

推扭 ($H-T$) 荷载作用下刚性矩形基础承载特性研究

尹平保, 伍晗曦, 贺 炜, 谭李俊英, 刘江波, 方 敏

Study on bearing characteristics of rigid rectangular foundation subjected to horizontal force and torque ($H-T$)

YIN Pingbao, WU Hanxi, HE Wei, TAN Lijunying, LIU Jiangbo, and FANG Min

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

张振, 陈勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89-96

斜坡浅埋水平条形锚板抗拔承载力的极限分析

A limit analysis of the ultimate pullout capacity of a shallow horizontal strip anchor plate embedded in slope

黄明华, 李盾, 李嘉成 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 116-116

分级循环荷载下原状红黏土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of the undisturbed laterite under graded cyclic loading

穆锐, 黄质宏, 姚未来, 成鑫磊, 雷屹欣, 杨成 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 94-102

盾构施工与波浪荷载耦合作用后软土力学特性

Mechanical properties of soft clay after coupling between shield construction and wave loading

刘浩旭, 朱剑锋, 饶春义, 潘斌杰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 97-103

多级荷载下弱膨胀土的膨胀变形特性试验研究

An experimental study of expansion deformation characteristics of weak expansive soil under multi-stage load

边加敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 125-133

基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究

An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area

张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 罗玉磊, 郭幔 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 117-125



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307036

尹平保, 伍晗曦, 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.
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.

推扭 ($H-T$) 荷载作用下刚性矩形基础承载特性研究

尹平保¹, 伍晗曦¹, 贺炜¹, 谭李俊英¹, 刘江波², 方敏²

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114;

2. 海口市设计集团有限公司, 海南海口 570208)

摘要: 现行杆件基础设计仅考虑水平力(H)而忽略扭矩(T)的作用, 这很可能导致杆件基础发生推扭破坏。为分析推扭($H-T$)荷载下刚性矩形基础的承载特性, 首先根据杆件基础的受力特点, 建立了相应的简化计算模型, 推导了 T 、 H -偏心弯矩(M) 2种承载模式下基础受力与变形分析的理论解答; 其次通过数值模拟分析, 获得了 $H-T$ 荷载下矩形刚性基础的破坏包络线; 在此基础上, 通过室内模型试验验证了理论计算方法的合理性, 并探讨了扭推比、地基抗力比例系数 m 值对基础受力与变形的影响。研究发现: $H-T$ 荷载下刚性矩形基础的破坏包络线近似呈抛物线分布; 随扭推比增大, 矩形基础的地基承载力随之减小, 其破坏模式也由水平变形破坏转为扭转变形破坏; 增大 m 值, 可有效减小基础地面处水平位移及旋转角度。为确保刚性矩形基础的安全稳定, 其上覆回填土体性质和压实度均应满足设计要求。上述结论可为多杆合一杆件基础的设计提供参考。

关键词: 刚性基础; 水平荷载; 扭矩; 破坏包络线; 承载特性

中图分类号: TU471.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0125-10

Study on bearing characteristics of rigid rectangular foundation subjected to horizontal force and torque ($H-T$)

YIN Pingbao¹, WU Hanxi¹, HE Wei¹, TAN Lijunying¹, LIU Jiangbo², FANG Min²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan, 410114, China; 2. Haikou Designing Group Co. Ltd., Haikou, Hainan, 570208, China)

Abstract: The current design of member foundation only considers horizontal forces (H) and ignores the effect of torque (T), which may lead to torsional failure of the foundation. To analyze the bearing characteristics of rigid rectangular foundation subjected to horizontal force and torque ($H-T$), according to the stress characteristics of the foundation, the corresponding simplified calculation model is established, and the theoretical solutions of the stress and deformation analysis of the foundation under the two bearing modes of torque (T), horizontal force (H) - eccentric bending moment (M) are derived; numerical simulation analysis is carried out to obtain the failure envelope of rigid rectangular foundations under push torsion $H-T$ load. And then the rationality of the theoretical calculation method is verified by the indoor model test. Finally, the influences of torsion ratio and foundation resistance ratio coefficient m on the stress and deformation of foundation are analyzed. The results show that the failure envelope of rigid rectangular foundation under push torsion $H-T$ load is approximately parabolic. With the

收稿日期: 2023-07-19; 修订日期: 2023-12-13

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178311; 52078055); 湖南省教育厅科学研究项目(20A001); 江西省交通运输厅科技项目(2021H0005)

第一作者: 尹平保(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事桩基础及支挡结构工程等方面的研究。E-mail: pingbaby921@163.com

increase of torsion-thrust ratio, the horizontal bearing capacity of the foundation decreases, and its failure mode changes from horizontal deformation failure to torsional deformation failure. The increase of the proportional coefficient m can reduce the horizontal displacement and rotation angle at the foundation ground effectively. To ensure the safety and stability of the rigid rectangular foundation, the nature and compaction of the overlying backfill should satisfy the design requirements. This study can provide basic information for the design of multi-rod unified rod foundations.

Keywords: rigid foundation; horizontal load; torque; failure envelope; bearing characteristics

随着城市现代化发展,交通标识牌杆、照明灯杆、电子监控杆等传统杆件设施林立道路两旁,造成城市各种杆体重复建设,影响城市空间布局,亟需通过“多杆合一”技术将其进行整合,从而美化道路环境,节省城市地上空间^[1]。另外,为进一步节约城市地下空间,多杆合一杆件多采用不带扩底的等截面矩形基础,因其刚度较大,不妨将其称为“刚性矩形基础”。与单一杆件相比,多杆合一杆件的上部设备和构件更多,杆件基础除承受竖向力(V)、水平力(H)和偏心弯矩(M)外,还要承受扭矩(T)的作用,使得其受力与变形特性更为复杂。为设计出更为经济合理的多杆合一杆件基础,研究推扭(H - T)荷载作用下刚性矩形基础的承载特性具有重要的理论研究意义。

关于复合荷载作用下基础的承载特性,已有学者开展了一些有益的研究工作。理论方面:邹新军等^[2]、饶文昌等^[3]、王飞等^[4]建立了组合荷载作用下基桩水平承载简化计算模型,获得了基桩受力与变形计算的半解析解答;覃玉兰等^[5]、邹新军等^[6]推导了 V - T 和 H - T 下基桩的极限承载力。试验方面:武科等^[7]开展了扭剪荷载作用下桶形基础室内模型试验,分析了桶形基础与土的相互作用机理;邹新军等^[8-9]、郭沛翰等^[10]通过砂土单桩承载特性模型试验发现 H - T 下桩身极限承载力较单一水平受荷桩或受扭桩小;Hu等^[11]开展了 H - T 下单桩离心机试验,结果表明 T 会导致桩身水平承载力降低30%~50%。数值模拟方面:王思等^[12]建模分析了桩径比、桩端土强度等对大直径超长桩承载性状的影响;武科等^[13]通过数值模拟得到了 H - T 下桶形基础的破坏包络线,分析了桶形基础稳定性;范庆来等^[14]基于Tresca屈服准则,进行了海上风机桶形基础三维有限元分析,得到了 V - H - T 荷载空间内的破坏包络面。上述结果均表明扭矩对基础的受力与变形有显著影响,且会大幅降低基础的承载力。但这些研究主要针对桩基础和桶型基础^[15-17]。对于刚性矩形基础,目前主要从水平受荷的角度来分析其承载特

性^[18-21],如:穆保岗等^[22]基于模型试验结果,建立了修正的理想塑性土体水平抗力(p)与桩身挠度(y)的关系曲线,为软土地区刚性矩形基础水平变形计算提供了理论模型。吴炯等^[23]采用极限平衡法推导了铁塔矩形基础的倾覆验算公式,通过数值模拟验证了该公式的合理性。另外,现行《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[24]中有关刚性基础的计算,也未考虑扭矩的影响,由此设计的刚性基础与实际情况差异显著。综上所述,目前有关刚性矩形基础的研究仅考虑 H 和 M 的作用,并未考虑 T 的影响^[25],这将可能导致基础发生扭转破坏,故针对刚性矩形基础开展 H - T 荷载作用下的承载特性研究非常必要。

鉴于此,本文拟在现有研究基础上,根据多杆合一杆件基础的承载特性,建立相应的简化受力模型及数值计算模型,求得 T 、 H - M 2种承载模式下杆件基础的理论解答和破坏包络线,并采用模型试验验证其合理性,进而探讨扭推比 T/H (扭矩和水平力的比值)和地基抗力比例系数 m 值对基础承载特性的影响。

1 简化计算模型与基本假定

1.1 多杆合一杆件基础简化计算模型

通常情况下,多杆合一杆件上将集成交通指示牌、摄像头及信号箱等设备,故基础将会承受一定的 V ;另外,作用在标识板上的风荷载,将通过上部杆件传递给基础,使得基础还会承受 H 、 M 和 T 等作用。简化后的多杆合一杆件基础受力模型如图1所示。

1.2 基本假定

为便于分析,在图1所示的简化受力模型基础上,做出如下假定^[26]:

- (1)不考虑基础与土之间的黏着力和摩阻力;
- (2)将地基土视为弹性变形介质,其水平向地基系数随深度成正比,土体横向抗力与土体变形量成正比;
- (3)基础受力后,基础只发生刚体转动,不做平行运动,其本身的弯曲变形略去不计。

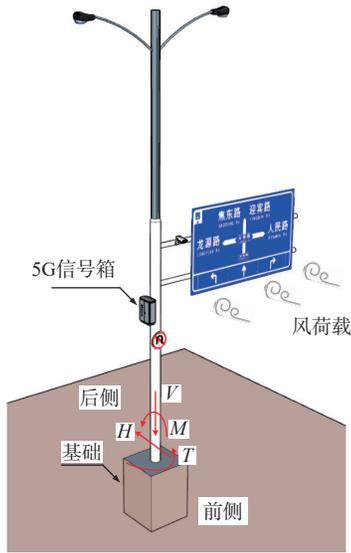


图 1 多杆合一杆件基础简化受力模型

Fig. 1 Simplified force model of multi-pole foundation

2 方程建立与解答

根据上述简化计算模型, 以下将分别分析 T 、 $H-M$ 作用下杆件基础的受力与变形, 进而对其破坏包络线进行分析。

2.1 T 作用下基础受力分析

当刚性矩形基础(长 $b_1 \times$ 宽 $a_1 \times$ 高 c_1)受 T 作用时, 基础将绕中心轴发生平面旋转, 假定其旋转角度为 θ , 基础受力与变形如图 2 所示。

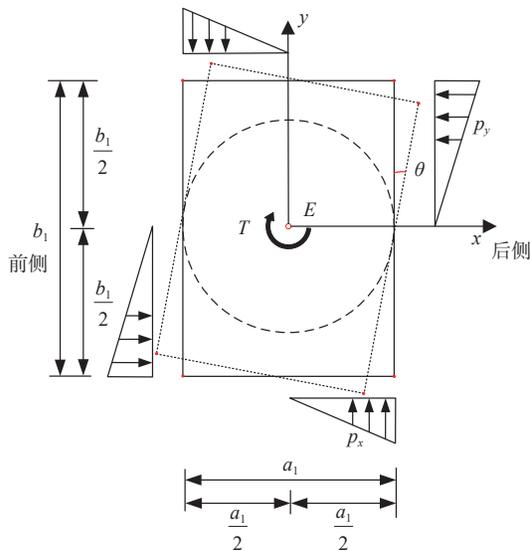


图 2 基础受力与变形平面图

Fig. 2 Force and deformation of the foundation

因基础四周所受侧土压力呈中心对称分布, 故可选取其中的 x 正半轴部分进行分析。

作用在基础上的侧向土抗力 p_y 、 p_x 分别为:

$$\int_0^{c_1} \int_0^{\frac{b_1}{2}} mzy \tan \theta dy dz = p_y \quad (1)$$

$$\int_0^{c_1} \int_0^{\frac{a_1}{2}} mzx \tan \theta dx dz = p_x \quad (2)$$

式中: z ——计算点深度/m;

m ——地基抗力比例系数/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-4}$);

a_1' 、 b_1' 、 c_1' ——基础计算宽度及深度/m, $a_1' = 1.5a_1$,

$b_1' = 1.5b_1$, $c_1' = 1.5c_1$ 。

根据静力平衡关系可得:

$$T = \frac{2a_1' p_x}{3} + \frac{2b_1' p_y}{3} \quad (3)$$

T 作用下基础旋转角度 θ 为:

$$\theta = \arctan \frac{24T}{mc_1'^2 (a_1'^3 + b_1'^3)} \quad (4)$$

2.2 $H-M$ 作用下基础受力分析

在 H 及 M 作用下, 刚性矩形基础将绕某点 $o(x_0, z_0)$ 倾斜, 假设其倾斜角度为 ω 。若矩形基础所受偏心荷载较小, 基底与地基土体尚未脱开, 基底土反力呈梯形分布, 此为承载模式一, 如图 3 所示。随着基础所受偏心荷载增大, 基础倾斜角度 ω 增大, 由于基础与地基土体之间不能承受拉应力, 部分基底与地基土体发生脱开, 基底应力重分布, 此时基底土反力由梯形分布转变为三角形分布, 此即承载模式二, 如图 4 所示。以下将根据这 2 个阶段对基础进行受力与变形分析。

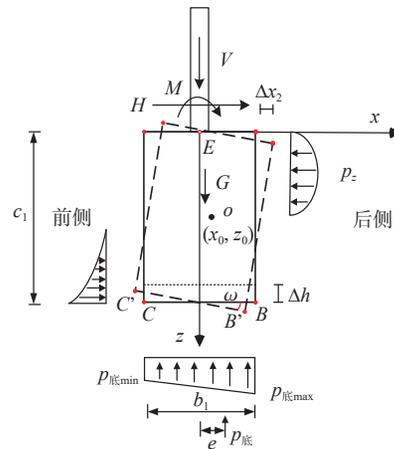


图 3 模式一下基础受力与变形示意图

Fig. 3 Force and deformation of foundation in condition 1

注: $P_{\text{底max}}$ 、 $P_{\text{底min}}$ 为作用在基底的、最大、最小土反力; e 为基底土反力合力 $P_{\text{底}}$ 偏离基础中轴线的距离; Δh 为基底竖向位移; Δx_2 为深度 z 处基础产生的水平位移; p_z 为 z 处的侧向土抗力。

(1) 模式一下基础受力与变形分析

在竖向荷载 V 及基础自重 G 下, 基底竖向位移为:

$$\Delta h = (V+G)/(AC_0) \quad (5)$$

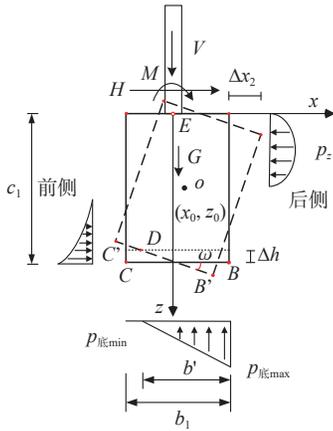


图 4 模式二下基础受力与变形示意图

Fig. 4 Force and deformation of foundation in condition 2

注: b' 为基底未脱开部分的宽度。

式中: V ——上部杆件及设备重量/kN;

G ——基础自重/kN;

A ——基础底部面积/ m^2 ;

C_0 ——基底地基抗力系数/($kN \cdot m^{-3}$)。

$$C_0 = mz \tag{6}$$

在 H 和 M 作用下, 地面以下深度 z 处基础产生的水平位移 Δx_2 及侧向土抗力 p_z 分别为:

$$\Delta x_2 = \left(\frac{b_1}{2} - x_0 \right) \cos \omega - (z - z_0) \sin \omega + x_0 - \frac{b_1}{2} \tag{7}$$

$$p_z = \Delta x_2 C_z \tag{8}$$

$$C_z = mz \tag{9}$$

式中: C_z ——地面以下深度 z 处水平向地基抗力系数/($kN \cdot m^{-3}$)。

当基础倾斜 ω 后, 基底两侧的 B 、 C 点将分别位移至 B' 和 C' 点, 假设 B' 和 C' 两点的坐标分别为 (x_2, z_2) 和 (x_3, z_3) 。根据几何关系可得:

$$z_2 = (c_1 - z_0) \cos \omega + \left(\frac{b_1}{2} - x_0 \right) \sin \omega + z_0 \tag{10}$$

$$z_3 = (c_1 - z_0) \cos \omega + \left(\frac{-b_1}{2} - x_0 \right) \sin \omega + z_0 \tag{11}$$

根据叠加原理, 可得作用在基底的最大的、最小土反力分别为:

$$p_{底max} = \left(z_2 - c_1 + \frac{V+G}{AC_0} \right) C_0 \tag{12}$$

$$p_{底min} = \left(z_3 - c_1 + \frac{V+G}{AC_0} \right) C_0 \tag{13}$$

由式(13)可知, 若 $p_{底min}$ 大于等于 0, 则说明基底与地基土尚未脱开, 即模式一; 若 $p_{底min}$ 小于 0, 则说明

基底与地基土部分脱开, 即模式二。

基底土反力合力 $P_{底}$ 偏离基础中轴线距离 e 为:

$$e = \frac{b_1}{2} - \frac{b_1}{3} \frac{2p_{底min} + p_{底max}}{p_{底min} + p_{底max}} \tag{14}$$

根据水平静力平衡条件 $\sum H=0$, 可得:

$$H - \int_0^{c_1} p_z a_1'' dz = 0 \tag{15}$$

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

对基础顶面中心 E 点取矩, 并根据力矩平衡条件 $\sum M_E=0$, 可得:

$$M + \int_0^{c_1} p_z a_1'' z dz - \frac{a_1(p_{底min} + p_{底max})b_1 e}{2} = 0 \tag{16}$$

由竖向静力平衡条件 $\sum V=0$, 得:

$$\frac{a_1(p_{底min} + p_{底max})b_1}{2} - G - V = 0 \tag{17}$$

因基础倾斜角度 ω 较小, 可采用二阶泰勒级数将式(15)~(17)展开为:

$$H - ma_1'' \left(-\frac{b_1 \omega^2}{4} + \frac{x_0 \omega^2}{2} + z_0 \omega - \frac{x^3}{6} z_0 \right) \frac{c_1^2}{2} + ma_1'' \left(\omega - \frac{\omega^3}{6} \right) \frac{c_1^3}{3} = 0 \tag{18}$$

$$M + ma_1'' \left(-\frac{b_1 \omega^2}{4} + \frac{x_0 \omega^2}{2} + z_0 \omega - \frac{x^3}{6} z_0 \right) \frac{c_1^3}{3} - ma_1'' \left(\omega - \frac{\omega^3}{6} \right) \frac{c_1^4}{4} - \frac{a_1(p_{底min} + p_{底max})b_1 e}{2} = 0 \tag{19}$$

$$\frac{a_1(p_{底min} + p_{底max})b_1}{2} - G - V = 0 \tag{20}$$

(2) 模式二下基础受力与变形分析

在承载模式二下, 基础倾斜角度较大, 基底与土体在 $D(x_4, z_4)$ 点处发生脱开(基底未脱开部分宽度为 b'), 基底应力重分布, 整体呈三角形分布, 如图 4 所示。

DB' 两点的直线表达式为:

$$z - z_2 = \tan \omega (x - x_2) \tag{21}$$

将 D 点 $[x_4, c_1 - (V+G)/(AC_0)]$ 代入到式(21)中, 可得 D 点坐标为:

$$x_4 = \frac{c_1 - \frac{V+G}{AC_0} - z_2}{\tan \omega} + x_2, \quad z_4 = c_1 - \frac{V+G}{AC_0} \tag{22}$$

由此得基底未脱开部分宽度 b' 为:

$$b' = \frac{b_1}{2} - \frac{c_1 - \frac{V+G}{AC_0} - z_2}{\tan \omega} - x_2 \tag{23}$$

同理建立如下平衡方程式:

根据水平静力平衡条件 $\sum H=0$, 可得:

$$H - \int_0^{c_1} p_x a_1'' dz = 0 \quad (24)$$

对基础顶面中心 E 点取矩, 并根据力矩平衡条件 $\sum M_E=0$, 可得:

$$M + \int_0^{c_1} p_x a_1'' z dz - \frac{b^2 \tan \omega C_0 a_1}{2} \left(\frac{b_1}{2} - \frac{b'}{3} \right) = 0 \quad (25)$$

由竖向静力平衡条件 $\sum V=0$, 得:

$$\frac{b^2 \tan \omega C_0 a_1}{2} - G - V = 0 \quad (26)$$

同理, 采用泰勒级数将其展开为:

$$\begin{aligned} H - ma_1'' \left(-\frac{b_1 \omega^2}{4} + \frac{x_0 \omega^2}{2} + z_0 \omega - \frac{x^3}{6} z_0 \right) \frac{c_1^2}{2} + \\ ma_1'' \left(\omega - \frac{\omega^3}{6} \right) \frac{c_1^3}{3} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} M + ma_1'' \left(-\frac{b_1 \omega^2}{4} + \frac{x_0 \omega^2}{2} + z_0 \omega - \frac{x^3}{6} z_0 \right) \frac{c_1^3}{3} - \\ ma_1'' \left(\omega - \frac{\omega^3}{6} \right) \frac{c_1^4}{4} - \frac{b^2 \left(\omega + \frac{\omega^3}{3} \right) C_0 a_1}{2} \left(\frac{b_1}{2} - \frac{b'}{3} \right) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{b^2 \left(\omega + \frac{\omega^3}{3} \right) C_0 a_1}{2} - G - V = 0 \quad (29)$$

综上所述, 根据不同承载模式下刚性矩形基础的几何关系和静力平衡条件, 对模式一可联立式(18)—(20)、对模式二可联立式(27)—(29)进行求解, 即可得到相应承载模式下基础倾斜中心位置 $o(x_0, z_0)$ 和倾斜角度 ω 。

2.3 $H-T$ 作用下基础破坏包络线

在推扭加载模式下, 通过破坏包络线可较好地判断基础是否由安全状态进入极限状态, 也是确定基础极限承载力的一种方法^[27]。对于 $H-T$ 作用下刚性矩形基础的破坏标准, 现有研究表明: 在纯扭荷载作用下, 当基础旋转角度达到 1.15° 时, 可认为基础已达扭转破坏, 对应的 T 即为扭转极限地基承载力 T_{ult} ^[12]; 在纯水平荷载作用下, 当基础地面处水平位移达到 10 mm 时, 可认为基础已达水平变形极限, 对应的 H 即为水平极限地基承载力 H_{ult} ^[28]; 在 $H-T$ 作用下, 当基础旋转角度达到 1.15° 或地面处水平位移达到 10 mm 时, 即可认为基础已达破坏。在此基础上, 通过数值模拟分析, 按不同 T/H 在基础顶面施加荷载直至达到上述破坏标准, 并将基础破坏时对应的荷载分量归一化, 从

而得到基础破坏包络线。实际工程中, 基础埋置深度 c_1 和基底宽度 b_1 对其承载力有较大影响, 故保持 b_1 不变, 假定 b_1 和长度 a_1 相等, 可以得到不同深宽(长)比 c_1/b_1 (c_1/a_1) 下基础破坏包络线, 如图 5 所示。

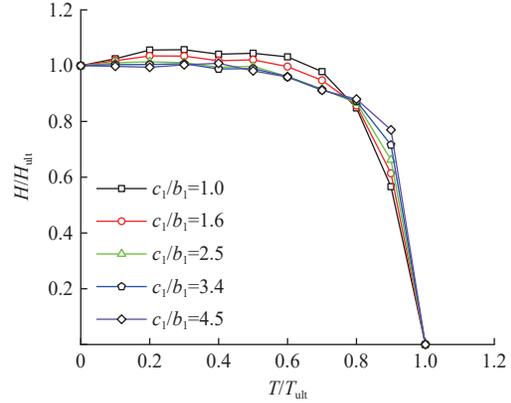


图 5 $H-T$ 下刚性矩形基础的破坏包络线

Fig. 5 Failure envelopes of rigid rectangular foundation under $H-T$ load

由图 5 可知, 刚性矩形基础的推扭破坏包络线近似呈抛物线分布。为便于工程应用, 可对其进行非线性拟合, 得到相应的表达式:

$$f = \alpha \left(\frac{T}{T_{ult}} \right)^2 + \beta \left(\frac{T}{T_{ult}} \right) + \eta - \left(\frac{H}{H_{ult}} \right) \quad (30)$$

式中: α 、 β 、 η ——与深宽比 c_1/b_1 有关的拟合参数, 其表达式为:

$$\begin{cases} \alpha = 4.0 - 0.9c_1/b_1 \\ \beta = 7.5 - 1.8c_1/b_1 \\ \eta = 12.5 - 4.2c_1/b_1 \end{cases} \quad (31)$$

实际工程中, 可通过理论分析确定刚性矩形基础的地基水平极限承载力 H_{ult} 和扭矩极限承载力 T_{ult} , 再结合上述破坏包络线判断基础的安全状况。

3 试验验证

3.1 试验概况

为检验上述理论解答的准确性, 以海口市临空经济区某多杆合一杆件矩形基础为原型, 在室内开展了 $H-T$ 作用下刚性矩形基础模型试验。模型箱尺寸为 2 m (长) \times 1.8 m (宽) \times 1.6 m (高); 原型矩形基础尺寸为 0.9 m (长) \times 0.9 m (宽) \times 1.5 m (高); 模型矩形基础尺寸为 0.3 m (长) \times 0.3 m (宽) \times 0.5 m (高), 原型与模型基础的几何相似比为 $3:1$; 模型基础由 C30 混凝土制作而成。上部杆件采用直径为 108 mm 、壁厚为 4 mm 的钢管, 基础与杆件采用高强螺栓相连。试验土体取自长

沙某实际工程,土粒级配曲线见图 6,土体的物理力学性质指标见表 1。

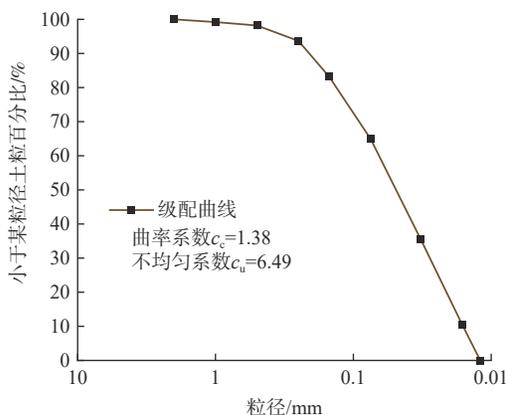


图 6 试验用土的级配曲线
Fig. 6 Grading curve of test soil

表 1 试验土体物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of test soil

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

注: φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; w 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。

3.2 试验布置

试验加载装置由钢绞线、砝码以及定滑轮等组成。采用位移计测试基础地面处水平位移;采用土压力盒测试基础前后两侧及底部土反力;利用角度传感器测试基础顶面的倾斜角度及旋转角度;通过模型刚桩测试地基抗力比例系数 m 值;模型试验布置如图 7 所示。

3.3 加载方案

在现有研究基础上,结合《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)等^[25,29],计算得到最不利状态下基础顶部所受荷载为: $V=0.98\text{ kN}$, $H=0.71\text{ kN}$, $M=1.64\text{ kN}\cdot\text{m}$, $T=0.71\text{ kN}$ 。

多杆合一杆件属于高耸结构,其上部结构在风荷载作用下产生的弯矩与水平荷载的比值较大,所需模型杆件过长。为便于试验加载,减小模型杆件高度,可根据等效原则在基础两端同时施加水平荷载 H_1 和 H_2 而获得相应条件下的 H 、 M 以及 T 。具体的试验加载方案如表 2 所示。

$$M = H_1 \times 1 - H_2 \times 0.3 \quad (32)$$

$$H = H_1 - H_2 \quad (33)$$

$$T = H_1 \times 0.34 \quad (34)$$

3.4 理论与试验结果对比分析

通过刚性桩水平静载试验可以测得地基抗力比例系数 m 值与地面处水平位移之间的关系曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,当刚性桩地面处水平位移为 10 mm 时, m 值约为 70 MN/m⁴。通过图 8 可以获得与地面处水平位移相对应的 m 值,从而开展刚性基础的设计计算。在此基础上,根据式(4)可以计算得到基础旋转角度,再联立式(12)、式(13)、式(18)—(20)或式(27)—(29)可以计算得到基础地面处水平位移、基础顶面倾斜角度、侧土压力和基底土反力等,其与模型试验结果的对比如图 9 所示。

由图 9(a)(b)(c)可知,随着推扭荷载增大,基础地面处水平位移、基础旋转角度及倾斜角度均随之增大,当 $H=1.40\text{ kN}$ 、 $T=1.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,基础地面处水平位移为 10.97 mm、基础旋转角度为 0.30°、倾斜角度为 1.61°,基础已达破坏;由图 9(d)可知,基础侧土压力与基础倾斜角度成正比,呈中间小两端大分布;从图 9(e)可以发现,当 $H=0.28\text{ kN}$ 、 $T=0.24\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,基底与土体脱开,随着 H - T 增大,基底土压力重新分布,后侧基底的土压力增幅较大;由图 9(f)可得,当 $H=1.40\text{ kN}$ 、

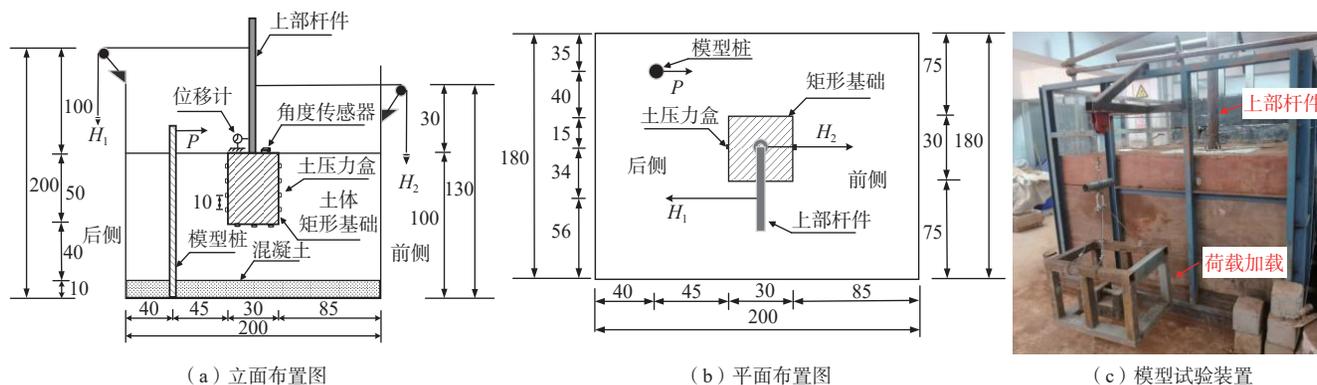


图 7 模型试验布置图 (尺寸单位: cm)

Fig. 7 Model test arrangement (Unit: cm)

注: P 为模型钢桩上的水平荷载。

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	$T/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	0.20	0.13	0.07	0.068
2	0.40	0.26	0.14	0.136
3	0.60	0.39	0.21	0.204
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	$0.20n$	$0.13n$	$0.07n$	$0.068n$

$T=1.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时, 基础荷载水平已超过破坏包络线, 说明其已达到破坏。总的来说, 基础受力、变形计算结果均与试验结果吻合较好, 可以验证前述理论计算方法的合理性。

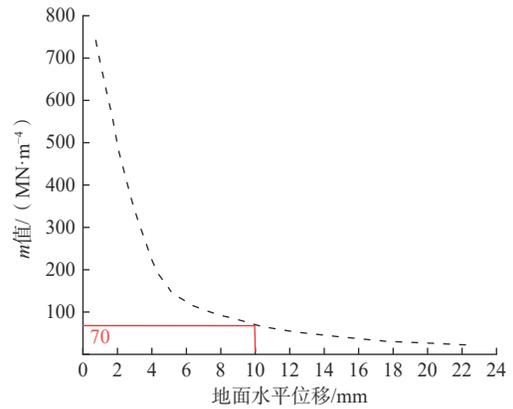


图 8 m 值随杆件地面处位移关系曲线

Fig. 8 m value versus ground displacement of foundation

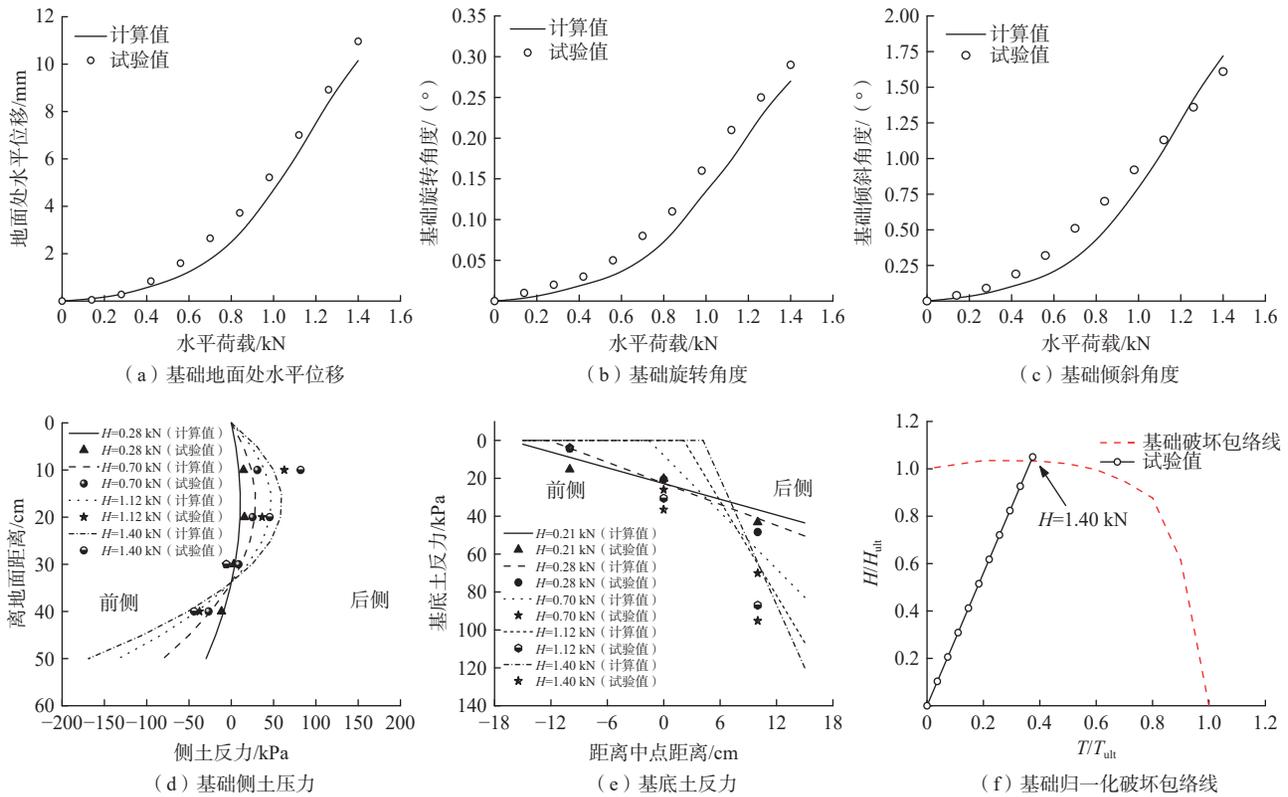


图 9 理论与试验结果对比分析

Fig. 9 Comparison analysis of theoretical and test results

4 影响因素分析

以模型试验中的杆件基础为例, 进一步探讨扭推比 T/H_1 和地基抗力比例系数 m 值对刚性矩形基础受力与变形的影响。

4.1 扭推比的影响

当 $T/H_1=0.34, 0.64, 0.94\text{ m}$ 时, 基础受力与变形情况如图 10 所示。

由图 10(a) 可得, 相同水平荷载分量 H 下, 基础旋

转角度随扭推比增加而增大; 从图 10(b) 可以发现, 当 T/H_1 由 0.34 m 增大到 0.64 m 和 0.94 m 时, 基础破坏时对应的水平荷载分量 H 分别降低 0.11 kN 及 0.31 kN , 此时基础破坏模式由水平变形破坏逐渐转变为扭转破坏。因此, 在设计刚性矩形基础时, 应综合考虑 $H-T$ 对基础地基承载能力的削弱效应, 避免基础在 $H-T$ 作用下发生扭转破坏。

4.2 m 值的影响

现有研究表明^[20, 22], m 值主要取决于土体性质及

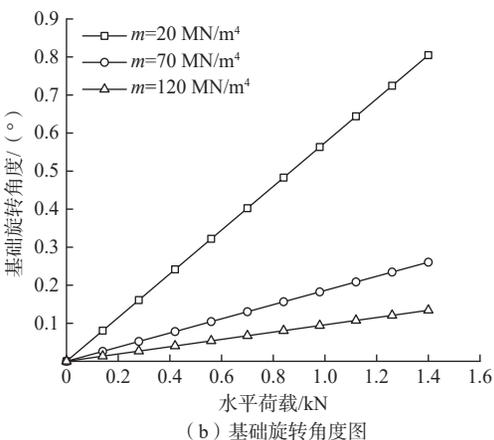
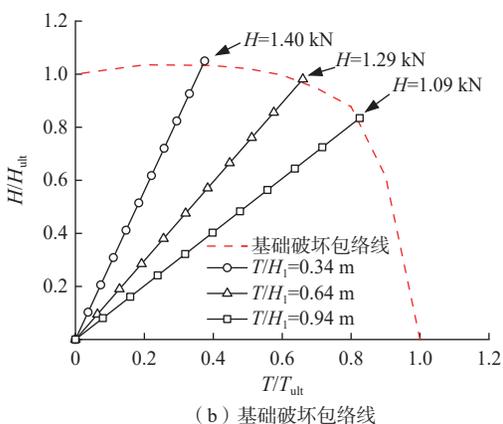
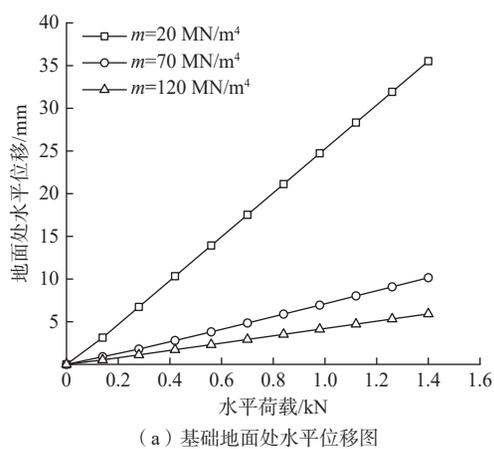
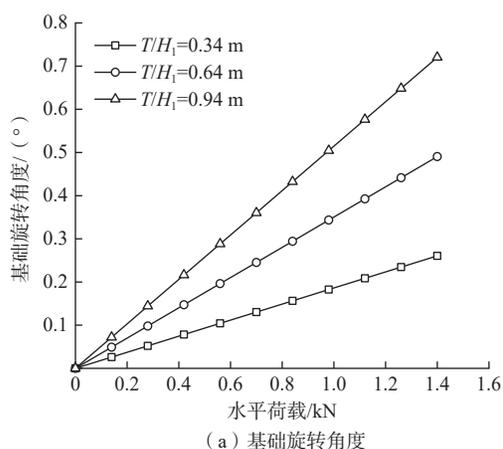


图 10 不同扭推比下基础旋转角度与破坏包络线

Fig. 10 Deformations and failure envelopes of foundation under different torsion push ratios

其密实度。由图 8 可知, 试验过程中, 随着基础地面处水平位移增大, m 值逐渐减小, 故参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[26] 取基础地面处水平位移为 10 mm 时对应的 m 值进行计算是偏安全的。为分析土性对基础承载特性的影响, 分别取 $m = 20, 70, 120$ MN/m⁴ 时, 计算得到的基础变形结果如图 11 所示。

由图 11 可知, 在相同荷载水平下, 随 m 值增大, 基础在地面处的水平位移和旋转角度均减小。当 $H = 1.40$ kN, 且 m 值由 20 MN/m⁴ 增大到 70 MN/m⁴ 和 120 MN/m⁴ 时, 对应的基础地面处水平位移分别减小 71.42% 和 83.34%, 而基础旋转角度分别减小 67.62% 和 83.33%。因此, 对于刚性矩形基础, 其上覆回填土体性质及压实度均应满足设计要求, 以避免因基础周围土体刚度不够而破坏。

5 结论

根据多杆合一杆件的结构特点及承载特性, 建立了刚性基础简化计算模型, 推导了 T 、 H - M 2 种荷载模式下基础受力与变形的理论解答, 获得了 H - T 下刚性

图 11 不同 m 值下基础变形图
Fig. 11 Deformations of foundation under different m values

矩形基础的破坏包络线, 通过模型试验验证了理论解答的合理性, 进而探讨扭推比 T/H_1 、地基抗力比例系数 m 值对刚性矩形基础受力与变形的影响, 得到如下主要结论:

(1) 由理论解答得到的基础地面处水平位移、旋转角度、倾斜角度、侧土压力及基底土反力计算值与模型试验值吻合良好, 验证了理论解答的合理性。

(2) 在 H - T 作用下, 基础破坏包络线整体呈抛物线分布; 与单一水平荷载或扭转荷载作用相比, H - T 作用将显著降低刚性矩形基础的承载能力, H - T 对基础承载能力的削弱效应不容忽视。

(3) 在相同的荷载水平下, 基础旋转角度随扭推比增加而增大; 而地面处水平位移和旋转角度则随 m 值增加而减小; 为确保刚性矩形基础的安全稳定, 其上覆回填土体性质和压实度均应满足设计要求。

参考文献 (References) :

[1] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 邹新军, 徐洞斌, 王亚雄. 近海复杂环境下的 $H-M-T$ 受荷桩内力位移分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6): 736 – 741. [ZOU Xinjun, XU Dongbin, WANG Yaxiong. Analysis of piles under $H-M-T$ combined loading in offshore complex environment[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(6): 736 – 741. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 饶文昌, 竺明星. 组合荷载作用下基桩水平承载特性的简化半解析解 [J]. 中外公路, 2021, 41(6): 6 – 13. [RAO Wenchang, ZHU Mingxing. Simplified semi-analytical solutions of horizontal bearing characteristics of pile foundation under combined load[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(6): 6 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王飞, 闫宇, 焦立冬, 等. 考虑软化效应的滨海软土区基桩受力与变形特性分析 [J]. 中外公路, 2024, 44(2): 1-8. [WANG Fei, YAN Yu, JIAO Lidong, et al. Analysis of the mechanical and deformation characteristics of piles in coastal soft soil area considering softening effect[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 覃玉兰, 邹新军, 曹雄. 均质砂土中水平简谐荷载与扭矩联合受荷单桩内力、位移分析 [J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 147 – 156. [QIN Yulan, ZOU Xinjun, CAO Xiong. Internal forces and deformations of a single pile in uniform sand under combined action of horizontal harmonic load and torque[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(1): 147 – 156. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 邹新军, 王亚雄, 徐洞斌. Gibson 地基中 $V-T$ 联合受荷桩承载力分析 [J]. 工程力学, 2015, 32(8): 149 – 155. [ZOU Xinjun, WANG Yaxiong, XU Dongbin. Bearing capacity analysis of piles under $V-T$ combined loading in Gibson subsoil[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 149 – 155. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 武科, 马明月, 范庆来, 等. 扭剪荷载作用下桶形基础与土相互作用机理模型试验 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 86 – 90. [WU Ke, MA Mingyue, FAN Qinglai, et al. Mechanism model test of interaction between bucket foundation and soil subjected to torsional resistance[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2013, 34(1): 86 – 90. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 邹新军, 丁仕进, 赵灵杰. 水平力(H)-扭矩(T)组合受荷桩承载特性模型试验研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 126 – 133. [ZOU Xinjun, DING Shijin, ZHAO Lingjie. Model testing investigation on bearing behavior of a single pile under combined $H-T$ loads[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(3): 126 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 邹新军, 丁仕进, 徐洞斌. 中密砂土地基中 $H-T$ 组合作用下单桩承载特性研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 107 – 114. [ZOU Xinjun, DING Shijin, XU Dongbin. Bearing behavior of a single pile in ground of medium-dense sand under the combined $H-T$ loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(11): 107 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郭沛翰, 邹新军. 均质砂土地基中竖向力-水平力-桩顶扭矩共同作用下单桩承载特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2593 – 2600. [GUO Peihan, ZOU Xinjun. Bearing capacity of a single pile in sand under combined vertical force-horizontal force-torque load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2593 – 2600. (in Chinese with English abstract)]
- [11] HU Zhihong, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Influence of torque on lateral capacity of drilled shafts in sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(4): 456 – 464.
- [12] 王思, 张永杰, 程鑫, 等. 大直径超长桩承载性状影响研究 [J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 68 – 75. [WANG Si, ZHANG Yongjie, CHENG Xin, et al. Numerical analysis of influence of soil strength of pile tip on bearing capacity of overlong pile[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2021, 37(2): 68 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 武科, 马明月, 栾茂田, 等. 扭剪荷载作用下桶形基础承载性能的弹塑性有限元数值分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(5): 777 – 786. [WU Ke, MA Mingyue, LUAN Maotian, et al. Numerical analysis of bearing capacity behavior of bucket foundation subjected to torsion shear loading based on elasto-plastic FEM[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(5): 777 – 786. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 范庆来, 栾茂田. $V-H-T$ 荷载空间内海上风机桶形基础破坏包络面特性分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 113 – 118. [FAN Qinglai, LUAN Maotian. Failure envelopes of bucket foundation for offshore wind turbines in $V-H-T$ loading space[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(4): 113 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 丁梓涵, 赵其华, 彭社琴, 等. 地基土强度对桩土水平作用特性及 m 值影响的模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 113 – 117. [DING Zihan, ZHAO Qihua, PENG Sheqin, et al. Experimental study on the effect of strength of foundation soil on the pile-soil

- interaction and m value[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(3): 113 - 117. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张玲, 陈金海, 欧强. 基于能量法的轴横向荷载作用下单桩受力变形分析[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 81 - 91. [ZHANG Ling, CHEN Jinhai, OU Qiang. Deformation analysis of pile under combined axial and lateral loads by using the energy method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 81 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 邓时容, 肖世国. 嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 84 - 91. [DENG Shirong, XIAO Shiguo. Calculation method of stabilizing piles with broadened top at the built-in section[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 84 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 等. 抗滑桩应变特征与内力非线性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 114 - 124. [REN Qingyang, ZHAO Mengyuan, XIE Zhongwei, et al. A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 114 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 闫玉平. 越顶破坏模式下沉埋桩受荷段及沉埋段推力算法[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(3): 76 - 84. [YAN Yuping. Calculation method of thrust force of the embedded stabilizing piles under the overtopping failure mode[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 76 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 赵小晴, 詹伟, 严鑫, 等. 水平荷载下沉井在砂土中变位特性的试验与模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊 2): 80 - 83. [ZHAO Xiaoqing, ZHAN Wei, YAN Xin, et al. Experimental study and simulation on deformation characteristics of caissons in sand under horizontal loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(Sup 2): 80 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 邱力杰, 尹平保, 王礼华, 等. 考虑空间效应的深长基坑围护结构受力与变形分析[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(4): 70 - 79. [QIU Lijie, YIN Pingbao, WANG Lihua, et al. Analysis of stress and deformation of retaining structure in deep foundation pit based on spatial effect[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(4): 70 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 穆保岗, 李旭, 龚维明, 等. 水平荷载长期作用下沉井变位特性的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8): 1388 - 1397. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of foundation of highway bridges and culverts: JTG 3363—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)]
- [25] 交通部公路科学研究院. 公路交通标志和标线设置手册: JTG D82—2009[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. [Research Institute of Highway Ministry of Transport. Road traffic signs and markings setting manual: JTG D82—2009[M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)]
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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 Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundation: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2008. (in Chinese)]
- [27] 张旭. 复合加载模式下单桩复合筒型基础地基承载力包络线研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(5): 187 - 193. [ZHANG Xu. Ultimate bearing characteristics and envelope analysis of the composite caisson foundation with a single pile in combined loading modes[J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(5): 187 - 193. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for detection of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014. (in Chinese)]
- [29] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)]