

格构梁与锚管注浆复合结构加固裂隙岩质边坡的应用研究

江学良^{1,2}, 曹平¹, 杨慧¹, 孟茁超²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083;

2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南益阳 413000)

摘要: 格构梁与锚管注浆复合结构是治理滑坡的一种有效措施, 文中系统阐述了格构梁与锚管注浆复合结构的作用机理、格构梁简化为受多个集中力作用的弹性地基梁进行计算的原理与步骤以及锚管注浆加固裂隙岩体的设计实施过程, 并将其应用于常张高速公路 K129 边坡的治理中, 取得了满意的结果, 可为同类工程提供有意义的参考。

关键词: 格构梁; 锚管注浆; Winkler 弹性地基梁; 裂隙岩体; 滑坡治理

中图分类号: TU457

文献标识码: A

0 前言

混凝土格构锚固体系是将传统的格构护坡和锚杆(索)加固为一体, 利用钢筋混凝土格构梁进行坡面防护, 并结合锚杆或锚索进行深层加固, 形成一种有效的复合抗滑护坡体系。这一新型支挡加固结构加固效果可靠, 能较好地适应地形, 施工方便, 已开始广泛运用于边坡防护工程中。目前, 国内对混凝土格构锚固体系中格构梁的研究并不成熟, 没有设计与施工规范, 工程运用也多停留在经验阶段。注浆是将一定材料配制成浆液, 用压送设备将其灌入地层或裂隙内使其扩散、胶凝或固化, 以达到加固地层或防渗堵漏的目的。注浆技术在岩土工程中得到了广泛的应用, 主要用于治水防渗、地层加固与地基加固, 在裂隙岩质边坡加固中也有报道。然而, 将混凝土格构梁支护技术与锚管水泥注浆技术联合应用于裂隙岩质边坡加固在国内少有报道, 本文将着重探讨格构梁与锚管注浆复合结构的作用机理, 格构梁的设计以及锚管注浆的设计与实施, 该技术成功应用于常张高速公路 K129 边坡的治理, 可为同类工程提供参考。

1 工程概况

常张高速公路 K129 边坡位于常张高速公路张家界市慈利县宜冲桥乡农科村段 K129 +

收稿日期: 2008-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50274074), 高等学校博士点学科专项基金 (20060533071)。

作者简介: 江学良 (1977-), 男, 博士生, 主要从事岩石边坡、岩土力学等方面的研究。E-mail: iamjxl@tom.com

660—K129+900，坡面长 240 m，最大高度 39.6 m。

1.1 工程地质特征

边坡主要由灰岩构成，节理裂隙发育（见图 1）。岩层呈单斜状构造，顺向坡，岩层产状为：走向 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，倾向为 $310^{\circ} \sim 330^{\circ}$ ，倾角在 $42^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 之间。岩层走向与路线方向、倾向与坡向、倾角与坡角基本相一致。发育的节理主要有两组，其产状分别为：走向 75° 、倾向 SE、倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ；走向 350° 、倾向 SW、倾角 $70^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ，呈 X 型组合。前者隙面粗糙，隙宽 $1 \sim 2$ mm，无充填物，具微张特征；后者隙面光滑，隙宽 $2 \sim 4$ mm，黏土充填。



图 1 K129 边坡现场照片

Fig.1 Picture of K129 slope

1.2 水文地质特征

边坡区域地下水类型主要有第四系覆盖层中的孔隙潜水、基岩中的裂隙水和岩溶水 3 种。潜水主要赋存于第四系中的高液限黏土和块石中，并接受大气降水补给，水流量随季节的变化而变化。基岩裂隙水主要赋存于含泥量较高的瘤状灰岩中，并接受大气降水和地表水的补给，水流量与季节变化和裂隙发育程度有关，水力联系较差，无统一地下水位，水流量不集中，且水量较小。岩溶水蕴含于奥陶纪灰岩类地层，接受大气降水以及地表水补给，向澧水河及其下游排泄，水位稳定，水量丰富。

2 复合结构作用机理

格构梁与锚管注浆复合结构是水泥浆液通过锚管注入裂隙岩体的缝隙中，使其在缝隙内扩散、胶凝或固化，达到加固裂隙岩体，提高岩体强度与整体性以及锚杆的锚固力，混凝土格构梁通过格构梁交叉点处的锚管锚固于深层稳定岩体，锚管注浆完成后留在注浆孔内以增强岩层面间的抗剪性能；注浆锚管的一端带有螺纹，旋转螺母可对坡面施加一定的预应力。从传力机理上看，现浇钢筋混凝土格构梁与锚管复合结构通常是一种被动支挡结构，格构梁受坡体下滑力作用发生变形，与格构梁相连的锚管随之拉伸，产生阻止梁外移的拉力，梁受

到锚管作用后对斜坡产生压力,该力与下滑力平衡,使斜坡稳定。

2.1 水泥浆液在岩体水平单一裂隙中的流动机理

2.1.1 水泥浆液的流动沉积特性

水泥浆液沉积为颗粒沉积是裂隙被注浆材料充填的原因。浆液存在一最小流动速度 V_{kp} ,即水泥颗粒开始沉积的临界速度值。当 $V < V_{kp}$ 时,固相开始沉积,裂隙壁底处沉积物增加,直到浆液速度达到 V_{kp} 时为止。确定临界速度值半经验公式为^[1]:

$$V_{kp} = K(g\delta)^{1/2} \left[\frac{V^2(\rho_T - \rho_B)\sigma^m}{6fgd_{cp}\rho_B} \right]^{3/7} \quad (1)$$

式中 K 为修正系数, $K = 1.25$; g 为重力加速度, m/s^2 ; V 为水泥颗粒的水中下沉速度, m/s ; d 为裂隙宽度, m ; ρ_T 、 ρ_B 分别为水泥颗粒、水的密度, kg/m^3 ; σ 为溶液中固体颗粒的含量; f 为裂隙中水的阻力系数; d_{cp} 为水泥颗粒的特征尺寸, m ; m 为经验指标。

2.1.2 水泥浆液在岩体裂隙中的沉积排水机理

裂隙岩体注浆用水泥浆液的水灰比多为 1~5 之间,水泥水化大约需 5%~25% 的水,而其余 75%~95% 的水则属于多余的,其作用仅为输送浆液,将水泥颗粒输送至预定地点后,多余水份应排除。德国的 Cristian Kutzner 认为,注浆过程分为“填满”与“饱和”2 个阶段,在“填满”阶段,浆液进入并充填了裂隙的绝大部分;在“饱和”阶段,浆液中的多余水分在饱和压力下产生类似太沙基土力学的固结现象而被排出,使得水泥颗粒彼此接近^[2]。

2.2 锚管锚固机理

2.2.1 锚管荷载传递机理

Lutz 和 Gergeley^[3]、Hanson 等^[4]认为,钢锚杆表面上存在着微观的粗糙皱曲,浆体围绕着锚杆充满这些皱曲而形成一灌浆柱。在锚索(杆)和灌浆体之间的结合破坏之前,其结合力发挥作用;当锚杆和浆体发生一定的相对的位移之后,两者界面的某些地方就要遭到破坏,这时锚杆和灌浆柱之间摩擦阻力就发挥主要作用,而且摩擦阻力是随灌浆体的剪胀而增加,增大锚索(杆)表面的粗糙度就能提高摩擦阻力,对灌浆体而言则提高了其剪切强度。灌浆体的强度及厚度成为承载力的控制因素。本文采用锚管充当锚杆,荷载传递机理与锚索(杆)类似。

2.2.2 锚管对裂隙岩质边坡的加固机理

①支撑作用:锚管能限制、约束边坡岩土体变形,并向岩土体施加压力,从而使处于二维应力状态的地层外表面岩土体转变为三维应力状态,提高了岩土体强度。

②增强作用:对于节理密集破碎岩体,施加锚管,可使破碎岩体具有完整性,增强了锚固区岩土体的强度(如弹性模量 E 、凝聚力 c 等)

③销钉作用:锚管穿过滑动面时表现出的阻滑抗剪作用。

3 格构梁设计

格构梁的计算最初是采用倒梁法^[5],将框架视为倒置的交叉梁格体系,坡面反力视为荷载,锚索作用点视为支座,认为整个框架为刚性,假定坡面反力呈均匀直线分布,将纵横梁看成相互独立的连续梁。该方法忽略了格构梁在锚固力作用下产生的变形和随之引起的底部反力的不均匀分布,而使设计偏于保守。本文采用杨明等^[6]、许英姿等^[7]、唐辉明等^[8]提

出的 Winkler 地基模型，假设格构梁为弹性，并将之视为受多个集中力作用的有限长梁进行计算。

Winkler 模型假定，土体表面任意一点的压力强度与该点的沉降成正比，即

$$p(x) = ky \tag{2}$$

弹性地基梁的挠曲微分方程为：

$$E_b I_b \frac{d^4 y}{dx^4} = -ky + q(x) \tag{3}$$

式中： E_b 、 I_b 分别为梁的弹性模量和惯性矩； b 为梁宽， m ； $q(x)$ 为梁上荷载。

该方程的通解为：

$$y = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) \tag{4}$$

式中： $\lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4E_b I_b}}$ ，为弹性梁的弹性特征，常数 C_1, C_2, C_3, C_4 由荷载情况与边界条件确定。

根据材料力学， $-E_b I_b \frac{d^2 y}{dx^2} = M$ ， $-E_b I_b \frac{d^3 y}{dx^3} = V$ ，结合 (4) 式可得到梁的弯矩和剪力。

有限长梁在一个集中力作用下，在 $x \leq a$ 时，从 A 点（见图 2）向右起算，变形与内力表达式为^[9]：

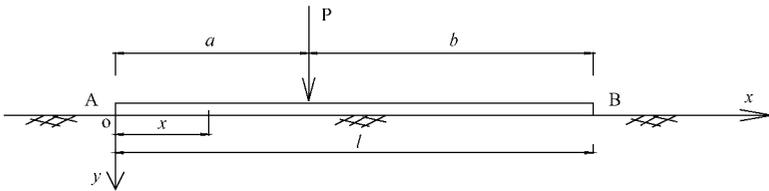


图 2 有限长梁受力图

Fig.2 Sketch of the beam with finite length

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= \frac{p\lambda}{kb[sh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_3 \\ M(x) &= \frac{P}{2\lambda[sh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} I_1 \\ V(x) &= -\frac{P}{sh^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)} I_2 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中： I_1, I_2, I_3 分别为 x 的函数^[9]， l 为梁长。当 $x > a$ 时，则式中 a, b 交换位置，且 x 从 B 点向左起算。

对于实际工程中纵横相交的格构梁，为了简化计算，可分别将其拆分成若干根纵梁和横梁。每根纵梁或横梁可以视为紧贴坡面的有限长梁，锚杆或锚索的作用可视为作用于梁上的多个集中力作用。利用 Hetenyi^[9]有限长梁上作用有集中力时的解析解表达式和叠加原理，可以计算出纵梁或横梁的内力：

$$y(x) = \sum_{i=1}^n y_i(x), M(x) = \sum_{i=1}^n M_i(x), V(x) = \sum_{i=1}^n V_i(x) \tag{6}$$

本文中,在 K129 裂隙岩质边坡上设置格构梁与锚管注浆复合结构加固,格构梁首先起表层护坡的作用,格构梁交叉点设置锚管,锚管注浆加固深层岩石,锚于深部稳定岩层,这是一种兼顾浅层护坡与深层加固的有效的滑坡治理措施。

格构梁设计中,为简化计算,仅考虑纵梁受力,横梁作为联系梁,按构造配筋,横梁截面为 $b \times h = 0.25 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,纵筋为 $4\phi 14$ HRB335 螺纹钢,箍筋为 $\phi 8 @ 200$ HPB235 圆钢。纵梁截面采用 $b \times h = 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,锚管设置于纵横梁交叉点,沿坡面方向间距 3.2 m 。具体设置详见边坡加固立面图(图 3)。

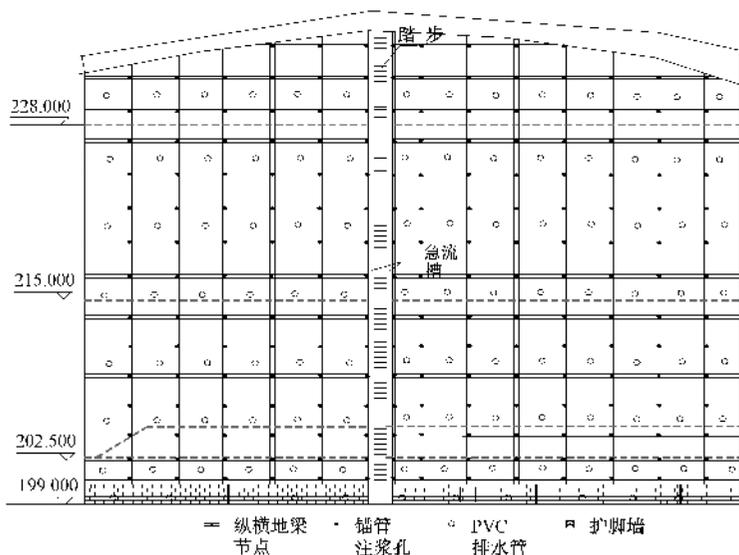


图 3 K129 边坡加固立面图

Fig.3 Elevation drawing of K129 slope reinforcement

纵梁弹性模量 $E_b = 25.5 \text{ GPa}$, 纵梁惯性矩 $I_b = bh^3/12 = 6.75 \times 10^{-4} (\text{m}^4)$, 坡面基床系数 $k = 35000 \text{ kN/m}^3$, 纵梁弹性特征系数 $\lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4E_b I_b}} = 0.11$, 格构梁采用 C20 混凝土, 受力筋为 HRB335, 箍筋为 HRB235。根据边坡稳定性分析得到每层锚管索承担的集中力, 代入 (5) (6) 式得到纵梁的弯矩与剪力, 从中找出最不利截面, 根据钢筋混凝土正截面受弯与斜截面受剪进行配筋计算, 得到纵梁配筋: 底筋采用 $2\phi 16 + 2\phi 14$ 通长钢筋, 负筋采用 $4\phi 14$ 通长筋, 箍筋为 $\phi 8 @ 150$ 双肢箍。

4 锚管注浆设计

针对 K129 裂隙岩质滑面抗剪强度低, 采用钢管压力注浆, 钢管透过滑面, 注浆时在钢管中和钢管与钻孔壁之间均注水泥浆, 使其进入钢管与钢管之间的岩土体中, 对边坡表层与深层岩体进行加固。在边坡坡顶设置截水沟, 坡脚设置 1.5 m 护脚墙, 坡面设置 PVC 管排水孔。

为了使设计、施工更符合实际情况, 布置更合理, 组织了现场注浆试验, 并以最终试验成果作为注浆设计和施工的主要依据。

4.1 注浆孔位设计

注浆横向排距为 3 m，纵向排距（以高差计）为 2.5 m，同时保证注浆孔设计位置离平台台阶边缘距离大于 1 m。钢管直径 50 mm，注浆孔开孔直径设 70 mm，水平角为 25°。边坡加固剖面图见图 4。

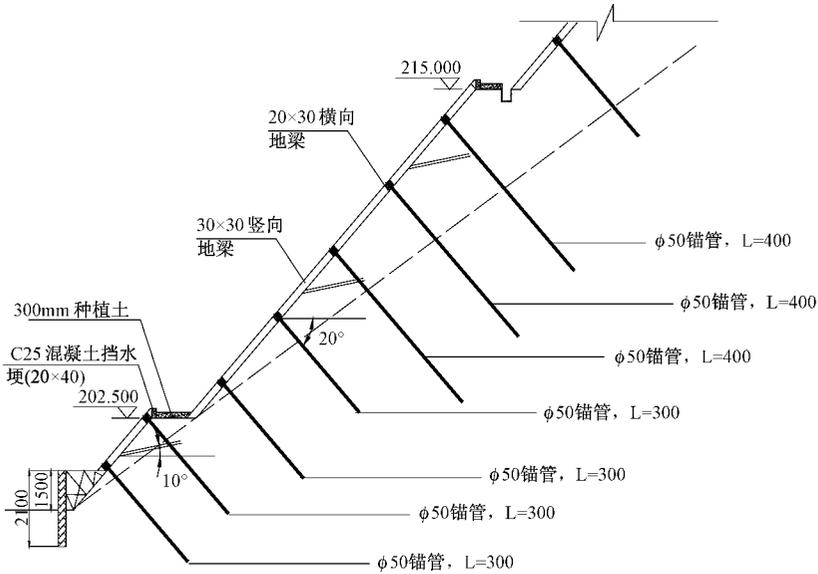


图 4 K129 边坡加固剖面图

Fig.4 Cross-section of K129 slope reinforcement

4.2 注浆参数

① 锚管注浆施工工艺流程为：下放锚管→混凝土封闭锚管孔口→裂隙清洗结合压水试验→锚管注浆→封锚管口→自然养护。

② 水泥：采用 42.5 普通硅酸盐水泥。

③ 水灰比：采用 2:1、1:1、0.8:1 三种不同稠度的水泥浆液，在浆液中掺入水泥用量 0.5% 的减水剂。采用 2:1 水灰比浆液作为开灌水灰比。

④ 注浆压力：根据注浆试验读到最大注浆压力不超过 1.85 MPa。

⑤ 注浆扩散范围：根据注浆试验得出注浆扩散范围大致为 $3.2 \times 3.2 \text{ m}^2$ 。

4.3 注浆施工技术

① 采用 CXD 对心护孔套管跟进措施钻孔，钻进过程中应合理调整钻进参数和钻进速度，防止埋钻、卡钻等事故。孔斜误差不得大于孔深的 1%，孔径误差不得大于孔径的 3%。

② 注浆前，采用洗孔清除钻孔中残积的岩粉、铁末和裂隙或空洞中充填的黏土杂质等。为检查钻孔的渗透情况，注浆前采用注水试验检测。

③ 注浆时在相邻锚孔楔紧锚管后，进行压力灌浆。灌浆过程中，必须按时记录注浆量和压力以及地表的位移情况。采用 JMDL-2110 智能数码位移计监测地表位移。当满足《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》规定的注浆终止条件时，注浆终止。

④ 对注浆过程中出现的注浆中断、串浆、冒浆等事故，认真分析，找出原因，及时处理。

4.4 注浆效果

注浆后，经实验室测定，水泥浆对岩体薄弱结构面间黏结力起到了很好的改善作用，由

原来的 0.03 MPa 增加到了 0.36 MPa；对边坡岩体随机钻孔进行压水试验，平均透水率为 8.6，达到固结灌浆透水率规定标准；岩体 RQD 指数提高了 35%。这样，原来的裂隙岩体经过注浆以后变成了较为完整的岩体。

5 结论与建议

格构梁与锚管注浆复合结构通过注浆加固边坡裂隙岩体，锚管锚于边坡深层岩体，格构梁进行坡面防护，已成功应用于常张高速公路 K129 裂隙岩质边坡治理中，取得了满意的结果。

采用弹性地基上的有限长梁计算坡面格构梁克服了采用“倒梁法”计算的不足，提高了计算精度，适合于快速计算。复杂及重大工程应参考数值模拟计算结果。

注浆参数是通过现场注浆试验得出，目前浆液在裂隙岩体中作用机理并不十分清楚，注浆理论与工程实际存在差距，应该加强注浆理论的研究。

采用格构梁与锚管注浆联合加固裂隙岩质边坡，可以对坡面及深层岩体进行加固，是一种有效的滑坡治理手段，可以为同类工程提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 乔卫国, 张玉侠, 宋晓辉, 等. 水泥浆液在岩体裂隙中的流动沉积机理 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (增刊): 14 ~ 16.
QIAO Wei-guo, ZHANG Yu-xia, SONG Xiao-hui, et al. Flow deposition mechanism of cement slurry in rock mass fractures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (Supp.): 14 ~ 16.
- [2] 邝健政, 等. 岩土注浆理论与工程实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
KUANG Jian-zheng, et al. Theory and case study of rock-soil grouting [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [3] Lutz L, Gergeley P. Mechanics of band and slip of deformed bars in concrete [J]. Journal of American Concrete Institute, 1967, 64 (11): 711 ~ 721.
- [4] Hansor N W. Influence of surface roughness of prestressing strand on band performance [J]. Journal of Prestressed Concrete Institute, 1969, 14 (1): 32 ~ 45.
- [5] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
ZAI Jin-min, ZAI Jin-zhang. Analysis and design of high-rise building foundation [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993.
- [6] 杨明, 胡厚田, 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.
YANG Ming, HU Hou-tian, LU Cai-jin, et al. Calculation of internal forces for prestressed anchor cable frame used in reinforced road-cut soil slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (9): 1383 ~ 1386.
- [7] 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 ~ 92.
XU Ying-zi, TANG Hui-ming. Analysis on analytic solution of lattice frame anchor structure in landslide control [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21 (3): 89 ~ 92.
- [8] 唐辉明, 许英姿, 程新生. 滑坡治理工程中钢筋混凝土格构梁设计理论研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (11): 1683 ~ 1687.
TANG Hui-ming, XU Ying-zi, CHENG Xin-sheng. Research on design theory of lattice frame anchor structure in landslide control engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (11): 1683 ~ 1687.
- [9] Hetenyi M. Beams on Elastic Foundation [M]. Michigan Ann Arbor: University of Michigan Press, 1946.

APPLICATION OF LATTICE BEAM AND ANCHOR PIPE GROUTING COMPOSITE STRUCTURE TO FRACTURED ROCK SLOPE REINFORCEMENT

JIANG Xue-liang^{1,2}, CAO Ping¹, YANG Hui¹, MENG Zhuo-chao²

(1. *School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;*

2. *School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China*)

Abstract: The lattice beam and anchor pipe grouting composite structure is an effective engineering measure in landslide control. This paper deals with the mechanism of lattice beam and anchor pipe grouting, the principle and procedure of calculation by simplifying the lattice beam as Winkler elastic foundation, and the design of anchor pipe grouting for application to fractured rock slope reinforcement. As a case study, the lattice beam and anchor pipe grouting was used in control of K129 slope of Changzhang highway and brought about a satisfactory result. This method will prove to be useful to the same engineering.

Key words: lattice beam; anchor pipe grouting; Winkler elastic foundation; fractured rock; landslide control