

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20230428008

文章编号:1674-599X(2025)01-0148-09

引用格式:符传飞,覃显达,伍晗曦,等.考虑侧土压力的刚性矩形基础设计计算方法[J].交通科学与工程,2025,41(1):148-156.

Citation: FU Chuanfei, QIN Xianda, WU Hanxi, et al. Design and calculation method of rigid rectangular foundation under consideration of lateral earth pressure[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 148-156.

考虑侧土压力的刚性矩形基础设计计算方法

符传飞¹,覃显达¹,伍晗曦²,刘江波³,尹平保²,陈璐²,方敏³

(1.海口市路桥建设投资有限公司,海南 海口 570105;

2.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;

3.海口市设计集团有限公司,海南 海口 570208)

摘要:【目的】现行杆件基础设计中通常未考虑侧土压力的作用,导致基础设计尺寸偏大、过度占用城市地下空间等问题,因此有必要对现行设计方法进行优化。【方法】首先建立多杆合一杆件刚性矩形基础受力与变形简化计算模型,然后推导杆件基础的力矩平衡方程并进行求解,接着对比分析理论计算与模型试验结果,最后探讨地基抗力比例系数 m 值和基础埋置深度对基础受力与变形的影响。【结果】通过试验与理论对比分析发现,随水平荷载增加,基础逐级由前侧向后侧转动,矩形基础的四角出现裂缝,并逐渐向基础后侧发展,且基础前侧顶面与土体脱开,基础破坏的模式为沿荷载作用方向发生转动破坏;基础侧土压力与基础转动角度成正比,呈中间小两端大分布;随水平荷载增大,基础底面逐渐与地基土体脱开,基底土压力呈三角形分布,基底后侧的土压力显著增加。【结论】 m 值的改变对于基底脱开比值、基底脱开宽度和基底最大土反力均无明显影响;基础在地面处的水平位移、转动角度均随着地基抗力比例系数 m 值的增大和基础埋置深度的增加而减小;随基础埋深的增加,基础侧土压力、基底土反力均有所减小,基础埋深越大则稳定性越高。

关键词:刚性基础; m 法;模型试验;侧土压力;基础设计

中图分类号:TU471.1

文献标志码:A

Design and calculation method of rigid rectangular foundation under consideration of lateral earth pressure

FU Chuanfei¹, QIN Xianda¹, WU Hanxi², LIU Jiangbo³, YIN Pingbao², CHEN Lu², FANG Min³

(1. Haikou Road and Bridge Construction Investment Co., Ltd., Haikou 570105, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Haikou Designing Group Co. Ltd., Haikou 570208, China)

Abstract: [Purposes] The current design method of rod foundations does not consider the role of lateral earth pressure, which leads to a large size of the designed foundation and excessive occupation of urban underground space. Thus, it is necessary to optimize the method. [Methods] Firstly, a simplified calculation model of the force and deformation of the rigid rectangular foundation with multiple rods was established. Then, the moment equilibrium equations of the rod foundation were deduced and solved, and the results of the theoretical calculations and the model tests were compared and analyzed. Finally, the effects of the proportionality coefficient of the foundation resistance m , and the foundation embedment depth on the force and deformation of the foundation were explored.

收稿日期:2023-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178311);湖南省教育厅科学研究项目(20A001)

通信作者:尹平保(1984—),男,教授,主要从事地基基础工程方面的研究工作。E-mail:pingbaby921@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

[Findings] Comparative analysis of test and theoretical results reveals that with the increase in horizontal load, the foundation rotates step by step from the front side to the back side, and cracks appear at the corners of the rectangular foundation and gradually develop to the back side of the foundation. The top surface of the front side of the foundation is disconnected from the soil body, and the foundation damage mode is rotational damage in the direction of load. The lateral earth pressure on the foundation is directly proportional to the rotation angle of the foundation and shows a distribution pattern of being small in the middle and large at both ends. With the increase in horizontal load, the bottom of the foundation gradually disconnects from the foundation soil body. The earth pressure at the base shows a triangular distribution, and that at the rear side of the base increases significantly.

[Conclusions] The change in m value has no obvious effect on the ratio of base disengagement, width of base disengagement, and maximum soil reaction force of the base. The horizontal displacement and rotation angle of the foundation at the ground level decrease with the increase in the m value and the foundation embedment depth. The lateral earth pressure on the foundation and the soil reaction force of the base decrease with the increase in the foundation embedment depth. The stability of the foundation becomes higher as the foundation embedment depth increases.

Key words: rigid foundation; m method; model test; lateral earth pressure; foundation design

随着我国城市建设的快速发展,道路两旁林立的杆件设施越来越多(如照明杆件、交通信号灯、标志牌等),杆体重复建设易造成资源浪费、影响城市空间布局,因此亟需采取“多杆合一”的方式对杆件进行整合^[1]。与单杆相比,多杆合一杆件搭载了各类交通指示牌、信号传输设备等^[2],对杆件基础的承载与变形能力提出了更高的要求。然而,目前设计多杆合一杆件的基础时并未考虑侧土压力对基础水平承载和结构变形的作用,从而导致基础设计尺寸过大、偏于保守等问题,极易造成资源浪费、影响周围管线施工,给城市地下空间的利用带来不便^[3]。因此,如何在保证结构安全稳定的前提下,设计出更为经济合理的多杆合一杆件基础已成为市政工程亟需解决的关键问题。

目前,关于基础侧土压力的研究主要是采用地基反力系数法,该方法基于 Winkler 地基模型^[4],该模型将基础四周土体视为弹性体,用梁的弯曲理论求解土压力,并根据地基抗力比例系数 m 值的不同进行假设。弹性地基反力法又分为 C 法、 k 法和 m 法^[5-8],其中 m 法符合地基系数沿深度增大的规律,并且兼顾解析解和数值解,因此在计算浅基础侧土压力时得到了广泛的应用。针对杆件基础设计问题,唐国安^[9]针对《送电线路基础设计技术规定》(SDGJ 62—84)所存在的桩身内力不明确等问题,假定桩在土中的变位绕某点作直线转动,提出了桩的最大剪力及弯矩计算公式。施晓春等^[10]根据桶形基础水平承载力试验,推导出桶形基础水平承载

力的计算方法。孙曦源等^[11]利用三维有限元方法和极限平衡方法推导出了桶形基础水平承载力计算简便公式。上述研究表明: m 法能较好地计算基础的水平承载特性,在此基础上,部分学者进一步分析了基础在水平荷载下的位移特征^[7, 12]。如:吴炯等^[13]基于极限平衡理论,发现了铁塔矩形基础的倾覆转动点位置,浅基础和深基础分界点的划分都与土体的性质、土体和基础的相对刚度、基础的尺寸和荷载性质等因素有关。邢月龙等^[14]进行了水平荷载原位基础载荷试验,测试了各种试验工况下基础的变形与受力情况,得出基础旋转中心位置及侧土压力分布形式。穆保岗等^[15]基于模型试验发现,在水平荷载作用下,沉井基础会绕地面下 $2/3$ 埋深范围内的转动中心发生转动。由上述研究可知,在水平荷载作用下,基础会绕基础内部某一点发生转动变形。上述分析均假定当基础发生转动时,其转动中心位于中轴线上。然而,在实际工程中基础的转动中心并不一定位于中轴线上。另外,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)在计算沉井基础位移及受力情况时,也同样假定基础转动中心位于中轴线上。目前,关于转动中心位置的基础水平承载特性的研究尚不充分,这可能造成基础变形计算与实际状况存在偏差,故针对基础旋转中心不一定位于中轴线上这一情形,开展水平荷载下基础的受力与变形分析很有必要。鉴于此,本文拟在现有杆件基础设计理论的基础上,首先基于 m 法考虑基础四周的土反力,建立水平荷载作用下多杆合一杆

件刚性矩形基础的简化计算模型,然后基于力矩平衡方程获得相应的理论结果,最后通过模型试验验证理论结果的合理性,在此基础上探讨 m 值、埋置深度对多杆合一杆件基础受力与变形的影响。

1 多杆合一杆件基础承载特性

1.1 基础受力特点

多杆合一杆件基础可采用矩形基础和扩展基础两种形式。为节省城市地下空间,目前多采用矩形基础。由于多杆合一杆件上部集成了信号灯、指示牌及5G基站等设备,在风荷载作用下,基础既要承受杆件和设备等自重产生的竖向力 V ,还要承受杆件传递下来的水平力 H 和偏心弯矩 M 。多杆合一杆件刚性矩形基础的简化受力模型如图1所示。



图1 多杆合一杆件刚性矩形基础简化受力模型^[16]

Fig. 1 Simplified force model of rigid rectangular foundation with multiple rods^[16]

1.2 基本假定

为便于分析,可在图1所示简化受力模型的基础上,进行如下假定^[16]:1) 基础周围土体为弹性体,水平向地基系数沿深度增加,土体横向抗力 p_x 与土体水平变形成正比;2) 不考虑基础与土体之间的黏着力和摩阻力;3) 基础受力后仅发生刚性转动,且不考虑基础本身的弯曲变形。基于上述假定,在竖向荷载及基础自重下,基底土体竖向变形量为:

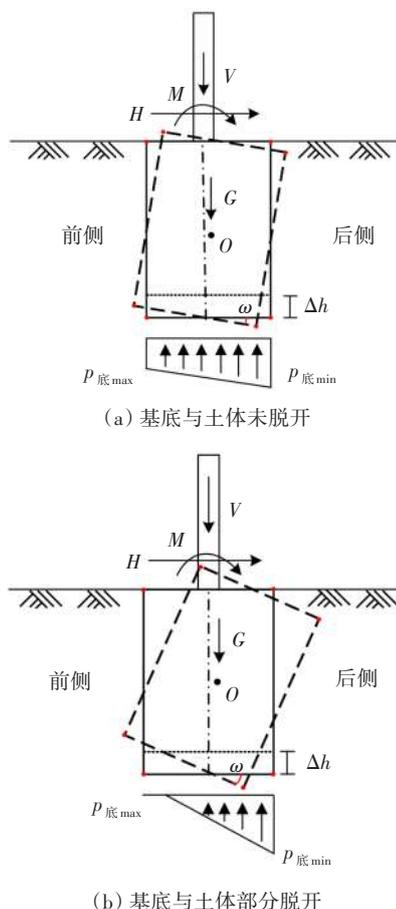
$$\Delta h = (V + G)/(SC_0) \quad (1)$$

式中: V 为上部杆件及设备自重; G 为基础自重; S 为基础底面积; C_0 为基底地基抗力系数。

$$C_0 = m_0 y \quad (2)$$

式中: m_0 为竖向地基系数随深度变化的比例系数, $m_0=m$, m 为水平地基系数随深度变化的比例系数; y 为计算点深度。

当矩形基础(长 $b_1 \times$ 宽 $a_1 \times$ 高 c_1)所受的水平力 H 及偏心弯矩 M 较小时,基础将发生小幅转动,此时基底与土体尚未脱开,基底土反力整体呈梯形分布,如图2(a)所示。而当基础承受的水平荷载 H 和偏心弯矩 M 较大时,基础将发生大幅转动,由于基础与土之间不能承受拉应力,基底与土体会部分脱开(基底未脱开部分的宽度为 b_2),基底土反力重分布,整体呈三角形分布,如图2(b)所示。



注: $P_{底max}$ 、 $P_{底min}$ 为作用在基底的、最大、最小土反力; Δh 为基底竖向位移; ω 为倾斜角度。

图2 矩形基础受力与变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force and deformation of rectangular foundation

2 方程建立与求解

根据基底与土体的接触情况,本文将分别按基底与土体未脱开(模式一)、基底与土体部分脱开(模式二)这两种破坏模式对多杆合一杆件刚性矩

形基础进行分析^[16]。基础受力与变形如图 3 所示(图中部分变量含义见后文)。

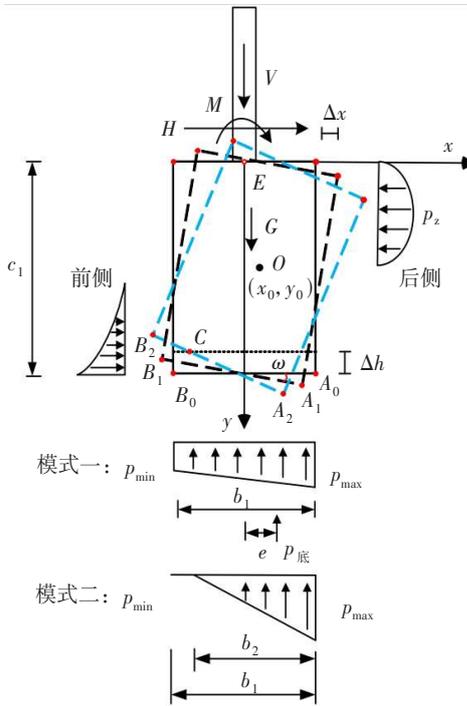


图 3 基础受力与变形

Fig. 3 Force and deformation of foundation

2.1 破坏模式一

当基础承受的水平荷载较小时,基底与土体尚未脱离^[16]。基础将围绕地面以下某一点 $O(x_0, y_0)$ 转动,假设其转动角度为 ω 。由此可得,基础在地面深度 z 处产生的水平位移 Δx 以及土体横向抗力 p_z 分别为:

$$\Delta x = (1 - \cos \omega)x_0 + (\cos \omega - 1) \frac{b_1}{2} - (y - y_0) \sin \omega \quad (3)$$

$$p_z = m y \Delta x \quad (4)$$

式中: x_0 为转动中心离基础中轴线的距离; y_0 为转动中心深度。

在基础发生转动后,基础两侧的 A 、 B 两点将分别绕旋转中心旋转至 A_1 、 B_1 两点,假设 A_1 、 B_1 两点的坐标分别为 (x_{A1}, y_{A1}) 、 (x_{B1}, y_{B1}) , 根据几何关系可得:

$$x_{A1} = (1 - \cos \omega)x_0 + \frac{b_1}{2} \cos \omega + (c_1 - y_0) \sin \omega \quad (5)$$

$$y_{A1} = (1 - \cos \omega)y_0 + c_1 \cos \omega + (\frac{b_1}{2} - x_0) \sin \omega \quad (6)$$

$$x_{B1} = (1 - \cos \omega)x_0 + \frac{b_1}{2} \cos \omega + (-c_1 - y_0) \sin \omega \quad (7)$$

$$y_{B1} = (1 - \cos \omega)y_0 + c_1 \cos \omega + (-\frac{b_1}{2} - x_0) \sin \omega \quad (8)$$

基底最小土反力 p_{\min} 和最大土反力 p_{\max} 分别为:

$$p_{\min} = \gamma_{B1} C_0 - c_1 C_0 + (V + G/S) \quad (9)$$

$$p_{\max} = \gamma_{A1} C_0 - c_1 C_0 + (V + G/S) \quad (10)$$

基底土反力合力 p 到基础中轴线的距离 e 为:

$$e = \frac{b_1}{2} - \frac{b_1}{3} \frac{2p_{\min} + p_{\max}}{p_{\min} + p_{\max}} \quad (11)$$

根据力学平衡关系,对转动中心位置 (x_0, y_0) 和基础转动角度 ω 建立方程:

1) 由水平静力平衡方程 $\sum H=0$ 可得:

$$H = \int_0^{c_1} p_z a_2 dy \quad (12)$$

2) 由基础顶部中点 E 的力矩平衡条件 $\sum M_E=0$ 可得:

$$M = \frac{a_1 (p_{\min} + p_{\max}) b_1 e}{2} - \int_0^{c_1} p_z a_2 y dy \quad (13)$$

3) 由竖向静力平衡条件 $\sum V=0$ 得:

$$V = \frac{a_1 (p_{\min} + p_{\max}) b_1}{2} - G \quad (14)$$

式中: a_2 为基础计算宽度。当 $a_1 < 1$ m 时, $a_2 = 1.5a_1 + 0.5$; 当 $a_1 \geq 1$ m 时, $a_2 = a_1 + 1$ 。

2.2 破坏模式二

当基础承受较大水平荷载时,基础底面和土体会在 C 点脱离,进而导致基底应力重分布^[16]。当基底与土体部分脱离时,基础两侧的 A 、 B 两点将分别绕旋转中心旋转至 $A_2(x_{A2}, y_{A2})$ 、 $B_2(x_{B2}, y_{B2})$, 由此可得 A_2 、 B_2 两点的直线表达式为:

$$y - y_{A2} = (x - x_{A2}) \tan \omega \quad (15)$$

根据式 (15) 可得基底未脱离部分的宽度 b_2 为:

$$b_2 = \frac{b_1}{2} - \frac{c_1 - (V + G/SC_0) - y_{A2}}{\tan \omega} - x_{A2} \quad (16)$$

同理可建立如下平衡方程式:

1) 由水平静力平衡方程可得:

$$H = \int_0^{c_1} p_z a_2 dy \quad (17)$$

2) 由基础顶部中点 E 的力矩平衡条件可得:

$$M = \frac{C_0 a_1 b_2^2 \tan \omega}{2} (\frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{3}) - \int_0^{c_1} p_z a_2 y dy \quad (18)$$

3) 由竖向静力平衡条件可得:

$$V = \frac{C_0 a_1 b_2^2 \tan \omega}{2} - G \quad (19)$$

在基础变形时其转动中心不在中轴线上的情况下,通过基础在水平荷载下变形协调关系及力学平衡进行求解,即可得到基础的旋转中心 (x_0, y_0) 和转动角度 ω 。

3 试验验证

3.1 试验设计

本文以海口市临空经济区某多杆合一杆件刚性矩形基础为原型,开展了几何相似比为3:1的缩尺模型试验,其中杆件基础原型尺寸为:0.9 m(长)×0.9 m(宽)×1.5 m(高),缩尺模型为0.3 m(长)×0.3 m(宽)×0.5 m(高)。基础采用C30混凝土制作而成,上部杆件钢管直径为108 mm,壁厚4 mm,并采用高强螺栓连接基础和杆件。试验箱尺寸为2.0 m(长)×1.8 m(宽)×1.6 m(高),试验填土为硬塑黏土,试验土体的物理力学性质指标见表1,级配曲线如图4所示。

表1 试验土体物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of test soil

$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$w_1/\%$	$\rho_{\text{dmax}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_s/MPa	I_p
24.39	26	19.72	1.75	6.93	27.2

注: φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; w_1 为含水率; ρ_{dmax} 为最大干密度; E_s 为压缩模量; I_p 为土体塑性指数。

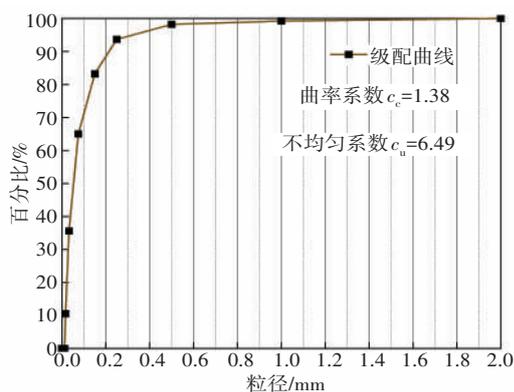
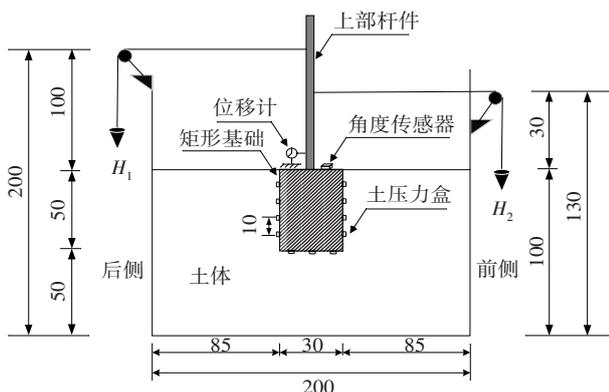


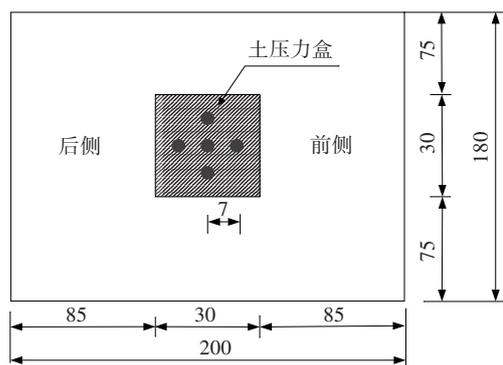
图4 试验用土的级配曲线

Fig. 4 Grading curve of test soil

试验加载装置由钢绞线、砝码以及定滑轮等组成。采用位移计测量基础地面处水平位移;采用土压力盒测量土压力;采用角度传感器监测基础顶面的转动角度,模型布置如图5所示。



(a) 立面布置图



(b) 基底土压力盒布置图



(c) 仪器布置图

图5 模型试验布置图(单位:cm)

Fig. 5 Model test arrangement (unit: cm)

为便于进行多杆合一杆件模型加载试验,根据等效原则在基础两端同时施加水平荷载 H_1 和 H_2 以减小杆件高度,即 $H_1-H_2=H, H_1-0.3H_2=M$ 。试验加载方案如表2所示。

表2 试验加载方案

Table 2 Test loading scheme

荷载等级	H_1/kN	H_2/kN	H/kN
1	0.40	0.26	0.14
2	0.80	0.52	0.28
3	1.20	0.78	0.42
⋮	⋮	⋮	⋮
n	$0.40n$	$0.26n$	$0.14n$

本次试验采用慢速连续加载法,每级荷载为0.14 kN,每级荷载施加后保持其恒定,按0、5、15、30 min等时间间隔测读位移计,当每小时位移小于0.1 mm时开始施加下一级荷载,当基础地面处水平位移超过10 mm时即停止加载。

3.2 试验结果及分析

随水平荷载的增加,基础逐级自前侧向后侧转动,矩形基础的四角出现裂缝,并逐渐向基础后侧发展,且基础前侧顶面与土体脱开,基础破坏的模式为沿荷载作用方向发生转动破坏,如图6所示。



(a) 裂缝整体情况



(b) 裂缝细部情况

图 6 基础破坏情况

Fig. 6 Foundation damage

通过水平静载试验测得地基抗力比例系数 m 值与基础顶部水平位移之间的关系如图 7 所示。

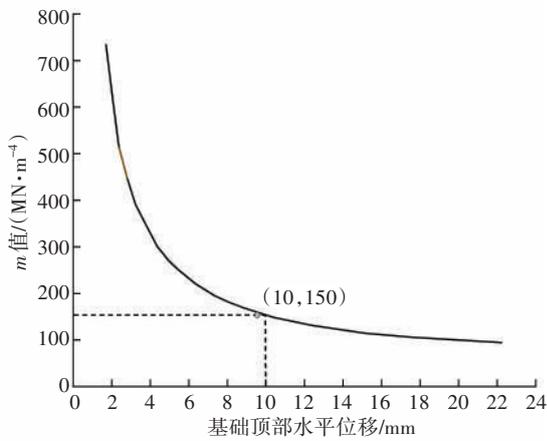


图 7 m 值与地基位移的关系

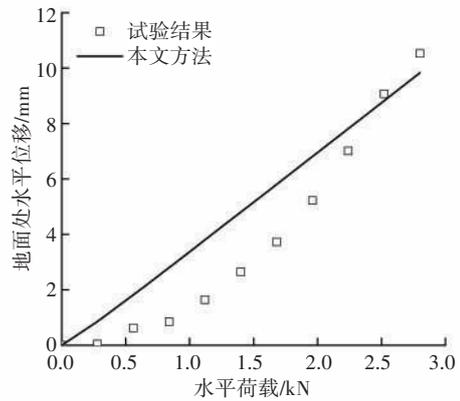
Fig. 7 m value versus ground displacement of foundation

根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014),当基础顶部的水平位移为 10 mm 时,地基抗力比例系数 m 值约为 150 MN/m^4 。对模型试验结果进行分析,对比试验值与计算值,结果如图 8 所示。

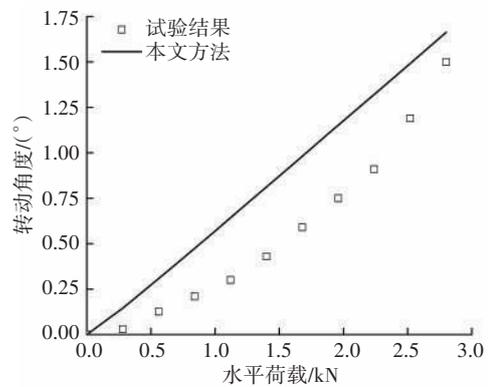
由图 8(a)和 8(b)可知,基础地面处水平位移及转动角度随水平荷载的增大而增加,当 $H=2.80 \text{ kN}$ 时,基础地面处水平位移为 10.53 mm,可认为基础发生破坏,此时转动角度为 1.66° 。基础侧土压力与基础转动角度成正比,呈中间小两端大分布。从图 8(d)可知,随水平荷载增大,基础底面逐渐与地基

土体脱开,基底土反力呈三角形分布,基底后侧的土反力显著增加。综上所述,基础地面处水平位移、转动角度、侧土压力、基底土反力计算值与试验值的变化规律基本一致,说明本文计算方法是合理的,可以用于实际工程设计。

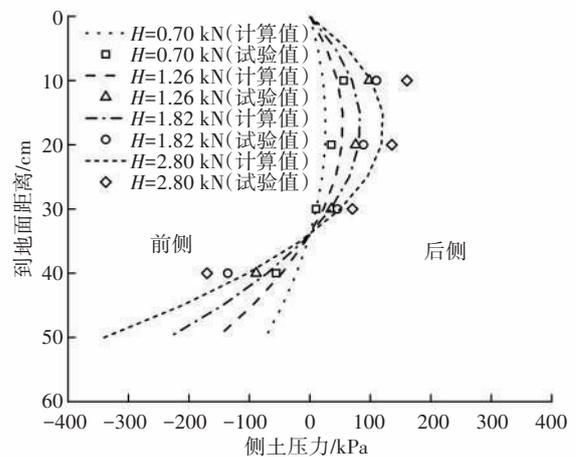
目前在多杆合一杆件基础设计中常将基底土反力作为衡量基础稳定性的一项重要指标,即基础基底脱开比例越小,基础越安全稳定。根据《公路交通标志和标线设置手册》^[3](JTG D82—2009,后文简称方法 1)和《公路桥涵地基与基础设计规范》



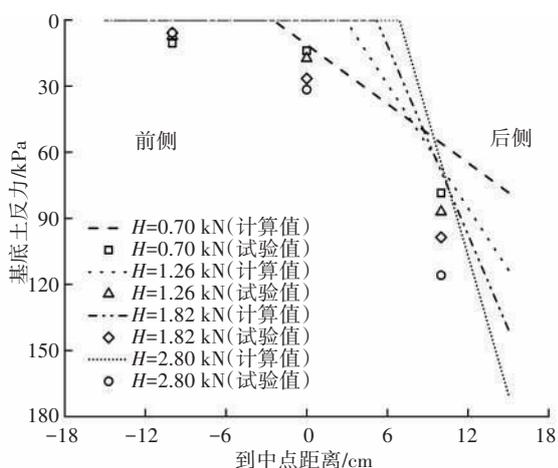
(a) 基础地面处水平位移



(b) 基础转动角度



(c) 基础侧土压力



(d) 基底土反力

图8 理论与实测结果对比分析

Fig. 8 Comparative analysis of theoretical and test results

(JTG 3363—2019, 后文简称方法2)两种方法,以模型试验中的基础为例,对其进行计算,各方法计算结果对比见表3。

表3 计算结果对比表

Table 3 Comparison table of calculation results

方法	脱离比	p_{max} /kPa	p_{min} /kPa	脱离比	p_{max} /kPa	p_{min} /kPa
	值/%			值/%		
	0.14 kN			1.26 kN		
方法1	36.8	116.4	0			
方法2	0.0	36.7	9		148.2	-102.4
本方法	0.0	36.7	9	59.6	113.5	0.0

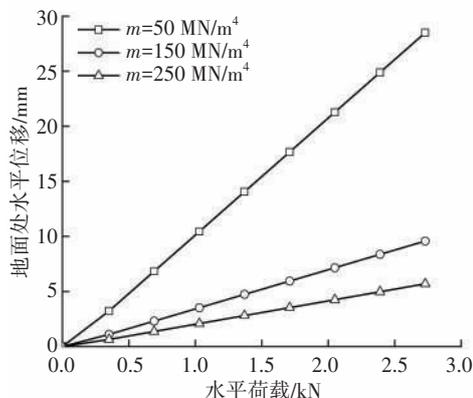
由表3可知,当水平荷载 $H=0.14$ kN时,本文方法与方法2的计算结果相同。相较于方法1的计算结果,本文所得结果证明了不仅基底未与土体脱离,且基底最大土反力(p_{max})小于方法1所得结果。当水平荷载 $H=1.26$ kN时,采用方法2计算得到 $p_{max}=148.2$ kPa,大于本文方法计算值($p_{max}=113.5$ kPa),基底最小土反力 $p_{min}=-102.4$ kPa <0 ,不符合实际情况。而本文方法考虑了基础在基底与土体部分脱离的情况,使基底土反力进行重分布,计算出当基础旋转中心由中轴线逐渐向基础水平位移方向偏移时,基底脱离比值为59.6%。综上所述,相较于方法1,本文方法所得的基底土反力曲线更加平缓,基础安全系数更高;相较于方法2,本文方法更加符合实际情况。

4 影响因素分析

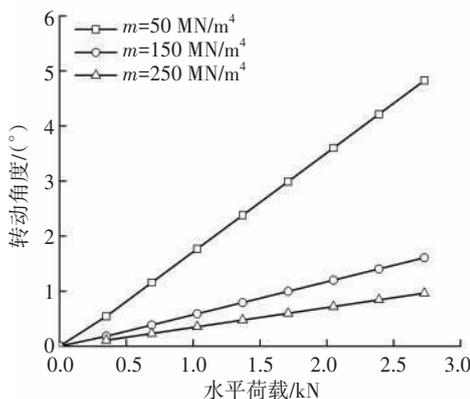
在模型试验的基础上,探讨 m 值、基础埋置深度对多杆合一杆件刚性矩形基础受力与变形的影响。

4.1 m 值的影响

当 $m=50、150、250$ MN/m⁴时,对应的基础变形如图9所示。



(a) 基础地面处水平位移



(b) 基础转动角度

图9 不同 m 值下的基础变形

Fig. 9 Deformation of foundation under different m values

由图9可知,随着 m 值增加,基础在地面处的水平位移和转动角度均有所减小。当 $H=2.80$ kN,且 m 值由 50 MN/m⁴增加至 250 MN/m⁴时,对应的地面处水平位移和转动角度分别减小了66.4%、80.0%。现有研究表明,地基抗力比例系数 m 值不仅与土性有关,还与土体密实度有关。因此,对于多杆合一杆件基础,其周围的回填土应具有一定的压实度,以避免土体刚度不够而导致基础变形过大。 m 值对基底脱离比值、基底脱离宽度和基底最大土反力并无明显影响。

4.2 埋置深度的影响

为研究基础埋置深度对基础受力与变形的影响。当基础的埋置深度为 $L=0.50、0.75、1.00$ m时,对应的基础受力变形如图10所示。

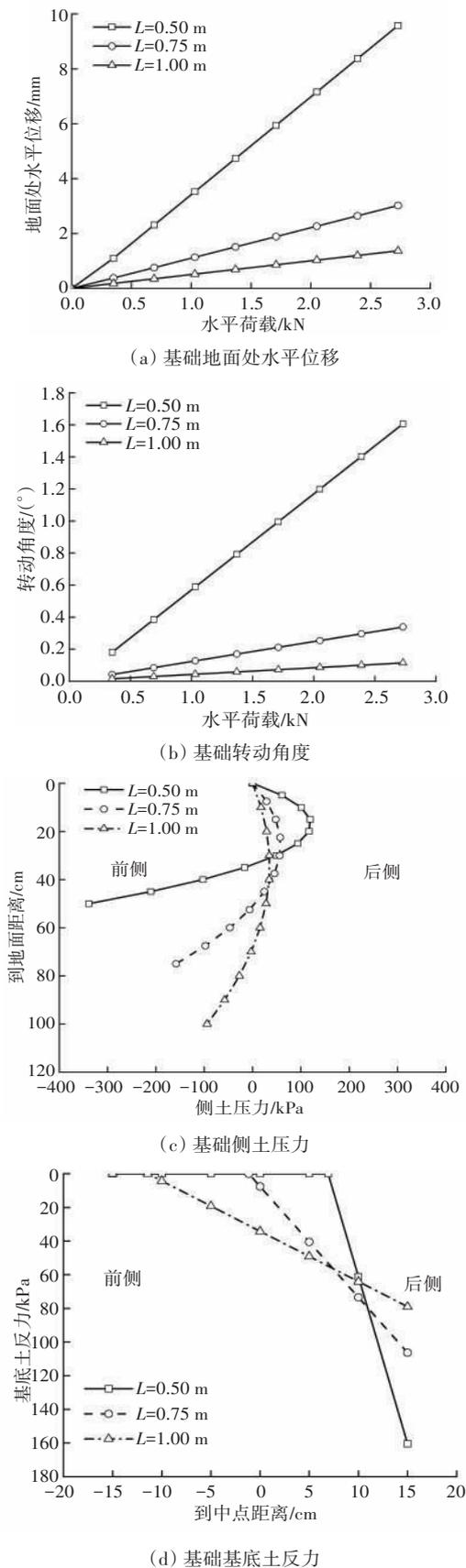


图 10 不同埋置深度下基础变形和土反力图

Fig. 10 Deformation of foundation and soil reaction force of base under different embedment depths

由图 10(a)和 10(b)可知,在 $H=2.80$ kN 的情况下,当埋置深度由 0.50 m 增大至 1.00 m 时,对应的地面处水平位移和基础转动角度分别减小了 85.70%、92.91%。由此可见,随着基础埋置深度的增加,基础地面处水平位移和转动角度有所减小。由图 10(c)和 10(d)可知,当埋置深度由 0.50 m 增大到 0.75、1.00 m 时,在 $H=2.80$ kN 的情况下,对应的基础最大侧土压力分别减小了 53.27% 和 72.24%,最大基底土反力分别减小了 33.71% 和 50.77%。由此可见,基础地面处水平位移、转动角度、基础侧土压力以及基底土反力均随着基础埋置深度的增加而减小。

5 结论

基于现有多杆合一杆件基础设计理论,采用 m 法考虑水平荷载下基础所受土反力,通过自行设计的加载装置和试验方案,对本文方法进行验证,并与现行规范进行对比分析,得到如下结论:

- 1) 通过对比基础地面处水平位移、转动角度、侧土压力及基底土反力的理论计算值与模型试验结果,可验证理论解的合理性。与规范对比可知,本文方法计算得到的基底土反力更符合工程实际。
- 2) 基础在地面处的水平位移和转动角度均随着地基抗力比例系数 m 值的增加而减小。 m 值的改变对于基底脱离比值、基底脱离宽度和基底最大土反力均无明显影响。
- 3) 基础地面处水平位移、转动角度、基础侧土压力以及基底土反力均随着基础埋置深度的增加而减小。增大基础埋置深度能有效地提升基础的水平承载能力,埋深越大基础稳定性越高。

参考文献 (References):

[1] 施亮. 城市道路照明中的多杆合一及智能化设计[J]. 上海建设科技, 2018(2): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6637.2018.02.013.
SHI Liang. Multi-pole integration and intelligent design in urban road illumination [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2018(2): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6637.2018.02.013.

[2] 陆凯论, 史习渊. 城市建成区道路多杆合一工程研究与应用[J]. 上海建设科技, 2019(2): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6637.2019.02.007.
LU Kaiquan, SHI Xiyuan. Research and application of multi-pole integration project in urban built-up area [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2019(2): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6637. 2019.02.007.

- [3] 交通运输部公路科学研究院, 北京交科公路勘察设计研究院. 公路交通标志和标线设置手册: JTG D82—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing Jiaoke Highway Survey Design and Research Institute. Manual on layout of highway traffic signs and markings: JTG D82—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [4] 陈万鹏. 考虑应力扩散的复杂受荷桩非线性分析方法[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 14-18. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.05.004.
CHEN Wanpeng. Nonlinear analysis method of complex loaded piles considering stress diffusion[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 14-18. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.05.004.
- [5] 蒋翔, 彭冉. 基于 m 法的桩基分析程序开发[J]. 中外公路, 2016, 36(5): 173-175. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.05.039.
JIANG Xiang, PENG Ran. Development of pile foundation analysis program based on m method [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(5): 173-175. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2016.05.039.
- [6] 成滢, 罗忠涛, 尹平保. 山区桩柱式桥梁基桩破坏模式和受力分析[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(3): 28-33, 71. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2013.03.011.
CHENG Ying, LUO Zhongtao, YIN Pingbao. The force analysis and failure mode of bridge pile-columns in mountain area [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(3): 28-33, 71. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2013.03.011.
- [7] 周天应, 周援衡, 鲁智勇. 嵌岩桩水平承载力计算方法的讨论和分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 65-71. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.03.012.
ZHOU Tianying, ZHOU Yuanheng, LU Zhiyong. Analysis and discussion of calculation methods for rock socketed piles under lateral load[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 65-71. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.03.012.
- [8] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [9] 唐国安. 对刚性短桩基础抗倾覆设计方法的探讨[J]. 电力建设, 1997, 18(10): 23-26.
TANG Guoan. Discussion on anti-overturning design method of rigid short pile foundation[J]. Electric Power Construction, 1997, 18(10): 23-26.
- [10] 施晓春, 徐日庆, 龚晓南, 等. 桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 723-726.
SHI Xiaochun, XU Riqing, GONG Xiaonan, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of single bucket foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 723-726.
- [11] 孙曦源, 栾茂田, 唐小微. 饱和软黏土地基中桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 667-672. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.02.037.
SUN Xiyuan, LUAN Maotian, TANG Xiaowei. Study of horizontal bearing capacity of bucket foundation on saturated soft clay ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 667-672. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.02.037.
- [12] 贺炜, 陈宇林. 土体震致剪切变形条件下斜坡桩的受力特性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 53-59. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.009.
HE Wei, CHEN Yulin. Mechanical characteristics of slope piles under soil seismic shear deformation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 53-59. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.009.
- [13] 吴炯, 汪梅, 程东华. 输电线路窄基铁塔基础抗倾覆公式[J]. 电力建设, 2012, 33(6): 43-46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2012.06.011.
WU Jiong, WANG Mei, CHENG Donghua. Anti-overturning formula for narrow-base tower foundation in transmission line [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(6): 43-46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2012.06.011.
- [14] 邢月龙, 沈建国, 周福元. 掏挖式基础受力机理试验研究[J]. 电力建设, 2008, 29(2): 22-26, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2008.02.007.
XING Yuelong, SHEN Jianguo, ZHOU Fuyuan. Experimental study of excavated foundation loading mechanisms[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(2): 22-26, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2008.02.007.
- [15] 穆保岗, 李旭, 龚维明, 等. 水平荷载长期作用下沉并变位特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1388-1397. DOI: 10.11779/CJGE201708005.
MU Baogang, LI Xu, GONG Weiming, et al. Model tests on deformation characteristics of caissons under long-term horizontal load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1388-1397. DOI: 10.11779/CJGE201708005.
- [16] 尹平保, 伍哈曦, 贺炜, 等. 推扭($H-T$)荷载作用下刚性矩形基础承载特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 125-134. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307036.
YIN Pingbao, WU Hanxi, HE Wei, et al. Study on bearing characteristics of rigid rectangular foundation subjected to horizontal force and torque ($H-T$) [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 125-134. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307036.

(责任编辑:薛仪)