

文章编号: 1002-0268 (2001) 02-0041-03

桩式地锚计算方法研究

胡红雨

(安徽省高速公路总公司建设处, 安徽 合肥 230051)

摘要: 分析桩式地锚的力学行为,应用桩基研究成果和《公路桥梁设计规范》中的公式,论证桩式地锚承载力计算方法。

关键词: 拱桥施工; 桩式地锚; 力学行为

中图分类号: U448 225 文献标识码: A

Study on Anchor Pile Bearing Capacity Calculation Method

HU Hong-yu

(Anhui Province Expressway Co., Anhui Hefei 230051, China)

Abstract: Based on the results of pile foundation study and the formula under the “Highway Bridge Design Specification”, the author analyzes the mechanical condition of anchor pile and expounds its bearing capacity calculation method.

Key words: Arch bridge construction; Anchor pile; Mechanical condition

0 引言

拱桥施工中,在遇到峡谷或水深流急的河段上,或在通航河流上需要满足船只的顺利通行,或在洪水季节施工并受漂流物影响等条件下,常采用缆索吊装施工。地锚是缆索吊装施工中必不可少的结构。它的作用是把缆索系统的索力最终传递给地基,其重要性不亚于塔架、缆索等任何结构。常用的重力式地锚主要依靠自重和摩擦力来平衡索力,受力明确,易于计算。但重力式地锚占地面积大、造价高。采用桩式地锚来锚固主缆,施工简易,占地面积小,造价低,效益高,值得推广。问题是桩式地锚的受力复杂,需要正确计算、正确施工,方可确保安全合理。为此,本文对桩式地锚的受力行为进行分析后,论证了桩式地锚的承载力计算方法。

1 桩式地锚的受力行为

桩式地锚由大直径桩、承台、尾梁、耳环、肋板、支承板等部构件组成,尾梁和耳环用以扣挂主缆,桩和支承板通过肋板、承台组成整体结构。如图

1所示,当桩式地锚受主缆拉力 T 作用时,桩和侧板将同时发生水平位移 x_0 、转角 ϕ_0 ,并在桩或支撑板与土介质接合面上产生土抗力 q_y 、 E_x 。桩底面转动 φ_h 后,还会产生与转动相反的抵抗力矩 M_h 。这些力系构成了桩式地锚的抗推承载力和抗弯承载力,是本文讨论的重点。桩式地锚的抗拔承载力除了结构自重、桩土周边摩阻力 F 外,还有侧土抗力产生的摩阻力 F_1 。通过这些力系的平衡分析,方可得到正确的承载力和桩身配筋计算方法。

2 计算方法分析

2.1 桩顶变位及土抗力计算分析

(1) 外力

作用于尾梁上(B 点)的拉力 T 可分解为作用于桩顶中心 O 点的水平推力 H_t 、上拔力 T_t 、偏心弯矩 M_t ,且有

$$H_t = T \cdot \cos \alpha \tag{1}$$

$$T_t = T \cdot \sin \alpha \tag{2}$$

$$M_t = e_1 H_t + e_2 T_t = T (e_1 \cdot \cos \alpha + e_2 \cdot \sin \alpha) \tag{3}$$

如果拉力 T 作用于耳环上 C 点,则弯矩为

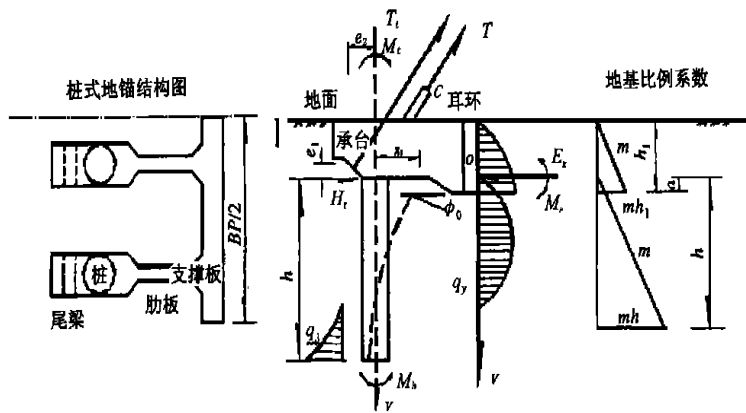


图 1 桩式地锚计算图式

$$M_{tc} = \frac{T}{n} (e_{c1} \cdot \cos \alpha - e_{c2} \cdot \sin \alpha) \quad (4)$$

由于 M_t 与 M_k 的数量差别, 甚至方向差别, 同样的拉力会产生不同的后果, 所以应当重视传力点位置的设计。两者比较, 显然把传力点设在桩的前方为好, 但这不影响计算分析方法。上式中 α 为拉力 T 的倾角。

(2) 桩顶变位与板侧土抗力的相关性

为了说明本文方法同桥规方法的相关性、一致性, 首先简要地叙述桥规所依据的桩基计算理论。埋置于土质中桩的受力行为类同于弹性地基梁。地基反力 q (桩侧土抗力) 符合温克尔假定, $q = Kxb_1 = m \cdot y \cdot x \cdot b_1$ 。这里, K 为随桩的入土深度 y 呈直线比例增长的地基系数, m 为地基土比例系数, b_1 为桩计算宽度, x 为桩轴线水平位移。应用内力平衡原则, 可建立桩轴挠度曲线微分方程式

$$EI \cdot \frac{d^4 x}{dz^4} + m \cdot y \cdot x \cdot b_1 = 0 \quad (5)$$

令 α 为反映桩-土刚度的比例系数, 且 $\alpha = (mb_1/EI)^{1/5}$, 代入上式, 然后用初参数法或用幂级数法, 解式 (5), 便可得到桥规所列的一系列公式, 该表中的 A 、 B 、 C 、 D 为以换算深度 $\alpha \cdot y$ 为变量的三角函数, 所以, 又可以把它进一步归并为

$$x_0 = \frac{H_0}{\alpha^3 EI} Y_{0h} + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} Y_{0m} + \frac{M_h}{\alpha^2 EI} Y_{0mh} \quad (6)$$

$$\varphi_0 = \frac{H_0}{\alpha^2 EI} \varphi_{0h} + \frac{M_0}{\alpha EI} \varphi_{0m} + \frac{M_h}{\alpha EI} \varphi_{0mh} \quad (7)$$

$$M_h = -\varphi_n C_0 I_0 = \frac{H_0}{\alpha} M_{hh} + M_0 M_{hm} \quad (8)$$

由以上 3 式, 并设定新的变位系数: A_x 表示单位水平力 ($H_0=1$) 产生的桩顶水平位移; B_x 表示单位弯矩 ($M_0=1$) 产生的桩顶水平位移; C_φ 表示单位水平力产生的桩顶转角, D_φ 表示单位水平弯矩产生的桩顶转角, 则有

$$A_x = \frac{1}{\alpha^3 EI} (Y_{0h} + M_{hh} \cdot Y_{0mh}) \quad (9)$$

$$B_x = \frac{1}{\alpha^2 EI} (Y_{0m} + M_{hm} \cdot Y_{0mh}) \quad (10)$$

$$C_\varphi = \frac{1}{\alpha^2 EI} (\varphi_{0h} + M_{hm} \cdot \varphi_{0mh}) = B_x \quad (11)$$

$$D_\varphi = \frac{1}{\alpha EI} (\varphi_{0m} + M_{hm} \cdot \varphi_{0mh}) \quad (12)$$

则 (6)、(7) 可简便地表示为

$$X_0 = H_0 \cdot A_x + M_0 \cdot B_x \quad (13)$$

$$\varphi_0 = H_0 \cdot C_\varphi + M_0 \cdot D_\varphi \quad (14)$$

(3) 支撑板侧土抗力计算公式

式 (11) 和式 (12) 中 X_0 和 φ_0 为桩顶 O 点受水平力 H_0 和 M_0 共同作用时产生的水平位移和转角。对于普通单排桩基, 把式 (2) 和 (3) 中的 H_t 、 M_t 代为 H_0 、 M_0 , 则可完成全部计算。本文的不同点在于, 桩顶变位会使支撑板正面产生与此变位有关的土抗压力 E_x , 会平衡 H_t 和 M_t , 因此需要进一步研究支撑板土抗力与变位的关系。

设支撑板高度为 h_1 (从地面处起计算), 宽度为 B_p 。当支撑板随桩顶水平位移 x_0 转动 φ_0 时, 深度 y 处单位宽度 ($B_p=1$) 上的土抗力强度为

$$q_{y1} = -my [x_0 + (h_1 - y) \varphi_0] \quad (15)$$

支撑板侧面总土抗力 E_x 和土抗力矩 M_{Ex} 为

$$\begin{aligned} E_x &= \int_0^{h_1} -q_{y1} dy \\ &= -m \left(\int_0^{h_1} x_0 \cdot y \cdot dy + \int_0^{h_1} \varphi_0 h_1 \cdot y \cdot dy - \int_0^{h_1} \varphi_0 y^2 dy \right) \\ &= -x_0 F_c - \varphi_0 S_0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$M_{Ex} = \int_0^{h_1} -q_y (h_1 - y) dy = -x_0 S_c - \varphi_0 I_c \quad (17)$$

式 (16) 和式 (17) 中, 负号表示 E_x 、 M_{Ex} 与 x_0 、 φ_0 方向相反。 F_c 、 S_c 、 I_c 分别为支撑板侧向地

基系数图形的面积、面积矩、惯性矩。

$$F_c = \frac{1}{2} m h_1^2 \quad (18)$$

$$S_c = \frac{1}{6} m h_1^3 \quad (19)$$

$$I_c = \frac{1}{12} m h_1^4 \quad (20)$$

把式 (2)、式 (3)、式 (16)、式 (17) 代入式 (13)、式 (14) 得

$$x_0 = (H_t + E_x \cdot \frac{B_p}{n}) A_x + (M_t + M_{Ex} \cdot \frac{B_p}{n}) B_x \quad (21)$$

$$\varphi_0 = (H_t + E_x \cdot \frac{B_p}{n}) C_\varphi + (M_t + M_{Ex} \cdot \frac{B_p}{n}) D_\varphi \quad (22)$$

式中, n 为桩式地锚的桩数; B_p 为支撑板沿横桥向的宽度; B_p/n 表示把支撑板侧的土抗力分配到每一根桩上; T 、 H_t 、 M_t 为一根桩上作用的外力。

(4) 桩顶变位计算公式

把式 (16) 和式 (17) 代入式 (21) 和式 (22), 引入新的计算系数 A_{xc} 、 B_{xc} 、 $C_{\varphi c}$ 、 $D_{\varphi c}$, 表示考虑支撑板侧土抗力, 联解方程, 最后得到计算桩式地锚桩顶变位 x_0 、 φ_0 的公式

$$x_0 = [H_t(A_x \cdot D_{\varphi c} - C_\varphi \cdot B_{xc}) + M_t(B_x \cdot D_{\varphi c} - D_\varphi \cdot B_{xc})] / (A_{xc} \cdot D_{\varphi c} - B_{xc} \cdot C_{\varphi c}) \quad (23)$$

$$\varphi_0 = [H_t(C_\varphi \cdot A_{xc} - A_x \cdot C_{\varphi c}) + M_t(D_\varphi \cdot A_{xc} - B_x \cdot C_{\varphi c})] / (A_{xc} \cdot D_{\varphi c} - B_{xc} \cdot C_{\varphi c}) \quad (24)$$

$$\text{式中, } A_{xc} = 1 + \frac{B_p}{n} (A_x F_c + B_x S_c) \quad (25)$$

$$B_{xc} = \frac{B_p}{n} (A_x S_c + B_x I_c) \quad (26)$$

$$C_{\varphi c} = \frac{B_p}{n} (C_\varphi F_c + D_\varphi S_c) \quad (27)$$

$$D_{\varphi c} = 1 + \frac{B_p}{n} (C_\varphi S_c + D_\varphi I_c) \quad (28)$$

2.2 桩式地锚水平承载能力验算

桩式地锚的水平承载能力由桩的抗剪和抗弯能力、容许水平位移、桩和支撑板侧土抗力等要素组成。为了保证桩式地锚不致倾倒, 其水平承载能力必须满足以下要求:

(1) 桩顶水平位移 $x_0 \leq 6.0 \text{ mm}$, 这在桥规中作了规定。其根据一是我国采用的钻孔桩系低配筋结构, 桩顶水平位移到 6.0 mm 时, 桩已微裂; 二是分析 m 值时, 已限定 $x_0 \leq 6.0 \text{ mm}$ 。所以 m 值的使用条件必须控制在研究范围之内。

(2) 支撑板侧土抗力 E_x 必须小于支撑板侧土体的被动土压力 E_p 。

当结构物在地基接触面上产生相对位移时, 接触面上必须产生土抗力。这是保持结构平衡的因素之

一, 已在桩基础、轻台坦拱、弹性地基板、梁等结构分析中广泛应用。桩式地锚的侧向弹性稳定性, 也与支撑板侧向的土抗力有关。但因土抗力是由板侧土体的弹性压缩产生的, 如果板侧推力很大, 超过了土体的被动土压力, 土体就会产生破棱体滑动, 不再具备提供土抗力的条件。所以, 为确保安全, 安全系数 n_c 应大于 2.0, 对于支撑板, 有

$$E_x \leq \frac{1}{2} E_p = \frac{1}{2n} B_p h_1 [\frac{1}{2} h_1 \cdot r \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2)] \quad (29)$$

式中, r 、 φ 、 c 为土的容重、内摩擦角、粘聚力。

(3) 基于同一原则, 桩侧土桩层力 σ_y 层小于桥规的要求, 即

$$\sigma_y = q_y / b_1 \leq \frac{4}{\cos \varphi} [r (y + h_1 - a) \text{tg} \varphi + c] \quad (30)$$

式中, y 为桩顶点 o 点以下深度坐标, q_y 为 y 点的土抗力, 可按下式计算

$$q_y = \alpha^2 [(H_t - E_x) / \alpha] \sigma_{h \cdot \max} + (M_t - M_{Ex}) \sigma_{m \cdot \max} \quad (31)$$

式中, $\sigma_{h \cdot \max}$ 、 $\sigma_{m \cdot \max}$ 为桩侧最大土拉力系数, 可查有关文献。

由于桩顶埋入较深, 式 (30) 条件均满足, 可不必详细计算。

2.3 桩式地锚抗拔能力验算

桩式地锚的抗拔能力由结构自重 G 、支撑板侧土抗力产生的摩阻力 F_1 和桩侧摩阻力 F_2 部分构成, 考虑安全系数 α 之后, 得到抗拔能力验算式为

$$T_t \leq \frac{1}{2} [G + f(B_p/n) h_1 E_x + \pi d h \tau_p] = [T] \quad (32)$$

式中, G 为一根桩及肋板和 $1/n$ 支撑板重力; d 、 h 、 n 为桩直径、长度、根数; f 为土与混凝土摩擦系数, 取 0.4; B_p 、 h_1 为支撑板宽度、高度; τ_p 为桩周土摩阻力。

缆索吊装系统在拱桥施工中, 特别是在大跨径拱桥施工中是经常采用的重要方法, 应用桩式地锚, 效果显著, 值得推广。

目前, 国内的有关书籍、文献、规范都没能系统地论述地锚或类似结构物的计算方法。本文提供的计算方法可提供同行参考。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计规范合订本. 北京: 人民交通出版社.
- [2] 中华人民共和国交通部. 墩台基础设计.
- [3] 中华人民共和国交通部. 基础工程.