!} \\ c_5 &= \frac{\lambda_2 - \alpha_0^5 c_0}{5!} \\ c_{i+5} &= -\frac{\alpha_0^5}{(i+5)(i+4)(i+3)(i+2)} c_i \quad (i=1, 2, 3, 4, 5, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(9)第 3 式的递推关系展开后, 可得到 c_6 、 c_7 、 c_8 、 c_9 、 c_{10} 、... 与 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 之间的关系为

$$c_{5j+k} = \alpha_0^{5j} (-1)^j \frac{\prod_{i=1}^j (5i+k-4)k!}{(5j+k)!} c_k \quad (10)$$

($j=1, 2, 3, \dots; k=1, 2, 3, 4, 5$)

将式(9)第1、2式及式(10)代回式(7), 整理后得

$$X = \sum_{k=0}^5 \left[\frac{(\alpha_0 y)^k}{k!} + \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^j \frac{\prod_{i=1}^j (5i+k-4)}{(5j+k)!} (\alpha_0 y)^{5j+k} \right] \sigma_k \quad (11)$$

σ_k ($k=0, 1, 2, 3, 4, 5$) 可用矩阵的形式表示为

$$\sigma = \begin{bmatrix} c_0 & \frac{c_1}{\alpha_0} & \frac{2c_2}{\alpha_0^2} & \frac{6c_3}{\alpha_0^3} & \frac{\lambda_1}{\alpha_0^4} & \frac{\lambda_2}{\alpha_0^5} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

通过以上工作, 式(7)中位移 X 表达式中的无限多个待定系数已缩减为 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 等4个系数 (λ_1 、 λ_2 已知)。对式(11)逐次求导, 可相继得到转角 θ 、弯矩 M 、剪力 H 等变量的表达式, 这里不再一一列出。最后, 若将桩的变形和内力统一地表示为

$$Z = [X \quad \theta \quad M \quad H]^T \quad (13)$$

则有

$$Z = V\sigma \quad (14)$$

式中: V 的各元素 V_{IJ} ($I=1, 2, 3, 4; J=1, 2, 3, 4, 5, 6$) 的表达式为

$$V_{IJ} = \frac{(\alpha_0 y)^{J-I}}{(J-I)!} + \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^j \frac{\prod_{i=1}^j (5i+J-5)}{(5j+J-I)!} (\alpha_0 y)^{5j+J-I} \quad (15)$$

将桩顶处 ($y=0$) 的边界条件代入式(14), 则 σ 可表达为

$$\sigma = \begin{bmatrix} X_0 & \frac{\theta_0}{\alpha_0} & \frac{M_0}{\alpha_0^2 E_p I_p} & \frac{H_0}{\alpha_0^3 E_p I_p} & \frac{\lambda_1}{\alpha_0^4} & \frac{\lambda_2}{\alpha_0^5} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

式中: X_0 、 θ_0 、 M_0 、 H_0 分别为桩顶的位移、转角、弯矩及剪力。

为便于下文公式的应用, 将矩阵 V 表示为

$$V = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & F_1 & G_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 & F_2 & G_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 & F_3 & G_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 & F_4 & G_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: 系数 A 、 B 、 C 、 D 的意义及表达式同现有计算方法^[1], 但新增了系数 F 和 G , 分别对应于式(16)中的荷载项 λ_1 和 λ_2 。

2.3 桩在滑面处的变形与内力的关系

由于桩顶处的弯矩 M_0 及水平力 H_0 均为 0, 故由式(14), 桩在滑面处 ($y=l_0$) 的变形及内力计算公式可表达为

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= A_{11}X_0 + B_{11}\frac{\theta_0}{\alpha_0} + F_{11}\frac{\lambda_1}{\alpha_0^4} + G_{11}\frac{\lambda_2}{\alpha_0^5} \\ \frac{\theta_1}{\alpha_0} &= A_{21}X_0 + B_{21}\frac{\theta_0}{\alpha_0} + F_{21}\frac{\lambda_1}{\alpha_0^4} + G_{21}\frac{\lambda_2}{\alpha_0^5} \\ \frac{M_1}{E_p I_p \alpha_0^2} &= A_{31}X_0 + B_{31}\frac{\theta_0}{\alpha_0} + F_{31}\frac{\lambda_1}{\alpha_0^4} + G_{31}\frac{\lambda_2}{\alpha_0^5} \\ \frac{H_1}{E_p I_p \alpha_0^3} &= A_{41}X_0 + B_{41}\frac{\theta_0}{\alpha_0} + F_{41}\frac{\lambda_1}{\alpha_0^4} + G_{41}\frac{\lambda_2}{\alpha_0^5} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: 各系数的第2个下标均为1, 表示其为 $y=l_0$ 处的值。以上4式联立, 消去 X_0 及 θ_0 后得

$$X_1 = \Delta_{HH}H_1 + \Delta_{HM}M_1 + \Delta_{H\lambda_1}\lambda_1 + \Delta_{H\lambda_2}\lambda_2 \quad (19)$$

$$\theta_1 = \Delta_{MH}H_1 + \Delta_{MM}M_1 + \Delta_{M\lambda_1}\lambda_1 + \Delta_{M\lambda_2}\lambda_2 \quad (20)$$

式中: Δ_{HH} 、 Δ_{HM} 、 $\Delta_{H\lambda_1}$ 、 $\Delta_{H\lambda_2}$ 、 Δ_{MH} 、 Δ_{MM} 、 $\Delta_{M\lambda_1}$ 、 $\Delta_{M\lambda_2}$ 为各柔度系数, 表达式为

$$\Delta_{HH} = \frac{1}{E_p I_p \alpha_0^3} \frac{A_{11}B_{31} - A_{31}B_{11}}{A_{41}B_{31} - A_{31}B_{41}} \quad (21)$$

$$\Delta_{HM} = \frac{1}{E_p I_p \alpha_0^2} \frac{A_{11}B_{41} - A_{41}B_{11}}{A_{31}B_{41} - A_{41}B_{31}} \quad (22)$$

$$\Delta_{H\lambda_1} = \frac{1}{\alpha_0^4} \left[F_{11} + \frac{(A_{41}B_{11} - A_{11}B_{41})F_{31} + (A_{11}B_{31} - A_{31}B_{11})F_{41}}{(A_{31}B_{41} - A_{41}B_{31})} \right] \quad (23)$$

$$\Delta_{H\lambda_2} = \frac{1}{\alpha_0^5} \left[G_{11} + \frac{(A_{41}B_{41} - A_{41}B_{11})G_{31} + (A_{31}B_{11} - A_{11}B_{31})G_{41}}{(A_{41}B_{31} - A_{31}B_{41})} \right] \quad (24)$$

$$\Delta_{MH} = \frac{1}{E_p I_p \alpha_0^2} \frac{(A_{31}B_{21} - A_{21}B_{31})}{(A_{31}B_{41} - A_{41}B_{31})} \quad (25)$$

$$\Delta_{MM} = \frac{1}{E_p I_p \alpha_0} \frac{A_{21}B_{41} - B_{21}A_{41}}{A_{31}B_{41} - A_{41}B_{31}} \quad (26)$$

$$\Delta_{M\lambda_1} = \frac{1}{\alpha_0^3} \left[F_{21} + \frac{(A_{41}B_{21} - A_{21}B_{41})F_{31} + (A_{21}B_{31} - A_{31}B_{21})F_{41}}{(A_{31}B_{41} - A_{41}B_{31})} \right] \quad (27)$$

$$\Delta_{M\lambda_2} = \frac{1}{\alpha_0^4} \left[G_{21} + \frac{(A_{41}B_{21} - A_{21}B_{41})G_{31} + (A_{21}B_{31} - A_{31}B_{21})G_{41}}{(A_{31}B_{41} - A_{41}B_{31})} \right] \quad (28)$$

注意到, 式 (19) 及式 (20) 中的 M_1 及 H_1 目前尚未知量, 需结合锚固段桩的计算公式, 通过滑段桩、锚固段桩在交界处 (滑面位置) 的变形协调条件来确定。

2.4 锚固段桩的变形及内力表达式

在锚固段, 桩的平衡方程为

$$E_p I_p \frac{d^4 X}{dy^4} + p b_0 = 0 \quad (29)$$

$$p = k_2 X \quad (30)$$

式中: k_2 的表达式见式 (2)。将式 (30) 代入式 (29), 再引入虚拟深度 z :

$$z = y - l_0 + \frac{k_0}{m_2} \quad (31)$$

式 (29) 变为我们熟悉的形式:

$$\frac{d^4 X}{dz^4} + \alpha_1^5 z = 0 \quad (32)$$

式中: $\alpha_1 = \sqrt[5]{\frac{m_2 b_0}{E_p I_p}}$ 为桩 (滑面以下) 的变形系数。

$$H_1 = \frac{[A_{H\lambda_1}(\delta_{MM} - A_{MM}) - A_{M\lambda_1}(\delta_{HM} - A_{HM})]\lambda_1 + [A_{H\lambda_2}(\delta_{MM} - A_{MM}) - A_{M\lambda_2}(\delta_{HM} - A_{HM})]\lambda_2}{(\delta_{MM} - A_{MM})(\delta_{HH} - A_{HH}) - (\delta_{MH} - A_{MH})(\delta_{HM} - A_{HM})} \quad (35)$$

$$M_1 = \frac{[A_{H\lambda_1}(\delta_{MH} - A_{MH}) - A_{M\lambda_1}(\delta_{HH} - A_{HH})]\lambda_1 + [A_{H\lambda_2}(\delta_{MH} - A_{MH}) - A_{M\lambda_2}(\delta_{HH} - A_{HH})]\lambda_2}{(\delta_{MH} - A_{MH})(\delta_{HM} - A_{HM}) - (\delta_{HH} - A_{HH})(\delta_{MM} - A_{MM})} \quad (36)$$

上述工作完成后, 按下列步骤计算桩身变形和内力, 以及桩对土 (滑) 体产生的推力:

(1) 将求出的 H_1 及 M_1 代入式 (19)、(20) 或式 (33)、(34), 求得 X_1 及 θ_1 。

(2) 对滑体段, 将 X_1 、 θ_1 或 H_1 、 M_1 代入式 (18) 求得桩顶的位移 X_0 及转角 θ_0 。对锚固段, 由 X_1 、 θ_1 、 H_1 、 M_1 反算出虚拟桩顶点的 X_V 、 θ_V 、 H_V 、 M_V 。

(3) 由式 (14) 计算桩的位移、转角、弯矩、剪力, 由式 (5) 及式 (30) 计算桩前土 (岩) 的抗力。

3 对本文方法的验证

3.1 有限元法计算公式

为验证上述计算公式及过程的正确性, 将对本法与有限元法的结果进行对比。

有限元计算采用相同的模型 (见图 1), 并用一阶 Hermite 多项式模拟梁单元^[12], 其特点是可以保证位移、转角在结点处的连续性。

将滑面以上、以下部分的抗力系数统一写为

$$k = k'_0 + m'y' \quad (37)$$

其中, 对应于滑面以上部分: $k'_0 = 0$, $m' = m_1$, $y' = y$; 滑面以下部分: $k'_0 = k_0$, $m' = m_2$, $y' = y - l_0$ 。

式 (31) 的变换结果, 是形成了一个顶点 ($z=0$) 在滑面以上 k_0/m 处, 长度为 l_1+k_0/m 的虚拟桩, 而滑面的位置对应于 $z=k_0/m$ 。

锚固段的桩在滑面处的位移与力之间的关系可表示为

$$X_1 = H_1 \delta_{HH} + M_1 \delta_{HM} \quad (33)$$

$$\theta_1 = H_1 \delta_{MH} + M_1 \delta_{MM} \quad (34)$$

式中: δ 为柔度系数, 当 $k_0=0$ 时, 其表达式比较简单^[1]; $k_0 \neq 0$ 时, 上述公式相当于虚拟桩在滑面 ($z=k_0/m$) 处位移、转角与弯矩、剪力之间的关系, 其计算公式略为繁琐, 这里不再具体列出。

2.5 滑面处桩的弯矩及剪力的确定

由于桩的上、下两段在滑面处的位移及转角是连续的, 故可将式 (19)、(20) 与式 (33)、(34) 联立并消去未知量 X_1 及 θ_1 , 最终得到该处的剪力和弯矩为

则可以推得 (推导过程略), 桩-土单元的刚度矩阵为

$$K^e = K_b^e + K_s^e \quad (38)$$

$$K_b^e = \frac{E_p I_p}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ \text{对} & & 12 & -6L \\ & \text{称} & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (39)$$

式 (39) 对应于桩单元。

$$K_s^e = b_0(k'_0 + m'y')L \begin{bmatrix} \frac{13}{35} & \frac{11}{210}L & \frac{9}{70} & -\frac{13}{420}L \\ & \frac{1}{105}L^2 & \frac{13}{420}L & -\frac{1}{140}L^2 \\ \text{对} & & \frac{13}{35} & -\frac{11}{210}L \\ & \text{称} & & -\frac{1}{105}L^2 \end{bmatrix} + b_0 m' L^2 \begin{bmatrix} \frac{3}{35} & \frac{1}{60}L & \frac{9}{140} & -\frac{1}{70}L \\ & \frac{1}{280}L^2 & \frac{1}{60}L & -\frac{1}{280}L^2 \\ \text{对} & & \frac{2}{7} & -\frac{1}{28}L \\ & \text{称} & & \frac{1}{168}L^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

式(40)则对应于土抗力的贡献。式中: y' 为该单元的上结点到地面(对滑面以上的单元)或滑面(滑面以下的单元)的铅垂距离。

与下滑力对应的结点荷载为

$$P^e = q_1 L \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{12} L \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{12} L \end{Bmatrix} + (q_2 - q_1) L \begin{Bmatrix} \frac{3}{20} \\ \frac{1}{30} L \\ \frac{7}{20} \\ -\frac{1}{20} L \end{Bmatrix} \quad (41)$$

上述工作完成后,即可按有限元的通用程式建立其最终的方程并求解,此处不再赘述。

3.2 算例及分析

相应的参数为:桩的截面为 $h \times b = 3.75 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 计算宽度 $b_0 = b + 1 = 3 \text{ m}$, 滑面以上长度 $l_0 = 16 \text{ m}$, 滑面以下 $l_1 = 9.5 \text{ m}$, 总长 $l = 25.5 \text{ m}$, 弹性模量 $E_p = 30 \text{ GPa}$; 滑体的 $m_1 = 3 \text{ MPa/m}^2$, 滑床的 $m_2 = 18 \text{ MPa/m}^2$, $k_0 = 7 \text{ MPa/m}$; 作用在桩上的推力沿深度呈梯形分布: $q_1 = 168 \text{ kN/m}$, $q_2 = 582 \text{ kN/m}$ 。计算时假定桩底的边界条件为“自由”(弯矩和剪力为0)。

采用本文方法计算时,式(15)中的级数项取前5项($j=1 \sim 5$),整个计算通过 Matlab 编程实现,并依次得到:滑面处的弯矩 $M_1 = 2\,231.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 剪力 $H_1 = 453.7 \text{ kN}$; 水平位移 $X_1 = 2.5 \text{ mm}$, 转角 $\theta_1 = -0.000\,41 \text{ rad}$; 然后得到桩顶的位移 $X_0 = 9.8 \text{ mm}$, 转角 $\theta_1 = -0.000\,48 \text{ rad}$; 虚拟桩(锚固段)顶部的 $X_V = 2.7 \text{ mm}$, $\theta_V = -0.000\,41 \text{ rad}$, $M_V = 2\,052.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $H_V = 464.1 \text{ kN}$; 最终得到整个桩的水平位移、弯矩、剪力、土抗力等,如图2中所示。

有限元的计算同样通过 Matlab 编程实现。滑面以上及以下各均分为10个单元,其相应的计算结果也绘于图2中。

由图可以看出:

(1) 除剪力在桩顶、桩底及滑面处略有偏差外(显然是有限元法的计算误差),两种方法得到的结果十分吻合,说明本文中建立的计算公式是正确的。

(2) 滑体段的桩前抗力沿深度呈抛物线形分布,从现有的研究成果来看,这样的分布特征是比较合理的^[1, 13]。在目前的设计方法中,对处于稳定状态的桩前土体,通常以剩余抗滑力或被动土压力作为桩前抗力^[1],这可抵消部分滑坡推力,并减小桩的内力,但这只在推力使桩前土体达到极限状态时比较合理。对实际并未达到极限状态的桩前土体,这样的处理方法就过高地估计了抗力,而低估了桩的

内力,是偏于不安全的。用本文方法得到的是桩前的实际(而不是极限)抗力,因此更为合理。

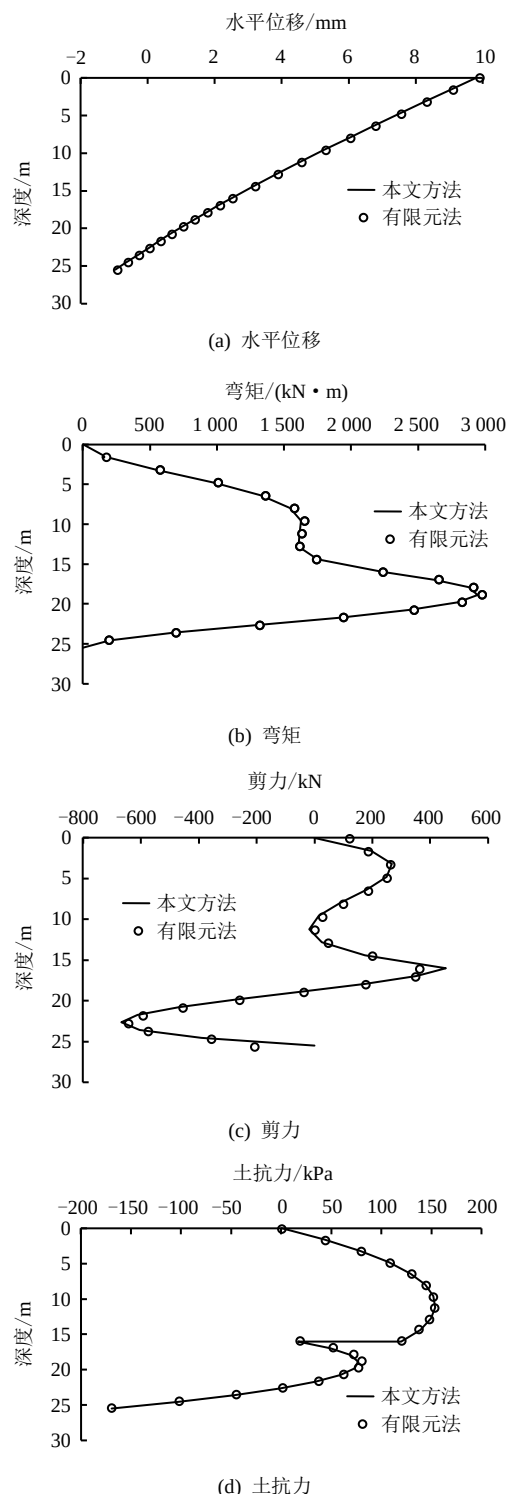


图2 m 法和有限元法计算结果的比较
Fig.2 Calculation results by m -method and FEM

(3) 本法中用 m 法计算滑体段抗滑桩的前提是桩前土体处于稳定状态。以双排桩为例,当前排桩的刚度较大而足以保证前排及后排桩之间的土体不发生滑移时,后排桩的桩前抗力可发挥出来,采用

本法计算的结果是减小了自身的内力, 但将桩前推力通过土体传给了前排桩。当前排桩刚度较小而导致前、后桩间的土体滑移时, 后排桩的桩前抗力将明显减弱甚至消失, 其结果是不再有后排桩的推力传至前排桩, 且由于桩前无抗力, 故后排桩将会承受较大的荷载, 并产生较大的内力。

4 结 论

(1) 本文建立了以 m 法模型模拟滑体段桩受力变形的抗滑桩计算方法。其中, 利用滑体段桩、锚固段桩在滑面处的变形协调条件确定该截面的弯矩和剪力是该法中的关键问题。

(2) 与现有方法相比, 该法的计算模型能更好地反映滑体段桩与滑体的相互作用。对单排抗滑桩来说, 这可使桩受力变形的计算结果与实际更为相符。对双排桩, 应用此法可更为合理地确定出滑体段桩对滑体产生的推力——这也是双排桩设计中需解决的一个关键问题, 并由此进一步计算桩前滑体及前排桩的受力。

本法以工程设计人员熟悉的 m 法为基础, 其原理容易理解; 其计算通过简单的编程或利用 Excel 等软件即可实现。整体上看, 本法适于在实际工程设计中应用。

参 考 文 献

- [1] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
LI Hai-guang. Design and engineering examples of new types of retaining structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] VEDER C. Landslides and their stabilization[M]. New York and Wien: Springer-Verlag, 1981.
- [3] HO K K S. Recent advances in geotechnique for slope stabilization and landslide mitigation—perspective from Hong Kong[C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides. [S. l.]: [s. n.], 2004: 1507—1560.
- [4] DIYALJEE V A. Stabilization of roadway landslide using anchored drilled shaft piles performance evaluation over the last 15 years[C]//Geo-Congress 2014 Technical Papers. [S. l.]: [s. n.], 2014: 282—296.
- [5] 刘新荣, 梁宁慧, 黄金国, 等. 抗滑桩在边坡工程中的研究进展及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 56—62.
LIU Xin-rong, LIANG Ning-hui, HUANG Jin-guo, et al. Progress and applications of anti-sliding piles in slope reinforcing projects[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2006, 17(1): 56—62.
- [6] TOMIO ITO, TAMOTSU MATSUI, WON PYO HONG. Design method for stabilizing piles against landslide—one row of piles[J]. **Soils and Foundations**, 1981, 21(1): 21—37.
- [7] 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 Man-man, WANG Liang-qing, GE Yun-feng, et al. Mechanical characteristics of anti-sliding pile considering comprehensive foundation coefficient of sliding bed on composite inclined rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 3000—3008.
- [8] ELSON W K. Design of laterally-loaded piles[R]. Beijing: Construction Industry Research and Information Association, 1984.
- [9] 陈曦. 双排抗滑桩滑坡推力计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
CHEN Xi. Study on the calculation of landslide thrust on double row anti-slide piles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [10] 肖世国, 何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 376—380, 494.
XIAO Shi-guo, HE Hong. An approximate analytical method for calculating thrust on double-row stabilizing piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 376—380, 494.
- [11] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
LIANG Kun-miao. Methods of mathematical physics [M]. Beijing: People's Education Press, 1979.
- [12] 王勰成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
WANG Xu-cheng, SHAO Min. The basic principle and numerical method of finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [13] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517—521.
DAI Zi-hang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antisliding piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 517—521.