

格构梁与边坡岩体相互作用机制及现场试验研究

朱大鹏, 晏鄂川, 宋 琨

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于格构梁弹性假设及 Winkler 地基模型变形协调条件所得的解析解, 分析格构梁与边坡岩体相互作用机制; 并依托忠县顺溪场滑坡治理工程, 设计间距为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 、截面为 $0.4\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的预应力锚索格构梁支挡结构, 通过格构梁现场试验, 重点探讨预应力加载时格构梁内力的变化特征及锚固力在格构纵横梁上的分配规律。现场试验既考虑了格构梁与边坡岩体相互作用, 又克服了数值法中岩体与结构参数难确定及解析法对复杂情况难于求解的问题, 为优化格构梁的结构设计提供了科学依据。

关键词: 岩石力学; 预应力锚索格构梁; 边坡岩体; 相互作用; 现场试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 2947 - 07

RESEARCH ON INTERACTION MECHANISM BETWEEN LATTICE BEAM AND SLOPE ROCK MASS AND FIELD TEST

ZHU Dapeng, YAN Echuan, SONG Kun

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Based on analytical solution derived from deformation coordination equation of hypothesis elastic foundation beam and Winkler foundation model, the interaction mechanism between lattice beam and slope rock mass is analyzed, depending on Shunxichang landslide treatment engineering in Zhongxian county. Lattice beam with cross section $0.4\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ and anchor rope with space $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ are designed. Factual variation of inner force of lattice beam is obtained in the process of loading, and then the assignment of anchor forces in the longitudinal beam and transverse beam is discussed mainly. In field test, the interaction mechanism between lattice beam and slope rock mass is considered, and the problems that the parameters of rock mass are difficult to be determined accurately by numerical method and the complex situations that are difficult to be solved by analytical method are overcome. It has reference value for optimal design of lattice beam structure.

Key words: rock mechanics; prestressed anchor lattice beam; slope rock mass; interaction; field test

1 引 言

预应力锚索格构梁是一种将格构梁护坡与锚固工程有机结合的支挡结构, 具有结构形式多样, 布置灵活, 不必开挖扰动边坡, 施工安全快速等优点,

在边坡或滑坡工程中已得到广泛应用^[1]。然而, 在边(滑)坡加固工程中, 传统的支挡工程往往根据经验类比法进行结构设计^[2, 3], 忽略格构梁和岩土体之间的相互作用, 可能导致理论计算结果与梁的实际受力状态不相符, 使得某些治理工程竣工后不久格构梁出现拉裂甚至损坏现象, 严重影响到边坡的

收稿日期: 2008 - 01 - 28; **修回日期:** 2008 - 03 - 15

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET - 07 - 0775)

作者简介: 朱大鹏(1981 -), 男, 2004年毕业于长江大学城建学院土木系, 现为博士研究生, 主要从事地质灾害防治工程设计理论的研究工作。

E-mail: zdpcug@126.com

安全性。因此，为了准确分析支护结构对地质体的加固效果，深入开展格构梁与地质体的相互作用研究显得尤为重要。

目前，关于结构与岩土体相互作用的研究一般采用数值离散法和解析法^[4-5]。许英姿等^[6]采用三维有限元法模拟加固过程中格构梁、土体应力应变场的演化过程，分析格构梁锚固结构的受力特征，研究现浇砼格构梁和预应力锚索复合结构与土体之间的相互作用。方理刚等^[7]对各种横观各向同性岩体边坡与预应力锚索框架梁相互作用进行参数研究，提出层理的方向性对支护结构影响的规律。由于土体与支护结构物理力学性质差别较大，预应力的作用会导致两者接触界面上产生不连续的变形与应力，然而有限元法将支挡结构与地质体作为一个连续的整体对象来考虑，与实际误差较大；同时土体的参数对有限元计算结果密切相关，不合理的参数取值会得出完全错误的结果；这些误差影响了有限元法应用于实际工程的准确性^[8]。而解析法只对一些特殊情况给出了解答，但由于荷载、边界条件及岩土体性质的复杂性，很多情况却难于求解。因此，有必要通过现场试验来研究结构与岩土体相互作用问题。

本文依托三峡库区忠县顺溪场滑坡治理工程，设计了间距为 4 m×4 m、截面为 0.4 m×0.5 m 的预应力锚索格构梁支挡结构，并通过格构梁现场试验，重点探讨预应力加载过程中格构梁内力的变化规律，同时反演锚索的锚固力沿格构梁纵横方向分配规律。试验既考虑了格构梁与边坡地质体相互作用，又克服了有限元法中地质体与结构参数难确定及解析法对复杂情况难于求解的问题，为优化格构梁的结构设计提供了科学依据。

2 格构梁与边坡岩体相互作用分析

最早的格构梁设计方法为倒梁法，由于倒梁法没有考虑地基与梁的相互作用，故相应的计算结果不能真实地反映格构梁的工作状态。为分析地质体与结构的相互作用，早在 1867 年捷克学者 Winkler 就将工程性状各异的地基土理想化成线形弹性体，假设地基土表面每一点的位移与作用在该点的应力成正比，而和土与基础交界面上其他各点所受的应力或位移完全无关，即假设地基是由一系列相距很

近且独立的弹簧单元来组成。受锚固荷载的作用，当格构梁压在边坡体上时，同时坡面对梁产生反作用力。因此，可以视格构梁为作用于地基上的弹性梁，且受到若干锚固力和基底反力的作用。预应力锚索格构梁的力学模型^[9]如图 1 所示。

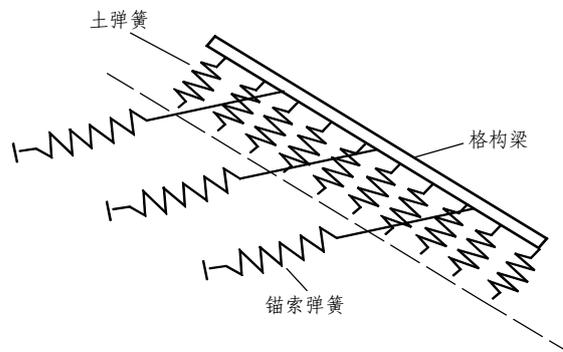


图 1 预应力锚索格构梁力学模型^[9]
Fig.1 Mechanical model of prestressed anchor lattice beam^[9]

根据 Winkler 假设，地基表面任意一点的压力强度与地基的沉降成正比^[10]，即

$$p(x) = kz \tag{1}$$

式中： $p(x)$ 为地基对格构梁的反力； k 为地基反力系数(kN/m^3)，在考虑格构梁与地基相互作用时，该系数是反映场地岩土体性质的基本参数； z 为地基的沉降量(m)。

根据静力平衡及材料力学假设，推导出弹性地基梁的挠曲微分方程：

$$E_b I_b \frac{d^4 y}{dx^4} = -p(x) + q(x) \tag{2}$$

式中： E_b 为梁的弹性模量，在考虑格构梁与地基相互作用时，该系数反映了格构梁的基本性质； I_b 为梁的惯性矩； b 为梁宽(m)； $q(x)$ 为梁上荷载； y 为梁的变形。

假设地基的沉降 z 与格构梁的变形 y 相等，得

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

该齐次四阶常系数微分方程的通解为

$$y = e^{\lambda x} [c_1 \cos(\lambda x) + c_2 \sin(\lambda x)] + e^{-\lambda x} [c_3 \cos(\lambda x) + c_4 \sin(\lambda x)]$$

式中： λ 为弹性地基梁的柔性指数(m^{-1})， $\lambda =$

$$\sqrt[4]{\frac{kb}{4E_b I_b}}; c_1 \sim c_4 \text{ 均为待定积分常数，可由荷载位}$$

置及边界条件确定。

为了简化计算, 在实际边坡治理工程中可将纵横相交的格构梁拆分成若根纵梁和横梁。考虑到梁的长度为 $\pi/(4\lambda) < L < 2\pi/\lambda$, 且荷载到梁端的距离一般都小于 π/λ , 故每根纵梁(或横梁)可看作是紧贴坡面的有限长梁。有限长梁受力简图如图 2 所示。

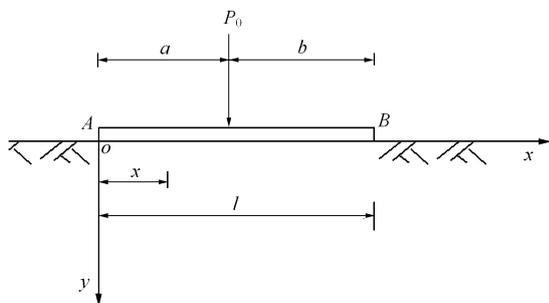


图 2 有限长梁受力简图

Fig.2 Sketch of finite beam subjected to a point load

锚索预应力的作用可简化为作用在梁上的集中力。当有 n 个集中力作用时根据变形协调条件, 该纵(横)梁的变形 y 、弯矩 M 和剪力 V 分别为

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= \frac{\lambda}{kb[\text{sh}^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} \sum_{i=1}^n P_i I_{3i} \\ M(x) &= \frac{1}{2\lambda[\text{sh}^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)]} \sum_{i=1}^n P_i I_{1i} \\ V(x) &= -\frac{1}{\text{sh}^2(\lambda l) - \sin^2(\lambda l)} \sum_{i=1}^n P_i I_{2i} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: I_{1i} , I_{2i} , I_{3i} 见相关研究^[11]。

当 $x > a$ 时, 则式(4)中 a , b 位置交换, 且 x 从点 B 向左。

在考虑格构梁与地基相互作用时, 柔性指数 $\lambda = \sqrt[4]{\frac{3k}{E_b h^3}}$ (其中, h 为梁高(m))既含有反映场地岩土体性质的基本参数 k , 又包括反映格构梁的基本性质的物理参数 E_b 及几何参数。

预应力通过格构梁向靠山侧梁底土体产生压应力, 并以某一扩散角从地面向四周和深部土体传递, 压应力值随传递距离的增大而递减, 经过一定距离的传递, 应力发生扩散、叠加, 在滑坡体内部产生比较均匀的压应力区, 同时坡体内部土体的强度有所提高。郑颖人等^[12]采用有限元数值法对梁与岩体之间的土压力分布规律进行分析, 认为框架节点处的土压力较大, 特别是当边坡岩体弹性模量较大时

更为突出。刘晶晶等^[13]通过预应力锚索格构梁的室内模型试验, 对格构梁底部土体应力的实际分布情况进行分析, 结果显示: 土中应力随锚索预应力的增大而增大, 且格构梁底部的基底反力并非成直线或线性变化, 而是与所加锚索的位置有关, 因此不能简单地将格构梁看成刚性梁。许英姿等^[6]通过比较了不同地基反力系数的岩土体上格构梁弯矩发现: 当土体很软($k = 50 \text{ MPa}$)时, 荷载作用下土体变形大, 导致梁的弯矩也大; 随着土体反力系数的增大, 梁弯矩值变化很小。同时也发现: 梁的物理参数 E_b 对梁的变形基本无敏感性; 但是梁高 h 对 λ 的影响最敏感, 因此对梁的弯矩及变形也最为敏感。若要调节 λ , 改变梁高效果最好。赵华^[14]认为, 当格构梁与地基的变形出现不协调时, 可以分别选用协调两者的变形或者加强对格构梁的设计来抵抗变形这 2 种方式解决。

3 现场试验研究

3.1 试验场地工程概况

顺溪场滑坡位于三峡库区忠县烂泥湾^[15], 属长江左岸岸坡, 斜坡走向 NW, 朝向 NE, 斜坡呈陡缓相间的台阶状, 缓坡平台为长江侵蚀阶地。滑坡于 2004 年 4~5 月出现滑动, 目前仍然保持着比较清楚的滑坡形态。滑坡后缘及南侧侧缘陡倾滑壁明显, 北西侧边界则表现为张扭性的地裂缝。滑坡面积约 $1\,300 \text{ m}^2$, 厚度一般 $5\sim 8 \text{ m}$, 体积约 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

滑坡前缘高程约 214 m , 后缘高程约 240 m , 高程 210 m 左右有沿江公路通过, 由于公路开挖, 公路内侧形成了高 $8\sim 12 \text{ m}$ 的边坡。滑坡即发育在沿江公路内侧, 并朝着公路方向滑动(滑坡主滑方向 65°), 剪出口产状平缓, 距路面高 $3.5\sim 4.0 \text{ m}$ 处, 剪出口以下为紫红色泥质粉砂岩, 岩层完整, 以上为松散的块石土, 块石成分为紫红色泥质粉砂岩与浅灰绿色砂岩。沿剪出口有线状分布的泉眼渗出, 滑坡发育地层为侏罗系上统蓬莱镇组(J_3p)厚层灰绿色块状长石石英砂岩及紫红色泥岩泥质粉砂岩, 滑坡体为强风化灰白色砂岩碎块石(Q^{del})。滑坡中部坡度为 $30^\circ\sim 40^\circ$ 。滑坡后缘以上为基岩陡坎, 坡度为 $60^\circ\sim 80^\circ$ 。图 3 给出了预应力锚索格构梁剖面布置图。

3.2 格构梁现场试验设计

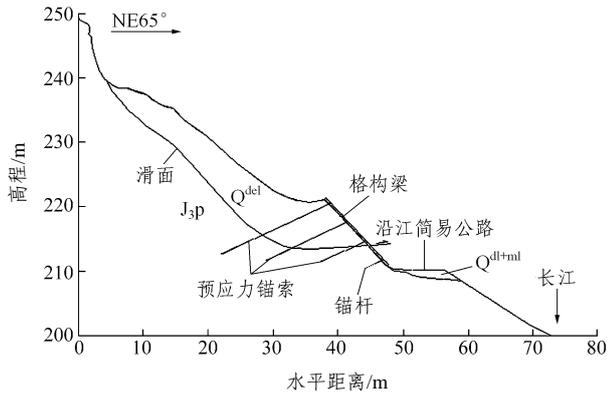


图3 预应力锚索格构梁剖面

Fig.3 Profile of prestressed anchor lattice beam

根据场地地形地貌，共设置4榀预应力锚索格构梁。如图4所示，每榀格构梁由4根横梁(从上往下分别为边横梁H1、中横梁H2、中横梁H3、边横梁H4)和3根纵梁(从右往左分别为边纵梁Z1、中纵梁Z2、边纵梁Z3)组成，且均为0.4 m×0.5 m的矩形截面。横梁间距4 m，悬臂端长2 m，全长12 m；纵梁间距4 m，悬臂端长1 m，全长14 m。从上到下，第1~3排横梁与纵梁的交节点为预应力锚索。锚索由5根 $\phi 15.2$ mm、极限抗拉强度1 860 MPa、公称截面积139 mm²的钢绞线组成，设计锚固力为500 kN。锚孔直径130 mm，与水平面的夹角为25°。第4排横梁与纵梁的节点为5 m长全黏接锚杆。采用GXR振弦试钢筋计与格构梁受力主筋焊接连接，采用GPC-2型手持式钢弦频率测定仪采集数据，通过监测钢筋计的内力推导纵横梁的弯矩分布。考虑到格构梁具有一定的对称性，本次试验共设100 kN量程钢筋计24个(见图4)，第1, 2排横梁各设置6个，编号分别为H1-1~H1-6, H2-1~H2-6；纵梁共12个，编号分别为Z1-1~Z1-12，除Z1-11与Z1-12之间的间距为2 m外，其余钢筋计之间及H1-1, H2-1, Z1-1与相近梁端的间距均为1 m，根据钢筋计导线的长短共设3个数据采集点。格构梁节点编号分别为S1~S9，即为锚索的张拉锁定顺序。

3.3 格构梁内力特征分析

根据钢筋计的轴力实测值和钢筋混凝土相关公式，可以计算出横梁和纵梁钢筋计所在梁截面的弯矩(以下简称实测弯矩)，绘制成梁弯矩变化曲线图。考虑到格构梁弯矩变化规律具有相似性，本文重点以中横梁H2为例，分析荷载作用下其弯矩的变化

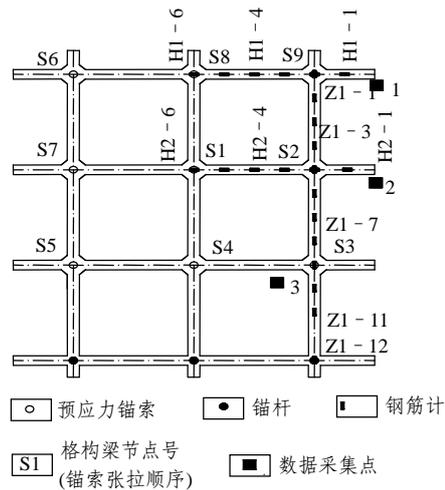


图4 钢筋计平面布置图

Fig.4 Layout of steel bar meters

特征。图5给出了中横梁H2加载过程弯矩变化曲线，坐标原点为梁的右端点。

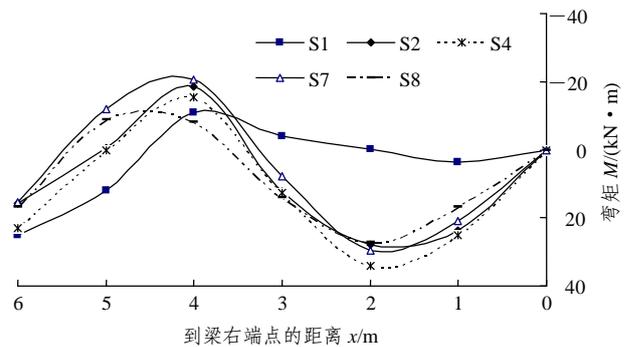


图5 中横梁H2加载过程弯矩变化曲线

Fig.5 Moment variation curves along middle transverse beam H2 under different node loads

当6 m处S1加载后，中横梁H2右端0~2 m范围内梁底稍稍受拉；2.0~4.5 m范围内梁底则处于受压状态；4.5~6.0 m范围内梁底处于受拉状态。

当2 m处S2加载后，该节点附近底部正弯矩变化幅度最大，从0.3 kN·m增加到34.0 kN·m，同时受拉范围扩大到0.0~3.5 m，负弯矩范围有所减小，其绝对值有所增加；由于荷载作用导致弯矩叠加，受压状态左移到3.5~5.0 m；S1附近梁底5~6 m范围处于受拉状态，同时弯矩极值也从25 kN·m减少到17 kN·m。由此可以得出，当考虑格构梁与岩体相互作用时，节点锚固力作用下梁底处于受拉状态的范围为3.5~4.0 m，验证了本场地格构梁间距设计的准确性。

当中横梁H3上S4加载后，中横梁H2各节点

处弯矩略有增加, 约为 $6.23 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 跨中负弯矩绝对值略有减少, 约为 $2.54 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。因此, 中横梁 H3 上节点加载对中横梁 H2 弯矩的影响较小。试验结果表明: 尽管每榀格构梁都是由若干横梁和纵梁垂直交叉所组成的有机整体, 但各节点处锚索的张拉锁定只对与之相连的横纵梁发生作用, 而对相邻梁弯矩的贡献较小。

图 6 给出了中横梁 H2 加载完毕弯矩实测与 Winkler 模型值(锚固荷载在节点处沿纵、横方向的分配比例为 1)对比图。

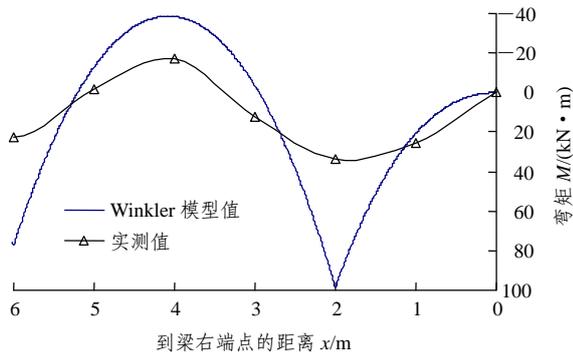


图 6 中横梁 H2 加载完毕弯矩实测与 Winkler 模型值对比图
Fig.6 Comparison of moment distributions of field test measurement and theoretical result based on Winkler model in middle transverse beam H2

从图 6 可以看出: 节点锚索张拉锁定完毕, 中横梁节点处梁底都处于受拉状态, 跨中梁底都处于受压状态。实测弯矩与 Winkler 弹性地基模型所计算的分布趋势基本吻合, 但小于理论计算值。由于 Winkler 弹性地基模型假定没考虑地基中剪应力的影响, 因而就没能考虑地基中的应力扩散效应, 该扩散效应会减小框梁的弯矩; 另外, 锚索松弛导致预应力损失也是实测值比计算值偏小的原因。对比结果表明: 用 Winkler 弹性地基模型计算中横梁弯矩结果偏于安全, 造成一定程度的浪费, 因此有必要研究锚固力在格构纵横梁上的分配比例。

3.4 锚固力沿格构纵横梁内力分配研究

虽然锚索格构梁复合支挡结构是一个整体受力体系, 但是节点加载只对与之相连的横纵梁发生作用, 而对相邻梁弯矩的贡献较小, 故可以忽略扭矩作用。本次反分析就是根据实测轴力所计算的弯矩反算节点处锚索预应力荷载在格构纵横梁上内力的分配, 由于现场测试所计算的弯矩较为准确, 反分

析得到的内力分配对格构梁设计具有一定的参考价值。

首先, 假设锚索的有效锚固力 P_i 可分配为垂直作用在格构纵梁与横梁上的力为 P_{ix} , P_{iy} , 且有

$$P_i = P_{ix} + P_{iy} \tag{5}$$

式中: P_{ix} , P_{iy} 表示节点 i 处 X , Y 方向(即纵、横方向)梁上的垂直分力(kN)。

基于 Winkler 假定的弹性地基梁模型, 采用有限差分法^[16]计算出纵横梁上的弯矩 M_{iwx} , M_{iwy} (以下简称理论弯矩), 然后与现场测试所计算值 M_{ix} , M_{iy} 进行拟合, 直到满足精度要求为止。这样就得出了节点处预应力荷载沿纵横梁分配情况。

图 7 给出了边横梁 H1 弯矩实测值与理论值对比图, 此时有

$$(P_{9y}, P_{8y}, P_{6y}) = (40 \text{ kN}, 40 \text{ kN}, 40 \text{ kN}) \tag{6}$$

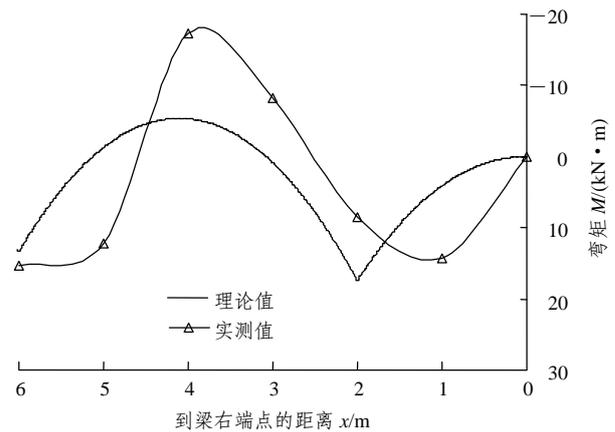


图 7 边横梁 H1 弯矩实测值与理论值对比图
Fig.7 Comparison between measured and theoretical bending moments in side transverse beam H1

图 8 给出了中横梁 H2 弯矩实测值与理论值对比图, 此时有

$$(P_{2y}, P_{1y}, P_{7y}) = (80 \text{ kN}, 80 \text{ kN}, 80 \text{ kN}) \tag{7}$$

图 9 纵梁 Z1 弯矩实测值与理论值对比图, 坐标原点为梁的上端点, 此时有

$$(P_{9x}, P_{2x}, P_{3x}) = (150 \text{ kN}, 280 \text{ kN}, 190 \text{ kN}) \tag{8}$$

因此, 由式(5), (6), (8)可以得出边节点 S9 处锚索有效锚固力 $P_9 = P_{9x} + P_{9y} = 190 \text{ kN}$ 。

由式(5), (7), (8)可以得出边节点 S2 处锚索有效锚固力 $P_2 = P_{2x} + P_{2y} = 360 \text{ kN}$ 。

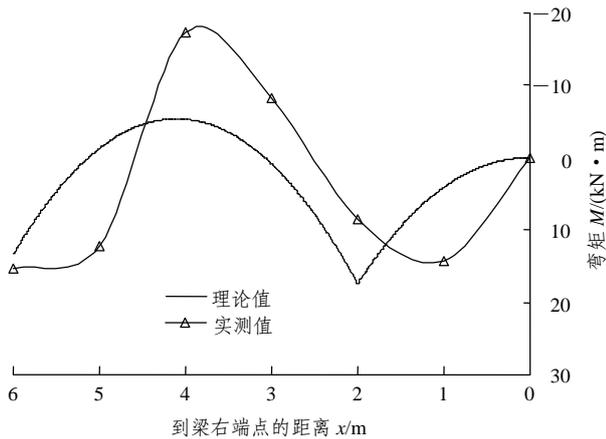


图8 中横梁H2弯矩实测值与理论值对比图

Fig.8 Comparison between measured and theoretical bending moments in middle transverse beam H2

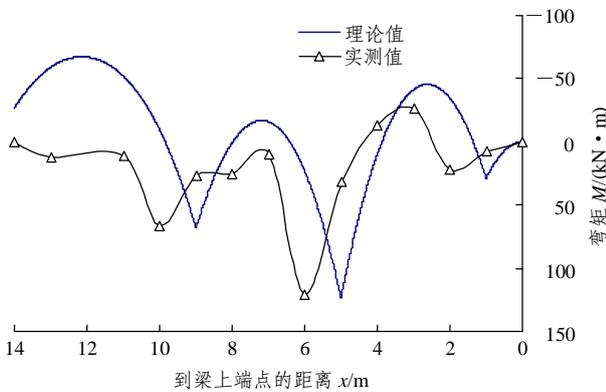


图9 纵梁Z1弯矩实测值与理论值对比图

Fig.9 Comparison between measured and theoretical bending moments in longitudinal beam Z1

因此，角节处纵、横梁的分配系数为： $P_{9x}/P_9=0.79$ ， $P_{9y}/P_9=0.21$ ；边节处纵、横梁的分配系数为： $P_{2x}/P_2=0.78$ ， $P_{2y}/P_2=0.22$ 。故边梁节点处荷载纵、横梁的分配系数比接近3.55~3.76。

4 结 论

结构与地质体相互作用是工程地质研究的核心问题，传统的结构与岩土体相互作用的研究方法为数值离散法及解析法。然而，结构与地质体的参数难以确定等原因，使得有其数值法计算结果可能与实际差别较大。另外，解析法只对一些特殊情况给出了解答，由于荷载及边界条件和岩土体性质的复杂性，很多情况难以求解。本文通过解析解分析和现场试验，详细研究了格构锚固结构与地质体相互

作用机制及设计理论和方法，得到了如下认识：

(1) 现场实测值与根据 Winkler 弹性地基模型计算值曲线走势一致，但小于理论计算值，表明支挡结构处于安全状态，采用弹性地基模型进行格构梁内力计算能够满足工程实践的要求。

(2) 由于 Winkler 弹性地基模型假定没考虑地基中剪应力的影响，因而就没能考虑地基中的应力扩散效应，该扩散效应会减小框梁的弯矩；另外，锚索松弛导致预应力损失也是实测值比计算值偏小的原因。

(3) 考虑边坡地质体与支挡结构相互作用进行结构设计时，经济合理的格构纵横梁间距为 3.5~4.0 m；边纵梁交叉节点处锚固力沿纵、横梁的分配比例为 3.55~3.76。

现场试验较准确地反映了格构梁弯矩的变化规律，验证了本滑坡格构设计的准确性，为研究支挡结构的结构设计提供了可靠的依据。

参考文献(References):

- [1] 张永防, 王秉勇. 用锚杆框架护坡加固南昆线膨胀土边坡的研究[J]. 铁道工程学报, 2000, 67(3): 92 - 95.(ZHANG Yongfang, WANG Bingyong. Study on strengthening expansive soil side slope in Nanning—Kunming Railway by using revetment with anchor bolt frame[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000, 67(3): 92 - 95.(in Chinese))
- [2] 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): 1 383 - 1 386.(YANG Ming, HU Houtian, LU Caijin, 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): 1 383 - 1 386.(in Chinese))
- [3] 殷跃平. 滑坡钢筋砼格构防治“倒梁法”内力计算研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, (6): 52 - 56.(YIN Yueping. Internal force analysis of steel concrete lattice by reverse beam method for landslide control[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (6): 52 - 56.(in Chinese))
- [4] 吴礼舟, 黄润秋. 锚杆框架梁加固膨胀土边坡的数值模拟及优化[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 605 - 608.(WU Lizhou, HUANG Runqiu. Numerical simulation and optimum design of anchor frame beam strengthening expansive soil road-cut slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 605 - 608.(in Chinese))

- [5] 赵玲. 高层建筑上部结构-筏板基础-地基共同作用的有限元分析——以成都市某高层框架住宅为例[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2006: 3-4.(ZHAO Ling. Finite element analysis of the superstructure-footing-ground co-action in the construction of high-rise building[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006: 3-4.(in Chinese))
- [6] 许英姿, 璩继立, 葛修润, 等. 格构锚固结构与地基相互作用分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 742-745.(XU Yingzi, QU Jili, GE Xiurun, et al. Analysis of soil and lattice framed anchor structure interaction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 742-745.(in Chinese))
- [7] 方理刚, 段靓靓, 梁 锴. 横观各向同性岩体边坡与预应力锚索框架梁相互作用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 135-143.(FANG Ligang, DUAN Liangliang, LIANG Kai. Interaction between transverse isotropy rock slope and prestressed anchor cable with frame beam support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 135-143.(in Chinese))
- [8] 武亚军. 基坑工程中土与支护结构相互作用及边坡稳定性的数值分析[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2003.(WU Yajun. Numerical analyses of stability of soil slopes and interaction of soil and support structure in foundation pit engineering[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.(in Chinese))
- [9] 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.(XU Yingzi, TANG Huiming. Analysis of analytic solution of lattice frame anchor structure of landslide control[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(3): 89-93.(in Chinese))
- [10] YIN J H. Comparative modeling study of reinforced beam on elastic foundation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(3): 265-271.
- [11] 中国船舶工业总公司第九设计院. 弹性地基计算图表及公式[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 199-200.(China Shipbuilding NRRI Engineering Co., Ltd.. Calculation charts and formulations of elastic foundation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 199-200.(in Chinese))
- [12] 郑颖人, 张玉芳, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在元磨高速公路高边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 812-3 817.(ZHENG Yingren, ZHANG Yufang, ZHAO Shangyi, et al. Application of strength reduction FEM to Yuanjiang—Mohei expressway cut slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 812-3 817.(in Chinese))
- [13] 刘晶晶, 赵其华, 彭社琴, 等. 预应力锚索格构梁作用下边坡土中应力分布的室内模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (4): 9-12.(LIU Jingjing, ZHAO Qihua, PENG Sheqin, et al. On indoor model experiment of the action of prestressed anchor-rope and lattice beam on slope soil stress distribution[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (4): 9-12.(in Chinese))
- [14] 赵 华. 边坡生态护坡结构稳定性分析及地基土的适宜性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(4): 47-49.(ZHAO Hua. Structures stability analysis and suitability assessment of biological prevention with frame beams[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003, 14(4): 47-49.(in Chinese))
- [15] 邓清禄, 许英姿, 徐景田, 等. 忠武输气管道顺溪 I 号滑坡治理勘察与设计[R]. 武汉: 中国地质大学, 2005.(DENG Qinglu, XU Yingzi, XU Jingtian, et al. The investigation and treatment of Shunxi landslide No.1 along Zhongwu gas pipe[R]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005.(in Chinese))
- [16] 田亚护, 刘建坤, 张玉芳. 预应力锚索框架内力计算的有限差分法[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4): 22-25.(TIAN Yahu, LIU Jiankun, ZHANG Yufang. Internal force calculation of prestressed anchor cable frame by finite difference method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4): 22-25.(in Chinese))