

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyh.2024.05.040

水利插板桩内力计算方法探讨

徐玉亭,周健,余代广,张胤
(南京市水利规划设计院股份有限公司,江苏南京210000)

摘要:针对目前缺乏水利插板桩护岸内力计算方法的问题,探讨和分析了插板桩计算原理,推导了插板桩挡土板和锚固桩的内力及位移计算公式,并以江苏省南通市某河道护岸为例进行了验算。结果表明:所推导的公式力学意义明确,公式相对简单,便于设计人员计算,可为类似工程设计提供参考。

关键词:水利插板桩;挡土板;锚固桩

中图分类号:TV675

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)05-0166-04

0 引言

桩板式挡土墙是指由间隔设置的桩与桩间的挡土板构成的钢筋混凝土支挡结构,被广泛应用于公路、铁路等路基支挡。近年来,由于其总体造价较为便宜,施工便捷,能有限防治岸坡水土流失,并具备水土交换的功能(不同于阻断水土交流的连续性排桩护岸)等优点,因而也被广泛运用于水利工程,尤其是江苏省南通市、泰州市等高沙土地地区的河道岸坡防护,只是水利上一般称其为插板桩。但是,关于插板桩的内力计算原理尚无统一认识,《水工挡土墙设计规范》(SL379—2007)上也无统一计算规定或约定。

谢娇娇等^[1]给出了插板桩的布置、结构计算及施工要求,其中桩顶位移参考《水工挡土墙设计规范》(SL386—2016);桩身内力计算参考《水利水电工程边坡设计规范》(SL386—2016),采用“K”法。姚慧敏^[2]对双排板桩挡土墙结构内力进行了研究,其内力计算参照建筑行业《深基坑支护设计与施工新技术》^[3]。侯琳等^[4]分析研究了组合式板桩抗倾覆稳定计算。赵恺^[5]采用图解法、理正软件对插板桩护岸的入土深度、内力计算作了分析,其基本依据为《公路挡土墙设计与施工技术细则》^[6]。胡增团^[7]对桩板式挡土墙墙后土压力进行了研究。胡庆^[8]基于“m”法,采用理正软件对插板桩内力进行了分析。与公路行业桩板式挡土墙相比,水利插板桩具有挡土高度小、桩身断面小、以短桩为主(一般不影响整体稳定,设桩目的

为挡土而非整体抗滑)受水位影响大等特点,而以上学者对插板桩内力的研究多是基于公路行业或其他行业标准,并未针对水利插板桩特点,且目前水利行业尚无规范或标准可供参照,因此对于插板桩内力计算模式的探讨一直是工程界需要攻克的难题之一。

本文针对水利插板桩护岸内力计算问题,根据其结构和受力特点,基于基本力学原理,推导了挡土板和锚固桩的内力及位移计算公式,并应用于江苏省南通市某河道治理工程中,以期为类似工程设计提供参考。

1 计算原理与方法

水利插板桩基本构造示意图见图1。图1中: h 为挡土板高度; H 为桩身总长; H_1 为桩悬臂段高度; H_2 为桩锚固段深度; l_1 为护岸悬空高度; l_2 为护岸斜坡高度; m 为边坡系数; l_0 为河底距锚固点垂直距离。图中的挡土板一般采用桩后式。

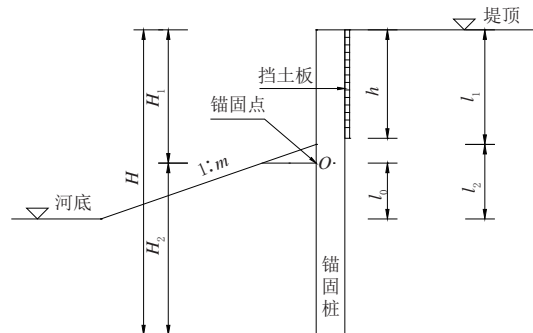


图1 水利插板桩基本构造示意图

作用在插板桩上的荷载有墙后土压力、堤顶汽车和人群荷载、墙后水压力、墙前水压力;根据插板桩结构受力特点,可以认为作用在插板桩上的荷载先传递

收稿日期:2023-06-12

作者简介:徐玉亭(1989—),女,学士,工程师,从事水利规划设计工作。

至挡土板,再通过挡土板传递给锚固桩。因此,插板桩内力计算分为挡土板和锚固桩两种。

1.1 挡土板

挡土板受荷示意图见图2。图2中: V_1 为墙前水压力; V_2 为墙后水压力; E_a 为墙后土压力(含超载引起的土压力)。其计算宽度取板的计算跨度(一般简化为桩中心距),按简支板计算。

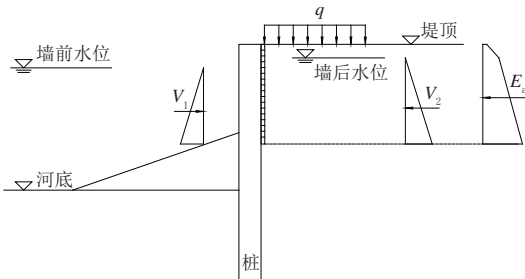


图2 挡土板受荷示意图

作用在挡土板上的主动土压力采用库伦土压力公式计算。主动土压力水平分力 E_{ax} (kN/m)的表达式为:

$$E_{ax} = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 K_a \cos \delta \quad (1)$$

式中:

$$K_a = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos \delta}} \right]^2},$$

$$h_1 = H_0 - h_c,$$

$$h_c = 2c \frac{1 + \sin(\varphi + \delta)}{\gamma \cos \varphi \cos \delta},$$

$$h_0 = \frac{q}{\gamma}.$$

γ 为挡土墙墙后填土重度, kN/m³; H_0 为墙前地面至墙顶的高度, m; h_1 为主动土压力为零处至墙前地面的高度, m; h_c 为考虑墙后填土的黏结力作用时, 主动土压力为零处的深度, m, 当墙顶水平面以上有超载作用时, 填土面应按近似折算后的等代填土高度计算; c 为墙后填土的黏结力, kPa; q 为作用在墙后填土面上的均布荷载, kPa; h_0 为墙顶水平面以上的等代填土高度, m; φ 为土体内摩擦角, °; δ 为墙后填土对墙背的摩擦角, °。

1.2 锚固桩

桩的主要荷载为板传递过来的水土压力, 计算宽度可按其左右两相邻桩之间距离的一半计算(一般简化为桩中心距), 因其受力与抗滑桩类似, 故桩的计算可参照一般抗滑桩计算思路, 分悬臂段和锚固段分别计算。

1.2.1 锚固点确定

插板桩前一般接斜坡, 在插板桩受力分析时应

考虑其提供的抗力, 其抗力大小可考虑斜坡段提供的被动土压力。被动土压力 E_p (kN/m)计算参考以下公式^[9]:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma l_0^2 K_p + 2c l_0 \sqrt{K_p} \quad (2)$$

其中:

$$l_2 = \frac{l_0}{1 + \tan \beta \tan(45^\circ + \varphi/2)}.$$

式中: β 为桩前坡面与水平面夹角, (°); K_p 为被动土压力系数。

按照抗力大小一致的等效原则, 斜坡段提供的被动土压力可等效为高度为 h_m (河底起算)水平段提供的抗力, 河底以上 h_m 高度即为锚固点位置。根据图1几何关系换算得锚固点距堤顶高度 H_1 :

$$H_1 = l_1 + l_2 - \frac{l_2}{1 + \tan \beta \tan(45^\circ + \varphi/2)} \quad (3)$$

1.2.2 悬臂段计算

悬臂段桩身内力及变形根据挡土板传递的荷载按悬臂梁计算。

1.2.3 锚固段计算

根据锚固点处的弯矩、剪力和锚固段地基的弹性抗力, 采用“m”法计算。

桩身锚固段任一截面 y 处的水平位移 x 、转角 θ 、弯矩 M 及剪力 Q 按下式计算:

$$\begin{aligned} x(y) &= x_0 A_1 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 \\ \theta(y) &= \alpha(x_0 A_2 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_2) \\ M(y) &= \alpha^2 EI(x_0 A_3 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_3) \\ Q(y) &= \alpha^3 EI(x_0 A_4 + \frac{\theta_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_4) \\ \alpha &= \sqrt[5]{\frac{m B_p}{EI}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 为m法影响函数值; EI 为桩身抗弯刚度, kN·m; Q_0 、 M_0 为锚固段顶面处的剪力及弯矩, 可取悬臂段计算结果; x_0 、 θ_0 为锚固段顶面处的水平位移及转角, 根据桩底支承条件确定; B_p 为桩身计算宽度, m, 当方桩边宽 $b \leq 1$ m时, $B_p = 1.5b + 0.5$ 。

桩底锚固地层为土层时, 桩底可视为自由端; 桩底锚固地层为完整岩层时, 桩底可视为铰支端。根据水利插板桩地层特点, 桩底支承可按自由端考虑。当桩底支承为自由端时, 桩底剪力 $Q_{h2} = 0$, 弯矩 $M_{h2} = 0$, $x_0 = \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \frac{B_3 C_4 - B_4 C_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \frac{B_3 D_4 - B_4 D_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3}$, $\theta_0 = \frac{M_0}{\alpha EI}$

$$\frac{A_4 C_3 - A_3 C_4}{A_3 B_4 - A_4 B_3} + \frac{Q_0}{\alpha^2 EI} \frac{A_4 D_3 - A_3 D_4}{A_3 B_4 - A_4 B_3}$$

1.2.4 桩顶水平位移计算

桩顶水平位移由悬臂段顶端弹性变形叠加锚固段顶端刚性变形组成。桩顶水平位移计算示意图见图3,计算式见式(5)。

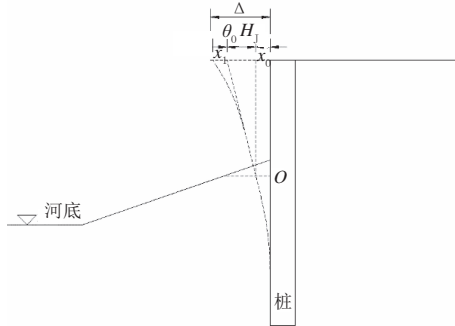


图3 桩顶水平位移示意图

$$\Delta = x_0 + x_1 + \theta_0 H_1 \quad (5)$$

式中: x_1 为悬臂段的桩顶水平位移,mm,按材料力学方法计算。

2 案例

2.1 工程概况

南通市某河道工程采用插板桩护岸,锚固桩采用方桩,方桩尺寸为0.35 m×0.30 m,桩顶高程1.20 m,初拟锚固桩长7 m(不含冠梁)、桩间距2 m;预制插板宽1.98 m、高2.10 m、厚0.12 m。

河道水位变幅较小,本次选取河道正常水位进行计算,河内水位1.20 m,桩后水位1.50 m(考虑0.30 m水头差)。

河道边坡土层较为单一,主要分布淤泥质重粉质壤土,土层物理力学指标见表1。边坡插板桩护岸计算简图见图4。

表1 土层物理力学指标

名称	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ ($^\circ$)
淤泥质重粉质壤土	18.0	13.6	9.3

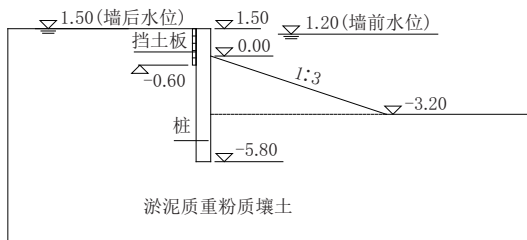


图4 插板桩护岸计算简图

2.2 护岸整体稳定计算

整体稳定(不考虑插板桩)计算采用简化毕肖普法,考虑运行期、施工期和地震工况,利用 AutoBank

软件计算,计算结果见图5~图7和表2。

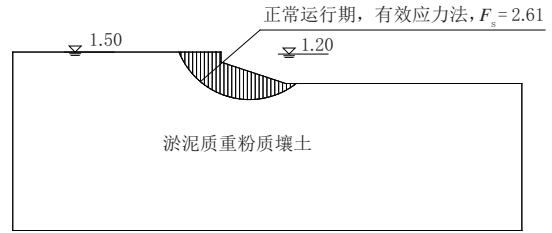


图5 护岸整体稳定(运行期)计算结果图

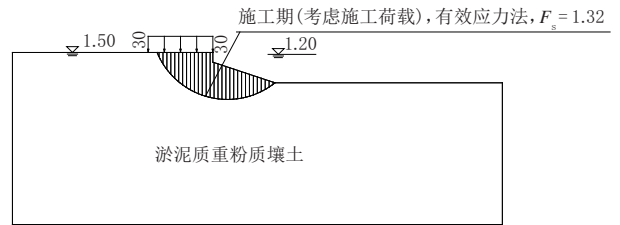


图6 护岸整体稳定(施工期)计算结果图

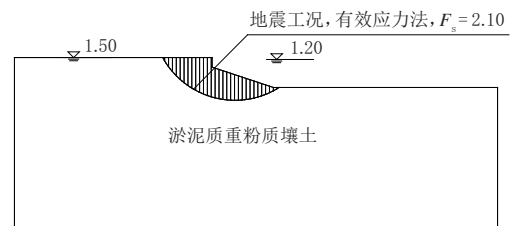


图7 护岸整体稳定(地震工况)计算结果图

表2 抗滑稳定计算成果表

项目	抗滑稳定安全系数 F_s		
	运行期	施工期	地震期
计算结果	2.61	1.32	2.10
容许抗滑稳定安全系数 $[k]$	1.30	1.20	1.15

由图5~图7和表2可知,护岸整体稳定满足《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)要求。

2.3 插板桩内力计算

2.3.1 水土压力计算

一般情况下,砂土采用水土分算,黏土采用水土合算。但水利插板桩一般挡土高度较小,受水位影响较大,根据其受力特点,采用水土分算,水压力按静水压力计算,土压力按库仑土压力计算,堤顶活载取 5 kN/m^2 ,计算宽度取桩中心距2.0 m。挡土板水土压力设计值见表3。表3中: Z_y 为主动土压力水平分力力臂,m; V 为作用在挡土板上的静水压力,kN; Z_{vy} 为静水压力力臂,m。

表3 挡土板水土压力设计值

部位	E_{ax} /kN	Z_y /m	V /kN	Z_{vy} /m
迎水侧			38.88	0.6
背水侧	9.6	0.34	52.92	0.7

2.3.2 挡土板内力计算

挡土板两侧按简支考虑,建筑物级别按3级考虑,挡土板内力计算结果见表4。由表4可知,挡土板强度及计算裂缝宽度(《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)规定允许值为0.25 mm)满足要求。

表4 挡土板内力计算结果

最大弯矩 / (kN·m)	计算配筋 / mm ²	实际配筋 / mm ²	裂缝宽度 / mm
5.23	199	565	0.103

2.3.3 锚固桩内力计算

(1)锚固点确定。依据2.2节锚固点确定方法,经计算,锚固点距离桩顶2.45 m。

(2)悬臂段。桩承受挡土板传递来的荷载,按悬臂梁计算,桩悬臂段内力及变形计算结果见表5。

表5 桩悬臂段内力及变形计算结果

最大弯矩 / (kN·m)	最大剪力 / kN	计算配筋 / mm ²	挠度 / mm
24.08	21.95	351	7.44

(3)锚固段。采用“m”法计算,根据土的性质,取 $m=2 \text{ MN/m}^4$ (根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),长期荷载要考虑0.4的折减系数),桩底按自由端考虑;另外根据表5,锚固段顶端 $Q_0=21.95 \text{ kN}$, $M_0=24.08 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。桩锚固段最大内力和锚固段顶端位移计算结果见表6。

表6 桩锚固段内力、变形计算结果

最大弯矩 / (kN·m)	最大剪力 / kN	计算配筋 / mm ²	顶部位移 (刚性变形)/mm	转角 / rad
36.54	21.95	423	5.74	0.003 6

桩最大剪力21.95 kN,根据现行《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008),桩身截面抗剪承载力为 $0.07 \times 14.3 \times 350 \times 270 / 1000 = 94.6 \text{ kN}$,满足要求。

桩最大弯矩36.54 kN·m,可选配4D16(三级钢,钢筋截面积 804 mm^2),经计算,桩身最大裂缝宽度为0.15 mm,小于《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)允许值(0.20 mm),满足要求。

2.3.4 水平位移计算

桩身入土点位移取锚固段顶部位移5.74 mm。

桩顶的总位移为悬臂段顶端弹性变形叠加锚固段顶端刚性变形,即桩顶位移 $=7.44+5.74+0.003 6 \times 2450=22 \text{ mm}$ 。

根据现行《水工挡土墙设计规范》(SL 379—2007),对板桩挡土墙,桩入土点(锚固段顶端)的位移一般

要求不超过10 mm,本案例中为5.74 mm,满足该规范要求。

桩顶位移限值参考《铁路路基支挡结构设计规范》(TB 10025—2019),桩顶变形(自由段顶端)可按悬臂段长度的1/100即不超过24.5 mm控制,计算结果22 mm满足要求。

3 结 语

(1)按水利插板桩结构和受力特点,可以认为作用在插板桩上的荷载先传递至挡土板,再通过挡土板传递给锚固桩。因此,水土压力可只计挡土板上水土压力,不计锚固桩上水土压力。

(2)挡土板一般搭接在锚固桩上,可按简支板计算。

(3)锚固桩受力与一般抗滑桩受力类似,其内力计算可参考一般抗滑桩计算思路,同时考虑到水利插板桩地层特点,可采用“m”法计算锚固段内力,桩底支承按自由端考虑。

(4)本文基于河道岸坡整体处于稳定状态的条件,墙后采用库仑土压力计算。对于已出现失稳或存在潜在失稳现象时,应同时采用滑坡推力复核。另外,因目前尚无统一计算理论,建议结合现场监测对计算结果进行验证;有条件可以作专题研究,采用现场试验和理论计算对比的方式,对计算模型和有关参数进行率定,再用于工程实际。

参考文献:

- [1] 谢娇娇,蒲世涛,罗联利.板桩式挡墙在旺月闸上游护岸优化中的应用与设计[J].四川水利,2020,41(1):39-42.
- [2] 姚慧敏.板桩式挡土墙在渤海新区沿海水利工程中的应用[J].河北水利,2019,297(11):46-47.
- [3] 年廷凯,孙旻.深基坑支护设计与施工新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [4] 侯琳,张红武,卜海磊,等.河道与滩区治理组合板桩抗倾覆稳定计算[J].人民黄河,2021,43(3):120-126.
- [5] 赵恺.河堤护岸及抢险道路工程板桩挡土墙设计[J].广西水利水电,2022,207(3):64-67.
- [6] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路挡土墙设计与施工技术细则[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [7] 胡增团.桩板墙挡土板土压力计算研究[J].路基工程,2022,225(6):45-48.
- [8] 胡庆.桩板式挡土墙在河道治理工程中的应用[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2844-2848.
- [9] 程佳.桩板墙前倾斜坡面被动土压力计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.