

文章编号:1673-2049(2018)02-0056-07

堆载作用下被动桩的水平受力及位移分析

宋修广^{1,2}, 李 信^{1,2}, 万立尧^{1,2}, 张宏博^{1,2}, 马 源^{1,2}

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:针对既有桩体在较大侧向堆载作用下会发生偏斜或挠曲变形甚至开裂折断,从而导致结构存在较大安全风险的问题,基于 Flamant 解建立条形荷载作用下的水平附加应力计算公式。考虑到桩-土界面的剪切效应,采用双参数地基模型进行桩后土体的桩-土受力分析。建立了被动桩的挠曲微分方程,采用 MATLAB 求解得到桩的内力及变形情况。采用文献中的不平衡堆载试验监测数据验证了计算公式的合理性。研究结果表明:堆载对桩基的侧向土压力影响主要分布在桩体的上半部分,受到的侧向土压力占桩体总侧向土压力的 86% 以上;随着堆载高度的增加,桩的侧向土压力、侧向位移和弯矩均呈现出增大的趋势;所得结论可为类似工程的安全性评价提供理论依据。

关键词:侧向堆载;被动桩;侧向土压力;挠曲微分方程;稳定性分析

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

Analysis of Lateral Force and Displacement for Passive Piles Under Surcharge Load

SONG Xiu-guang^{1,2}, LI Xin^{1,2}, WAN Li-yao^{1,2}, ZHANG Hong-bo^{1,2}, MA Yuan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China;

2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety,
Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: According to the problem of pile deviation or flexural deformation, even cracking and breaking under large lateral surcharge load, which caused large structural safety risk for pile structure. Based on the Flamant solution, the formula of lateral additional stress under the strip load was obtained. Considering the shear effect of interface between the pile and the soil, the two-parameter foundation model was applied to analyze pile-soil force of soil behind the passive pile. The flexural differential equation of passive pile was established, and the internal force and deformation of piles were obtained by MATLAB. The reasonableness of the formula was verified by the unbalance load test data in the literature. The study results show that the effect of surcharge load on lateral earth pressure on the pile is mainly distributed in the upper part of pile, the lateral earth pressure is accounted 86% of the total pile lateral soil pressure. With the increase of loading height, lateral earth pressure, lateral displacement and bending moment of pile show an increasing trend. The conclusions can provide a theoretical basis for the safety evaluation of similar projects.

Key words: lateral surcharge load; passive pile; lateral soil pressure; deflection differential equa-

收稿日期:2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51208284);山东省科技发展计划项目(2013GGE27065)

作者简介:宋修广(1966-),男,山东威海人,教授,工学博士,博士后,E-mail:songxiuguang@sdu.edu.cn。

tion; stability analysis

0 引言

根据桩-土的相互作用,可以将桩分为主动桩与被动桩 2 类^[1],其中被动桩承受桩周土体对其造成的挤压作用。自然状态下,桩与土体均处于静力平衡状态,而桩体附近的堆载则会破坏桩-土体系的整体平衡^[2],具体表现为:一方面会增加桩周土体的固结沉降,对桩身产生负摩阻力;另一方面会对邻近桩基产生挤压效应^[3],导致桩体产生偏斜甚至开裂折断。对于桩侧负摩阻问题的研究目前成果较多^[4-7],本文不作赘述。目前,堆载对邻近桩基的侧向影响还缺乏足够的分析,工程中计算常采用朗肯土压力理论直接将堆载沿固定角度作用于挡土体上计算堆载引起的侧向土压力,但该法未考虑堆载沿深度方向上的扩散性^[8-9]。

Randolph 等^[10]指出确定被动桩堆载侧土压力是对被动桩进行分析的关键因素,De Beer 以现场监测资料为基础提出了土体侧向运动过程中的桩基侧向土压力计算公式;Nicu 等^[11]对大面积堆载对被动桩的影响进行现场试验;Ito 等^[12]采用室内模型试验的方法,对被动桩的受力变形进行了定性研究。陈福全等^[13-14]、李忠诚等^[15]则借助数值方法对工程进行仿真,研究堆载对被动桩的侧向作用及被动桩的受力变形规律。竺明星等^[16]以日本 1972 年《建筑基础结构设计规范》中的超载侧土压力计算公式为基础,将侧向土压力看作 Boussinesq 水平附加应力解的 2 倍求出堆载下被动桩侧向附加土压力计算公式。张浩等^[17-18]基于 Euler-Bernouli 梁理论和 Winkler 地基模型,将被动桩的侧向附加荷载假定为二次函数分布,推导出考虑竖向荷载作用的被动桩内力计算方法。杨敏等^[19]基于弹性地基梁法,考虑桩体对土体的遮蔽作用,建立堆载侧的侧向土压力计算公式。

被动桩的理论分析一般分为土压力法^[16-18]、位移法^[19]。位移法用桩-土位移反映土体作用在桩身的附加应力值,由于土体的复杂性,要准确得到堆载下土体的自由位移十分困难,需要进行大量的实地勘测或数值仿真。土压力法则可以基于相关物理条件的假定,从而得到被动桩的侧向土压力解析解,较为方便有效。

本文从土压力法的角度出发,针对侧向堆载下的被动桩进行研究,基于 Flamant 解,得到无限长路

基荷载下被动桩的侧向土压力表达式;考虑桩土的剪切作用,对桩后土体假定为双参数地基模型,建立被动桩的挠曲微分方程。本文研究成果适用于道路改扩建、路基穿越桥梁桩基或边坡抗滑桩等。

1 被动桩侧向土压力公式的建立

1.1 被动桩受力机理分析

被动桩是堆载、桩与土共同作用的结果,堆载对被动桩的侧向挤压导致桩身产生挠曲变形,进而挤压桩后土体,将堆载的部分作用载释放到桩后土层中(图 1)。被动桩受到桩后土体的反作用力,反作用力限制桩体的侧向变形,间接提高了桩的水平承载力。因此,合理分析和计算堆载侧的桩身侧向土压力和桩后土体水平抵抗力是被动桩受力变形分析的关键。

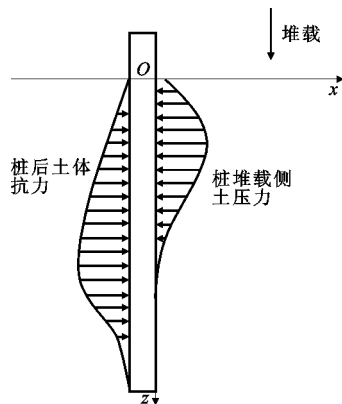


图 1 被动桩受力

Fig. 1 Force of Passive Pile

1.2 被动桩堆载侧的桩身侧向土压力公式

1.2.1 线性荷载下的侧向土压力

针对路基穿越桥梁桩基或坡体抗滑桩存在的情况,堆载长度相对于桩径近乎无限。由此提出路基堆载按照无限长条形荷载进行研究,则堆载可以看作是线荷载 P 的叠加,如图 2 所示。

Flamant 首先以 Boussinesq 解为基础得到弹性半空间表面下一无限长线荷载对空间某点 $M(x, 0, z)$ 的附加应力公式,即 Flamant 解。本文以 Flamant 解为基础建立极坐标下某点水平附加应力公式,方程如下

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_x dy &= \frac{2P(x)x^2z}{\pi(x^2+z^2)^2} \\ R &= \frac{z}{\cos(\theta)} = \sqrt{x^2+z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

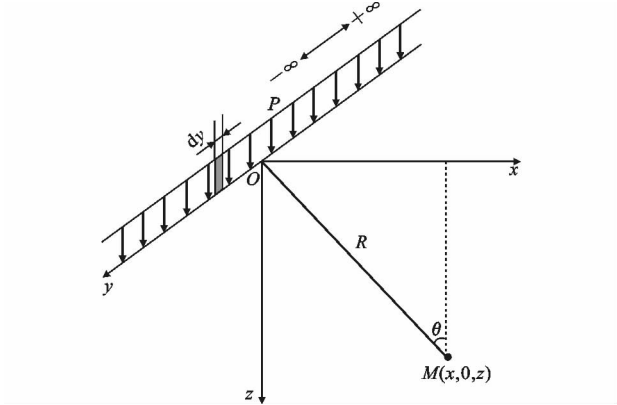


图 2 线荷载作用下的 M 点

Fig. 2 Point M Under Linear Load

将公式(1)联立求解得到无限长线荷载对地下某点的水平附加应力为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_x dy = \frac{2P(x)}{\pi z} \cos^2(\theta) \sin^2(\theta) = \frac{P(x)}{4\pi z} (1 - \cos 4(\theta)) \quad (2)$$

针对路基截面呈梯形的特性,将其看成均布荷载和三角形荷载的组合形式,本文对这 2 种荷载分布形式进行研究分析。

1.2.2 条形均布荷载下的侧向土压力

如图 3 所示,假设均布荷载的边缘距离某点 M 的水平位移为 α , 竖直距离为 z , 均布荷载的宽度为 L , 则均布荷载对 M 点的水平附加应力 $q(z)$ 可以看作线荷载为常量的荷载叠加, 计算公式为

$$q(z) = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{P}{4\pi z} [1 - \cos(4\theta)] = \frac{P}{4\pi z} \left[\theta - \frac{\sin(4\theta)}{4} \right] \Big|_{\alpha}^{\beta} \quad (3)$$

式中: $\tan(\alpha) = \frac{\alpha}{z}$; $\tan(\beta) = \frac{\alpha+L}{z}$; $\alpha \leq \theta \leq \beta$ 。

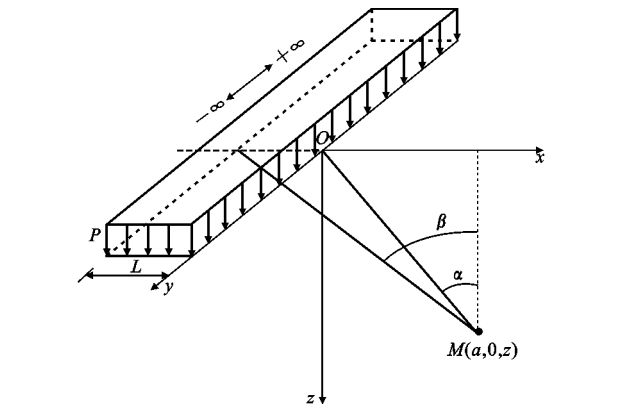


图 3 条形均布荷载作用下的 M 点

Fig. 3 Point M Under Strip Uniformly Distributed Load

1.2.3 条形三角形荷载下的侧向土压力

如图 4 所示, 条形三角形荷载区域内, 荷载是随着 x 的位置进行变化的, 某 x 轴向上的竖向荷载 $P(x)$ 大小为

$$P(x) = \frac{P}{L} z [\tan(\theta) - \tan(\alpha)] \quad (4)$$

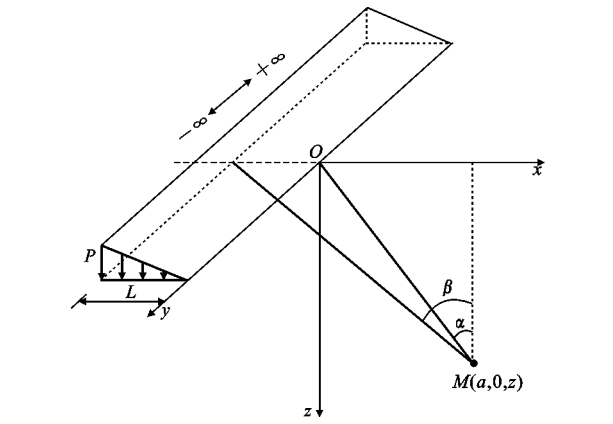


图 4 条形三角形均布荷载作用下的 M 点

Fig. 4 Point M Under Strip Triangle

Uniformly Distributed Load

将公式(4)代入公式(3)中, 得到三角形荷载对 M 点的水平附加应力 $q(z)$ 为

$$q(z) = \frac{P}{4\pi L} \left[\frac{\sin^4(\theta)}{2} - \tan(\alpha) \left(\theta - \frac{\sin(4\theta)}{4} \right) \right] \Big|_{\alpha}^{\beta} \quad (5)$$

2 被动桩内力与位移计算

2.1 桩的计算宽度

由于土体的黏结作用, 在堆载的作用下, 除桩身受到侧向挤压, 桩身以外一定宽度范围的土体同样也受到挤压作用, 且桩的截面形状、尺寸及桩间遮蔽等因素也会导致堆载对桩体造成不同的影响范围。在计算桩的内力及位移时不能直接采用桩的设计宽度, 而需要将桩的设计宽度换算成桩的计算宽度 b_m 。本文的计算宽度 b_m 采用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJG D63—2007) 中的公式, 即

$$b_m = \begin{cases} k' k_f (b+1) & b \geq 1 \text{ m} \\ k' k_f (1.5b+1.5) & b < 1 \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: b 为与外力相垂直的桩宽度; k_f 为形状换算系数; k' 为桩间的相互影响系数。

2.2 桩身的抗弯刚度

在计算被动桩的内力及变形时, 可以将被动桩简化为弹性地基梁模型, 在计算土中桩变形系数时所用到的抗弯刚度值取为

$$EI = 0.8 E_c I \quad (7)$$

式中: E 为桩的弹性模量; E_c 为桩的混凝土抗压弹

性模量; I 为桩的惯性矩。

2.3 桩后地基反力

由于桩与周围土体存在剪切作用,本文采用 Vlasov 双参数地基模型^[13]分析桩后地基反力。Vlasov 地基模型同时考虑了土体的压缩以及地基的剪切,如图 5 所示。

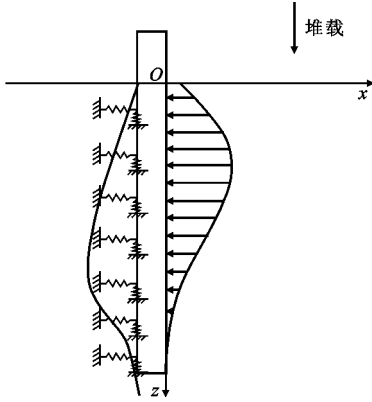


图5 被动桩所受侧向土压力

Fig. 5 Lateral Earth Pressure of Passive Pile

假设在桩后侧向分布着一系列地基反力系数为 k 的压缩弹簧和竖向分布着一系列剪切系数为 G 的剪切弹簧来共同模拟桩后土体对桩的作用,则

$$p(x, z) = kx - G \frac{d^2 x}{dz^2} \quad (8)$$

式中: $p(x, z)$ 为 z 深度单位面积的桩侧土抗力。

地基反力系数 k 是一个与桩-土有关的参数,许多学者均对其进行了研究。根据需要,本文对 k 采用 Vesic^[20] 基于 Biot^[21] 解改进的公式计算,即

$$k = \frac{0.65 E_s}{b(1 - \nu_s^2)} \times 12 \sqrt{\frac{b^4 E_s}{EI}} \quad (9)$$

地基剪切系数 G 采用以下公式计算^[16]

$$G = bG_s \quad (10)$$

式中: E_s 为土体弹性模量; ν_s 为土体的泊松比; G_s 为土体的剪切模量。

2.4 被动桩的计算分析

采用公式(3), (5)对被动桩计算得到堆载侧土压力 $q(z)$, 基于公式(8)得到桩后土体的侧向反力 $p(x, z)$, 取桩深 z 处的微段桩体 dz 进行力学分析。

2.4.1 桩顶无竖向荷载条件下桩身挠曲微分方程

当桩顶不存在竖向荷载时,对于桩体微分段进行受力分析,假设其受到水平剪力 Q_z 、弯矩 M_z 的作用,建立微分段的受力分析如图 6 所示。根据合力及力矩平衡的条件,可以得到如下方程。

桩体受力平衡方程为

$$Q_z + b_m p(x, z) dz = Q_z + dQ_z + b_m q(z) dz \quad (11)$$

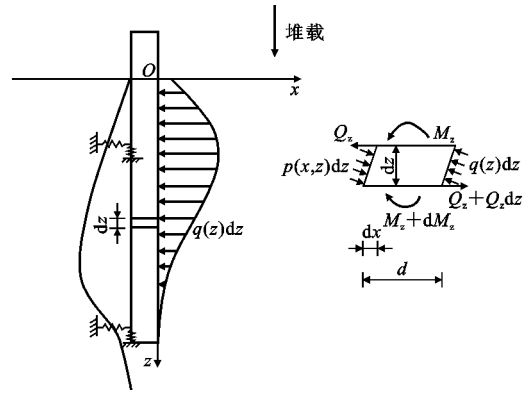


图6 无竖向荷载的被动桩受力

Fig. 6 Force of Passive Pile Without Vertical Load

简化式(11)可得

$$\frac{dQ_z}{dz} = b_m p(x, z) - b_m q(z) \quad (12)$$

桩体力矩平衡方程为

$$M_z + Q_z dz + \frac{1}{2} b_m q(z) (dz)^2 =$$

$$M_z + dM_z + \frac{1}{2} b_m p(x, z) (dz)^2 \quad (13)$$

去掉式(13)高阶小量,简化可得

$$\frac{d^2 M_z}{dz^2} = b_m p(x, z) - b_m q(z) \quad (14)$$

根据材料的力学特点,可得到弯矩与挠曲的关系为

$$\frac{M_z}{EI} = -\frac{d^2 x}{dz^2} \quad (15)$$

将公式(12)~(15)联立即可得到无竖向荷载作用下桩的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + b_m p(x, z) = b_m q(z) \quad (16)$$

2.4.2 桩顶有竖向荷载条件下桩身挠曲微分方程

当桩顶有竖向荷载 N_0 时,需要考虑荷载对弯矩的影响,其微分段 dz 的受力分析见图 7。

基于相同的力学分析,其力矩平衡条件变化为

$$M_z + Q_z dz + N_0 \frac{d}{2} = \frac{1}{2} b_m q(z) d^2 z +$$

$$N_0 \left(\frac{d}{2} + dx \right) + \frac{1}{2} b_m p(x, z) d^2 z +$$

$$M_z + dM_z \quad (17)$$

简化可得

$$Q_z = \frac{dM_z + N_0 dx}{dz} \quad (18)$$

将公式(12), (18)联立代入公式(15),可得考虑竖向荷载的微分方程为

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + N_0 \frac{d^2 x}{dz^2} + p(x, z) b_m = q(x) b_m \quad (19)$$

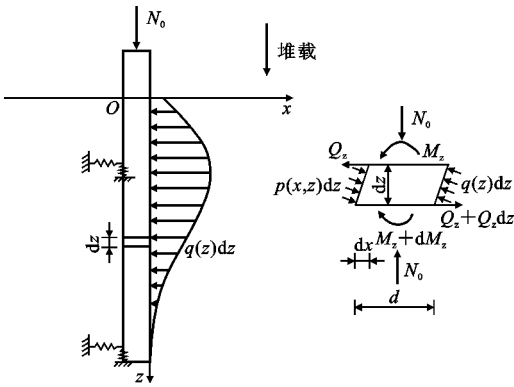


图7 有竖向荷载的被动桩受力

Fig. 7 Force of Passive Pile with Vertical Load

借助材料力学可以得到被动桩桩身某一深度的转角 ϕ_z 、弯矩 M_z 、剪力 Q_z 关于桩体深度 z 及侧向位移 x 的计算表达式,即

$$\left. \begin{aligned} \phi_z &= \frac{dx}{dz} \\ \frac{M_z}{EI} &= -\frac{d^2 x}{dz^2} \\ \frac{Q_z}{EI} &= -\frac{d^3 x}{dz^3} + \frac{N_0}{EI} \frac{dx}{dz} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

2.5 边界控制条件

对被动桩进行分析时,首先考虑其初始力学条件及桩端与桩顶的关系方程,其边界控制条件分别为:

桩顶自由时弯矩 M_0 和剪力 Q_0 为

$$M_0 = M, Q_0 = Q$$

桩顶固定时侧向位移 X_0 和转角 ϕ_0 为

$$x_0 = 0, \phi_0 = 0^\circ$$

桩端自由时弯矩 M_1 和剪力 Q_1 为

$$M_1 = 0, Q_1 = 0$$

桩端固定时侧向位移 X_1 和转角 ϕ_1 为

$$x_1 = 0, \phi_1 = 0^\circ$$

将桩端及桩顶的边界约束条件代入被动桩的挠曲微分方程中联立求解,可得到被动桩的内力及变形情况。

本文所推导的被动桩挠曲微分方程手算求解较为复杂,不利于方程使用。本文采用有限差分法进行求解,借助数学分析软件 MATLAB 进行相应的编程计算^[22],可以得到桩的侧向位移角度变化以及弯矩等力学参数。

3 工程验证及理论分析

3.1 工程验证

对文献[23]的不平衡堆载试验案例进行分析,

堆载高度为 3 m,堆载呈现梯形,上表面尺寸为 5 m,下表面尺寸为 13.4 m。填土为含砾黏土,密度为 $1.823 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。堆载一侧设有 3 个试桩,其桩间距 5.6 m,桩径 1.5 m。钻勘资料表明地面以下 24.5 m 为淤泥质软弱土,呈现出流塑状态和高压缩性,土质较差,取其弹性模量为 3.08 MPa,泊松比为 0.39,黏聚力为 10 kPa,内摩擦角为 5° 。桩端持力层在黏性土圆砾中。为保险计算,本文取地面以下 30 m 也就是测斜管的底部作为桩的固定点。根据上述分析,代入桩的挠曲微分方程中,得到的位移曲线如图 8 所示。

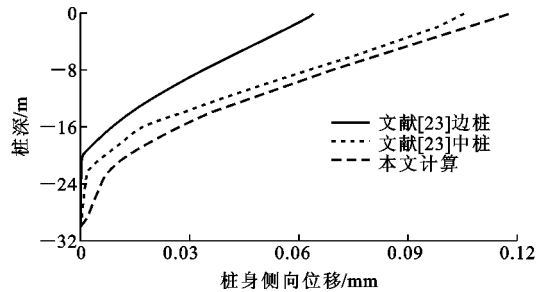


图8 位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of Displacement Curves

由图 8 可以看出,本文计算的位移与中桩的位移分布规律接近,具有很好的相似性,能够体现出堆载对于桩的挠曲规律。这是因为本文通过桩计算宽度这个因素考虑桩双侧均受桩-桩间影响的情况,而文献[23]中桩双侧均受到桩与桩的相互影响,因此本文结果与中桩规律一致。

3.2 侧向堆载过程中被动桩的内力及变形规律

以工程案例为基础,得到堆载高度 h 分别为 1, 2, 3 m 时被动桩内力及变形规律,结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着堆载高度的增加,桩的侧向土压力、侧向位移和弯矩均呈现出增大的趋势。根据工程中的土压力计算方法,得到堆载对桩的影响深度为 14.6 m,填土高度 h 分别为 1, 2, 3 m 时,影响深度在 14.6 m 以上的土压力分别占到了桩侧总土压力的 86.28%, 86.42%, 86.32%, 即上半部分桩体受到的侧向压力占桩体总侧向压力的 86% 以上,如图 9(a)所示,堆载对桩基的侧向土压力主要分布在地下的浅层部分,而对深层的桩基影响较小。如图 9(b), (c)所示,填土高度每提高 1 m,其位移分别提高 110%, 43%。对应的弯矩相应提高 25.74%, 16.14%, 且弯矩峰值对应的桩基深度分别为 15.95, 16.85, 18.15 m。这说明随着堆载高度的增加,对邻近桩基深度影响范围逐渐加深。

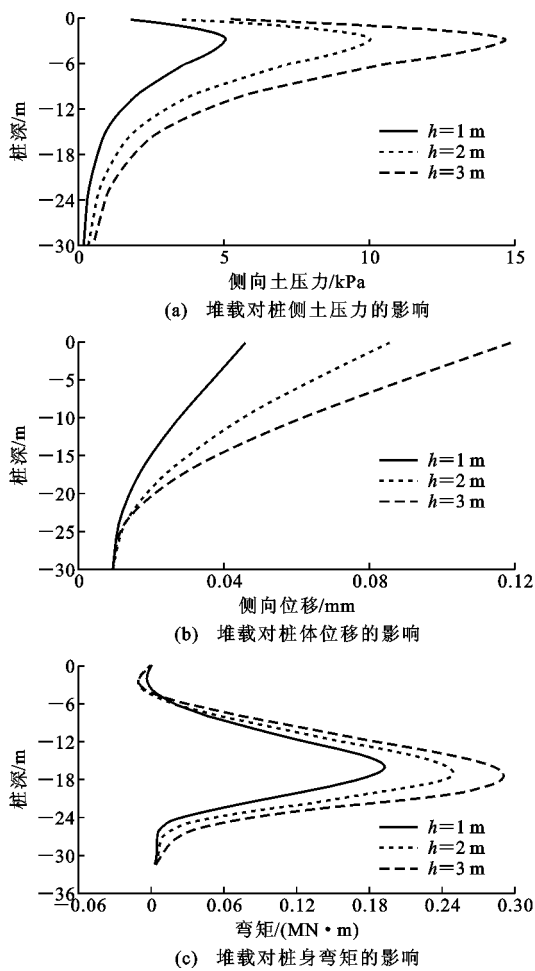


图 9 被动桩内力及变形规律

Fig. 9 Internal Force and Deformation Laws of Passive Piles

4 结 语

(1)结合边坡抗滑桩或路基堆载穿越桥梁桩基的受力特性分析,基于 Flamant 解,推导了条形荷载对桩体的水平附加应力计算公式,揭示了被动桩的侧向受力规律,可为被动桩的分析计算提供一种侧向土压力计算的新思路。

(2)在侧向堆载条件下,被动桩的桩-土界面存在剪切效应,本文基于双参数地基模型构建了桩后土体的侧向压力计算模型,推导了被动桩的挠曲微分方程,给出了不同初值条件下的边界控制方程。

(3)通过文献试验资料对比验证了本文方法的正确性;同时,比较分析了不同堆载高度下的桩基内力及变形规律,得到了侧向土压力、桩体位移及弯矩的分布规律,确定了侧向土压力及弯矩的峰值对应深度;深入研究了堆载高度对被动桩的内力影响规律。

参考文献:

References:

- [1] DE BEER E E. The Effects of Horizontal Loads on Piles Due to Surcharge or Seismic Effects [C]// BRUNI R, CORRADINI A, LAFUENTE A L, et al. Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: ICSMFE, 1977: 547-558.
- [2] FRANX C, BOONSTRA G C. Horizontal Pressures on Pile Foundations [C]// TERZAGHI K, CASAGRANDE A. Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: ICSMFE, 1948: 131-135.
- [3] 赵九斋. 连云港软土路基沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 643-649.
ZHAO Jiu-zhai. Research on Settlement of Soft Clay Ground in Lianyungang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 643-649.
- [4] 孔纲强. 堆载条件下现浇扩底楔形群桩负摩阻力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 1): 364-368.
KONG Gang-qiang. Performances of Negative Skin Friction of Belled Wedge Pile Group Under Surcharge Load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 364-368.
- [5] 杨 庆, 孔纲强, 郑鹏一, 等. 堆载条件下单桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2805-2810.
YANG Qing, KONG Gang-qiang, ZHENG Peng-yi, et al. Model Test Study of Negative Skin Friction for Single Pile Under Surface Load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2805-2810.
- [6] 夏力农. 桩基负摩阻力特性的理论与试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
XIA Li-nong. Theoretical and Field Test Study on Behavior of Negative Skin Friction in Piles [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [7] 高 昂. 堆载作用下桩基负摩擦特性分析[D]. 北京: 清华大学, 2012.
GAO Ang. Analysis of Pile Negative Friction Caused by Surcharge Loading [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [8] 胡建荣. 软土地区路堤堆载下桥台桩基侧向变形性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
HU Jian-rong. Study on Lateral Deformation of Piled for Bridge Abutments Under Embankment Overburden on Soft Ground [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [9] 韩东亚, 曹 平, 林 杭, 等. 堆载和桩顶荷载组合作

- 用下的桩土响应分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(1): 177-183.
- HAN Dong-ya, CAO Ping, LIN Hang, et al. Analysis of Pile-soil Interaction Under Combination of Pile Head Vertical Loads and Surface Loads[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(1): 177-183.
- [10] RANDOLPH M F, HOULSBY G T. The Limiting Pressure on a Circular Pile Loaded Laterally in Cohesive Soil[J]. Geotechnique, 1984, 34(4): 613-623.
- [11] NICU N D, ANTES D R, KESSLER R S. Field Measurements on Instrumented Piles Under an Overpass Abutment[J]. Highway Research Record, 1971, 354: 90-102.
- [12] ITO T, MATSUI T, WONSUI T A. Extended Design Method for Multi-row Stabilizing Piles Against Landslide[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(1): 1-13.
- [13] 陈福全, 侯永峰, 刘毓毓. 考虑桩土侧移的被动桩中土拱效应数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1333-1337.
- CHEN Fu-quan, HOU Yong-feng, LIU Yu-chuan. Numerical Analysis of Soil Arching Effects in Displaced Passive Piles Considering Lateral Soil Movements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1333-1337.
- [14] 陈福全, 杨 敏. 地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1286-1290.
- CHEN Fu-quan, YANG Min. Numerical Analysis of Piles Influenced by Lateral Soil Movement Due to Surcharge Loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1286-1290.
- [15] 李忠诚, 杨 敏. 被动桩土压力计算的被动拱-主动楔模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 4241-4247.
- LI Zhong-cheng, YANG Min. Passive Arching-active Wedge Model of Soil Pressure Calculation in Passive Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4241-4247.
- [16] 竺明星, 龚维明, 徐国平, 等. 大面积堆载作用下轴向受力隔离桩的承载机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 421-432.
- ZHU Ming-xing, GONG Wei-ming, XU Guo-ping, et al. Analysis of Bearing Mechanism of Axially Loaded Isolation Piles Under Large-scale Surcharge Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 421-432.
- [17] 张 浩, 石名磊, 郭院成. 土体侧移作用下被动桩受力变形的简化解析计算[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(2): 392-399.
- ZHANG Hao, SHI Ming-lei, GUO Yuan-cheng. Simplified Analytical Calculation for Forced Deformation of Passive Pile Subjected to Lateral Soil Displacement[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(2): 392-399.
- [18] 张 浩, 石名磊, 郭院成, 等. 边载作用下桥梁基桩-立柱的位移特征与受力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2683-2692.
- ZHANG Hao, SHI Ming-lei, GUO Yuan-cheng, et al. Analysis of Stress and Displacement Characteristics of Bridge Pile and Pier Adjacent to One-side Loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2683-2692.
- [19] 杨 敏, 朱碧堂. 堆载地基与邻近桩基的相互作用分析[J]. 水文地质工程地质, 2002(3): 1-5, 9.
- YANG Min, ZHU Bi-tang. On the Interaction Between Adjacent Pile and Soil Subjected to Surcharge Loads[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002(3): 1-5, 9.
- [20] VESIC A B. Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solids[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1961, 87(2): 35-54.
- [21] BIOT M A. Bending of an Infinite Beam on an Elastic Foundation[J]. Journal of Applied Physics, 1922, 2(3): 165-184.
- [22] 张 红. 水平受荷单桩分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- ZHANG Hong. Research on Analysis Method of Single Pile Under Lateral Load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [23] 邓会元, 戴国亮, 龚维明, 等. 不同平衡堆载条件下桩基承载特性的原位试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3063-3070.
- DENG Hui-yuan, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming, et al. In Situ Experimental Study of Bearing Characteristics of Pile Foundation Under Different Balanced Surcharges[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3063-3070.