

文章编号:1671-8879(2005)06-0001-05

悬锚式挡土墙结构设计与分析

陈忠达¹, 汪东升², 王志谦¹, 高江平¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 天津市公路管理局, 天津 300170)

摘要:悬锚式挡土墙是新型的组式支挡结构。以两层锚定板的悬锚式挡土墙为对象,依据有限元分析结果,研究了悬锚式挡土墙的结构设计和稳定性分析方法。提出了以朗金主动土压力为基础的墙背土压力计算方法。给出了墙身结构设计和锚定板与拉杆的设计方法;并给出了基于悬臂式挡土墙的稳定性分析方法和基于锚定板挡土墙的折线破裂面稳定性分析方法。工程实践表明,给出的计算、分析和设计方法具有较强的应用价值。

关键词:道路工程;悬锚式挡土墙;土压力;结构设计;稳定性

中图分类号:U417.11

文献标识码:A

Structural design and calculation of suspended-anchor earth retaining wall

CHEN Zhong-da¹, WANG Dong-sheng², WANG Zhi-qian¹, GAO Jiang-ping¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Highway Administration of Tianjin, Tianjin 300170, China)

Abstract: The earth retaining wall is a new kind of compound supporting and retaining structure. Taking the double-layer suspended-anchor earth retaining wall as research object, based on the finite element method, the paper studies this kind of retaining wall's design method, and puts forward its calculation method, which is based on Rankine active earth pressure, gives the design demand of wall structure, presents the method of designing anchor plate and drawbar, delivers the stability analysis method toward cantilever retaining wall and polygonal fracture plane stability analysis method. An example results show that this method can be widely used in engineering design. 6 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; suspended-anchor earth retaining wall; earth pressure; structure design; stability

0 引言

随着中国高等级公路建设步伐的加快,特别是高等级公路建设向中西部地区的推进,路基挡土墙应用愈来愈多。为了适应中西部地区的地形、地质、土质等条件,满足高等级公路建设的需要,研究开发

新型的支挡结构具有十分重要的现实意义^[1]。

悬锚式挡土墙是利用锚定板技术与悬臂式挡土墙组合而成的一种轻型支挡构造物,它是由钢筋混凝土墙身(指立壁和底板部分)、锚定板、拉杆及充填在墙身与锚定板之间的填料构成的一种复合式结构^[2]。它对地基承载力的要求低,而且由于锚定板

收稿日期:2004-10-15

基金项目:交通部“九五”行业联合科技攻关项目(95-05-58-02)

作者简介:陈忠达(1956-),男,江苏无锡人,长安大学教授。

对墙身的约束作用,可有效地减小立壁根部的弯矩,增加墙身的建筑高度。本文以两层锚定板为对象,系统研究悬锚式挡土墙的设计方法。

1 悬锚式挡土墙墙背土压力计算

悬锚式挡土墙见图 1。为保证悬锚式挡土墙安



图1 悬锚式挡土墙示意图

全可靠,计算不过于繁杂,在结构设计和内部稳定性分析时,作用于悬锚式挡土墙墙背上的土压力近似按朗金主动土压力理论计算,但需修正,即

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

$$p = \gamma h K_a \eta \quad (2)$$

式中: E_a 为墙背土压力($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$); p 为计算点土压应力(kPa); γ 为填土的容重($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); H 为挡土墙计算高度(m); h 为挡土墙计算截面的高度(m); η 为土压力扩大系数; K_a 为朗金主动土压力系数。

墙顶填土表面水平时

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (3)$$

墙顶填土倾斜平面时

$$K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}} \quad (4)$$

式中: β 为墙顶填土表面与水平面的倾角($^\circ$); φ 为填土的内摩擦角($^\circ$)。

由有限元分析和模型试验结果,并结合锚定板挡土墙结构,扩大系数 $\eta = 1.05 \sim 1.40$, 由于悬锚式挡土墙具有较大的刚性,一般可取 $\eta = 1.20$ 。

对于粘性土,常按等效内摩擦角法近似计算土压力,一般当墙高在 6 m 以下时,用等效内摩擦角 $\varphi_0 = 35^\circ \sim 40^\circ$ 代替 c, φ ; 当墙高在 6 m 以上时,用 $\varphi_0 = 30^\circ \sim 35^\circ$ 代替 c, φ 。等效内摩擦角 φ_0 也可按土压力相等原理和抗剪强度相等原理来确定。

墙背土压力 E_a 的方向与墙顶填土表面平行,即与水平面成 β 角。

2 悬锚式挡土墙结构设计

2.1 墙身设计

悬锚式挡土墙墙身高度 H 由工程实际确定,根据有限元分析结果,墙身顶宽 b 可按 $b/H = 0.04 \sim 0.05$ 确定,墙背竖直,墙面坡度为 $1:0.02 \sim 1:0.05$ 。底板一般水平设置,厚度不应小于 30 cm。拉杆在竖直方向一般按两层布设,水平间距为 3.0

~ 5.0 m。挡土墙分段长度不应大于 $15 \sim 20$ m,段间应设置沉降缝和伸缩缝。

2.2 锚定板及拉杆设计

锚定板一般采用钢筋混凝土矩形板,更多采用方形板,竖向埋于填土中,它承受由拉杆传递的拉力,其值等于拉杆与立壁连接处的作用反力,拉杆与填土之间的摩擦力忽略不计。因此锚定板的面积应根据拉杆拉力及锚定板的容许抗拔力确定,即

$$A_F = T/[R] \quad (5)$$

式中: A_F 为锚定板面积(m^2); T 为拉杆拉力(kN); $[R]$ 为锚定板单位面积容许抗拔力(kPa)。

拉杆一般水平设置。为了使锚定板正常发挥作用,同时还要保证锚定板具有足够的稳定性,应将锚定板埋设在滑动破裂面的后方 $1.5 \sim 2.0$ m 以上。因此拉杆长度为

$$L \geq b_3 + h \tan[45^\circ - (\varphi/2)] + (1.5 \sim 2.0) \quad (6)$$

式中: L 为拉杆计算长度(m); b_3 为踵板宽度(m); h 为计算点(上、下层拉杆处)至墙底板下缘距离(m)。

拉杆直径不得小于 22 mm,但亦不宜大于 32 mm,其值可按下式计算

$$d = 2 \times 100 \times \sqrt{T/\pi[\sigma]} + 0.2 \quad (7)$$

式中: d 为拉杆计算直径(cm); $[\sigma]$ 为拉杆的容许拉应力(kPa); 预防钢材锈蚀的安全储备为 0.2 cm。

2.3 拉杆拉力计算

拉杆拉力计算模型属超静定结构,可采用力法计算。对于布设于梁(简化而得)上的两层拉杆可作为多余约束,用多余未知力 T_1 代表上层拉杆的拉力, T_2 代表下层拉杆的拉力。那么力法方程为

$$\Delta_y + \Delta_p = 0 \quad (8)$$

式中: Δ_y 为基本结构在 T_i 单独作用下 i 点处沿 T_i 方向的位移; Δ_p 为基本结构在荷载单独作用下在 i 点处沿 T_i 方向的位移。

基本体系在单位力 $T_1 = 1, T_2 = 1$, 荷载作用下的内力图为 M'_1, M'_2, M'_p , 计算位移为 $\delta_{11}, \delta_{21}, \delta_{12}, \delta_{22}$ 和 Δ_{1p}, Δ_{2p} , 其中 $\delta_{21} = \delta_{12}$, δ_y 为基本结构在 $T_i = 1$ 时单独作用下 i 点处沿 T_i 方向的位移。则有

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} T_1 + \delta_{12} T_2 + \Delta_{1p} &= C_1 \\ \delta_{21} T_1 + \delta_{22} T_2 + \Delta_{2p} &= C_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: C_1 为上层拉杆支点处的柔度系数($\text{m} \cdot \text{N}^{-1}$); C_2 为下层拉杆支点处的柔度系数($\text{m} \cdot \text{N}^{-1}$)。

当已知 C_1, C_2 时,根据方程(9),即可求得拉杆拉力 T_1, T_2 。

3 悬锚式挡土墙稳定性分析

悬锚式挡土墙是复合结构,要保证其稳定性,须保证墙身及填土破裂面共同构成的整体的稳定性。

整体稳定性分析的方法主要有:平面滑裂面法、圆弧滑面法、Kranz 法、折线破裂面法等^[1~2]。本文综合了悬臂式挡土墙稳定性分析方法和锚定板挡土墙稳定性分析方法,结合悬锚式挡土墙的特点,提出了基于悬臂式挡土墙的稳定性分析方法和基于锚定板挡土墙的折线破裂面稳定性分析方法^[3,4]。

3.1 悬臂墙稳定性分析法

以悬臂式挡土墙为基础的稳定性分析图式如图2所示,其中图2(b)为破裂面受力状况。

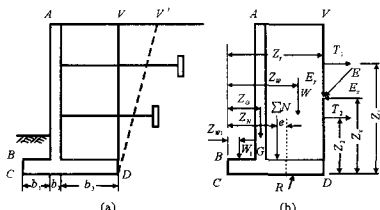


图2 悬臂墙稳定性分析图式

(1)抗滑稳定性验算。抗滑稳定性用抗滑稳定系数 K_c 表示

$$K_c = (F + T_1 + T_2)/E_x = [f(G + W + W_1 + E_x) + T_1 + T_2]/E_x \geq 1.3 \quad (10)$$

式中: F 为拉杆水平间距 S_x 范围内的抗滑力(kN); E_x 为 S_x 范围内 VD 面主动土压力的水平分力(kN); E_y 为 S_x 范围内 VD 面主动土压力的竖向分力(kN); G 为 S_x 范围内墙身自重(kN); W 为 S_x 范围内墙踵板上填土和车辆荷载的重力(kN); W_1 为 S_x 范围内墙趾板上填土的重力(kN), 由于 W_1 较小, 为简化计算, 可忽略不计; S_x 为拉杆的水平间距(m); f 为墙底板底面与地基之间的摩擦系数。

(2)地基承载力和合力偏心距验算。合力偏心距为

$$e = \frac{B}{2} - Z_N \quad (11)$$

$$Z_N = \frac{\sum M_y - \sum M_0}{\sum N}$$

$$\frac{GZ_G + WZ_W + W_1Z_{W1} + E_yZ_y + T_1Z_1 + T_2Z_2 - E_xZ_x}{G + W + W_1 + E_y} \quad (12)$$

在偏心荷载作用下, 基地的最大法向应力 σ_1 和

最小法向应力 σ_2 分别为

$$\sigma_1 = \frac{\sum N}{A} + \frac{\sum M}{W_E} = \frac{G + W + W_1 + E_y}{BS_x} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0]$$

$$\sigma_2 = \frac{\sum N}{A} - \frac{\sum M}{W_E} = \frac{G + W + W_1 + E_y}{BS_x} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \quad (13)$$

式中: $\sum N$ 为作用于基地的合力的法向分力(kN); Z_N 为 $\sum N$ 对墙趾的力臂(m); A 为基底面积(m^2), $A = BS_x$; $\sum M$ 为各力对中心轴的力矩和(kN·m); W_E 为基底截面模量(m^3), $W_E = B^2 S_x / 6$; e 为合力偏心距($e \leq B/6$)(m); B 为墙底板宽度(m)。

应该说明, 锚定板抗拔力 T (即拉杆实际拉力) 与锚定板埋设位置有关, 也就是说, 锚定板距离破裂面 $V'D$ 越远, 抗拔力越大 (或者说抗拔力可得到充分发挥)。根据式(6), 并参考锚定板挡土墙的使用经验, 一般认为距离破裂面 $1.5 \sim 2$ m 时, 锚定板抗拔力可得到比较充分的发挥。因此, 在整体稳定性验算时, 当锚定板距离破裂面 $V'D < 2$ m 时, 计算抗拔力需按下式折减 (线性折减)

$$\left. \begin{aligned} T'_i &= T_i; & L'_i &\geq 2 \text{ m} \\ T'_i &= \frac{L'_i}{2} T_i & L'_i < 2 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: T_i 为锚定板设计抗拔力 (即拉杆拉力) (kN); L'_i 为锚定板至破裂面的距离 (即破裂面 $V'D$ 至锚定板的拉杆长度) (m)。

3.2 折线破裂面稳定性分析法

以锚定板挡土墙为基础的稳定性分析方法是: 在稳定性分析时, 将墙身和锚定板前的填土作为一个整体进行考虑。根据上、下层拉杆长度的不同, 分为4种情况。

(1) 上层拉杆长度 \leq 下层拉杆长度 (图3)。上下层锚定板的稳定性分析见图3(a), 两分析图式基本相似, 这时悬锚式挡土墙的稳定性受下层锚定板的控制, 即应以下层锚定板图式来控制稳定性分析。破裂面 $ABCDGV$ 的受力情况见图3(b)。

①抗滑稳定性验算。假想墙背 VG 上土压力 E 在 CD 面上的滑动力为

$$T_E = E_x - fE_y = E(\cos\varphi - f\sin\varphi) \quad (15)$$

式中: E 为作用在 VG 面上的库仑主动土压力 ($kN \cdot m^{-1}$)。

土体自重 W 、 W_1 、墙身自重 G 和土压力的竖向

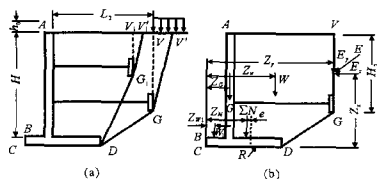


图3 折线法分析图式(第一种情况)

分力 E_y 在 CD 面上的摩擦阻力为

$$R_w = f(W + W_1 + G + E_y) \quad (16)$$

抗滑稳定性为

$$K_1 = \frac{R_w}{T_E} = \frac{f(W + W_1 + G + E_y)}{E(\cos\varphi - f\sin\varphi)} \geq 1.3 \quad (17)$$

② 基底应力和合力偏心距验算。合力偏心距为

$$e = \frac{B}{2} - Z_N \quad (18)$$

$$Z_N = \frac{\sum M_y - \sum M_0}{\sum N} = \frac{WZ_w + W_1Z_{w1} + GZ_G + E_yZ_y - E_xZ_x}{W + W_1 + G + E_y} \quad (19)$$

偏心荷载下基底的极大和极小法向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sum N}{A} + \frac{\sum M}{W_E} = \frac{W + W_1 + G + E_x}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \\ \sigma_2 &= \frac{\sum N}{A} - \frac{\sum M}{W_E} = \frac{W + W_1 + G + E_x}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 上层拉杆长度 > 下层拉杆长度, 但上层锚定板位于下层破裂面 GV' 之内(图4)。对于第二种情况, 其稳定性也受下层锚定板的控制。因此, 实质上与第一种情况相似, 有关的计算见式(15)~式(20)。

(3) 上层拉杆长度 > 下层拉杆长度, 且上层锚定板位于下层破裂面 GV' 之外(图5)。挡土墙稳定性同时受上、下层锚定板控制, 其分析图式见图5(a)。

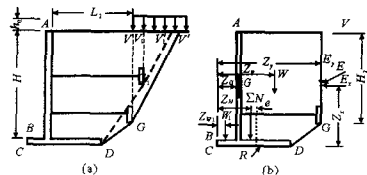


图4 折线法分析图式(第二种情况)

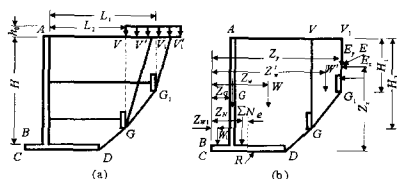


图5 折线法分析图式(第三种情况)

破裂体 $ABCDGG_1V_1$ 的受力状况见图5(b)。

① 抗滑稳定性验算。土压力 E 在 CD 面上的滑动力为

$$T_E = E_x - fE_y = E(\cos\varphi - f\sin\varphi) \quad (21)$$

其中, E 为作用在 V_1G_1 面上的库仑主动土压力 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$); 土体和墙身自重 ($W + W' + W_1 + G$) 以及土压力的竖向分力 E_y 在 CD 面上的摩擦阻力为

$$R_w = f(W + W' + W_1 + G + E_y) \quad (22)$$

抗滑稳定性为

$$K_1 = \frac{R_w}{T_E} = \frac{f(W + W' + W_1 + G + E_y)}{E(\cos\varphi - f\sin\varphi)} \geq 1.3 \quad (23)$$

② 基底应力和合力偏心距验算。合力偏心距为

$$e = \frac{B}{2} - Z_N \quad (24)$$

$$Z_N = \frac{\sum M_y - \sum M_0}{\sum N} = \frac{WZ_w + W'Z_{w'} + W_1Z_{w1} + GZ_G + E_yZ_y - E_xZ_x}{W + W' + W_1 + G + E_y} \quad (25)$$

偏心荷载下基底的极大和极小法向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sum N}{A} + \frac{\sum M}{W_E} = \frac{W + W' + W_1 + G + E_x}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \\ \sigma_2 &= \frac{\sum N}{A} - \frac{\sum M}{W_E} = \frac{W + W' + W_1 + G + E_x}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \end{aligned} \quad (26)$$

(4) 上层拉杆长度 >> 下层拉杆长度(图6)。挡土墙稳定性受上层锚定板控制, 如图6(a)所示。其破裂体 $ABCDG_1V_1$ 的受力状况如图6(b)所示。

① 抗滑稳定性验算。作用于假想墙背 V_1G_1 上的土压力 E 在 CD 上的滑动力为

$$T_E = E_x - fE_y = E(\cos\varphi - \sin\varphi) \quad (27)$$

式中: E 为作用于 V_1G_1 面上的库仑主动土压力 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)。

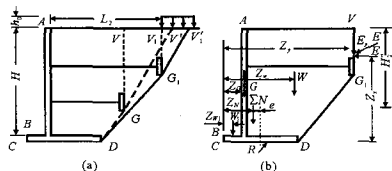


图6 折线法分析图式(第四种情况)

土体和墙总重($W+W_1+G$)以及土压力的竖向分力 E_y 在CD面上的摩擦阻力为

$$R_w = f(W+W_1+G+E_y) \quad (28)$$

抗滑稳定性为

$$K_s = \frac{R_w}{T_E} = \frac{f(W+W_1+G+E_y)}{E(\cos\varphi - f\sin\varphi)} \geq 1.3 \quad (29)$$

②基底应力和合力偏心距验算。合力偏心距为

$$e = \frac{B}{2} - Z_N \quad (30)$$

$$Z_N = \frac{\sum M_y - \sum M_0}{\sum N} = \frac{WZ_w + W_1Z_{w_1} + GZ_G + E_yZ_y - E_xZ_x}{W+W_1+G+E_y} \quad (31)$$

偏心荷载下基底的最大和最小法向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sum N}{A} + \frac{\sum M}{W_E} = \\ &= \frac{W+W_1+G+E_y}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \\ \sigma_2 &= \frac{\sum N}{A} - \frac{\sum M}{W_E} = \\ &= \frac{W+W_1+G+E_y}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) \leq [\sigma_0] \end{aligned} \quad (32)$$

对悬锚式挡土墙的稳定性的分析实际上就是验算拉杆的长度及墙底板的宽度是否满足要求。当悬锚式挡土墙不能满足稳定性的要求时,则应适当调整拉杆的长度及墙底板的宽度,然后重新验算,直至满足要求为止^[5,6]。

4 结 语

(1)悬锚式挡土墙受锚定板的约束作用,具有较强的结构整体性,因而其墙背土压力较朗金主动土压力计算结果大。为简化计算,在朗金主动土压力计算的基础上,应乘上扩大系数 $\eta=1.20$ 。其方向为与墙顶填土表面平行。

(2)针对悬锚式挡土墙的特点,提出了墙身、锚

定板和拉杆的设计方法,以及拉杆的内力计算方法。

(3)除保证悬锚式挡土墙结构内部稳定外,还应对象墙身及填料共同构成的整体进行稳定性分析。

(4)综合了悬臂式挡土墙和锚定板挡土墙的稳定性的分析,提出了基于悬臂式挡土墙的稳定性的分析方法和基于锚定板挡土墙的折线破裂面稳定性分析方法。

参考文献:

References:

- [1] 陈忠达.公路挡土墙设计[M].北京:人民交通出版社,1999.
CHEN Zhong-da. Design of highway earth retaining wall[M]. Beijing: People's Communications Press, 1999.
- [2] 卢肇钧.锚定板挡土结构[M].北京:中国铁道出版社,1989.
LU Zhao-jun. Anchor plate earth-retaining structure[M]. Beijing: China Railway Press, 1989.
- [3] 王志谦.悬锚式挡土墙结构研究[D].西安:长安大学,2000.
WANG Zhi-qian. The research of suspended-anchor earth retaining wall[D]. Xi'an: Chang'an University, 2000.
- [4] 邓子胜,邹银生,王贻彪.考虑位移非线性影响的挡土墙土压力计算模型研究[J].中国公路学报,2004,17(2):24-27.
DENG Zi-sheng, ZOU Yin-sheng, WANG Yi-sun. Study of calculation model of the earth pressure for retaining wall considering the nonlinear influence of the displacement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 24-27.
- [5] 高江平,胡长水,俞茂宏.网状及条带式加筋土挡墙加筋应变的测试[J].长安大学学报(自然科学版),2004,24(5):24-26.
GAO Jiang-ping, HU Chang-shui, YU Mao-hong. Testing of pulling strains of both striped and netted reinforcement wall[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(5): 24-26.
- [6] 张友葩,高永涛,吴顺川,等.失稳挡土墙加固数值分析[J].交通运输工程学报,2003,3(4):17-21.
ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Numerical analysis of reinforcement for unstable retaining wall[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 17-21.