

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1619

深厚软土中抗滑桩的修正悬臂桩计算方法

邓 涛, 许 杰, 郑嘉勇, 郑 路

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 大面积堆填或开挖时深厚软土地层内部常产生较大滑移, 这为该类地层中考虑桩土作用的抗滑桩分析带来较大困难。考虑深厚软土的滑移性状, 针对既有悬臂桩法计算存在的问题进行修正, 滑动面上部桩身受荷段的桩身荷载采用等腰三角形分布且极值点为极限侧土压力, 设滑动面下部桩身锚固段上侧桩周软土为理想弹塑性以考虑软土大位移条件, 下侧为弹性状态, 并通过位移叠加原理对传统方法求解产生滑动面不连续的缺陷进行修正。通过现场桩侧堆载试验验证, 修正悬臂桩法的弯矩和位移计算结果较好, 桩顶位移误差小于 3%, 桩身最大弯矩误差小于 10%。所提方法有助于深厚软土地层抗滑桩的设计和计算。

关 键 词: 桩基工程; 抗滑桩; 深厚软土; 修正悬臂桩法; 堆载试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 05-1299-08

Modified cantilever pile method for anti-sliding pile in deep soft soil

DENG Tao, XU Jie, ZHENG Jia-yong, ZHENG Lu

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Large slip often occurs in deep soft soil during large area filling or excavation, which brings great difficulty to the analysis of anti-sliding pile considering pile-soil interaction. For this purpose, a modified cantilever pile method was proposed to overcome the problem in the calculation of the existing cantilever pile method considering the sliding behavior of deep soft soil layer. The soil pressure of the pile passive loading segment adopts an isosceles triangle distribution, and the maximum value is identical to the ultimate lateral soil pressure. The soft soil around the pile anchorage segment is assumed as ideal elastic-plastic to consider the large displacement of the soft soil. In addition, the displacement superposition principle is applied to deal with the discontinuous displacements around the sliding surface existed in previous methods. The displacement and bending moment results obtained by the proposed method are verified by in-situ pile side loading test. The displacement error of pile top is less than 3%, the maximum bending moment error of pile is less than 10%. The proposed method is helpful for the design and calculation of anti-sliding piles in deep soft soil layer.

Keywords: pile foundation engineering; anti-sliding pile; deep soft soil; modified cantilever pile method; loading test

1 引 言

抗滑桩是滑坡及边坡工程中一种被广泛应用的横向受荷桩, 其作用机制及内力、位移计算的研究一直被国内外学者所关注^[1-5]。自 20 世纪 60 年代以来, 国内学者就针对抗滑桩问题提出了许多计算方法。其中最早由铁道第二勘察设计院提出的悬臂桩法(以下简称为传统方法)^[6], 由于简单、实用, 在国内关于抗滑桩的实际工程中获得了较为广泛的应用。

由于悬臂桩法在对抗滑桩进行分析时作了一定的假设, 使得其计算结果相对真实情况有较大的误差^[7]。传统方法在受荷段上大多是以传递系数法^[8]

计算滑坡推力和抗力^[9], 以此为桩侧荷载进行分析, 但传递系数法需进行条块划分, 且显式解法和隐式解法存在差异^[10]。显式解法的误差方向较隐式解法更不固定(有的文献建议工程界不再使用)^[11], 其隐式解法也需要迭代求解, 计算较为繁琐, 并且所得结果比较保守^[12-13]; 在锚固段一般运用 m 法(m 为地基土中的比例系数)计算位移和内力, 但《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)^[14]以及文献^[15]指出 m 法一般适用于桩身在地面处水平位移为 10 mm 以内的小变形条件; 另外, 悬臂桩法在计算时以滑动面为界, 滑动面上部的受荷段和下部的锚固段各自建立独立的坐标系进行求解, 在最终的解析结果

收稿日期: 2021-09-22

修回日期: 2022-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41977233, No. 51878265)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41977233, 51878265).

第一作者简介: 邓涛, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: dengtao0911@163.com

通讯作者: 郑路, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 主要从事边坡工程与地质灾害、数值计算方法方面的研究。E-mail: zhenglulu8211@163.com

中会出现滑动面处上下位移结果不连续的问题。

针对悬臂桩法理论计算存在的诸多不足,不少学者进行了分析并提出了各自的改进方法。戴自航等^[16]提出将受荷段视为弹性定向铰支悬臂梁的假设,并在锚固段利用有限差分方法计算桩身位移。宁龙飞等^[17]亦提出了悬臂桩法的内力简化算法,但其更多的是对抗滑桩悬臂桩法的归纳,且所提出的内力简化算法也仅仅是针对刚性桩,并未涉及弹性桩。毛坚强等^[18]通过建立解析公式,由滑动面变形协调确定待定参数,再反代回解析公式,得到抗滑桩的受力性状,但是由于该公式在求解时设置了 10 个待定参数,导致在实际应用其具体求解的难度较大,也不甚方便。同时,上述改进方法均未考虑到深厚软土层内部滑移量大、锚固段上侧桩周土体易进入塑性状态这一特殊问题。实际上,在深厚软土地区因受道路扩建、城市景观改造和港区货场堆卸载等施工影响,下覆软土在发生显著沉降的同时也易产生明显的水平侧向位移^[19],并推挤邻近桩基造成桥梁、码头和房屋等既有建构筑物桩及其上部结构偏位、开裂甚至坍塌,这类事故近年来屡有发生^[20-21]。

鉴于此,笔者结合深厚软土层条件,针对传统悬臂桩法计算存在的问题进行修正,并以福州可门港单桩桩侧堆载试验作为依托进行验证和分析,提出在深厚软土条件下更为简捷、精确的修正计算方法。本文基于深厚软土内部滑移条件,对滑动面上方被动受荷段桩侧土压力采用 Tschebotarioff 侧土压力分布模式^[22]和 Viggiani 极限侧土压力公式^[23],其中文献^[24-27]对两计算方法的适用性进行了阐述和验证。在得到受荷段荷载后按悬臂梁以静力法求解上部桩的位移、弯矩;对于滑动面下方的主动锚固段,首先,将上方受荷段荷载等效为滑动面处外荷载;再根据土弹塑性状态将锚固段分为上下两段,上段以桩周软土在塑性状态下的极限抗力^[28]进行计算,下段桩身则按照传统 m 法进行计算;最后,通过位移叠加以保证滑动面处上下位移的连续性。根据福州可门港现场试验监测提供的数据可以看出,由本文计算方法获得的桩顶最大位移和桩身最大弯矩相较于传统方法和文献^[16]提出的改进方法具有更高的精度和可靠性。

2 模型建立与求解

2.1 传统计算模型及其修正

2.1.1 传统模型

传统悬臂桩法以滑动面为界,对滑动面以上的被动受荷段和滑动面以下的主动锚固段分别进行计

算,其计算模型见图 1。图中, $k(z)$ 为地基反力模量, y_s 为滑动面位置受荷段位移, y_x 为锚固段在滑动面上的位移; M' 、 H' 分别为锚固段顶部的受荷段等效弯矩和等效水平荷载; y 、 z 分别为以桩顶中心为 0 点的水平和竖向坐标轴。具体计算方法如下:

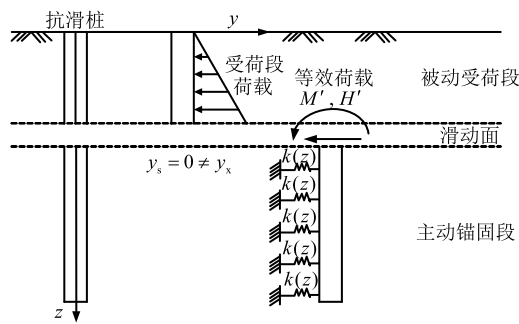


图 1 传统悬臂桩法模型示意图

Fig.1 Calculation model of traditional cantilever pile method

(1) 被动受荷段桩前受滑坡抗力,桩后受滑坡推力,按悬臂梁分析受荷段的受力性状。

(2) 将受荷段荷载简化为等效荷载,作用在滑动面下部的主动锚固段顶部,运用 m 法计算该段受力性状。

2.1.2 修正模型与计算

修正模型的计算方法如下:

(1) 土体为理想弹塑性体。将桩基沿深度方向分为滑动面以上的被动受荷段和以下的主动锚固段;再根据锚固段桩周软土是否进入塑性状态将其分为上下两段,锚固段上段桩身的周围土层为塑性状态,下段桩周土层处于弹性状态^[28]。

(2) 将被动受荷段视为悬臂梁,滑动面所处位置假定为悬臂梁的固定支座。被动受荷段承受软土侧移产生的土压力,侧土压力的确定采用 Tschebotarioff 土压力分布模式^[22]和 Viggiani 极限侧土压力公式^[23]进行计算,按照一般的静力学问题求解被动受荷段的位移与内力响应。

(3) 将被动受荷段的荷载等效至滑动面处,作为主动锚固段荷载;主动锚固段的上段桩周土体以极限抗力法进行计算,下段弹性状态土体以传统 m 法进行抗力计算;两者分界点以土体达到极限抗力的临界位移曲线 y_u-z (其中, y_u 为土体进入塑性状态时桩身临界水平位移)与 m 法桩身位移曲线交点确定。

(4) 再将滑动面处主动锚固段获得的位移和转角叠加到被动受荷段上,以此获得整个桩身的最终位移结果。

据此可得修正悬臂桩法的计算模型, 如图2所示。图中, P_u 为土体水平极限抗力, $P_{\max}$ 为受荷段三角形分布荷载最大值。

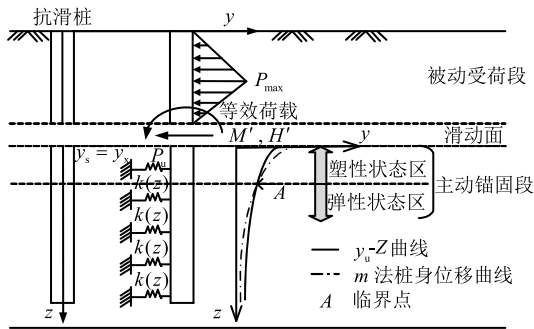


图2 修正悬臂桩法计算模型示意图

Fig.2 Calculation model of modified cantilever pile method

2.2 修正悬臂桩法的求解过程

2.2.1 被动受荷段求解

任意形式荷载下被动受荷段计算简图如图3所示, 将受荷段设为悬臂梁, 长度为 l_p , 悬臂梁上各点深度可由 z 轴坐标确定 (z 轴向下为正, 以受荷段顶端, 即地面为原点), 桩侧土压力为 $q(z)$ 的分布荷载, $Q(z)$ 为剪力 (kPa), $M(z)$ 为弯矩。

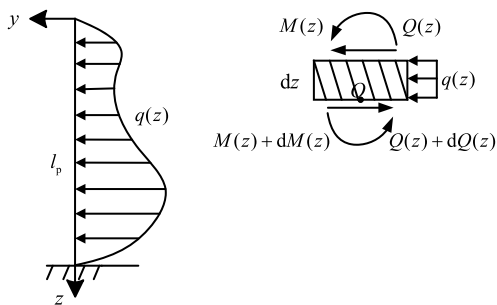


图3 被动受荷段一般荷载计算简图

Fig.3 General load diagram of passive loading section

取长度为 dz 的微段, 若 z 有一增量 dz , 则可知 $dQ(z)$ 与 $dM(z)$ 分别为 $Q(z)$ 与 $M(z)$ 的微分增量, 可得微分段剪力和弯矩的平衡方程如下:

$$\left. \begin{aligned} Q(z) - [Q(z) + dQ(z)] + q(z)dz &= 0 \\ -M(z) + [M(z) + dM(z)] - Q(z)dz - q(z)dz \frac{dz}{2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$M_2 = -\frac{1}{3} \frac{qz^3}{l_p} + qz^2 - \frac{1}{2} ql_p z + \frac{1}{12} ql_p^2$$

$$y_2 = \frac{1}{EI} \left(-\frac{1}{60} \frac{qz^5}{l_p} + \frac{1}{12} qz^4 - \frac{1}{12} ql_p z^3 + \frac{1}{24} ql_p^2 z^2 - \frac{1}{12} ql_p^3 z + \frac{7}{120} ql_p^4 \right), \left(\frac{l_p}{2} \leq z \leq l_p \right) \quad (5)$$

略去高阶微分量, 可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ(z)}{dz} &= q(z) \\ \frac{d^2 M(z)}{dz^2} &= \frac{dQ(z)}{dz} = q(z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

沿桩身二次积分可得弯矩和剪力。

另外, 转角 θ 和挠曲线方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{dy}{dx} = \int \frac{M}{EI} dx + C \\ y &= \iint \left(\frac{M}{EI} dx \right) dx + Cx + D \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: C 、 D 为积分后任意常数; EI 为桩身抗弯刚度, E 为弹性模量, I 为惯性矩。

对深厚软土中的被动受荷段, 根据 Viggiani 与 Tschobotarioff 的研究, 可得桩侧土压力计算模型如图4所示。

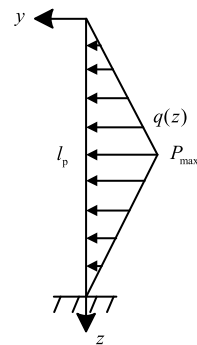


图4 本文方法被动受荷段计算简图

Fig.4 Calculation diagram of passive load section in the proposed method

将本文方法中的三角形荷载代入式(1)~(3), 求解出受荷段在三角形荷载下的弯矩 M_1 、 M_2 和位移 y_1 、 y_2 , 计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{1}{3} \frac{qz^3}{l_p} \\ y_1 &= \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{60} \frac{qz^5}{l_p} - \frac{1}{16} ql_p^3 z + \frac{5}{96} ql_p^4 \right), \left(0 \leq z \leq \frac{l_p}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: M_1 、 y_1 分别为悬臂梁中点上部弯矩、位移;
 M_2 、 y_2 分别为悬臂梁中点下部弯矩、位移。

2.2.2 主动锚固段求解

如图 2 所示, 将被动受荷段上的分布荷载等效为集中荷载移动至滑动面可得水平荷载 H' , 再由偏移量确定 M' , 视其为作用在锚固段顶部的荷载。为确保滑动面处桩身位移连续, 可利用叠加原理获得抗滑桩受荷段和锚固段的最终位移 (mm) 分别为 y_{af} 、 y_{bf} , 具体处理如图 5 所示。 y_{af} 、 y_{bf} 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} y_{af} &= y_a + y_x + \varphi_0(l_p - z) \\ y_{bf} &= y_b \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: y_a 为被动受荷段按悬臂梁计算位移; y_b 为主动锚固段位移计算结果; φ_0 为锚固段在滑动面处转角。

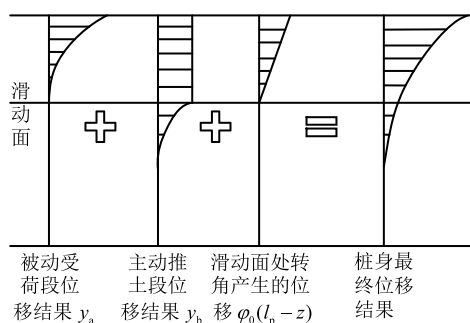


图 5 位移叠加原理示意图

Fig.5 Displacement superposition principle

3 现场单桩桩侧堆载试验与验证

3.1 堆载试验概述

堆载试验场地位于福州可门港可门大桥, 为单桩桩侧堆载试验。单桩入土深度为 30.00 m, 直径为 0.80 m, 单桩所用混凝土等级为 C35, 配筋率为 0.75%, 保护层厚度为 0.08 m, $EI = 515.95 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。堆载体高度为 5.18 m, 从距试桩中心 64 m 的位置逐渐向桩推进至 48 m, 采用推土机搭配自卸车完成试验。堆载试验见图 6。图中, ω 为土体含水率,

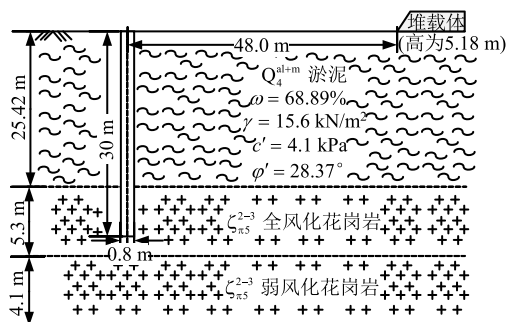


图 6 现场单桩桩侧堆载试验简图

Fig.6 Schematic diagram of in-situ side loading test of single pile

γ 为重度, c' 为土体有效黏聚力, ϕ' 为土体有效内摩擦角。

3.2 算例分析

利用可门港现场单桩桩侧堆载试验所得数据, 以本文方法计算单桩的弯矩、位移, 并与现场试验所得实测值进行比较分析。

3.2.1 被动受荷段的弯矩与位移

由文献[29]可知, 在试验堆载作用下, 滑动面在桩身处的深度 $h_1 = 4 \text{ m}$ 。被动受荷段荷载分布依照图 4, 其中最大值 $P_{\max}$ 用 Viggiani 极限侧土压力计算。取现场土样做室内试验, 得其不排水抗剪强度 c_u 为 10 kPa, 承载力系数 K_c 值取 10, 故有

$$P_{\max} = K_c c_u d = 10 \times 10 \times 0.8 = 80 \text{ kN/m} \quad (7)$$

由式 (4)、(5) 计算可得该部分的弯矩和位移如下:

(1) $0 \text{ m} \leq z \leq 2 \text{ m}$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{20}{3} z^3, \\ y_1 &= \frac{20}{30957} z^5 - \frac{6400}{10319} z + \frac{64000}{30957} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(2) $2 \text{ m} \leq z \leq 4 \text{ m}$ 时, 有

$$\left. \begin{aligned} M_2 &= -\frac{20}{3} z^3 + 80z^2 - 160z + \frac{320}{3} \\ y_2 &= -\frac{20}{30957} z^5 + \frac{400}{30957} z^4 - \frac{1600}{30957} z^3 + \frac{3200}{30957} z^2 - \frac{25600}{30957} z + \frac{71680}{30957} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

具体结果列于表 1。

表 1 被动受荷段位移与弯矩计算结果

Table 1 Calculation results of displacement and bending moment in passive loading section

深度 / m	位移 / mm	弯矩 / (kN · m)
0.0	2.06	0.00
0.4	1.82	0.43
0.8	1.57	3.41
1.2	1.32	11.52
1.6	1.07	27.31
2.0	0.84	53.33
2.4	0.58	91.31
2.8	0.35	139.52
3.2	0.17	195.41
3.6	0.04	256.43
4.0	0.00	320.00

3.2.2 主动锚固段的弯矩与位移

将被动受荷段荷载等效至滑动面得 H' 、 M' 。

其中 $M' = 320 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $H' = 160 \text{ kN}$, 根据图 2 计算主动锚固段, 得到土塑性区分布范围为埋深 4.00~6.67 m, 其下为土弹性区, 部分桩身的计算结果见表 2 和表 3。

表 2 主动锚固段塑性区位移与弯矩计算结果

Table 2 Calculation results of displacement and bending moment of plastic zone of active anchorage section

深度 / m	位移 / mm	弯矩 / (kN · m)
4.00	21.51	320.00
4.27	20.19	362.51
4.53	18.92	403.38
4.80	17.71	441.64
5.07	16.56	458.82
5.33	15.48	505.65
5.60	14.46	529.61
5.87	13.52	547.28
6.13	12.65	558.15
6.40	11.86	561.80
6.67	11.15	557.53

表 3 主动锚固段弹性区位移与弯矩计算结果

Table 3 Calculation results of displacement and bending moment of elastic zone of active anchorage section

深度 / m	位移 / mm	弯矩 / (kN · m)
6.93	10.54	545.20
7.20	9.96	524.38
7.47	9.47	495.19
7.73	9.05	456.95
8.00	8.69	409.31
8.27	8.39	352.36
8.53	7.73	285.63
8.80	7.93	209.06
9.07	7.74	122.04
9.33	7.57	24.13

3.2.3 计算结果与分析

由上述所求结果进一步求解得锚固段在滑动面处的转角 $\varphi_0 = 0.005\ 023 \text{ rad}$, 滑动面处的位移 $y_x = 21.51 \text{ mm}$, 代入位移叠加原理的式 (4) 可得桩的最终位移结果, 将计算结果与现场实测桩顶位移和最大弯矩列出, 结果见表 4。

表 4 悬臂桩法控制点计算结果对比

Table 4 Comparison between control results calculated by the proposed method and measured data

堆载试验 结果对比	桩顶位移/ mm			最大弯矩值/ (kN · m)		
	实测值	本文方法	误差/ %	实测值	本文方法	误差/ %
	42.6	43.66	2.49	622.73	561.80	-9.78

通过表 4 可以看出, 在工程设计中主要关注的桩顶位移上, 本文修正方法计算结果与实测值小于

1 mm, 相对误差仅为 2.49%; 从最大弯矩值的角度来看, 误差亦相对较小, 为 9.78%, 可见本文方法计算结果正确, 精度较高, 可以满足设计和工程需要。

3.3 比较验证

为进一步探讨修正方法的计算精度, 以本文现场桩侧堆载试验为依托, 用传统悬臂桩法和文献[16]提出的改进方法进行计算分析, 并与本文方法进行比较讨论。

由于桩所在土层为单一淤泥层, 重度 $\gamma = 15.6 \text{ kN/m}^3$ 。桩前后滑体厚度相同, $h_1 = 4 \text{ m}$ 。根据传统悬臂桩法计算, 滑坡推力 $E_T = 330 \text{ kN/m}$, 桩前剩余抗滑力 $E_0 = 165 \text{ kN/m}$ 。通过实测确定试验场地的 m 值为 $2\ 500 \text{ kN/m}^4$, 桩计算宽度 $B_p = 1.62 \text{ m}$, 滑动面处地基系数 $A = 10\ 000 \text{ kN/m}^3$ 。

滑动面以上的被动受荷段可按悬臂梁方法计算, 此处不予赘述。滑动面以下的主动锚固段则按弹性桩以 m 法展开计算, 并设桩底自由。将被动段荷载等效至滑动面处, 则 $M' = 220.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $H' = 165 \text{ kN}$ 。由 m 法可得锚固段顶端的挠曲线微分方程:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + mzB_p y_d = 0 \quad (10)$$

式中: $mzB_p y_d$ 为地基作用于桩上的水平抗力, y_d 为桩的水平位移。

可求解得到最终结果为

$$\left. \begin{aligned} M_z &= 422.25A_3 + 565.83B_3 \\ y_z &= 0.005\ 667A_1 + 0.007\ 594B_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: A_1 、 A_3 、 B_1 、 B_3 均为 m 法的影响函数值; M_z 为锚固段的弯矩表达式; y_z 为锚固段的挠度表达式。

文献[16]也提出改进方法, 该法主要是对悬臂桩法的位移计算进行改进, 其位移计算具体如下:

被动受荷段位移 y_{af} 计算公式为

$$y_{af} = \frac{q_A - q_B}{120Elh_1} (z^5 - 5h_1^4 + 4h_1^5) + y_A + \theta(h_1 - z) \quad (12)$$

式中: q_A 为滑坡推力; q_B 为滑坡抗力; h_1 为受荷段长度。

而主动锚固段位移通过有限差分方法进行计算。按文献[16]推得的方程组计算得到滑动面的位移 y_x : $y_x = 13.47 \text{ mm}$ 。利用下列公式可以计算各分段节点处的位移 (a_n 、 b_n 为文献[16]差分所得参数): $y_n = a_n y_{n+1} - b_n y_{n+2}$, y_n 为差分后的第 n 段位移。

传统悬臂桩法和本文改进方法的弯矩计算结果见图 7, 不同方法的位移计算结果如图 8 所示。

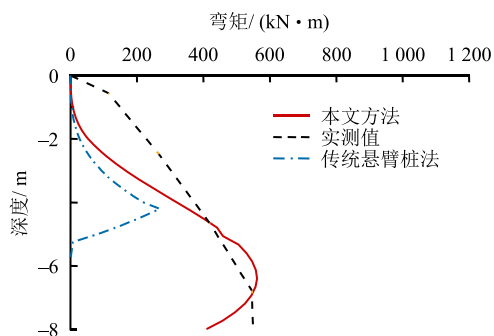


图7 弯矩计算结果对比图

Fig.7 Comparison of bending moment obtained from different methods

由图7弯矩结果可以看出,本文方法所得计算弯矩值沿桩长的整体分布比传统方法更加贴近实测值,克服了传统方法在滑动面处弯矩计算不连续的缺点,且弯矩最大值及其在桩身的分布位置上,传统方法偏差较大,而本文方法在精度上有较大优势,最大弯矩数值误差仅为9.78%,不足10%。

图8的位移结果对比表明,与传统悬臂桩法相比,文献[16]的方法和本文修正方法均较好地克服了滑移面处桩身位移不连续的缺点,但从桩身位移分布规律和量值来看,本文方法却明显优于文献[16]的方法,其计算结果与实测位移更加吻合,尤其是桩顶位移,本文计算值与实测其误差仅有2.49%,计算精度上优势显著。

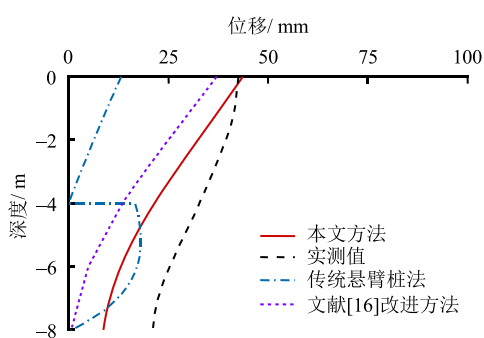


图8 位移计算结果对比图

Fig.8 Comparison of displacement obtained from different methods

4 结 论

为解决传统悬臂桩法在深厚软土滑移计算时的缺点并提高计算精度,本文提出了修正方法,并结合可门港现场单桩桩侧堆载试验数据进行验证和对比分析,可得以下认识和结论:

(1) 针对深厚软土抗滑桩计算中的传统悬臂桩法进行修正,将滑动面上部桩身荷载设为三角形分布的极限侧土压力形式进行计算;根据锚固段桩周

软土是否进入塑性状态将其分为上下两段,上段桩身的周围土层设为理想弹塑性以考虑软土大位移条件,下段桩周土层处于弹性状态,并对传统方法中滑动面处桩身位移不连续的缺陷通过位移叠加原理加以克服。本文提出的修正方法概念清楚,求解可靠,使用简单,可为设计和实际工程提供借鉴与参考。

(2) 与深厚软土单桩桩侧现场堆载试验结果相比较,在桩身位移和弯矩计算方面,修正方法计算结果明显优于传统悬臂桩法和既有改进方法,可以在实际工程中,用本文方法快速预估堆载对软土地层邻近桩基的影响。

参 考 文 献

- [1] VEDER C. Landslides and their stabilization[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [2] HO KKS. Recent advances in geotechnology for slope stabilization and landslide mitigation-perspective from Hong Kong[C]//Proceedings of 9th International Symposium on Landslides. [S. l.]: [s. n.], 2004: 1507-1560.
- [3] DIYALJEE V A. Stabilization of roadway landslide using anchored drilled shaft piles performance evaluation over the last 15 years[C]//Proceedings of Geo-Congress. Atlanta: [s. n.], 2014: 282-296.
- [4] 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.
- [5] 王成汤, 王浩, 张玉丰, 等. 锚索抗滑桩加固堆积型滑坡的受力特性模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3343-3354.
WANG Cheng-tang, WANG Hao, ZHANG Yu-feng, et al. Model test and numerical simulation study on the mechanical characteristics of the anchored slide-resistant pile for stabilizing the colluvial landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3343-3354.
- [6] 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 Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Anti-slide pile's design and calculation[M]. Beijing: China Railway Press, 1983.

- [7] 张爱军. 挡土桩-土相互作用模型及抗滑桩加固边坡简化计算方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
ZHANG Ai-jun. Model of interaction between pile and soil & simplified calculating method of pile used to stability unstable slope[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [8] 邓文伟. 改进传递系数法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 54-60.
DENG Wen-wei. Application of improved transfer coefficient method in slope stability analysis[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2021, 19(2): 54-60.
- [9] 孙来宾, 肖世国. 抗滑桩受荷段前侧有限范围地层的地基抗力系数取值方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 278-284, 294.
SUN Lai-bin, XIAO Shi-guo. Evaluation method for elastic foundation coefficient of finite downslope soil against loading segment of stabilizing piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(1): 278-284, 294.
- [10] 郭海强, 李安洪, 徐骏, 等. 基于可靠度的传递系数法显式与隐式对应关系[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 2015-2022.
GUO Hai-qiang, LI An-hong, XU Jun, et al. Study on corresponding relationship between explicit and implicit solutions inslope stability analysis based on reliability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(7): 2015-2022.
- [11] 方玉树. 滑坡稳定分析传递系数法若干问题探讨[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 607-611.
FANG Yu-shu. Some problems in transmitting coefficient method for landslide stability analysis[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(5): 607-611.
- [12] 顾宝和, 毛尚之. 滑坡稳定分析传递系数法的讨论[J]. 工程勘察, 2006, 34(12): 12-15, 35.
GU Bao-he, MAO Shang-zhi. Discussion on method of force transfer for stability analysis of slope[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2006, 34(12): 12-15, 35.
- [13] 赵尚毅, 郑颖人, 敖贵勇. 考虑桩反作用力和设计安全系数的滑坡推力计算方法——传递系数隐式解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1668-1676.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, AO Gui-yong. Calculation method of landslide thrust considering the reaction force of piles and factor of safety—implicit solution using transfer coefficient[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(8): 1668-1676.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [15] 黄福云, 周志明, 庄一舟, 等. 整体桥高性能混凝土桩-土相互作用试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 1-11.
HUANG Fu-yun, ZHOU Zhi-ming, ZHUANG Yi-zhou, et al. Experiment on interaction of high performance concrete pile-soil in IAJBs[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 1-11.
- [16] 戴自航, 沈蒲生. 抗滑桩内力计算悬臂桩法的改进[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 81-85.
DAI Zi-hang, SHEN Pu-sheng. Improvements on calculation of internal forces of cantilever anti-sliding piles[J]. **Journal of Hunan University (Natural Science Edition)**, 2003, 30(3): 81-85.
- [17] 宁龙飞, 任青阳, 张翔玮. 抗滑桩内力计算方法研究[J]. 人民长江, 2014, 45(09): 62-66, 108.
NING Long-fei, REN Qing-yang, ZHANG Xiang-wei. An improved calculation methodology for internal force of anti-slide pile[J]. **Yangtze River**, 2014, 45(9): 62-66, 108.
- [18] 毛坚强, 徐骏, 杨磊. 滑体段采用 m 法模型的抗滑桩计算方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1197-1202.
MAO Jian-qiang, XU Jun, YANG Lei. An improved method for stabilizing pile by using m -method model to the whole pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1197-1202.
- [19] 金宗川, 顾国荣, 韩黎明, 等. 大面积堆载作用下软土地基变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1056-1060.
JIN Zong-chuan, GU Guo-rong, HAN Li-ming, et al. Deformation properties of soft subsoil under large-scale perload[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 1056-1060.
- [20] 陈思佳. 舟山地区市政道路软土路基处理技术[D]. 西安: 长安大学, 2019.
CHEN Si-jia. Soft soil subgrade treatment technology on municipal roads in Zhoushan region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.