

文章编号:1001-4179(2013)20-0042-04

横向荷载下桩侧浅层土体的极限抗力上限分析

丁蓬莱, 王小明

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广东广州 510663)

摘要:基于塑性极限分析中的上限定理,利用对数螺线夹层破坏机制推导出了考虑水平地震作用受横向荷载下的桩侧浅层土体的水平极限抗力公式,最后根据序列二次规划算法对问题进行优化求解。数值计算结果表明,所提出模型的计算结果与 Matlock 法和 Sullivn 法非常接近,证明了所提方法的合理性;水平地震系数对桩侧土体极限抗力有较大的影响。该方法可为桩侧浅层土体极限抗力的设计研究提供参考。

关键词:上限分析;对数夹层破坏机制; $p-y$ 曲线;极限土抗力

中图分类号:TV43 文献标志码:A

对于承受风和波浪等荷载作用的海上风电基础,横向荷载下桩土相互作用问题受到了广泛重视^[1-2]。 $p-y$ 曲线法是评价桩土相互作用的重要方法之一,它考虑了桩-土之间的非线性变形特性,比传统的假想嵌固点法和 M 法更接近实际情况,目前得到了广泛应用。许多学者都对 $p-y$ 曲线展开了深入研究,戚春香等通过桩与弱化土层相互作用的模型试验^[3],建立了依据土层等效强度来确定土层水平极限抗力及土模量系数的方法;王成雷依据加权余量法原理^[4],推导了振动台模型试验中桩身任一深度的土层抗力,并确定了液化过程中桩土相互作用的动力 $p-y$ 曲线;王腾开展了浸水粉土中模型钢管桩的水平静载荷试验^[5],对粉土的 $p-y$ 曲线进行研究;李雨润利用大型振动台桩-土-承台试验^[6],以 API 规范为基础,提出可液化土层中桩基动力 $p-y$ 曲线双参数修正方法及修正计算公式;苏静波提出了一种桩土相互作用体系的接触非线性有限元分析模型^[7],并且采用复合地基反力法的 $p-y$ 曲线公式,推导了作用在桩上的非线性弹簧弹性系数的计算公式。

对于 $p-y$ 曲线,具有代表性的有 Matlock 的软黏土 $p-y$ 曲线、Reese 的硬黏土 $p-y$ 曲线、Sullivan 的统一法 $p-y$ 曲线、河海大学新统一法 $p-y$ 曲线和同济大学法 $p-y$ 曲线。这些典型曲线都反映出,当桩侧土体受到的横向荷载达到土体的极限抗力时,土体将产

生塑性流动或者软化,从而会导致桩基础以及整个构筑物的失稳。然而,对水平承载桩的变形和受力起控制作用的是浅层土^[7],在水平荷载下桩侧的土体是从浅层开始屈服,塑性区逐渐向下发展。对于桩侧浅层土体的极限抗力,Matlock 是根据土体呈 45° 斜面产生平面滑动破坏推导出的,Reese 是根据桩前楔形体的极限平衡推导出的,王惠初则引入代表土质特性的特征参数建立极限土抗力的计算公式^[8]。浅层土的极限抗力的合理取值直接关系到桩的位移及内力的计算结果精度,且目前成果均未考虑地震作用对土体极限抗力计算的影响,所以关于浅层土的水平极限抗力有必要进行深入研究。

本文运用塑性极限分析的上限理论,采用摩尔-库仑屈服准则和相关联的流动法则,构造机动许可的速度场,并将模型简化为二维问题求解,推导出考虑水平地震作用的桩侧极限土抗力解的计算公式,采用优化算法求解,通过与 Matlock 法和 Sullivn 法计算的极限土抗力进行对比,验证了所提方法的合理性。

1 塑性力学的上限定理

虚功原理表明,对于一个连续变形体,静力容许的应力场在机动容许的速度场上所做的外功等于内功,这是反映静力平衡和变形协调的一个表达形式,即:

收稿日期:2013-02-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41202163);广东省自然科学基金项目(S2011040005245)

作者简介:丁蓬莱,男,硕士,主要从事岩土工程勘察设计工作。E-mail:pldingju@163.com

$$\int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^* dV = \int_S T_i v_i^* dS + \int_V F_i v_i^* dV \quad (1)$$

式中, σ_{ij} 为静力许可应力; ε_{ij}^* 为与 σ_{ij} 对应的应变; T_i 为面力; F_i 为体力; v_i^* 为运动许可速度场。

上限定理是在满足速度边界条件及应变与速度相容条件下, 构筑一个相应的运动许可速度场, 根据外力功率与内部破坏面上内能消耗相等建立功能平衡方程, 从而得出所求荷载。

2 计算模型

2.1 模型建立

考虑地震影响的桩前土体破坏模式如图 1 所示, 桩前的土体均被划分为三个部分, 两个三角形区 (OAB 和 OCD) 以及一个对数螺旋线受剪区 OBC , 假设三角形 OAB 和 OCD 的速度 v_1 和 v_2 垂直于射线 OB 和 OC , 该机构可以用两个角度 ρ 和 ψ 来描述。图 1 中其他变量含义为: k_h 为水平地震系数, v_0 为桩体速度, x 为墙体高度, ρ 为线 OA 与 OB 的夹角, ψ 为对数螺旋线夹角, p_1 和 p_2 分别为桩前和桩后的被动土压力和主动土压力。根据相关联流动法则的塑性极限分析理论, 位移速度矢量与间断面的切线夹角为常量内摩擦角 φ 。图 2 为桩后土体破坏机制构成, 参数定义与图 1 类似。

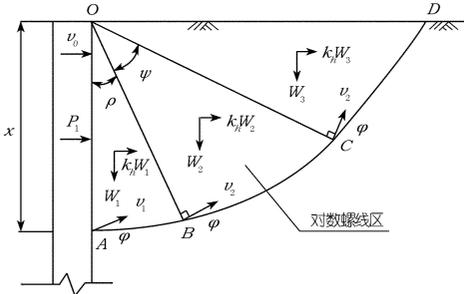


图 1 有地震作用的桩前土体破坏示意图

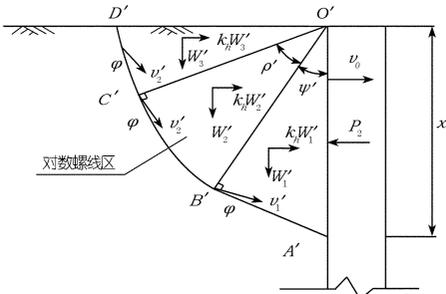


图 2 有地震作用的桩后土体破坏示意图

根据几何关系可知, 对数螺旋线破坏线及滑动体的速度方程为

$$L_2 = L_1 e^{\psi \tan \varphi} \quad v_2 = v_1 e^{\psi \tan \varphi} \quad (2)$$

$$L'_2 = L'_1 e^{-\psi \tan \varphi} \quad v'_2 = v'_1 e^{-\psi \tan \varphi} \quad (3)$$

2.2 外功率

在假定的破坏模式下, 桩前土体外力做功功率包括重力和水平地震力功率以及桩前被动土压力功率。

土体重力和水平地震力功率可以分解 OAB 、 OBC 和 OCD 分别计算, 最后进行叠加。

$$\dot{W}_{OAB} = -W_1 v_{1y} + k_h W_1 v_{1x} = -\frac{1}{2} \gamma x^2 v_0 f_1 \quad (4)$$

$$\dot{W}_{OBC} = -\frac{1}{2} \gamma L_1^2 v_1 \int_0^\psi e^{3\theta \tan \varphi} [\sin(\rho + \theta) - k_h \cos(\rho + \theta)] d\theta = -\frac{1}{2} \gamma x^2 v_0 f_2 \quad (5)$$

$$\dot{W}_{OCD} = -W_3 v_{2y} + k_h W_3 v_{2x} = -\frac{1}{2} \gamma x^2 v_0 f_3 \quad (6)$$

重力和水平地震力所做的总功率为

$$\dot{W}_{Soil} = \dot{W}_{OAB} + \dot{W}_{OBC} + \dot{W}_{OCD} = -\frac{1}{2} \gamma x^2 v_0 (f_1 + f_2 + f_3) \quad (7)$$

桩前被动土压力的功率为

$$\dot{W}_{P_1} = P_1 v_0 \quad (8)$$

外力所做的总功率为

$$\dot{W}_e = \dot{W}_{Soil} + \dot{W}_{P_1} \quad (9)$$

其中 f_1, f_2, f_3 是关于 ρ 和 ψ 的无量纲函数

$$f_1 = \frac{\cos(\rho - \varphi)}{\cos \varphi} \tan \rho (\sin \rho - k_h \cos \rho)$$

$$f_2 = \frac{\cos^2(\rho - \varphi)}{\cos^2 \varphi \cos \rho (1 + 9 \tan^2 \varphi)} \times [(3 \tan \varphi - k_h) (\sin(\rho + \psi) e^{3\psi \tan \varphi} - \sin \rho) - (1 + 3k_h \tan \varphi) (\cos(\rho + \psi) e^{3\psi \tan \varphi} - \cos \rho)]$$

$$f_3 = \frac{\cos^2(\rho - \varphi) \cos(\rho + \psi)}{\cos \varphi \sin(\rho + \psi - \varphi) \cos \rho} e^{3\psi \tan \varphi} \times [\sin(\rho + \psi) - k_h \cos(\rho + \psi)]$$

同理, 对于桩后土体外力所做的总功率为

$$\dot{W}'_e = -\frac{1}{2} \gamma x^2 v_0 (f'_1 + f'_2 + f'_3) - P_2 v_0 \quad (10)$$

其中 f'_1, f'_2, f'_3 是关于 ρ' 和 ψ' 的无量纲函数

$$f'_1 = \frac{\cos(\rho' + \varphi)}{\cos \varphi} \tan \rho' (\sin \rho' + k_h \cos \rho')$$

$$f'_2 = \frac{\cos^2(\rho' + \varphi)}{\cos^2 \varphi \cos \rho' (1 + 9 \tan^2 \varphi)} \times [(k_h - 3 \tan \varphi) (\sin(\rho' + \psi') e^{-3\psi' \tan \varphi} - \sin \rho') - (1 + 3k_h \tan \varphi) (\cos(\rho' + \psi') e^{-3\psi' \tan \varphi} - \cos \rho')]$$

$$f'_3 = \frac{\cos^2(\rho' + \varphi) \cos(\rho' + \psi')}{\cos \varphi \sin(\rho' + \psi' + \varphi) \cos \rho'} e^{-3\psi' \tan \varphi} \times [\sin(\rho' + \psi') + k_h \cos(\rho' + \psi')]$$

2.3 内部耗损率

内部能量耗损率包括速度间断线上的能量消耗率

和对数螺旋受剪区的能量消耗率。

发生在间断线 AB 和 CD 上的能耗率分别为

$$\dot{D}_{AB} = cxv_0 f_4 \quad (11)$$

$$\dot{D}_{CD} = cxv_0 f_5 \quad (12)$$

发生在间断线 BC 上的能量损耗率,可以由该面的微分面积 $rd\theta/\cos\varphi$ 与凝聚力 c 以及与跨该面的切向间断速度 $v\cos\varphi$ 的乘积,沿整个间断面积分得到,即

$$\dot{D}_{BC} = \int_{\theta_0}^{\psi} c(v\cos\varphi) \frac{rd\theta}{\cos\varphi} = cxv_0 f_6 \quad (13)$$

对数螺旋受剪区的能量损耗率与间断线 BC 上损耗是几乎相等的^[9]。

$$\dot{D}_i = \dot{D}_{AB} + 2\dot{D}_{BC} + \dot{D}_{CD} = cxv_0(f_4 + f_5 + 2f_6) \quad (14)$$

其中, f_4, f_5, f_6 是关于 ρ 和 ψ 的无量纲函数

$$f_4 = \tan\rho$$

$$f_5 = \frac{\cos(\rho - \varphi)\cos(\rho + \psi)}{\sin(\rho + \psi - \varphi)\cos\rho} e^{2\psi\tan\varphi}$$

$$f_6 = \frac{\cos(\rho - \varphi)}{2\sin\varphi\cos\rho} (e^{2\psi\tan\varphi} - 1)$$

同理,对于桩后土体内部能量损耗率为

$$\dot{D}'_i = cxv_0(f'_4 + f'_5 + 2f'_6) \quad (15)$$

其中 f'_4, f'_5, f'_6 是关于 ρ' 和 ψ' 的无量纲函数

$$f'_4 = \tan\rho'$$

$$f'_5 = \frac{\cos(\rho' + \varphi)\cos(\rho' + \psi')}{\sin(\rho' + \psi' + \varphi)\cos\rho'} e^{-2\psi'\tan\varphi}$$

$$f'_6 = \frac{\cos(\rho' + \varphi)}{2\sin\varphi\cos\rho'} (1 - e^{-2\psi'\tan\varphi})$$

2.4 极限土抗力

破坏机制中外功率与内部能量损耗率相等,得

$$P_1 = \frac{1}{2}\gamma x^2(f_1 + f_2 + f_3) + cx(f_4 + f_5 + 2f_6) \quad (16)$$

$$P_2 = \frac{1}{2}\gamma x^2(f'_1 + f'_2 + f'_3) - cx(f'_4 + f'_5 + 2f'_6) \quad (17)$$

在一个几何许可的速度场内,上限解是一个使结构遭受破坏的荷载。为接近真实的破坏状态,对于桩前土体必须求解出上限解的最小值,对桩后土体求解上限解的最大值,那么单位桩长受到的土体水平极限抗力为:

$$p_u = \frac{\partial[\min(P_1) - \max(P_2)]}{\partial x} = \min[\gamma x(f_1 + f_2 + f_3) + c(f_4 + f_5 + 2f_6)] + \min[-\gamma x(f'_1 + f'_2 + f'_3) + c(f'_4 + f'_5 + 2f'_6)] \quad (18)$$

3 优化计算与分析

3.1 对比分析

当其他参数一定的情况下,破坏面的位置完全由角度 ρ 和 ψ 以及 ρ' 和 ψ' 来决定。本文采用序列二次规划算法对目标函数进行优化,即在满足物理意义约束的同时,不断调整 ρ, ψ, ρ' 和 ψ' 的值,寻找目标函数 p_u 的最小值。基于前文公式通过编写 Matlab 程序来实现。

本文以广东珠海桂山风电场工程来验证计算方法的有效性,该工程位于珠海伶仃洋海域下游入海口,场地内浅部地层为全新统海相沉积的流塑状淤泥、淤泥质黏土和淤泥质黏土夹砂等软土,利用该工程的钻孔取样以及静力触探测试孔的相关试验数据作为计算参数,桩径为 800 mm,将土层分界深度作为计算深度,计算结果如图 3 所示。对于桩侧浅层土体,本文的计算结果与 Matlock 法和 Sullivn 法的计算结果非常接近,说明采用本文方法来计算地震荷载下桩侧浅层土体的水平极限抗力是合理有效的。其中 15.8 ~ 18.0 m 段为不排水抗剪强度较大的黏土层,因此 Matlock 法和本文方法在该深度出现了突变,而 Sullivn 法计算使用的是平均不排水抗剪强度,因此无突变。

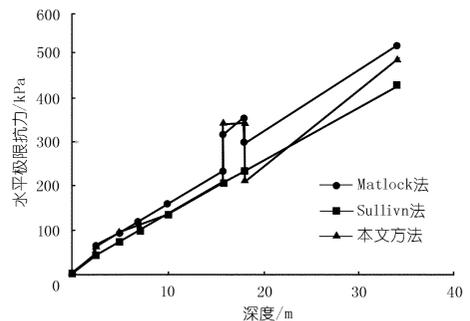


图 3 极限土抗力计算结果对比

3.2 水平地震系数的影响

我们分别取深度为 5, 7, 9 m, 水平地震系数为 0.025 ~ 0.15, 得到水平极限土抗力随地震系数变化的情况,如图 4 所示。可以发现:在其他条件不变的情况下,随着水平地震系数的增加,水平极限土抗力呈减小的趋势。

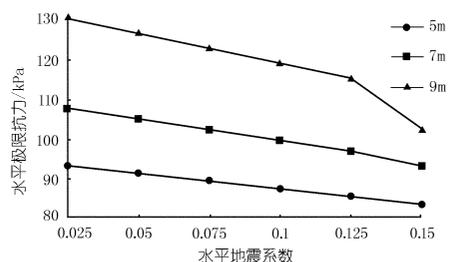


图 4 地震系数对极限土抗力的影响

4 结论

(1) 本文引入对数螺旋夹层破坏机制,将水平地震力拟静态,推导出桩侧浅部土体极限水平抗力的上限解公式,该公式可用于考虑水平地震系数的极限土抗力的计算。

(2) 本文方法中的桩侧浅层极限土抗力计算结果与 Matlock 法和 Sullivn 法的计算结果非常接近,说明本方法具有一定的合理性和实用性。

(3) 水平地震系数对水平极限抗力有着明显的影响,水平极限抗力随水平地震系数的增大而减小。

参考文献:

- [1] 王成华,孙冬梅. 横向受荷桩 $p-y$ 曲线研究与应用述评[J]. 中国港湾建设,2005,(2):1-4.
 [2] 姜忻良,吴薪柳. 复杂结构-桩-土体系下的桩-土动力 $p-y$ 曲

- 线[J]. 岩土工程学报,2012,34(5):911-916.
 [3] 戚春香,王建华. 弱化饱和土层中桩的双曲型 $p-y$ 曲线[J]. 天津大学学报:自然科学版,2010,43(3):215-221.
 [4] 王成雷,王建华,冯士伦. 土层液化条件下桩土相互作用 $p-y$ 关系分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(10):1500-1505.
 [5] 王腾,王天霖. 粉土 $p-y$ 曲线的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(5):1343-1346.
 [6] 李雨润,袁晓铭,梁艳. 桩-液化土相互作用 $p-y$ 曲线修正计算方法研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):595-599.
 [7] 苏静波,邵国建,刘宁. 基于 $p-y$ 曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析[J]. 岩土力学,2006,27(10):1781-1785.
 [8] 王惠初,武冬清,田平. 粘土中横向静载桩 $p-y$ 曲线的一种新的统一法[J]. 河海大学学报,1991,19(1):9-17.
 [9] Chen W. F. 极限分析与土体塑性[M]. 詹世斌译. 北京:人民交通出版社,1995.

(编辑:郑毅)

Upper bound limit analysis for limit resistance of pile – side shallow soil under lateral loads

DING Penglai, WANG Xiaoming

(Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Based on the upper bound theorem of plastic limit analysis, the horizontal limit resistance formula of pile – side shallow soil under lateral seismic load is derived by using the logarithmic spiral interlayer mechanism and then the problem is calculated by applying a nonlinear sequential quadratic programming algorithm. The calculations show that the results calculated by the suggested model are perfect consistency with the results calculated by Matlock method and Sullivan method, thus verifying the reasonability of the suggested method. It is found that the horizontal seismic coefficient exerts significant influences on the limit resistance of the pile – side soil. The suggested method provides valuable guidance for limit resistance design of pile – side shallow soil.

Key words: upper bound analysis; logarithmic spiral and planar mechanism; $p-y$ curve; limit of soil resistance

(上接第 36 页)

Application of channel scouring and deposition data processing system based on 3D Digital Map

ZHANG Chao, JIANG Xianrui, WU Zhongming

(Water Resource and Survey Bureau of the Changjiang Middle Reach, Changjiang Water Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The distribution and values of scouring – depositing of river channel are very important for studying riverbed landform and its evolution. At present, river – section calculation method is often employed to analyze channel scouring and deposition variation, which can analyze the total amount of scouring and deposition, but can not analyze the spatial distribution and variation amplitude. Channel Scouring and Deposition Data Processing System Based on 3 D Digital Map can simulate and analyze the scouring and deposition of river channel according to 3D Digital Topographic Map, forming a digital topographic model, thus the spatial distribution and variation amplitude of channel scouring and deposition can be analyzed, and clear simulating contour images as well as the calculation result table are obtained, which can be used as important basis for river evolution analysis.

Key words: 3D Digital Map; scouring and deposition calculation; data processing; river evolution analysis