

# 预应力格构锚固结构受力特征模型试验研究

宋 军<sup>1,2,3</sup>, 梁 炯<sup>2,3</sup>, 石胜伟<sup>2,3</sup>, 程英建<sup>2,3</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

3. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734)

**摘 要:** 格构锚固是边(滑)坡工程常用的防治技术之一, 为了研究格构锚固结构实际支挡碎石土边坡的受力特征, 利用现场大比例尺物理模型试验, 填筑粘土方式模拟滑坡体, 设计相似比为1:2.5的格构梁, 通过后缘加载模拟了格构锚固体系承载受力直至失稳破坏的全过程, 监控格构梁后部土压力、格梁应力、格梁位移等参数, 并分析了格构梁受力、位移特征和变形破坏模式。结果表明: 格构边界处锚固点处变形较内部更为明显, 跨梁呈“拱桥式”变形, 最终在锚固点附近折断破坏; 各纵横梁受力特征类同, 梁交叉锚固点处应力集中, 梁中部受力最小, 应力呈近倒三角形分布; 模型中锚固点受力和位移自顶到底呈现线性递减的应力分配现象。上述研究可以为工程优化设计提供一定参考。

**关键词:** 格构锚固; 边坡工程; 受力特征; 变形破坏; 物理模型

**中图分类号:** TU476

**文献标识码:** A

## MODELLING TEST ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PRE-STRESSED LATTICE FRAMED ANCHOR STRUCTURE

SONG Jun<sup>1,2,3</sup>, LIANG Jiong<sup>2,3</sup>, SHI Shengwei<sup>2,3</sup>, CHENG Yingjian<sup>2,3</sup>

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. The Institution of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China;

3. Technical Center for Geological Hazard Prevention & Control, CGS, Chengdu 611734, Sichuan, China)

**Abstract:** Lattice anchoring is one of the frequently used prevention technologies for slope and landslide engineering. A large-scale physical model test was adopted to explore the interaction of actual mechanics characteristics of lattice frame anchorage in the detritus soil slope. Using the compacted clay filling the indoor model experiment groove to simulate the landslide mass, and designing the lattice beams with the ratio of similitude 1:2.5, which revealed the whole deformation process in lattice beams of pre-stressed lattice anchorage system under the action of pre-stress, we monitored parameters of the soil pressure, stress of lattice and displacement of lattice. On the basis of analysis about stress-strain data and deformation signs, the following results are obtained: The deformation of the anchor points at the boundary of the lattice were more obvious than those of the interior, and also fractured nearby, in addition, the shape of deformed cross-beam was just like an arch bridge; The stress on each beam was near the inverted triangle distribution which was maximum at the beam crossing points; The stress

基金项目: 国土资源公益性行业专项(201511051); 中国地质调查项目(DD20160278)

作者简介: 宋军(1963-), 男, 教授级高级工程师, 在读博士, 长期从事地质钻探技术和地质灾害防治技术研究工作。E-mail: songjun801@163.com

收稿日期: 2018-02-10; 修回日期: 2018-04-08

吴芳编辑

distribution of the anchor points was linearly decreasing from the top to the bottom. The above research could provide some reference for engineering optimization design.

**Key words:** lattice frame anchorage; slope engineering; mechanical properties; deformation process; physical model

## 0 引言

格构锚固是用于边坡和地质灾害治理中常见的防治技术之一<sup>[1]</sup>,是由格构梁和锚索(或锚杆)组合形成的复合结构,不仅能起到深层锚拉的抗滑作用,亦能起到坡表固坡护坡的效果,尤其适宜土质边坡的工程防治,因此被广泛采用。

“锚索(或锚杆—格构梁—地基岩土)”所构成的复合结构体系,常称为格构锚固体系<sup>[2]</sup>。由于结构形式多样、地基岩土的差异、受力特征的复杂,使其在当前工程设计中,主要依据实践经验来设计。实际工程中,技术人员通常利用设计安全系数下的边坡剩余下滑力来设计锚固点的锚拉力,常常忽略了连系梁的作用<sup>[3]</sup>。此外,在低等级工程中(如二级以下公路路基边坡治理),大多仅依靠规范提出的经验坡比与锚拉力间的关系来进行结构设计。故而,由于设计依据并不充分,导致计算结果不准确,致使少部分格构锚固工程安全裕度设计不足,形成安全隐患,甚至破坏失效;也有少量防治工程过于保守,造成工程浪费。因此,只有明确了格构锚固体系的受力特征和变形破坏模式,才能准确、合理地进行工程结构设计。

目前,有关格构锚固体系受力特征的研究,主要是依据 Winkler 弹性地基梁<sup>[4]</sup>、倒梁法<sup>[5]</sup>等方法为基础来开展模型试验<sup>[6]</sup>和数值模拟<sup>[7]</sup>对比分析。郑颖人等<sup>[8]</sup>通过有限元分析对不同加载条件下的格构梁反力形成过程进行了分析,认为锚点会产生应力集中,尤其在岩质边坡中更为明显。张涛等<sup>[9]</sup>通过室内模型试验,测试了3种不同间距格构梁在不同加载条件下,格构梁上主要节点所承受反力的变化规律,提出构格梁、锚点力差异性设计的思路。韩冬冬等<sup>[10]</sup>开展物理模型试验与传统倒梁法的内力计算成果进行比对,发现边跨各梁受力特征趋势相同,而内跨各梁受力相差较大。

很多学者对格构锚固体系受力和变形特征进行了大量的研究,得到了丰富的成果<sup>[11]</sup>。但是存在以下不足:传统的室内小比例尺模型试验,尺

寸效应明显<sup>[12]</sup>;大多数的模型试验只是研究了耦合过程(预应力张拉使锚索—格构梁—岩土体紧密结合)、解耦过程(锁定且预应力较稳定后)中各体系组成单元的应力、位移等的变化趋势,而没有做到模型破坏的情形<sup>[13]</sup>。

因此,在这些研究的基础上,通过现场大比例尺物理模型试验,近似还原现实碎石土边坡特性,模拟在外荷载作用下预应力格构锚固结构变形直至破坏全过程,研究其变形破坏特征和内力分布规律,探索“锚索—格构—岩土体”的协同工作机理。为类似结构的边坡工程设计提供一定借鉴。

## 1 现场模型试验设计

### 1.1 试验方法

在模型试验设计以及格构梁的设计上,一定程度上参考了文献[14~16]内容。

试验采用现场大比例格构框梁的模型。模型选用几何相似比为 $\lambda = 1:2.5$ 的模型,自然砂岩边坡坡度为 $25^\circ$ ,上覆堆填碾压的碎石土,格构梁设4行4列。考虑到用相同材料比较容易满足相似条件,采用“放松重力效应”模型,弹性模量相似比 $C_E = 1$ 。

当锚索、格构和锚固点拉张施工完成后,利用后缘千斤顶施加斜向荷载,分级加载直至格构梁发生断裂,格构锚固体系整体受力方式发生陡然改变,即由整个体系受力转至锚固点受力为主,可判为“格构锚固体系失效”,结束试验<sup>[14]</sup>。

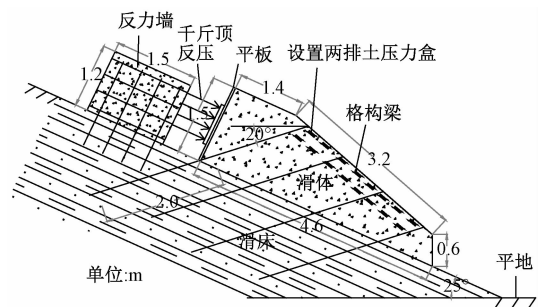


图1 模型试验剖面图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of landslide model (Unit: m)

## 1.2 滑坡模型材料

为了最大程度模拟现实碎石土边坡的特性, 试验选择在四川省江油市某典型薄层碎石土滑坡上开展。斜坡坡度为  $25^\circ$ , 基岩面较为平直完整, 将其开挖至基覆面, 然后进行分层填土夯实, 填土材料选择为滑体上的碎石土, 厚度为  $0.6\text{ m} \sim 1.5\text{ m}$ 。

表 1 岩土体材料参数表

Table 1 Rock and soil material parameters

模型材料	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	抗剪强度		弹性模量 $E/\text{Mpa}$	泊松比 $\nu$
		内聚力 $C/\text{kN}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$		
碎石土	22.5	12.0	23.5	25.0	0.30
砂岩	23.0	10.0	21.5	23.5	0.40

## 1.3 格构锚固设计

### (1) 格构梁布置

格构的截面尺寸为  $120\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ , 横、纵间距均为  $1.5\text{ m}$ , 格构梁受拉侧配筋、受压侧配筋均为 2 根  $\Phi 12\text{ mm}$  钢筋, 箍筋为  $\Phi 4 @ 220\text{ mm}$ , 混凝土标号 C25。格构梁为 4 排  $\times$  4 列<sup>[15]</sup>。

### (2) 锚索

按相似比设计, 锚索统一采用 1 束  $\Phi 15.24$  钢绞线, 锚索孔径  $800\text{ mm}$ , 入射角为  $20^\circ$ , 纵向间距为  $1.2\text{ m}$ , 横向间距  $1.2\text{ m}$ , 锚固段长度为  $3.0\text{ m}$ , 锚固段  $2\text{ m}$ , 砂浆型号为 M25。施加预应力值为

$20\text{ kN}$ , 锚索施工分二级张拉, 第一次张拉值为锚索张拉控制应力的  $70\%$ , 第 3 天后进行二次张拉, 最终张拉应力超设计张拉应力  $10\%$  并锁定<sup>[16]</sup>。

## 1.4 加载与测试系统设计

滑坡模型制作完成后, 需先进行格梁节点锚索的预应力张拉, 施加预应力值为  $20\text{ kN}$ 。等待锚索测力计监测数据稳定后, 在滑体后缘采用千斤顶施加荷载, 待监测数据稳定后, 施加下一级荷载, 到滑坡发生变形破坏为止。现场加载测试如图 2 所示。

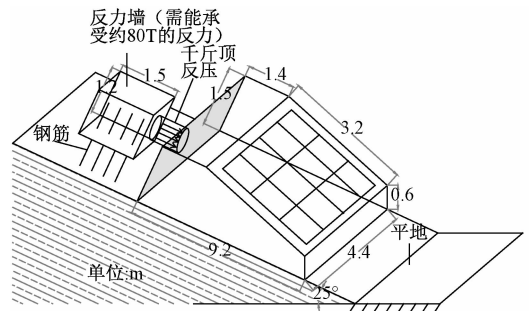


图 2 现场加载测试

Fig. 2 Field loading test

试验共进行了 25 次后缘加载, 并对梁上测点进行编号。例如, 横梁 H1 上测点从左到右分别为 H1-1、H1-2 和 H1-3。监测点布置如图 3 所示。

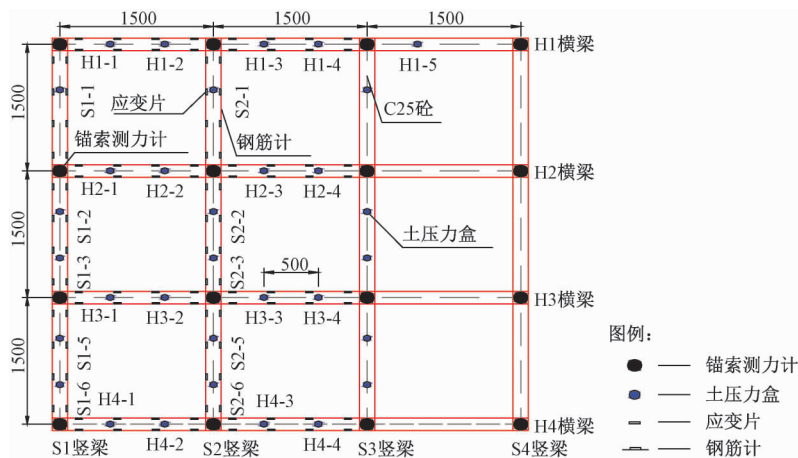


图 3 测试点的布置 (单位: mm)

Fig. 3 Design of test points (Unit: mm)

试验数据的采集主要包括: 锚索在锚头处的张拉力、格构梁框架纵横梁的受力和应变数据、格构框架的位移情况以及滑坡体在格构锚固体体系作用下形成的土体反力。对应的采集仪器布置见图 2 所示。横梁从上到下分别标记为 H1、H2、H3 和 H4; 竖梁从左到右分别为 S1、S2、S3 和 S4。

## 2 试验成果分析

### 2.1 横梁受力分析

统过数据分析, 横梁 H1—H3 的测试曲线如图 4 所示, 具有如下特征:

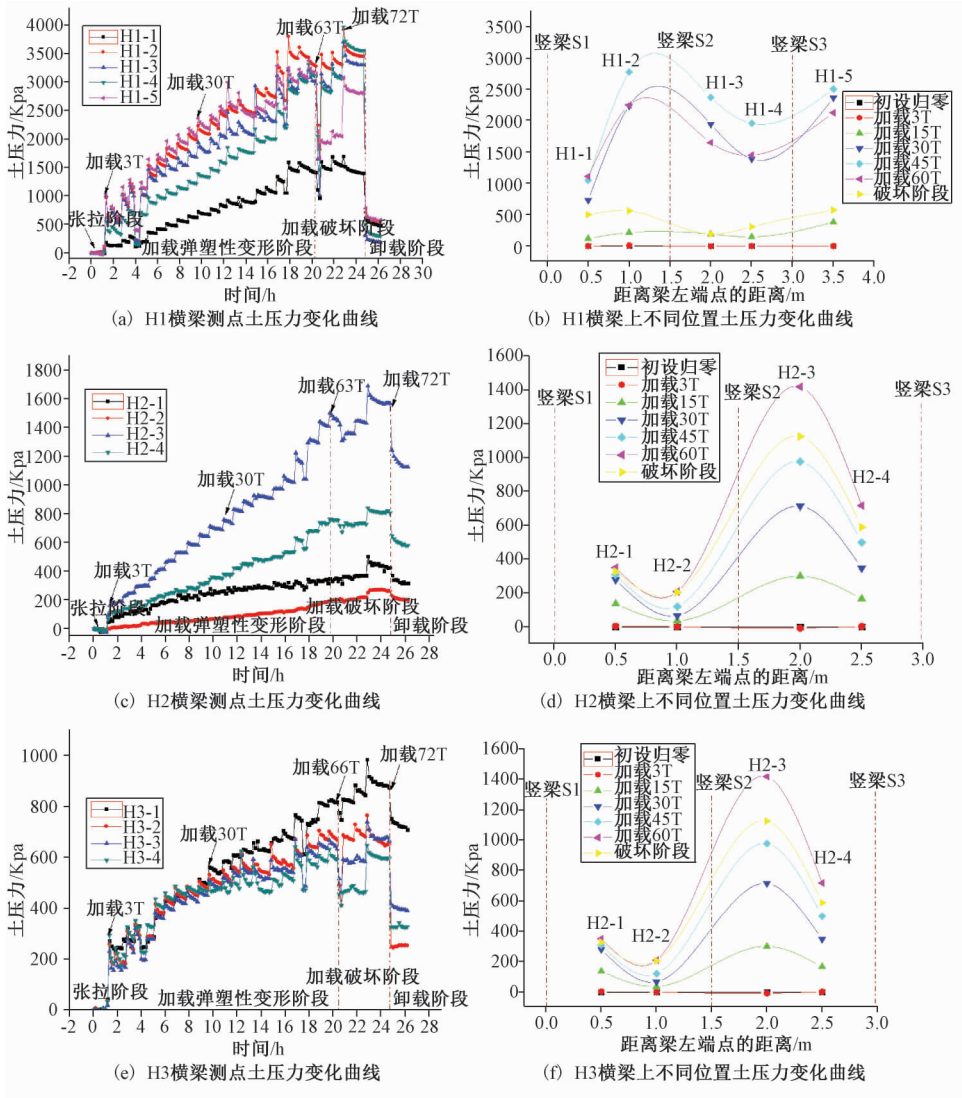


图4 横梁受力特征曲线

Fig. 4 Curves of mechanical properties of horizontal beams

(1) 如图4a、4c、4e所示, 随外荷载的增加, 各横梁同时受力, 且受力模式相似。

(2) 当滑坡后缘加载3 T至63 T时, 格构梁没有发生破坏, 为弹性变形阶段。土压力值每次加载完, 短时间内会显著增大; 随后土压力盒测值会有下降趋势, 然后逐渐趋于稳定。说明土体和格构梁发生了相互作用, 随着土体的挤压变形, 土体作用在格构梁上的荷载会更加均匀分布。次数土压力盒承受的集中应力会下降, 也是土压力盒数据也会有所下降。当滑坡后缘加载到63 T时, 格构梁断裂导致格构梁和土体发生了脱离, 因此压力盒曲线急剧下降。

(3) 后缘加载到63 T至72 T时, 起初每次加载后, 土压力值也随着增大; 最后加载后好土压

力值变化不打。是因为格构梁混凝土刚开裂时, 钢筋没有达到屈服破坏, 钢筋的拉力发挥一定的作用。但是随着加载量的进一步增加, 钢筋达到了屈服破坏, 此时格构梁发生了大位移变形, 整体格构锚固体系失效。

(4) 模型卸荷后, 压力盒数据急剧降低。进一步说明加载设计合理, 滑坡后缘施加的下滑推力可以直接作用在格构梁上, 因此, 后缘荷载卸荷之后, 格构所受的滑坡推力也急剧变小。

(5) 如图4b、4d、图4f所示, 当滑坡后缘荷载加大时, 单个监测点数据也会均匀增大, 且相同监测点位置的检测数据变化大小也相似。然而同一横梁不同检测点的数据大小悬殊交大。因为试验设备的缺陷, 导致后缘不同油缸加载时同步

性不好,造成同一横梁上的土压力的不均匀;并且横梁下土体的密实度差异,也是造成土压力不均匀的主要原因。

另外,从表2可看出,加载到一定数值后,最上排H1横梁所受压力最大,中部H2、H3次之,最下部横梁H4受到压力最小,可知,在坡体上部持续加载过程中,格构梁整体受力与变位呈现同时性,但其受力大小呈现不均匀性。

表2 H1—H4横梁在加载63T时受力数据表

Table 2 H1 to H4 beam's mechanical data table at the load of 63 T

		横梁受力变化情况/kPa				
		H1-1	H1-2	H1-3	H1-4	H1-5
		1575	3126	3263	3710	3113
加载63T后	H2-1	910	300	1400	750	
	H3-1	780	510	800	580	
	H4-1	280	110	700	410	
	H2-2					
	H2-3					

### 3.2 竖梁受力分析

竖梁也显示出与横梁受力类似的特征,以纵梁S1的受力情况为例进行说明(见图5):

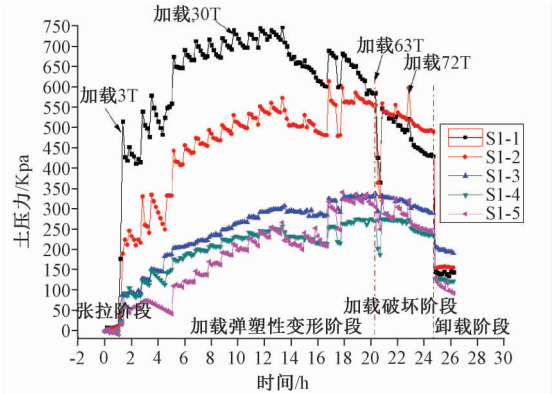
(1) 格构梁处于弹塑性变形阶段(加载量为3—63T时):曲线显示,每一次加载的过程中,土压力曲线急剧上升,平衡的过程中,压力盒数值趋于平稳,且有缓慢下降的趋势。而其他加载至63T时,压力盒曲线急剧下降,说明格构梁此时发生了断裂,格构梁失效。该现象和试验加载过程中所观察到的是一致的。

(2) 破坏加载阶段(加载量为63—72T时):随着加载的增加,土压力值也呈增大趋势。是因为格构梁混凝土开裂后,钢筋没有发生屈服破坏。但是钢筋发生屈服破坏后,土压力峰值变化不大,甚至有降低的趋势,是因为格构梁发生了大位移变形,此时混凝土发生贯通性开裂,格构梁破坏失效。

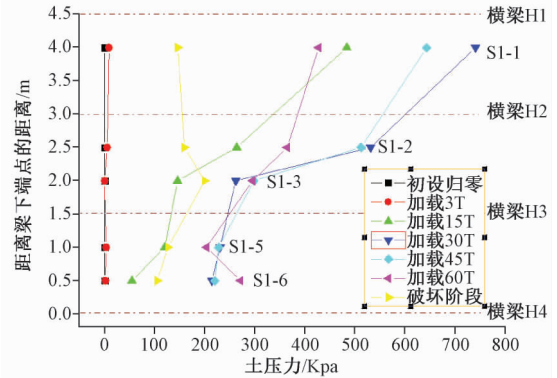
(3) 竖梁受土压力分布近似呈倒三角形,由于格构梁的整体性,竖梁与横梁在受力特征上具有相似性,即上部受力大,中部次之,下部最小。

### 3.3 格构锚固体系破坏过程分析

滑坡模型在卸载阶段以后,格构梁和土体均有开裂变形(见图6),加载试验过程中分别对加载30T、60T,和72T的格构梁破坏情况进行了



(a) S1竖梁测点土压力变化曲线



(b) S1竖梁按位置分布土压力变化曲线

图5 竖梁S1受力特征曲线

Fig. 5 Curves of mechanical properties of the vertical beam S1  
 记录。记录呈现如下过程:①H1横梁左右两个角最先出现裂纹;②H1横梁中部出现裂纹;③S1、S3竖梁上部出现裂纹;④H2横梁中部出现裂纹;⑤S1、S3竖梁中部出现裂纹;⑥H3横梁中部出现裂纹。



图6 加载破坏后的格构梁

Fig. 6 Lattice beam after the loading failure

在不同加载阶段格构裂纹破坏图中(见图7)可见,红色表示裂缝,格构锚固体系的破坏顺序为: H1左、右两个角→H1中部→S1、S3上部→

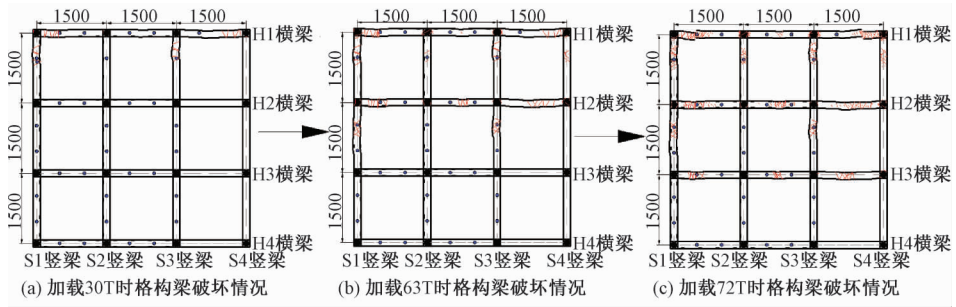


图7 不同加载阶段格构裂纹破坏展示图(单位: mm)

Fig. 7 Crack damages display at different loading stages

H2 中部。顶部横梁上的裂纹大多呈现拉张特性,起伏粗糙,裂纹分布由锚点处扩散开。跨梁受土体挤压呈“拱桥式”凸起,从格构破坏模式上属于受压破坏。

## 4 结论

通过格构锚固结构的现场试验,研究了格构锚固体系的整体受力特征和变形破坏全过程,经试验数据分析,揭示了格构锚固体系的基本受力分布规律,主要得到以下结论:

(1) 在不断加载作用下,格构梁同时受力产生位移,且各横梁和纵梁受力模式类似,纵横梁交叉锚固点处应力集中,梁中部受力最小,应力呈近倒三角形分布。

(2) 在恒定外力荷载作用下,模型中横梁的顶梁整体受力分摊较底部各梁更大,锚固点的受力大小自 H1 横梁到 H4 横梁呈现线性递减的现象。

(3) 在加载一定荷载范围内,整个格构锚固体系处于弹塑性变形状态,梁上受力、位移与锚固力的变化呈近线性递增;当荷载突破某一界限时,荷载变化较小,而位移呈持续增长,格梁断裂,格构锚固体系失效。

(4) 在宏观变形上,裂纹首先产生于顶部横梁的两侧,随荷载增加,格构横、纵边界锚固点处裂纹密度较梁中部更为明显,锚固点间呈“拱桥式”变形,最终在锚固点附近格梁折断破坏。

(5) 依据上述格梁的受力特征,在类似碎石土边坡格构锚固工程设计中,建议对预应力横梁进行差异化设计,自顶至底横梁的截面或配筋可优化递减。

## 参考文献/References

- [1] 田尤,杨为民,黄晓,等.天水市麦积区幅黄土滑坡发育分布特征及其孕灾因素分析[J].地质力学学报,2016,22(1):25~38.  
TIAN You, YANG Weimin, HUANG Xiao, et al. Distribution characteristics and inducing factors of loess landslide in Maiji mappable unit, Tianshui [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22 (1): 25 ~ 38. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吴礼舟,李部,孙萍.甘肃甘谷裂隙泥岩剪切蠕变行为及其修正模型研究[J].地质力学学报,2017,23(6):923~934.  
WU Lizhou, LI Bu, SUN Ping. Study on shear creep behavior of mudstone and its correction model of Gangu fissure in Gansu [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (6): 923 ~ 934. (in Chinese with English abstract)
- [3] 胡时友.框格护坡技术的新进展[J].西部探矿工程,1999,11(4):111~114.  
HU Shiyu. New progress of latticework slope protecting technology [J]. West-China Exploration Engineering, 1999, 11 (4): 114 ~ 114. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈春利,殷跃平,门玉明,等.全长黏结注浆格构锚固工程模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):881~889.  
CHEN Chunli, YIN Yueping, MEN Yuming, et al. Model test on fully grouted lattice beam anchorage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (4): 881 ~ 889. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周志刚.预应力锚索格构梁加固边坡的优化设计及安全系数计算[D].杭州:浙江大学,2011.  
ZHOU Zhigang. Optimization design and safety factor calculation of the slopes reinforced by pre-stressed anchors and lattice beams [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [6] Nambu H, Noguchi Y, Saitoh K, et al. Nearly nondiffracting electron lattice beams generated by polygonal slits [J]. Microscopy, 2017, 66 (4): 295 ~ 299.
- [7] Shi Z W, Xu Y T, Li Y, et al. Propagation of an Airy-Gaussian vortex beam in defected photonic lattices [J]. Optik -

- International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 142: 370 ~ 375.
- [ 8 ] 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): 3812 ~ 3817.  
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): 3812 ~ 3817. (in Chinese with English abstract)
- [ 9 ] 张涛, 石胜伟, 谢忠胜, 等. 格构锚固体系梁下土体反力分布规律的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (3): 70 ~ 75.  
ZHANG Tao, SHI Shengwei, XIE Zhongsheng, et al. Model test study of the soil anti-force distribution rule under the beams of a frame anchorage system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41 (3): 70 ~ 75. (in Chinese with English abstract)
- [10] 韩冬冬, 门玉明, 刘璐. 预应力格构锚固体系格构梁内力分布规律模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (8): 1619 ~ 1627.  
HAN Dongdong, MEN Yunming, LIU Lu. Modelling test on internal force distribution in lattice beams of prestressed lattice anchoring system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (8): 1619 ~ 1627. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 on analytic solution of lattice frame anchor structure of landslide control [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21 (3): 89 ~ 93. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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, 32 (6): 52 ~ 56.  
YIN Yueping. Internal force analysis on steel Concrete lattice by reverse beam method for landslide control [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32 (6): 52 ~ 56. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李德芳, 张友良, 陈从新. 边坡加固中预应力锚索地梁内力计算 [J]. 岩土力学, 2000, 21 (2): 170 ~ 172.  
LI Defang, ZHANG Youliang, CHEN Congxin. Design of prestressed-cable sommer for slope-reinforcing engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21 (2): 170 ~ 172. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵晓彦, 黄金河, 周一文, 等. 坡面锚索与坡脚抗滑桩联合加固边坡设计方法 [J]. 西南交通大学学报, 2017, 52 (3): 489 ~ 495.  
ZHAO Xiaoyan, HUANG Jinhe, ZHOU Yiwen, et al. Joint reinforcement design method of tieback anchors on slope surface and anti-slide piles at slope toe [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52 (3): 489 ~ 495. (in Chinese with English abstract)
- [15] 曹瑞琅, 王玉杰, 皮进, 等. 无粘结环锚预应力衬砌锚具槽布置方式对比研究 [J]. 水利水电技术, 2017, 48 (7): 59 ~ 63.  
CAO Ruilang, WANG Yujie, PI Jin, et al. Comparative study on layout patterns of anchorage slots for pre-stressed lining with unbonded circular anchored tendons [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (7): 59 ~ 63. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李萌, 李守义, 程帅, 等. 中墩锚块底部接触方式和锚索优化研究 [J]. 水利水电技术, 2016, 47 (12): 43 ~ 47.  
LI Meng, LI Shouyi, CHENG Shuai, et al. Optimal study on contact mode of bottom anchor-block and anchor cable of central pier [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47 (12): 43 ~ 47. (in Chinese with English abstract)