



一种适用于板桩与土体相互作用的 p - y 曲线折减方法

贝建忠, 何成忠, 彭志豪, 陈章楷

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: p - y 曲线法可充分考虑土体的塑性变形及抗力极限值, 但该方法是基于单桩水平静载试验提出的一种桩土弹簧计算方法, 无法直接应用于板桩与土体的相互作用。通过引入 p - y 曲线折减系数, 提出一种适用于板桩与土体相互作用的 p - y 曲线折减方法, 将其结果与 Plaxis 有限元模型计算结果及现场位移观测结果进行对比, 并验证该方法的准确性。结果表明, 该方法可以充分考虑土弹簧的非线性及土体地基反力极限值, 弥补了 m 法和 p - y 曲线方法的不足。

关键词: 板桩与土体相互作用; p - y 曲线; 折减方法; 被动土压力; 极限抗力; 塑性变形

中图分类号: U656.1+12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0263-07

A kind of reduction method of p - y curve applied to interaction between sheet pile and soil

BEI Jianzhong, HE Chengzhong, PENG Zhihao, CHEN Zhangkai

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The p - y curve method adequately considers soil plastic deformation and resistance limit values. However, this method is based on a pile-soil spring calculation approach derived from single-pile horizontal static load tests and cannot be directly applied to the interaction between sheet pile and soil. We propose a p - y curve reduction method suitable for the interaction between sheet pile and soil by introducing the p - y curve reduction coefficient, and compare the results to Plaxis finite element model results and on-site displacement observations to verify the accuracy of this method. The results show that this method can fully consider the nonlinearity of soil spring and the limit value of soil foundation counter-force, which makes up for the shortcomings of m method and p - y curve method.

Keywords: sheet pile-soil interaction; p - y curve; reduction method; passive soil pressure; ultimate resistance; plastic deformation

板桩结构因其结构简单、用料节省、造价较低、水上工作量少、施工便捷、工期短等优点, 在码头工程中应用广泛^[1]。板桩码头结构设计一般采用竖向弹性地基梁法进行计算, 该方法采用土弹簧模拟被动区桩土相互作用, 弹簧刚度系数选取是建模的关键。根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[2], 进行板桩码头设计时, 推荐采用 m 法进行弹簧刚度系数计算。该方法为线性弹簧方法, 参数简单、应用广泛, 但未完全考虑土体塑性变形及土抗力极限值, 当板桩变形较大时,

将导致计算结果存在一定偏差^[3-4]; 不同于 m 法 (m 为土水平抗力系数的比例系数), 土体水平抗力-侧向变形 (p - y) 曲线法可充分考虑土体的塑性变形及抗力极限值, 但该方法是基于单桩水平静载试验提出的一种桩土弹簧计算方法^[5-7], 无法直接应用于板桩与土体的相互作用。

根据桩土相互作用机理, 本文提出一种适用于板桩与土体相互作用的 p - y 曲线折减方法, 并分别采用 m 法、常规 p - y 曲线法及 p - y 曲线折减方法进行有限元模型分析, 同时与 Plaxis 有限元模型

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 贝建忠 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

计算结果及现场位移观测结果进行对比分析,验证 p - y 曲线折减方法的准确性,对后续板桩码头设计具有一定的参考意义。

1 理论公式

1.1 p - y 曲线法

1.1.1 黏性土

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》,对于黏性土,当土体不排水抗剪强度 $C_u > 96$ kPa 时,宜采用试桩资料绘制 p - y 曲线;当 $C_u \leq 96$ kPa 时, p - y 曲线可按下列规定确定:

$$p_u = \begin{cases} 3C_u + \rho g z + \frac{\zeta C_u z}{d} & (z < z_r) \\ 9C_u & (z \geq z_r) \end{cases} \quad (1)$$

$$z_r = \frac{6C_u d}{\rho g d + \zeta C_u} \quad (2)$$

当 $y/y_{50} < 8$ 时,有:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$y_{50} = \rho' \varepsilon_{50} d \quad (4)$$

当 $y/y_{50} \geq 8$ 时,有:

$$\frac{p}{p_u} = 1.0 \quad (5)$$

式中: p_u 为深度 z 处极限水平土抗力, kPa; p 为深度 z 处水平土抗力, kPa; C_u 为土体不排水抗剪强度, kPa; ρ 为土体密度, t/m^3 ; z 为深度, m; ζ 为系数,取 0.25~0.50; d 为桩径, m; z_r 为极限水平抗力转折点埋深, m; y 为深度 z 处的侧向变形, mm; y_{50} 为极限水平土抗力一半时对应的侧向变形, mm; ρ' 为系数,取 2.5; ε_{50} 为三轴仪试验中最大主应力差一半时的应变值,当无试验资料时,当 C_u 为 12~<24 kPa 时 ε_{50} 取 0.020,当 C_u 为 24~<48 kPa 时 ε_{50} 取 0.010,当 C_u 为 48~96 kPa 时 ε_{50} 取 0.007。

1.1.2 砂性土

对于砂性土, p - y 曲线可按下列规定确定:

$$p'_u = \begin{cases} (C_1 z + C_2 d) \rho g z & (z < z_r) \\ C_3 d \rho g z & (z \geq z_r) \end{cases} \quad (6)$$

$$p = \psi p'_u \text{th} \left(\frac{Kz}{\psi p'_u} y \right) \quad (7)$$

$$\psi = \left(3.0 - 0.8 \cdot \frac{z}{d} \right) \geq 0.9 \quad (8)$$

式中: p'_u 为深度 z 处砂性土极限水平土抗力, kN/m; C_1 、 C_2 、 C_3 为系数,可根据图 1 查得; ψ 为系数; K 为土抗力初始模量, kN/m^3 ,可根据图 2 查得。

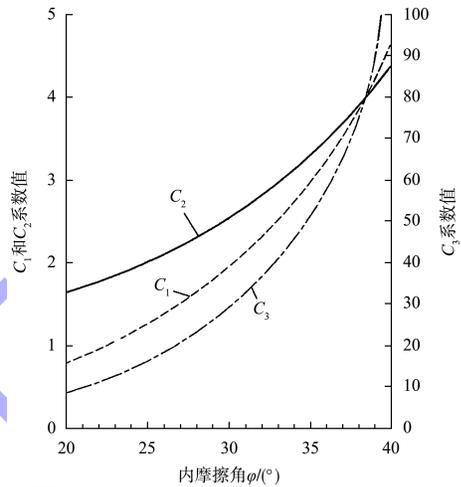


图 1 C_1 、 C_2 、 C_3 与内摩擦角关系曲线

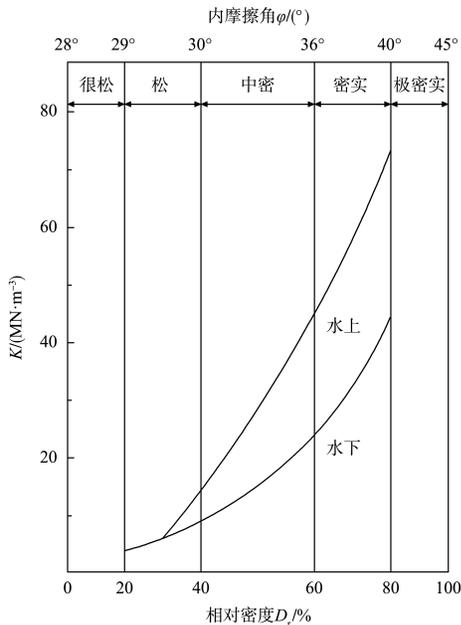


图 2 K 值曲线

1.2 p - y 曲线折减方法

1.2.1 理论推导

p - y 曲线是基于单桩水平静载试验提出的模型,考虑了土体应力的扩散作用,直接应用于板

桩与土体相互作用时, 将导致作用于板桩上的土抗力偏大, 应对其进行折减^[8-9]。

$p-y$ 曲线折减方法的关键是确定折减系数, 该系数可根据现场水平荷载试验确定, 当无试验资料或不具备试验条件时, 本文提出的折减方法如下。

按以下公式计算土体的被动土压力极限值:

$$p_p = K_p \cos \delta \left(\sum_{i=1}^n \rho_i g h_i \right) + 2c \cdot \frac{\cos \varphi \cos \delta}{1 - \sin(\varphi + \delta)} \quad (9)$$

$$K_p = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \delta \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2} \quad (10)$$

式中: δ 为土的外摩擦角, ($^\circ$); c 为计算土层的黏聚力, kPa; ρ_i 为计算面以上土层 i 的密度, t/m^3 ; h_i 为计算面以上土层 i 的厚度, m。

根据 p_p 和 p_u , 计算折减系数:

$$\alpha = \frac{p_p}{p_u} \quad (11)$$

黏性土折减系数的公式为:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\rho g z + 2C_u}{3c + \rho g z + \frac{\zeta C_u z}{d}} & (z < z_r) \\ \frac{\rho g z + 2C_u}{9C_u} & (z \geq z_r) \end{cases} \quad (12)$$

砂性土折减系数的公式为:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\cos^2 \varphi}{\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2 (C_1 z + C_2)} & (z < z_r) \\ \frac{\cos^2 \varphi}{\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2 C_3} & (z \geq z_r) \end{cases} \quad (13)$$

通过引入折减系数 α , 对标准 $p-y$ 曲线进行折减, 得到折减后的 p_r-y 曲线:

$$p_r = \alpha p_0 \quad (14)$$

式中: p_p 为深度 z 处的被动土压力极限值, kPa; p_0 为深度 z 处作用于直径 $d=1$ m 的单桩上的水平土抗力, kPa; p_r 为深度 z 处作用于板桩墙的水平土抗力折减值, kPa; α 为 $p-y$ 曲线折减系数。

板桩被动区土弹簧 $p-y$ 曲线折减见图 3。

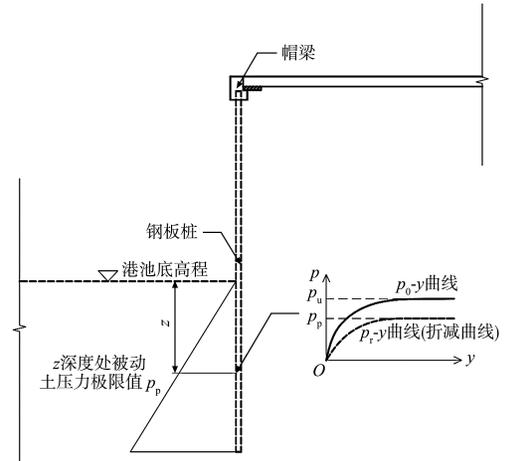
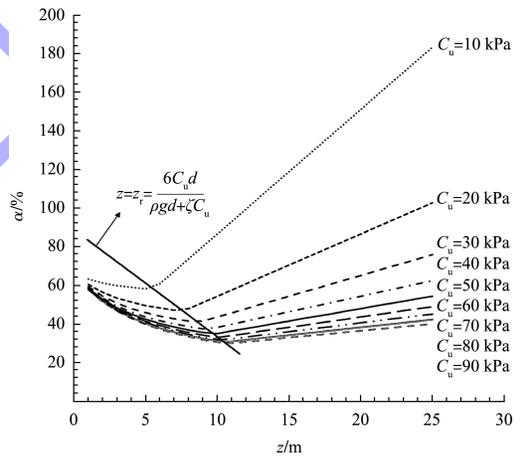


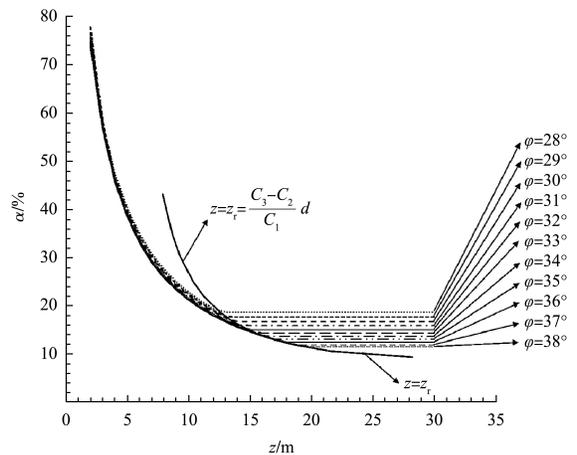
图 3 板桩被动区土弹簧 $p-y$ 曲线折减

1.2.2 $p-y$ 曲线折减系数的影响因素分析

分别针对黏性土和砂性土, 改变土体强度 (黏聚力或内摩擦角), 研究 $p-y$ 曲线折减系数 α 与计算深度 z 的关系, 见图 4。



a) 黏性土



b) 砂性土

图 4 $p-y$ 曲线折减系数与深度关系曲线

由图4可看出：1) 折减系数 α 越小，对 p - y 曲线的折减程度越大。2) 随着土体强度(黏聚力或内摩擦角)的增加，折减系数 α 逐渐变小。3) 对于黏性土，当 $z < z_c$ 时，折减系数 α 随深度增加呈递减趋势；当 $z \geq z_c$ 时，折减系数 α 随深度增加程线性递增趋势。4) 对于砂性土，当 $z < z_c$ 时，折减系数 α 随深度增加程递减趋势；当 $z \geq z_c$ 时，折减系数 α 为固定常数，仅与内摩擦角相关，与计算深度无关。

2 工程案例应用

2.1 工程概况

非洲东部某老码头改扩建工程，老码头长度445 m，港池水深仅为3.0 m，老码头采用钢板桩结构，因年久失修，锈蚀情况严重，甚至出现局部断裂情况，急需改造升级^[10]。老码头平面布置和典型断面见图5。

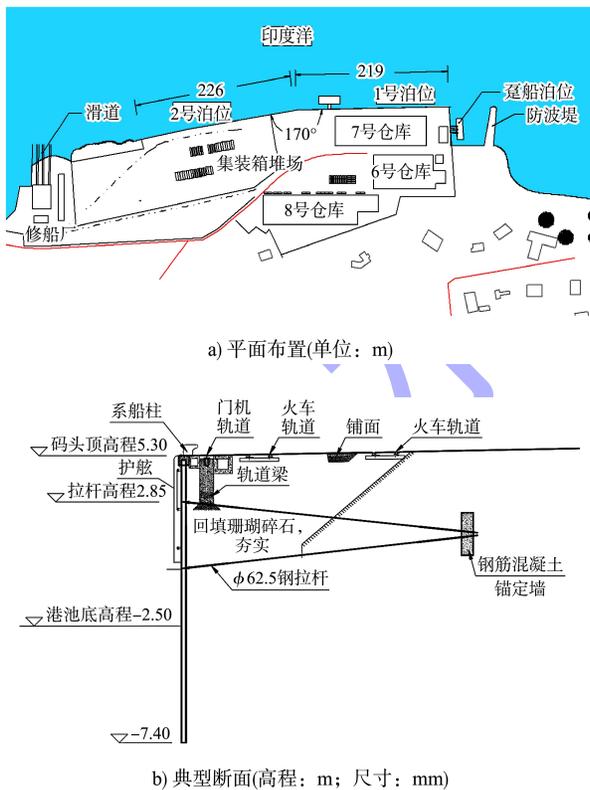


图5 老码头平面布置和典型断面

2.2 升级改造方案

新码头前沿线长450 m，呈直线布置并向海测偏移50~92 m，港池设计底高程-13.0 m。考虑到工程区域存在深厚泥炭质土，最终提出一种适用于深厚泥炭质土软基的后板桩接岸式高桩码头结构，主要包括高桩码头结构、后板桩接岸结构、陆域形成和地基处理，其中高桩码头结构宽38.5 m，陆域形成区域宽11.5~53.5 m。高桩码头的桩基采用灌注桩，直径1100 mm、排架间距8 m，上部结构采用现浇梁+叠合板结构；后板桩接岸结构采用AZ28-700型钢板桩，设置于高桩码头结构后方，通过现浇帽梁与高桩码头上部结构连接；陆域形成主要回填料为中粗砂及开山土石；板桩被动区及陆域形成区域采用高压旋喷桩处理，以保证码头整体稳定性、减小后板桩结构内力及陆域沉降。升级改造方案的平面布置和典型断面见图6。

土原状指标及地基处理复合指标见表1。

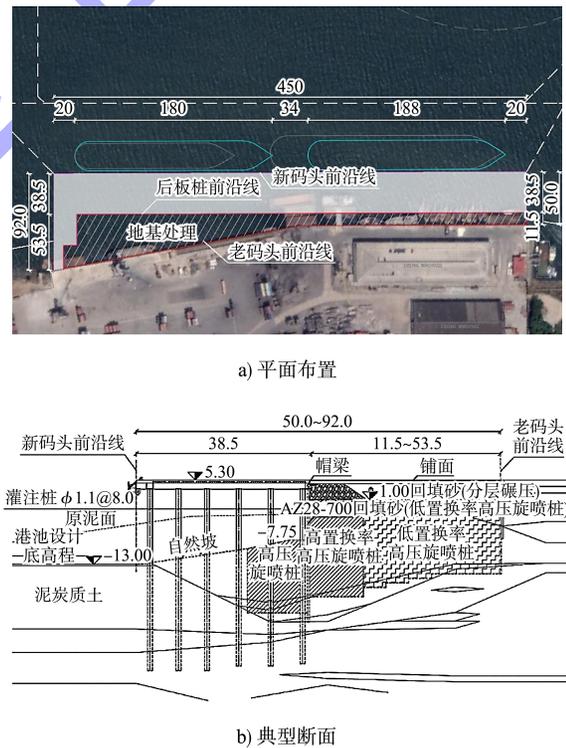


图6 升级改造方案平面布置和典型断面 (单位: m)

表1 土体原状指标及地基处理复合指标

土层	土体原状指标			地基处 理方式	置换率/ %	复合土体指标		
	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$			密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
② ₁ 黏性土	1.50	7.9	0	旋喷桩	20	1.58	66	0.0
② ₁ 黏性土	1.50	7.9	0	旋喷桩	30	1.58	96	0.0

3 有限元模型分析

3.1 水平地基反力系数计算

分别针对 $C_u = 96 \text{ kPa}$ (工程案例) 和 $C_u = 20 \text{ kPa}$ (对比模型), 选取计算深度 $z = 1 \text{ m}$ 和 $z = 5 \text{ m}$, 分别采用 m 法、 p - y 曲线法和 p - y 曲线折减方法计算水平地基反力系数, 并绘制不同计算方法土弹簧的力-变形关系对比曲线, 见图 7、8。

分析图 7、8 可得出: 1) 对于黏聚力较小的黏性土, m 法水平地基反力系数远大于 p - y 曲线法和 p - y 曲线折减方法的水平地基反力系数, m 法曲线对于低强度黏性土的适用性较差; 2) 对于表层黏聚力较大的黏性土, 当土体变形较小时, p - y 曲线法的水平地基反力系数最大, m 法和 p - y 曲线折减方法的水平地基反力系数大小相近, p - y 曲线法过度评估了表层黏性土的土体抗力; 3) 对于深层黏聚力较大的黏性土, 当土体变形较小时, m 法与 p - y 曲线法的水平地基反力系数大小相近, 大于 p - y 曲线折减方法的水平地基反力系数, m 法与 p - y 曲线法均过度评估了深层黏性土的土体抗力; 4) 不论对于低强度黏性土, 还是对于高强度黏性土, 随着土体变形的增加, m 法水平地基反力系数迅速增加, 远超过 p - y 曲线法和 p - y 曲线折减方法的水平地基反力系数, m 法曲线对于土体大变形的适用性较差, 计算结果逐渐失真。

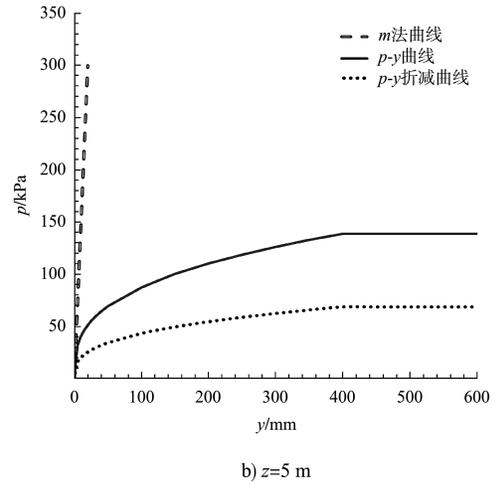
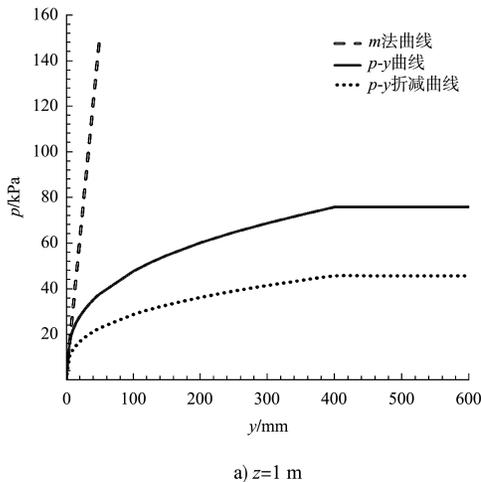


图 7 $C_u = 20 \text{ kPa}$ 时 m 法、 p - y 和 p - y 折减曲线对比

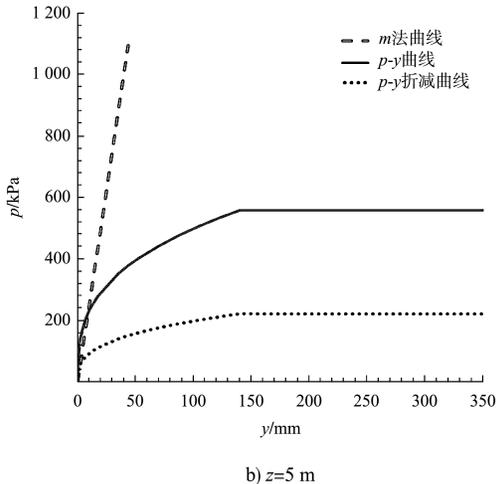
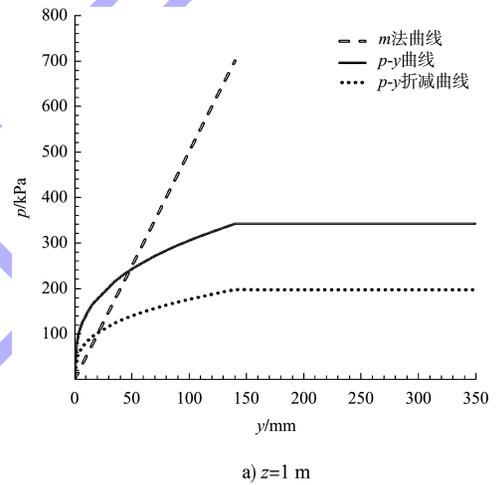
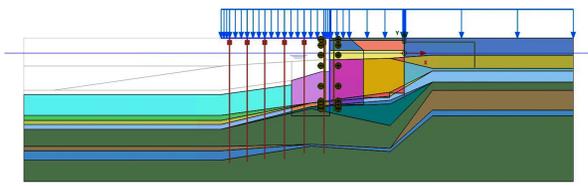


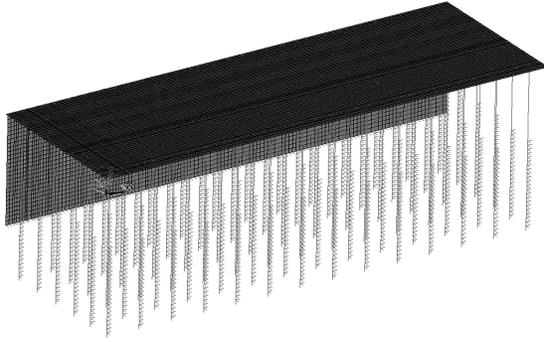
图 8 $C_u = 96 \text{ kPa}$ 时 m 法、 p - y 和 p - y 折减曲线对比

3.2 有限元模型

针对升级改造方案, 分别采用 Plaxis 岩土有限元软件和 ANSYS 结构有限元软件进行建模分析, 模型见图 9。



a) Plaxis有限元模型



b) ANSYS有限元模型(弹性地基梁法)

图9 有限元模型

3.3 结果对比分析

3.3.1 施工期位移拟合

码头上部结构施工完成后,在码头面板上设置了永久观测点(工序10),现场具备连续观测条件,连续观测后方陆域回填工况(工序11:回填高程1.0~4.5 m)的位移变化情况,观测点位移见表2,累计最大位移为17.1 mm。

表2 陆域回填工况(工序11)位移观测值

观测日期	累计位移/mm	观测日期	累计位移/mm
2023-01-30	0.0	2023-02-18	10.0
2023-01-31	1.4	2023-02-20	8.6
2023-02-03	1.4	2023-02-22	8.9
2023-02-04	1.4	2023-02-23	10.4
2023-02-06	2.2	2023-02-24	11.7
2023-02-09	2.2	2023-02-25	13.4
2023-02-10	3.2	2023-02-26	13.9
2023-02-11	4.1	2023-02-27	17.1
2023-02-13	4.1	2023-02-28	16.6
2023-02-14	5.8	2023-03-02	16.8
2023-02-15	7.2	2023-03-03	17.1

因传统的弹性地基梁法仅可计算某特定工况下的板桩结构位移,无法模拟整个施工过程,较难准确计算施工过程中的增量位移,本文通过

Plaxis进行整个施工过程模拟,提取陆域回填工况(回填高程1.0~4.5 m)的增量位移,并与现场实际观测位移对比,见表3。可以看出,Plaxis模型的增量位移与现场观测的增量位移匹配度较高,说明Plaxis模型可一定程度上反映现场实际位移,通过模型率定后,可用于预测结构实际变形情况。

表3 陆域回填工况板桩位移对比

方法	结构	位移/mm
Plaxis模型	板桩	16.9
现场观测	板桩	17.1

3.3.2 使用期位移分析

1) p - y 曲线折减方法的应用。针对升级改造方案最终断面,通过ANSYS有限元软件,采用基于 p - y 曲线折减方法的弹性地基梁模型对板桩结构进行计算分析,同时,为验证 p - y 曲线折减方法的普遍适用性,增加了 $C_u=20$ kPa的对比模型,不同黏聚力模型的土弹簧压缩量沿深度分布见图10。

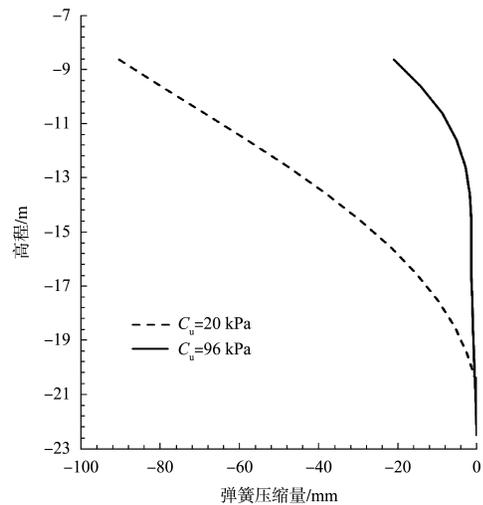


图10 p - y 曲线折减法土弹簧压缩量沿深度分布

2) 不同设计方法对比分析。针对 $C_u=20$ kPa和 $C_u=96$ kPa的对比模型,分别基于 m 法和 p - y 曲线法和 p - y 曲线折减方法确定土弹簧设计参数,并采用弹性地基梁法对板桩结构进行计算分析,位移结果见表4。

表 4 不同设计方法板桩位移结果对比

设计方法	结构	位移/mm	
		$C_u = 20$ kPa	$C_u = 96$ kPa
m 法	板桩	87.6	73.0
p - y 曲线法	板桩	96.4	61.0
p - y 曲线折减方法	板桩	130.9	74.8
Plaxis 模型	板桩	135.7	75.4

通过分析土弹簧压缩量沿深度分布及不同设计方法板桩位移结果, 可知: ① p - y 曲线折减方法计算位移与 Plaxis 模型位移接近, 偏差小于 5%, 考虑到 Plaxis 模型可一定程度上反映现场实际位移, 说明本文提出的 p - y 曲线折减方法可以适用于分析板桩与土体的相互作用; ②土弹簧压缩变形与土体强度成反比, 当土体强度较低时, 土弹簧压缩量较大, 板桩变形较大, m 法计算板桩位移最小, 远小于 Plaxis 模型位移, m 法对于低强度土体及大变形模型的适应性较差; ③对于不同强度土体, p - y 曲线计算板桩位移均远小于 Plaxis 模型位移, p - y 曲线过度评估了土体对板桩的约束作用, 无法直接应用于模拟板桩与土体相互作用。

4 结语

1) 针对板桩结构设计, 国内港工规范推荐采用 m 法进行弹簧刚度系数计算, 该方法简单、应用广泛, 但未完全考虑土体塑性变形及抗力极限值, 当土体强度较低、压缩性较大时, m 法会过度评估土体的地基反力, 导致板桩结构分析存在较大偏差, 故 m 法对于低强度、高压缩性的土体适用性较差。

2) 不同于 m 法, p - y 曲线法可充分考虑土体的塑性变形及抗力极限值, 但该方法是基于单桩水平静载试验提出的一种桩土弹簧计算方法, 考虑了土体应力的扩散作用, 对于连片布置的板桩墙结构, p - y 曲线法会过度评估土体的地基反力, 无法直接应用于模拟板桩与土体相互作用。

3) Plaxis 模型方法计算位移与现场实测位移拟合较好, 说明 Plaxis 模型可一定程度上反映现场实际位移, 通过模型率定后, 可作为预测板桩

实际位移的方法。

4) 本文根据桩土相互作用机理, 通过理论公式推导, 引入了土抗力折减系数 α , 提出一种适用于板桩与土体相互作用的 p - y 曲线折减方法, 该方法可以充分考虑土弹簧的非线性及土体地基反力极限值, 弥补了 m 法和 p - y 曲线方法的不足, 且通过与 Plaxis 模型对比, 验证了该方法的准确性。本文提出的 p - y 曲线折减方法可作为板桩码头结构设计的重要工具, 对后续板桩码头设计具有一定参考意义, 具有较高的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 孙楠. 大型深水板桩码头断面及计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] 刘兰花. 桩基计算中 m 法的进一步探讨[J]. 土工基础, 2011, 25(3): 51-53.
- [4] 王义, 张正伟, 王龙辰. m 法及非线性法在桩基础抗震设计中的对比研究[J]. 兰州工业学院学报, 2014, 21(2): 67-70.
- [5] 李洪江, 刘松玉, 童立元. 基于应力增量的单桩 p - y 曲线分析方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2916-2922, 2930.
- [6] 赵心涛, 赵心福, 刘欣. 水平荷载下单桩 p - y 曲线简化计算方法对比研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 219-224.
- [7] 司翔, 张培强, 黄桂祥, 等. 基于 p - y 曲线法的深埋桩桩-土相互作用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37(5): 20-26, 81.
- [8] 张小玲, 周锐, 许成顺. 海上风电基础修正 p - y 曲线模型研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 290-297.
- [9] 王涛. 板桩码头前墙地基反力限值问题对结构设计的影响[J]. 珠江水运, 2023(8): 66-69.
- [10] 吕威, 贝建忠, 孙国辉. 深厚泥炭质土软基条件下的老码头改扩建[J]. 水运工程, 2024(2): 66-71, 130.

(本文编辑 王璁)