

文章编号：1006-6616 (2004) 04-0366-06

滑坡治理中预应力锚索格构梁 内力计算方法对比分析

马迎娟¹, 彭社琴¹, 周 斌²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 中国华水总公司, 北京 100054)

摘 要：本文结合某一滑坡防治工程实例，对预应力格构锚索工程提出了适合该工程布置方式的格构梁设计计算模型，并将此模型的计算结果与常用的 winkler 弹性地基梁和倒梁法的计算结果进行对比分析，研究表明此计算模型更加符合格构梁实际受力情况。

关键词：格构锚固结构；格构梁；winkler 弹性地基梁；倒梁法

中图分类号：X43

文献标识码：A

0 前言

在滑坡的治理措施中，预应力锚索格构措施是格构与预应力锚索的联合应用，变被动抗滑为主动抗滑，充分发挥滑体的自承能力，是一种较为经济、环保和有应用前景的支挡加固措施。格构梁虽然不直接承受滑坡推力的作用，但作为锚索与滑坡体的外锚固系统，它直接承受预应力的作用，因此保证其稳定安全是设计中的重要一环。目前计算格构梁系内力时，多采用弹性地基梁法^[1-4]、倒置梁法^[3-5]。这些模型或多或少都存在这样或那样的问题，而且具体应用时还会遇到各种困难。本文结合一滑坡工程防治实例提出另一种适合此类结构布置形式的计算模型，通过对比分析，认为该模型更为符合本工程的实际情况。

1 滑坡工程概况

1.1 滑坡概貌

该滑坡位于西藏自治区，是一横向宽约 100m 左右，纵向（近东西向）长约 400m 左右，东高西低，东部标高约 3426m，西部标高约 3270m 左右，前后缘高差近 190m 的长条形滑坡，分布面积为 39700m²。该滑坡厚度从几米到十几米不等，体积约为 $33 \times 10^4 \text{m}^3$ 。滑坡的概貌及治理工程布置图如图 1 所示。新滑坡的表面在斜坡与平台相间的格局下凹凸不平，有梁有槽。微地貌上滑坡区呈现沿主轴线方向中部高、两侧低的梁状地形，地面形成四级平台。其中，一级台阶相对扎曲河床高差为 70m，二级台阶为 113m，三级台阶为 170m，四级台阶为

收稿日期：2004-07-14

作者简介：马迎娟（1979-），女，在读硕士，岩土工程专业。E-mail：mayingjuan@163.com

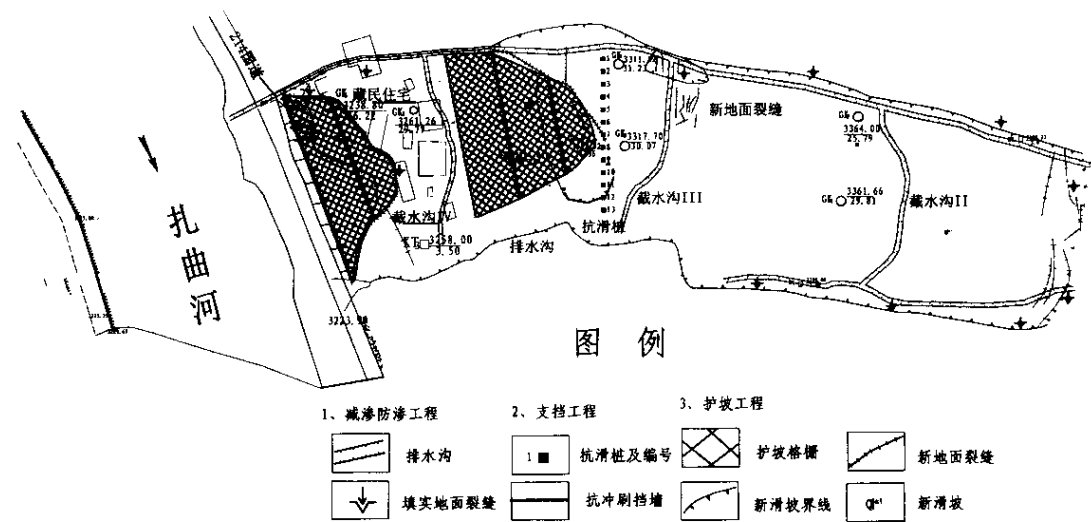


图 1 滑坡概貌及治理工程平面布置图

Fig.1 General view of the landslide and plan showing the layout of the control project

190m，台阶纵向宽度为 30~40m，斜坡坡度一般在 34°~42°之间。新滑坡两侧剪裂缝纵贯滑坡体，二级平台右侧羽状裂缝较发育，一、二级滑坡前沿横张裂缝发育，下错高度达 0.75m。滑体物质以块碎石为主，部分含不等量泥质。

1.2 治理工程布置概况

经稳定性分析认为该滑坡体是一个现今仍在活动的滑坡体。由于受到扎曲河及其支流的侧蚀的影响，前部有效临空成陡坎，一旦环境条件（坡形、降水）出现较大改变时可再度出现滑动，因此急需治理。

根据工程地质条件将滑坡分为不同区域，有针对性的采取不同的防治措施，以保证治理工程的合理性和可靠性。治理工程以抗滑桩加固和预应力锚索格构支挡为主，并配以坡面排水等措施（见图 1）。即在滑坡的中后部设抗滑桩以抵挡中后部滑体的剩余下滑力，具体布置位置从 6 号钻孔下开始，高程 3310.66m，经过 3 号钻孔下，高程 3316.82m，到高程 3311.80 结束，总长 84m，布置 13 根桩，桩距采用 6m（见图 1）。对于滑坡中部及前缘设预应力格构锚索进行支挡。格构锚索工程布置于抗滑桩与国道 214 线公路内侧挡墙之间的滑坡体上，长约 110m~130m，平均长约 120m，宽约 90m，布设工程段分为居民居住平台上下两个区，上部为格构Ⅱ区，长约 70m，宽约 87m，顺坡面设三级平台；下部为格构锚索Ⅰ区，长 44m，宽 97m，顺坡面两级平台。为了有利于坡面的稳定，格构梁沿与坡面走向呈 45°角布置。格构梁由纵梁和横梁现浇而成，梁截面采用矩形截面，采用 C25 混凝土浇筑，纵横梁截面尺寸 $b \times h = 300\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，纵横梁间距为 3m。沿水平向和坡向梁的交点处间隔设置预应力锚索。格构Ⅰ区锚索采用 $5 \times 15.2\text{mm}$ 钢绞线，锚索设计预应力 500kN；格构Ⅱ区锚索采用 $7 \times 15.2\text{mm}$ 钢绞线，设计预应力 700kN。坡面设排水沟系统进行排水，排水沟工程分为横向四条截水沟和纵向两条排水沟。

2 格构梁内力计算

2.1 格构梁计算模型的提出

在目前的格构计算模式中，通常都是在格构梁的交叉节点处设置锚杆（索），在计算格构梁内力时，可采用 winkler 弹性地基梁法将格构梁看作地基上的弹性地基梁来计算，当梁的刚度较大时（梁截面高与锚索间距之比大于 $1/6$ 时），也可采用倒梁法进行计算（此时将锚杆或锚索作用节点看作固定支座）。在目前三峡规范中，为了计算的简洁方便通常采用简支梁或连续梁法。该计算模型中通常在每个格构梁的交叉节点处都布置锚杆（索），但是实际工程中在保证结构安全的前提下，还追求经济上的合理性，因此出现锚索间隔布置的形式。进行内力计算时，如果仍套用一般的计算模型将与实际的情况不符，势必导致结构受力的不合理。现根据本工程预应力锚索格构结构的实际布置情况提出合理的计算模型。为了确定格构梁的计算模型，现取格构锚索 I 区某分级内两伸缩缝间的格构锚索布置图，如图 3 所示。在此布置图内纵横方向的梁的受力情况相同，因此可取纵横任一方向的梁来进行内力计算。需要指出的是由于格构梁由纵横梁现浇而成，故锚索作用节点处的锚索预应力应沿纵横梁方向进行分配和传递。由于目前尚无格构梁节点荷载分配的相关试验研究，相应的理论分析不完善，所以为了安全起见，本设计纵横梁均按受锚索全部预应力的作用来考虑。

2.1.1 格构梁受力分析

在图 4 中取斜坡上标准的梁受荷单元分析格构梁的受力情况。如图 4 所示：格构梁长 24m，放置于斜坡上，受到 $F_1 = F_2 = 500\text{kN}$ 两个锚索预应力作用，同时格构梁受到土压力 P 的作用，此外格构梁还要受到坡面摩擦力 f 的作用。但是由于摩擦力存在可以减小梁的受力^[6]，因此在计算过程中可以忽略摩擦力的影响，这样处理偏于安全，而且使计算简化。由于施工中将格构梁嵌入坡面以下 200mm，从而限制了纵横梁交叉节点处梁沿平行于坡面方向的位移和转角，而垂直于坡面方向由于直接作用嵌入坡面内，可简化成固定铰支座。根据地基土为上层是较薄的土层，下部为坚硬的岩石时，其上部弹性地基梁集中荷载作用下梁底的荷载分布形式和荷载作用的范围可近似取梁底荷载为三角形分布，作用范围及地基反力最大值如图 5 所示。当格构梁上有多个荷载作用时，将单个荷载作用下梁底反力分布的范围及大小进行叠加即可^[7]。

2.1.2 计算假定

- 通过上述分析，提出以下几点假定：
- ①把坡面反力视为作用于格构梁上的荷载，把锚索作用点看作固定支座，无锚索作用的格构纵横梁交叉节点处视为固定铰支座。

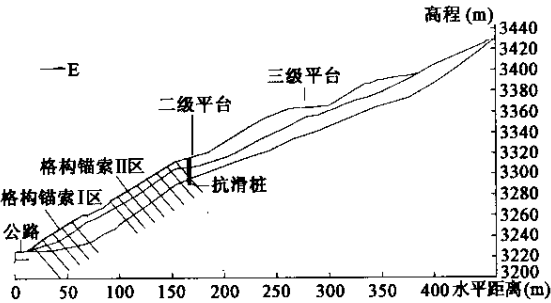


图 2 防治工程布置剖面简图

Fig.2 Cross-section of the control project

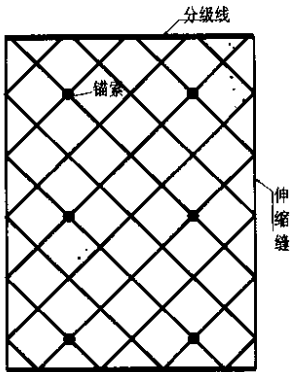


图 3 格构锚固平面布置示意图

Fig.3 Layout of the lattice frame anchor

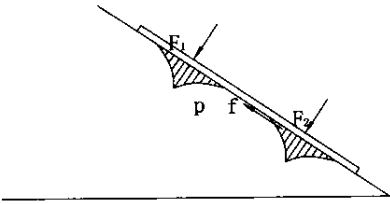


图 4 格构梁受力简图

Fig.4 Schematic diagram showing the loading of the lattice beam

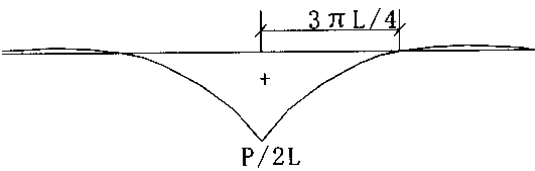


图 5 梁底荷载分布图

Fig.5 Distribution of loads under the beam

②假定坡面反力为三角形分布，将格构纵横梁看作相互独立的连续梁。

③不考虑坡面摩擦力的影响。

2.1.3 计算模型

计算单元模型如图 6 所示。图中 B、D、E、F、H 为纵横梁的交叉点， p 代表分布线荷载。根据图 5 所示求解地基反力的最大值及分布范围^[3]。

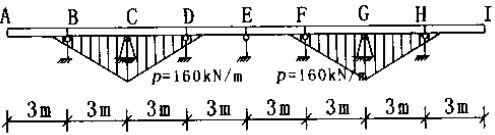


图 6 计算简图

Fig.6 Sketch of calculation

$$L = \sqrt{\frac{4E_c I_c}{k}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.8 \times 10^7 \times 0.0016}{3 \times 10^4}} = 1.563(\text{m})$$
$$I_c = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.3 \times 0.4^3}{12} = 0.0016\text{m}^4, \frac{P}{2L} = \frac{500}{2 \times 1.563} = 160\text{kN/m}$$
$$3\pi L/4 = 3 \times 3.14159 \times 1.563/4 = 3.683\text{m}$$

式中 L 为弹性地基梁中的特征长度， E_c 格构梁的弹性模量， I_c 为格构梁的惯性矩， k 为边坡的基床系数，量纲为 kN/m^2 ， P 为锚索预应力。

将格构梁看成倒置的连续梁按此计算模型进行梁的内力计算。

2.2 采用其它方法计算格构梁内力

【winkler 弹性地基梁法】

winkler 弹性地基梁法假定地基的竖向反力与地基沉降量成正比，地基与梁之间的摩阻力忽略不计。用该方法计算格构梁内力需将格构梁拆成紧贴坡面的弹性地基梁，分别进行计算。已知 $E_c = 2.8 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ ，格构梁的截面宽度 $\times$ 截面高度即 $b \times h = 0.3\text{m} \times 0.4\text{m}$ ，本工程边坡基床系数取 $k = 3.0 \times 10^4 \text{kN/m}^2$ 。梁的特征长度值同上面模型中的计算结果 $L = 1.563\text{m}$ ， $3L = 3 \times 1.563 = 4.69\text{m} \leq 6\text{m}$ ，故此梁属于无限长梁。Winkler 弹性地基梁的力学模型如图 7 所示。计算时先只分别考虑单个集中荷载的作用，计算出梁的内力，最后将两个力作用下梁的内力进行叠加^[3-4]。计算过程在很多书中均有详细介绍，在此不再赘述。

【倒梁法】

它基于以下两条假设：

- ①将坡面反力视为作用在格构梁上的荷载，把锚索作用点看作支座；
- ②认为整个框架为刚性，假定坡面反力呈均匀直线分布，将纵

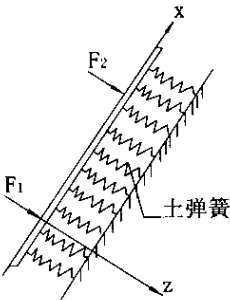


图 7 力学模型

Fig.7 Mechanic model

横梁看成相互独立的连续梁。

在此假设条件下，格构梁被简化成三跨连续梁，计算得单位宽度的坡面反力为 $p =$

$$\frac{500 \times 2}{24} = 41.7 \text{ kN/m}。$$
 计算简图如图 8 所示。

进行梁的内力计算。最终得支座处剪力与锚索拉力几乎相等，可不进行支座不平衡反力的调整。

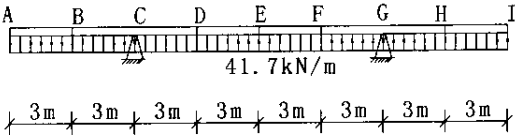


图 8 倒梁法计算简图

Fig.8 Calculation of the upside beam method

3 计算结果对比分析

将前面三种模型下的计算结果绘成内力图如下。

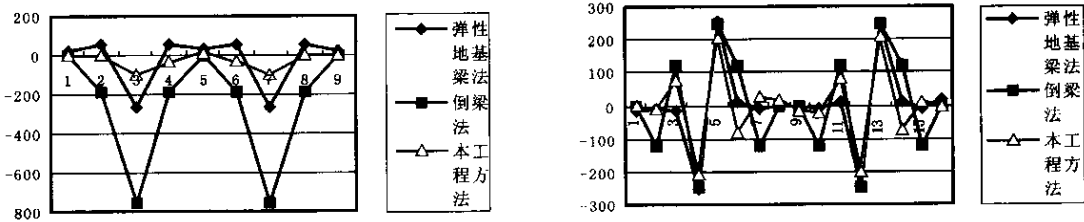


图 9 格构梁内力图 (a) 弯矩图 (b) 剪力图

Fig.9 Diagram of internal forces (a) and bending moment and shear diagram (b) in the lattice beam

从格构梁的内力图可以看出，这几种方法中，按照本工程提出的模型，利用结构力学求解连续梁的方法计算得到的格构梁支座处内力最小，winkler 弹性地基梁计算的内力其次，倒梁法计算的梁的内力最大。而对格构梁交叉节点处的内力进行比较发现，按本工程计算模型计算得到的弯矩、剪力大小均介于倒梁法和 winkler 弹性地基梁法之间，且比倒梁法得到的结果要均匀。主要原因有：①由于倒梁法只将锚索作用节点视为支座，未考虑格构梁纵横交叉节点处对梁变形的限制作用，与本工程实际受力情况不符，是造成梁内力过大的原因之一。②与倒梁法相比，winkler 弹性地基梁法具有较大的优势，尤其是该模式能反映出梁中间位置所受负弯矩的影响，这是倒梁法所不能达到的。同时，由于它忽略了梁底部摩擦力的作用而使计算结果偏于安全。但是由于 winkler 弹性地基梁法将地基土体看作独立的弹簧，忽略了土体的连续性，且未考虑锚索作用对梁受力的影响，因此造成支座处内力过大，以此内力进行截面配筋势必造成浪费。③本工程采用的计算模型对应计算出的支座处梁内力最小，无锚索格构梁节点处弯矩、剪力均匀。主要原因是由于：该方法相对于倒梁法来说，考虑了纵横梁交叉点处梁变形的相互约束，将格构梁十字交叉节点处看作固定铰支座，从而减小了连续梁的跨度，使内力大大减小。相对于弹性地基梁法来说，此方法考虑了锚索的作用，将锚索看作刚度无限大的弹簧，必将限制锚索作用处梁的变形，从而减小了支座处梁的内力。此外，该模型对梁底的荷载采用三角形分布与此类地基土上的弹性地基梁在荷载作用下的反力分布情况相近似，从而简化了计算。本工程格构梁按此方法设计，实践证明该方法是可行的，并可为其他相似工程提供参考。

4 结论与建议

经过计算对比分析，可知此计算模型综合考虑了 *winkler* 弹性地基梁法与倒梁法的适用条件，与实际结构的受力情况吻合，因此计算结果可用，并且可以应用于类似布置形式的结构计算中。

为了使本模型更加符合实际，建议进行以下几方面的研究：

- ①进行格构梁节点处荷载分配情况的实验研究，为设计提供理论支持，使结构受力更接近实际情况。
- ②深入研究坡面摩擦力对格构梁受力的影响情况，提高工程的经济性。
- ③进一步研究格构梁底坡面土体的应力分布情况，提出更符合实际的荷载分布情况应用于计算。

参 考 文 献

[1] 许英姿，唐辉明. 滑坡治理中格构锚固结构的解析解分析 [J]. 地质科技情报. 2002, 21 (3): 89~93.
[2] 许英姿，唐辉明. 滑坡治理中预应力锚索格构梁受力分析 [J]. 安全与环境工程. 2002, 9 (3): 24~26.
[3] 杨天林主编. 基础工程 [M]. 北京：人民交通出版社，1999.
[4] 杨永新，冯玉芹，等. 简明基础工程 [M]. 北京：地震出版社，2002.
[5] 杨明，卢才金，等. 路堑土质边坡加固中预应力锚索框架的内力计算 [J]. 岩石力学与工程学报. 2002, 21 (9): 1383~1386.
[6] 谈至明. 具有水平摩阻力的弹性地基上梁的解 [J]. 力学与实践. 1997, 19 (3): 33~35.
[7] 龙驭球. 弹性地基梁的计算 [M]. 北京：人民教育出版社，1981.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS OF INTERNAL
FORCE CALCULATION OF THE PRESTRESSED CABLE
LATTICE BEAM FOR LANDSLIDE CONTROL

MA Ying-juan¹, PENG She-qin¹, ZHOU Bin²

(1. College of Environment and civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China ;
2. China Huashui Hydropower Development Corporation, Beijing 100054, China)

Abstract : On the basis of the case study of a landslide prevention and control engineering work, a new model for design and calculation of the lattice beam suited to the layout of the engineering work is proposed. According to a comparative analysis of the results of calculation by using this model and the results of calculation by using the conventional Winkler elastic foundation beam and upside beam methods, the authors draw the conclusion that this model more closely conform to the actual manner of load of the lattice beam.

Key words : lattice frame anchor structure ; lattice beam ; Winkler elastic foundation beam ; upside beam method