

上拔力作用下桩土相互作用数值分析

杨吉新, 石旷, 孙亭亭, 刘畅

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 上拔力作用下桩土之间的相互作用较复杂。文中利用 ANSYS 软件建立石首建宁大桥桩土模型, 选择桩土作用非线性 Drucker-Prager 模型, 结合桩土接触面特性与荷载传递机理分析上拔力作用下桩身轴力、桩侧土压力和桩侧摩阻力的变化。结果表明, 上拔力作用下桩身轴力由上到下逐渐减小, 钢管桩表现为纯摩擦桩; 桩侧土压力随深度逐渐增加, 与库伦土压力公式计算结果吻合; 上拔力作用下桩侧摩阻力自上而下逐步发挥, 最大摩阻力出现在桩的中下部。

关键词: 桥梁; 上拔力; 钢管桩; 桩土相互作用; Drucker-Prager 模型

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0100-04

相对于压桩, 拔桩是一个作用力相反的逆向过程。拔桩过程中同样需考虑桩土相互作用, 其中土的非线性本构关系及桩土接触界面摩擦特性尤为复杂。针对桩土的相互作用, 上官士青等基于最小势能原理, 将整个桩土系统的势能方程离散化, 建立了一个无约束非线性数学规划模型; 齐良锋等在桩土界面引入接触单元, 采用参数二次规划法求解该接触单元模型, 得出桩土之间的剪力传递与相对位移; 廉兴军运用 ANSYS 软件, 采用弹簧单元模拟桩土相互作用、表面效应单元模拟桩周摩擦力, 得出桩在承受竖向荷载时的应力应变分布; 严祖文通过对有限元软件 ANSYS 的二次开发, 并导入 Duncan-Chang 本构模型, 模拟了竖向荷载作用下单桩、群桩与土的相互作用; 贺嘉等基于 Drucker-Prager (D-P) 与 Mohr-Coulomb 模型, 对单桩荷载-沉降曲线进行了比较; Yasser Khodair 等使用 ABAQUS 与 SAP2000 建立桩土相互作用三维有限元模型, 研究了桩在各类砂土中的受力情况; Maryam Mardfekri 等通过 ABAQUS 建立空心桩模型, 研究了横向受荷空心桩的非线性行为。目前对于桩土相互作用的研究大多针对受压桩或被动桩, 对拔桩过程中桩土相互作用的研究较少。该文基于土的非线性 D-P 模型, 利用 ANSYS 建立钢管桩与土的三维有限元模型, 分析上拔力作用下桩身轴力、桩侧土压力与桩侧摩阻力的变化。

1 数值分析原理

1.1 桩侧土的力学性质

土体在很多情况下是非均质、各向异性的, 在加

载过程中容易产生屈服, 产生弹性变形和不可恢复的塑性变形, 故土体内部本构关系通常表现为非线性。土体采用经典非线性 D-P 模型, 对拔桩过程中桩土相互作用进行分析。D-P 模型的屈服准则是对 Mohr-Coulomb 准则的近似, 它修正了 Von Mises 准则, 用于处理具有不同拉伸和压缩屈服强度的材料, 其屈服面并不随材料的逐渐屈服而改变, 因而没有强化准则, 其塑性行为被假定为理想弹塑性, 但其屈服强度随侧限压力的增加而增加。该模型还考虑了由于屈服而引起的体积膨胀, 故 D-P 模型适用于砂、土壤等颗粒状材料。D-P 模型屈服准则的等效应力表示为:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: β 为与材料有关的常数, $\beta = 2\sin\varphi / [\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)]$; φ 为内摩擦角; σ_m 为平均应力; $\{S\}$ 为偏应

$$\text{力}; M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}。$$

材料屈服应力为:

$$\sigma_y = \frac{6c \cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$$

式中: c 为粘聚力。

D-P 模型屈服面方程为:

$$3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{1/2} - \sigma_y = 0 \quad (2)$$

屈服面为圆锥形, 当应力状态位于屈服面上时,

材料达到屈服点。

1.2 桩土接触面的力学特性

接触面采用 Target170 与 Conta173 单元,桩与土两个接触面分离并共切,两个面之间不相互渗透,能传递法向压力与切向摩擦力,但不传递法向拉力,将刚度较大的桩设为目标面、土设为接触面。接触面算法采用增广拉格朗日法,该方法在接触位移的平衡条件下充分考虑接触面几何约束和物理约束,引入拉格朗日乘子,通过增量迭代的方式求解,能设置最大穿透允许量,先采用罚方法,穿透超出时,增加接触力再次迭代,迭代流程见图 1。

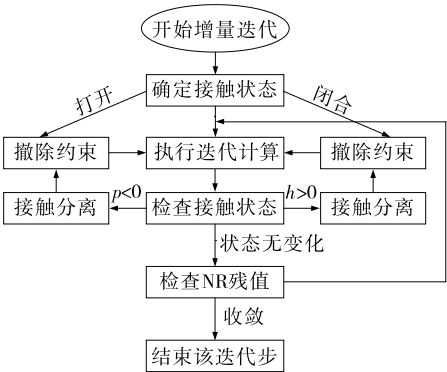


图 1 接触面迭代流程

1.3 桩侧荷载传递机理

把桩沿桩长方向离散成若干个单元,桩身位移 $s(z)$ 和桩身荷载 $Q(z)$ 随深度变化,桩身侧摩阻力 $q_s(z)$ 发挥值与桩土相对位移有关。取深度 z 处微小桩段 dz ,由平衡条件得:

$$Q_z = Q_z + dQ(z) + q_s(z) \cdot U \cdot dz \tag{3}$$

式中: U 为桩身周长。

由式(3)得:

$$q_s(z) = -\frac{1}{U} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \tag{4}$$

由桩身拉伸变形与轴力的关系得:

$$ds(z) = Q(z) \frac{dz}{AE_p} \tag{5}$$

式中: A 为桩身横截面面积; E_p 为桩身弹性模量。

z 断面荷载为:

$$Q(z) = AE_p \frac{ds(z)}{dz} \tag{6}$$

$$Q(z) = Q_0 - U \int_0^z q_s(z) dz \tag{7}$$

z 断面上升:

$$s(z) = s_0 + \frac{1}{E_0 A} \int_0^z Q(z) dz \tag{8}$$

将式(6)带入式(4),得:

$$q_s(z) = \frac{AE_p}{U} \cdot \frac{d^2 s(z)}{dz^2} \tag{9}$$

式(9)即为桩土荷载传递的基本微分方程,由此可求出桩身轴力与桩侧摩阻力沿深度的变化。

2 工程实例

2.1 工程背景

湖北省石首市建宁大桥主梁现浇支架采用钢管桩作为临时支撑,全桥钢管桩约 3 000 t,回收利用能产生巨大经济价值,研究上拔力作用下桩土相互作用对有效拔出、回收钢管桩具有重大意义。选用桩深 20 m、直径 630 mm、壁厚 8 mm 的钢管桩进行有限元分析,桩周土体为单层黏土。根据地质详勘报告,各材料性质见表 1。

表 1 材料参数

类别	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(g·m ⁻³)	粘聚力/Pa	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
黏土	3.4×10 ⁷	0.29	1 850	2.5×10 ⁴	18	10
钢管桩	2.0×10 ¹¹	0.25	7 850	—	—	—

2.2 有限元模型建立

利用 ANSYS 建立有限元模型,由于受力对称,采用 1/4 模型。桩与土均采用 Soild45 实体单元,该单元具有塑性、膨胀、应力强化、大变形和大应变功能,能模拟桩与土的性质。相关研究表明,土的有效作用范围为桩径的 15~30 倍。该项目分析中,土体取长方体,深度取 40 m,宽度取桩直径的 25 倍。

模型采用映射网格划分,刚度较大的桩体表面设为目标面,土体面设为接触面。土体四周全部约束,底部约束 z 方向,1/4 断面上采用对称约束。在桩顶施加 50 t 的力,设置时间为 400,所施加的力在该时间内按线性逐渐加载。有限元模型见图 2。

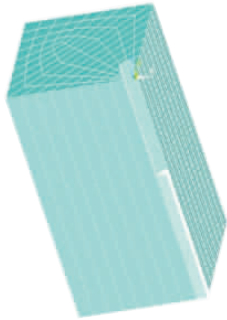


图 2 桩土 ANSYS 模型

3 计算结果分析

3.1 桩身轴力变化

时间为150时,桩顶受到11 t的拉力,桩顶单元位移为零,钢管桩侧摩阻力为静摩擦力,桩身轴力云图见图3。在桩顶荷载作用下,桩侧摩阻力从上到下发挥作用,桩身轴力从上传递到桩底,轴力值逐渐减小,下层土侧摩阻力较大,在桩下部出现压应力并在桩底部达到最大值,钢管桩直接承力面和底部与土的接触面符合应力集中现象,在桩顶和桩底分别出现最大拉、压应力,受力结果与实际相符。利用荷载传递公式求解桩身轴力沿深度的变化,并与ANSYS结果比较(见图4),二者结果相近。

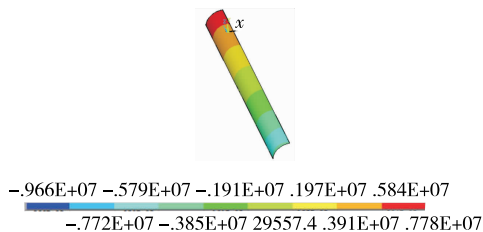


图3 桩身轴力云图(单位:N)

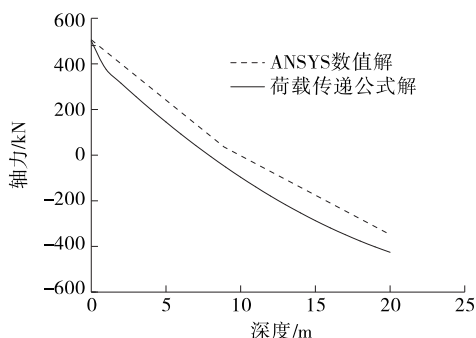


图4 桩身轴力随深度的变化

3.2 侧压力分布

钢管桩在竖向上拔力作用下逐渐脱离土体,桩侧土在土塞效应作用下呈向桩运动的趋势,土体主动压迫钢管桩,钢管桩侧承受的压力为主动土压力。钢管桩垂直,表面粗糙,土体表面水平,采用库伦土压力公式计算:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H K_a \quad (10)$$

式中: γ 为土重度; H 为计算深度; K_a 为主动土压力系数,按式(11)计算。

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \epsilon)}{\cos^2 \epsilon \cos(\epsilon + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \epsilon) \cos(\epsilon - \beta)}} \right]^2} \quad (11)$$

式中: φ 为土的内摩擦角; ϵ 为钢管桩与铅直线的夹角; δ 为桩土界面摩擦角,根据Potyondy J. G.的研究,取 0.7φ ; β 为土与水平的夹角。

有限元模型中, $\epsilon=0, \beta=0$ 。式(10)表明,桩侧土压力沿深度方向线性增加。图5为土压力云图。运用ANSYS分析桩侧土压力,考虑了土的塑性变形、剪胀及地应力的影响,虽不会呈线性变化,但趋势与公式计算结果相符(见图6)。

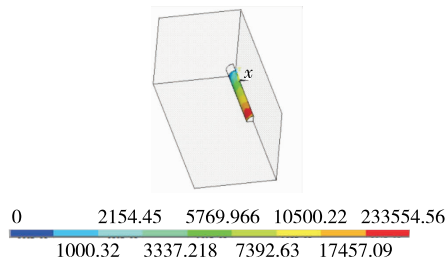


图5 土压力云图(单位:Pa)

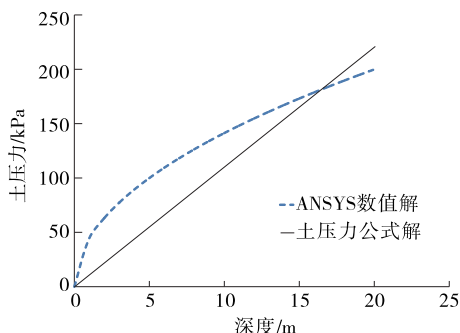


图6 土压力随深度的变化

3.3 桩侧摩阻力分布

图7为不同时间点的桩侧摩阻力云图,图8为不同上拔力下摩阻力随深度的变化。从图8可看出:桩侧摩阻力从上到下逐渐发挥,上侧土易发挥到极限,而下侧土较难完全发挥,最大摩阻力出现在桩的中下部而不是桩底。随着荷载的增大,桩侧摩阻力逐渐增大,上拔力超过钢管桩单桩极限抗拔承载力时桩体发生向上的位移,土体侧摩阻力已发挥最大作用,桩土界面的相对位移大于土体极限位移,界面发生滑移,使土的抗剪强度退化为残余强度,随着位移的逐步增加,桩侧摩阻力逐渐减小。

4 结论

(1) 在上拔力作用下,受侧摩阻力的影响,桩身轴力上大下小,且靠近下部出现压应力,桩底与土接触部分没有端承力,钢管桩表现为纯摩擦桩。

(2) 上拔过程中受土塞效应的影响,钢管桩侧

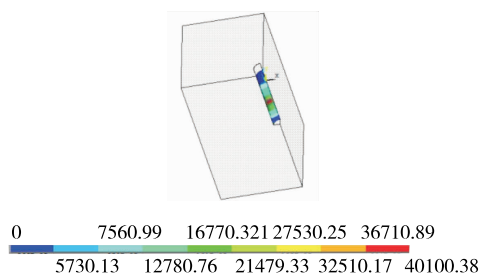


图 7 桩侧摩阻力云图(单位:Pa)

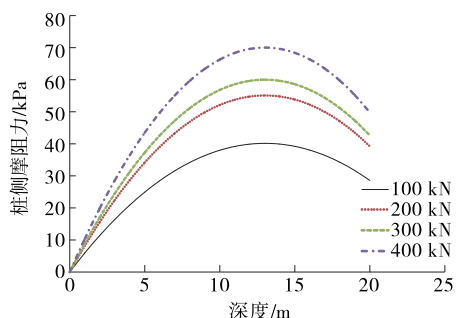


图 8 不同上拔力作用下桩侧摩阻力随深度的变化

所受压力为主动土压力,土压力随深度变化呈非线性逐渐增加,与库伦主动土压力计算结果相似。

(3) 上拔力作用下,桩侧摩阻力的发挥过程为自上而下:桩体拉伸首先发生在桩的上部,桩土相对位移逐渐增大,上部土层首先提供向下的摩擦力;随着上拔力增加,桩侧摩阻力不断增大,下部土层开始发挥作用,最大摩阻力出现在桩的中下部;上拔力增加到一定数值时,桩侧土所能提供的抗拔摩擦力达

到极限,桩体开始拔出,桩土界面滑移,土的抗剪强度退化为残余强度,桩侧摩阻力随上拔量增加而逐渐减小。

参考文献:

- [1] 上官士青,杨敏,陈飞,等.基于最小势能原理的加筋垫层与路堤桩土相互作用研究[J].岩土工程学报,2015,37(7).
- [2] 齐良锋,简浩,唐丽云.引入接触单元模拟桩土共同作用[J].岩土力学,2005,26(1).
- [3] 廉兴军.桩-土作用机理与数值模拟[J].工业建筑,2011,41(增刊).
- [4] 严祖文.基于 ANSYS 二次开发的桩土相互作用的三维非线性有限元分析[D].天津:天津大学,2007.
- [5] 贺嘉,陈国兴.基于 ABAQUS 软件的大直径桩承载力-变形分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(2).
- [6] Yasser Khodair, Ahmed Abdel-Mohti. Numerical analysis of pile-soil interaction under axial and lateral loads [J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2014, 8(3).
- [7] Maryam Mardfekri, Paolo Gardoni, Jose M Roeset. Modeling laterally loaded single piles accounting for nonlinear soil-pile interactions[J]. Journal of Engineering, 2013(5).
- [8] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4).

收稿日期:2018-11-09

(上接第 80 页)

技术要求。

4 结论

(1) 与一次成型方式相比,采用二次成型方式成型的 SBR 乳化沥青混合料马歇尔试件的空隙率小、稳定度大,宜采用二次成型方式制作马歇尔试件,第一次双面击实 50 次,第二次双面击实 25 次。

(2) SBR 改性乳化沥青混合料采用第一次击实后烘箱养生温度 90℃、养生时间 4 d,第二次击实后室温养生 1 d 的室内模拟加速养生条件最佳。

(3) 常温拌和型乳化沥青混合料的空隙率和稳定度可达到热拌沥青混合料的技术要求。

参考文献:

- [1] 魏建国,胡峻铭,王永胜.集料形状特征及其对热拌沥青混合料性能的影响[J].中外公路,2018,38(2).

- [2] 丁智勇,谢永平,王宝金,等.热拌沥青混合料生产和施工全过程能耗与排放评价[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(2).
- [3] 刘胜龙.温拌技术对沥青混合料抗老化性能的影响分析[J].中外公路,2014,34(3).
- [4] 于江,张飞,王克新,等.温拌沥青混合料技术研究分析[J].公路工程,2015,40(2).
- [5] 许菲菲,刘黎萍,唐海威,等.温拌沥青混合料与热拌沥青混合料性能对比[J].公路工程,2009,34(3).
- [6] 陈文.高性能乳化沥青冷再生混合料开发研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [7] 张涛.冷拌冷铺沥青混合料的研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [8] 赵志超.新型冷拌冷铺乳化沥青混合料研究[D].北京:北京建筑大学,2015.
- [9] 徐世法,黄玉颖,蔡硕果,等.冷拌冷铺沥青混合料技术进展[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(2).

收稿日期:2018-06-25