

基于力传递模型的框架预应力锚杆支护结构计算

胡明军 赖 勇

(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

【摘 要】 采用古典铁摩辛柯理论对挡土板受力进行了详细推导, 发现挡土板所受弯矩较大, 弯矩通过与四周框架的固定传递到框架内部引起框架弯矩值的增大, 因此提出一种基于力传递的计算模型, 可以更为准确地对框架预应力锚杆支护结构的受力进行计算。利用 C++ BUILDER, 结合实例开发出相应的计算软件, 结果表明, 提出的设计理论是合理的。

【关键词】 框架预应力锚杆; 铁摩辛柯理论; C++

【中图分类号】 TU 318

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.02.003

Computation of Frame Supporting Structure With Pre-stressed Anchor Bars Based on Force Transfer

Hu Mingjun, Lai Yong

(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

【Abstract】 Through the computation of bulkhead with classical theory of Timoshenko, it was found that the moment on bulkhead was large, and the moment was transferred to the beams. This article deduced a model with force transfer, it could better worked on the force computation of the structure. With C++ BUILDER program, linking with real instance, a computing software was developed. As the result showed, the theory of this paper was reasonable.

【Key words】 frame supporting structure with pre-stressed anchor bars; theory of Timoshenko; C++ program

0 引 言

框架预应力锚杆是近几年随着支挡结构的发展而被提出的一种新型支挡结构, 其利用钢筋混凝土框架、锚杆和土体的共同作用来提高边坡土体力学性能, 增加边坡的整体稳定性, 并可结合绿化措施, 对保证公路、铁路和建筑物的使用安全, 防止滑坡发生, 保护周边环境具有现实意义^[1]。

框架预应力锚杆支护结构的设计归根到底即力的计算问题, 在以往的研究中, 往往侧重表现整个锚固系统的某一方面进行计算。文献[2]采用倒梁法, 把土压力作为外荷载作用在框架梁上进行设计, 但未考虑锚杆预应力的计算和土与结构的相互作用。文献[3]考虑土与结构的相互作用, 把框架预应力锚杆设计过程分为开挖和工作两个阶段, 提出了一种侧移控制的设计方法, 可以合理地确定施加预应力的方向和支挡结构的侧移。另外一些研究则将力分

散到结构各个部分进行简化^{[4][5]}, 没有形成整体系统的计算理论。本文提出基于力传递的系统计算模型, 考虑了以往研究忽略的板的计算方式, 使计算结果更符合系统的实际受力情况。

1 框架预应力锚杆结构模型

框架预应力锚杆支护结构由框架、挡土板、锚杆和墙后土体组成, 属于轻型挡土结构。框架部分为立柱、横梁及挡土板, 三者连接形成类似楼盖的竖向梁板结构体系, 锚杆锚头与框架在立柱与横梁交叉处连接, 内端锚固在土体中, 挡土板所受的土压力通过锚头传至钢拉杆, 再由拉杆周边砂浆握裹力传递至水泥砂浆中, 然后再通过锚固段周边土层的摩擦力传递到锚固区的稳定地层中, 以承受土压力或水压力对支挡结构的作用力。框架预应力锚杆支护结构立面与剖面模型见图 1 和图 2。

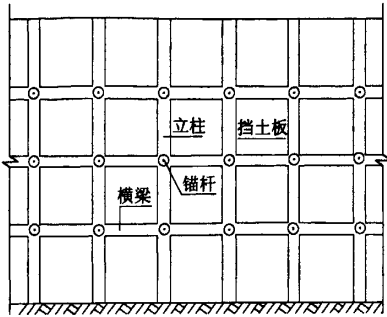


图1 框架预应力锚杆支护结构立面模型

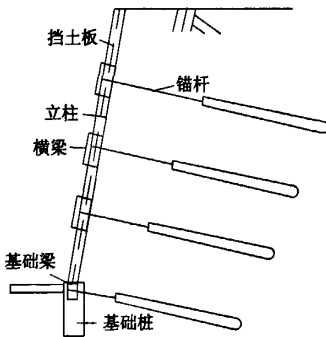


图2 框架预应力锚杆支护结构剖面模型

2 框架预应力锚杆结构受力分析

框架预应力锚杆结构受力分析主要包括四部分:墙后土体产生的土压力计算,挡土板受力计算,框架受力计算以及锚杆受力计算。基于力传递的计算方式,尽量考虑实际受力状态,避免过于简化引起计算的误差。力传递计算模型示意图见图3。

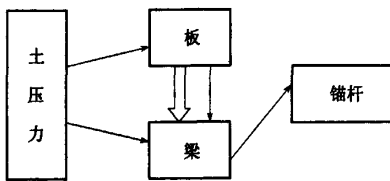


图3 力传递计算模型示意图

2.1 土压力计算

由于框架预应力锚杆进入工作状态后,坡体会向外产生一定的侧移,所以作用于支挡结构上的土压力可看作主动土压力,本文选取了库仑主动土压力计算模型,若土体为多层土,对土体参数可以采用加权平均的简化处理方法。

库仑主动土压力公式为:

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

主动土压力系数 K_a 为

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

土压力的分布式为

$$P_a = \gamma z K_a \quad (3)$$

由于墙后土层中有锚杆的存在,造成比较复杂的应力状态,确定岩土自重产生的锚杆挡土墙侧压力分布,应考虑锚杆层数、挡墙位移大小、支挡结构刚度和许多方法等因素,可简化为三角形、梯形或当地经验图形,而对岩质边坡以及坚硬、硬塑状粘土和密实、中密砂土类边坡,当采用逆作法施工的、柔性结构的多层锚杆挡墙时,侧压力分布可近似按图4确定。

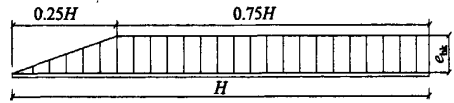


图4 框架预应力锚杆支护结构侧压力分布图

图4中 e_{hk} 按下式计算

对岩质边坡:

$$e_{hk} = \frac{E_{hk}}{0.9H} \quad (4)$$

对土质边坡:

$$e_{hk} = \frac{E_{hk}}{0.875H} \quad (5)$$

式中: e_{hk} 为侧向岩土压力水平分力标准值, kN/m^2 ; H 为挡土墙高度, m ; E_{hk} 为侧向岩土压力合力水平分力标准值, kN/m^2 ; E_{hk} 取值按图1中的边坡外侧各土层水平荷载标准值的合力之和 $\sum E_{ai}$ 。

2.2 挡土板受力分析

对于设置在现浇混凝土框架中间的挡土板,可以看成是四周固定的薄板,其一个方向上的尺寸远小于另外两个方向上的尺寸,即厚度远小于长度和宽度,运用弹性力学上的平面应力问题求解^[6]。

当面板受均布荷载 q_0 作用时(见图5)。

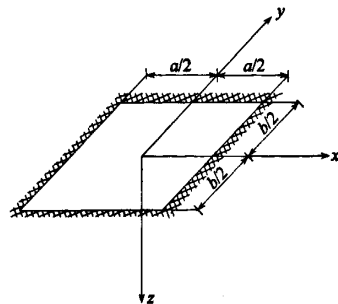


图5 四周固定薄板计算示意图

运用铁摩辛柯(S. T. Timoshenko)提出的叠加法,最终可得:

$$\frac{4q_0 a^2}{\pi^3} \frac{1}{i^4} \left(\frac{\alpha_i}{\text{ch}^2 \alpha_i} - \text{th} \alpha_i \right) - \frac{E_i}{i} \left(\text{th} \alpha_i + \frac{\alpha_i}{\text{ch}^2 \alpha_i} \right) - \frac{8ia}{\pi b} \times \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{F_m}{m^3} \frac{1}{\left(\frac{a^2}{b^2} + \frac{i^2}{m^2} \right)^2} = 0 \quad (i=1,3,5,\dots) \quad (6)$$

$$\frac{4q_0 b^2}{\pi^3} \frac{1}{i^4} \left(\frac{\beta_i}{\text{ch}^2 \beta_i} - \text{th} \beta_i \right) - \frac{F_i}{i} \left(\text{th} \beta_i + \frac{\beta_i}{\text{ch}^2 \beta_i} \right) - \frac{8ib}{\pi a} \times \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{E_m}{m^3} \frac{1}{\left(\frac{b^2}{a^2} + \frac{i^2}{m^2} \right)^2} = 0 \quad (i=1,3,5,\dots) \quad (7)$$

以上两组无穷线性方程组中的常数 E_1, E_3, E_5, \dots 和 F_1, F_3, F_5, \dots 可应用计算机编程求得。本文在该理论基础,利用 C++ 编写了四周固定薄板计算软件,取前四项进行计算,误差在 1% 以内,在程序中只需输入薄板长、宽和荷载,即可求得各项系数值。为方便应用,作者通过编程制作了一个参数表,根据两边比值即可查出所有数值(见附表 1)。

式中相关参数为:

$$\alpha_i = \frac{m\pi b}{2a}, \quad \beta_i = \frac{m\pi a}{2b} \quad (8)$$

通过上面线性方程组,最后可求得薄板的任意位置的弯矩:

$$(M_y)_{y=\pm \frac{a}{2}} = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{m+1}{2}} E_m \cos \frac{m\pi x}{a} \quad (9)$$

$$(M_x)_{x=\pm \frac{a}{2}} = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{m+1}{2}} F_m \cos \frac{m\pi y}{b} \quad (10)$$

则最大弯矩和最大挠度为:

$$\left| (M_{\max})_{x=0, y=\frac{a}{2}} \right| = \left| \sum_{i=4m+1}^{\infty} E_i - \sum_{i=4m+3}^{\infty} E_i \right| \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (11)$$

$$\left| (M_{\max})_{y=0, x=\frac{a}{2}} \right| = \left| \sum_{i=4m+1}^{\infty} F_i - \sum_{i=4m+3}^{\infty} F_i \right| \quad (m=0,1,2,\dots) \quad (12)$$

以正方形薄板为例:

此时 $a=b$, $\alpha_i = \beta_i = i\pi/2$, $E_i = F_i$ 线性方程组相同,取前四项进行计算精度误差在 1% 以下。由线性方程组,列出式子并通过计算得边上最大弯矩为

$$\left| M_{\max} \right| = \left| E_1 + E_5 - E_3 - E_7 \right| = 0.051720445q_0 a^2 \quad (13)$$

由此可见,对于挡土板传递给四周框架的弯矩是比较大的,在设计中必须予以考虑。

同时,由于板四周固定,作用在板上的均布荷载近似地向四周梁以各 1/4 面积受力进行传递,因此,作用在板上的力传递除包括力矩传递之外,还包括力传递。

2.3 框架受力分析

假定水平梁和竖向梁都不受扭矩作用。在文献 [2-5] 中,由于忽略对板的计算,因此将整个框架结构划分了计算单元,将作用于板上的土压力等值分配给水平梁和竖梁再进行简化计算,对水平梁,可看成是静定连续多跨梁,受力图见图 6。一般都将计算模型简化为等跨的五跨连续梁进行计算,且中间各跨的内力和配筋都按照第三跨来考虑。本文由于考虑了板的受力影响,将作用在板上的荷载和弯矩通过计算后传递到梁上,根据实际受力情况和设计出实际的跨数,借助计算机有限元计算工具,可以对梁做更为准确的分析。

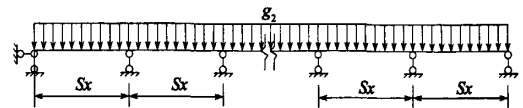


图6 横梁的计算模型

根据上图计算确定的最大弯矩还需在均布力产生的弯矩基础上叠加板传递给梁的弯矩值。

对于立柱,简化为一端为固定端的多跨超静定梁。结合侧压力分布规律,受力图见图 7。同时,也需在侧压力分布的基础上叠加板传递给梁的弯矩值。

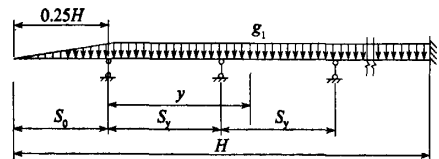


图7 立柱的计算模型

2.4 锚杆的计算

参照文献 [7] 中规定的计算方法并考虑整个支护结构绕边坡坡脚的转动稳定性验算。在对锚杆轴向拉力标准值进行计算时,取立柱计算模型,施加在立柱上的力为锚杆周围各 1/4 面积上的力,包括梁上的力和面板上的力,求得的支座反力作为轴向拉力标准值。确定此支座反力时每根立柱所承受的荷载 g_1 为相邻两跨锚杆水平间距的各 0.25 之间的土压力,所以有

当 $0 \leq y \leq 0.25H - S_0$ 时:

$$M_p = -\frac{1}{3} e_{nk} \frac{S_x}{H} (y + S_0)^3 \quad (14)$$

当 $0.25H - S_0 \leq y \leq 0.25H$ 时:

$$M_p = -\frac{1}{16} e_{nk} S_x H \left(y + S_0 - \frac{H}{6} \right) - \frac{1}{4} e_{nk} S_x \left(y + S_0 - \frac{H}{4} \right)^2 \quad (15)$$

2.5 稳定性分析

根据文献[7],对于土质边坡和较大规模的碎裂结构岩质边坡宜采用圆弧滑动法计算。整体稳定性验算采用圆弧滑动条分法,在给定一个滑移面的情况下可根据相应式子计算稳定性系数。通过建立滑移面搜索模型,可以找到最危险滑移面,进而可以求得最小安全系数,从而确定该系数是否满足稳定性检验的要求^{[9][10]}。

3 软件设计

本软件在 BORLAND C++ BUILDER6.0 集成开发环境中开发,集成了土力学相关计算以及铁摩辛柯理论的计算,并且支持直接将计算过程及结果生成 WORD 文件,可以作为框架预应力锚杆结构的辅助设计工具。软件计算界面及计算结果截图见图 8。



图 8 辅助计算软件

4 计算实例

某住宅建设小区一边坡,其高度为 11 m,倾角为 80° ,坡顶有厚 2.5 m 的堆载, $q=10 \text{ kN/m}^2$,土体为黄粘土,土的基本参数 $\gamma=16.5 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=20^\circ$, $c=16 \text{ kPa}$, $\mu=0.3$, $E_s=20 \text{ MPa}$ 。由于边坡正面需建民用住宅,因此对支挡结构侧移的要求比较高。

经过详细地与其它文献的方法^[3-5]进行对比计算,利用本文计算出来的模型在图 8 的设计情况下,横梁的计算值比用其它方法计算的数值低 17.87%,而立柱的值仅低了 0.32%。经过分析发现,当立柱的尺寸与横梁的尺寸相近时,利用两种方法计算的结果偏差较大,但如果立柱的尺寸与横梁尺寸相差较大时,则应用本文提出的计算模型可以计算出更加合理的设计值。

根据《建筑边坡工程技术规范》进行计算和验算,最终锚杆的参数见表 1。

表 1 锚杆参数表

锚杆编号	锚杆位置/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	杆体直径/mm	倾斜角度/ $^\circ$
1	2.5	6	10	32	15
2	5.5	7	10	32	15
3	8.5	9	10	32	15

框架设计总图见图 9。

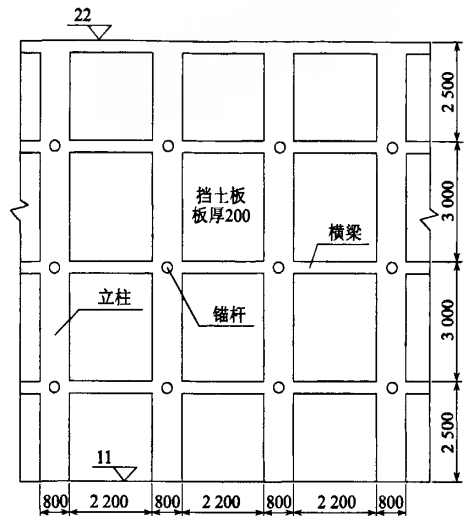


图 9 框架设计总图

经工程竣工后的应力检测结果证明结构稳定。

5 结论

1) 本文引入古典的铁摩辛柯叠加法对四周固定薄板进行计算,并利用 C++ 开发了计算程序,使框架预应力锚杆支护结构挡土板的设计有了理论依据,通过计算并用于工程设计的模型更具参考价值。

2) 通过对比计算,本文提出的计算方法与以往的计算方法不同主要体现在框架的数值差异上,利用本文提出的计算方法在数值上要低于其它方法,而相差程度则与框架设计尺寸有关,从工程角度来讲,利用本文提出的计算方法可以适当降低工程造价。

3) 通过数值计算,适当增大梁的面积可以降低梁上弯矩值,在进行设计时,可以结合工程造价进行梁的尺寸设计。

4) 近年来对框架预应力锚杆的设计逐渐由结构转变到细部设计参数研究上,并且对结构的细化部分进行了一些优化设计,从工程应用上来讲,这些研究工作都是十分必要的。

5) 由于框架、锚杆、挡土板、土体的协同工作是一个岩土与结构相互作用的问题,它们的空间协同工作还有待于进一步研究。

参考文献

[1] ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Analysis and design of frame supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slope[C]// ACMSM2004 Perth, Australia, 2004, 12.

[2] 铁道部第十三工程局. 框架式锚杆挡墙施工方法[J]. 施工技术, 2001, 30(5): 37-39.

[3] 朱彦鹏, 郑善义, 张 鸿, 等. 黄土边坡框架预应力锚杆支护结构的设计研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1582-1585.

[4] 周 勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆支护结构的理论分析及工程应用. 兰州理工大学学报[J], 2006, 32(6):136-139.

[5] 李海珠, 朱彦鹏, 周 勇. 框架锚杆支护结构计算方法

及工程实践[J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(2): 151-154.

[6] 寿楠椿. 弹性薄板弯曲[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.

[7] GB 50330—22002 建筑边坡工程技术规范[S].

[8] 周 勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆支护结构中锚杆长度的研究. 地下空间与工程学报[J], 2008, 4(3):406-410.

[9] 李 忠, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆边坡支护结构稳定性计算方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3922-3926.

[10] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1257-1261.

[11] 严伍琼. 基于 BCB 通过 WORD 自动生成表格[J]. 软件开发与设计, 2008.

收稿日期:2010-01-18

附表1 铁摩辛柯参数表

a/b	系数λ	a/b	系数λ
0.50	0.122 01	1.25	0.03421
0.51	0.120 75	1.26	0.033 79
0.52	0.119 46	1.27	0.033 39
0.53	0.118 14	1.28	0.033 01
0.54	0.116 80	1.29	0.032 64
0.55	0.115 43	1.30	0.032 29
0.56	0.114 05	1.31	0.031 95
0.57	0.112 64	1.32	0.031 62
0.58	0.111 20	1.33	0.031 31
0.59	0.109 75	1.34	0.031 02
0.60	0.108 28	1.35	0.030 73
0.61	0.106 80	1.36	0.030 46
0.62	0.105 29	1.37	0.030 20
0.63	0.103 78	1.38	0.029 95
0.64	0.102 25	1.39	0.029 71
0.65	0.100 71	1.40	0.029 48
0.66	0.099 15	1.41	0.029 26
0.67	0.097 60	1.42	0.029 05
0.68	0.096 03	1.43	0.028 85
0.69	0.094 46	1.44	0.028 66
0.70	0.092 89	1.45	0.028 47
0.71	0.091 31	1.46	0.028 30
0.72	0.089 74	1.47	0.028 13
0.73	0.088 17	1.48	0.027 97
0.74	0.086 60	1.49	0.027 81
0.75	0.085 04	1.50	0.027 66
0.76	0.083 49	1.51	0.027 52
0.77	0.081 94	1.52	0.027 38
0.78	0.080 41	1.53	0.027 25
0.79	0.078 89	1.54	0.027 13
0.80	0.077 38	1.55	0.027 01
0.81	0.075 89	1.56	0.026 89
0.82	0.074 41	1.57	0.026 78
0.83	0.072 95	1.58	0.026 67
0.84	0.071 51	1.59	0.026 57
0.85	0.070 09	1.60	0.026 47
0.86	0.068 69	1.61	0.026 37

续表

a/b	系数λ	a/b	系数λ
0.87	0.067 31	1.62	0.026 28
0.88	0.065 96	1.63	0.026 19
0.89	0.064 63	1.64	0.026 10
0.90	0.063 32	1.65	0.026 01
0.91	0.062 04	1.66	0.025 93
0.92	0.060 78	1.67	0.025 85
0.93	0.059 55	1.68	0.025 77
0.94	0.058 35	1.69	0.025 70
0.95	0.057 18	1.70	0.025 63
0.96	0.056 03	1.71	0.025 55
0.97	0.054 91	1.72	0.025 48
0.98	0.053 82	1.73	0.025 41
0.99	0.052 76	1.74	0.025 35
1.00	0.051 72	1.75	0.025 28
1.01	0.050 71	1.76	0.025 22
1.02	0.049 73	1.77	0.025 15
1.03	0.048 78	1.78	0.025 09
1.04	0.047 86	1.79	0.025 03
1.05	0.046 96	1.80	0.024 96
1.06	0.046 09	1.81	0.024 90
1.07	0.045 25	1.82	0.024 84
1.08	0.044 43	1.83	0.024 78
1.09	0.043 65	1.84	0.024 73
1.10	0.042 88	1.85	0.024 67
1.11	0.042 14	1.86	0.024 61
1.12	0.041 43	1.87	0.024 55
1.13	0.040 74	1.88	0.024 49
1.14	0.040 08	1.89	0.024 44
1.15	0.039 44	1.90	0.024 38
1.16	0.038 82	1.91	0.024 32
1.17	0.038 23	1.92	0.024 27
1.18	0.037 65	1.93	0.024 21
1.19	0.037 10	1.94	0.024 15
1.20	0.036 57	1.95	0.024 09
1.21	0.036 06	1.96	0.024 04
1.22	0.035 57	1.97	0.023 98
1.23	0.035 10	1.98	0.023 92
1.24	0.034 65	1.99	0.023 87
		2.00	0.023 81

说明:

根据两边比查出对应的λ,代入算式 $M_{max} = \lambda \cdot q_0 a^2$