

崩塌落石的 SNS 柔性拦石网系统

阳友奎

方向池

(布鲁克(成都)工程有限公司,成都 610051) (云南省公路规划勘察设计院,昆明 650011)

提要 在崩塌落石的栅栏式拦截防护中,以圬工、钢木结构为主的传统拦挡结构物,因其体积庞大、材料用量大、施工劳动强度大和缺乏可靠的设计技术保障,已难以适应诸如高等级公路、铁路和其他工程建设等级和技术水平的不断提高。本文介绍了以钢丝绳网为主要构成材料的岩崩落石 SNS 柔性拦石网系统的功能原理、基本特征、主要构成和主要适用范围,阐明了该项新技术在防护功能、标准化设计与施工作业以及适应性和安全可靠性等方面相对于传统常规手段的技术经济优势。

关键词 崩塌落石,钢丝绳网,柔性防护,SNS 系统,拦石网

1 前言

我国是个多山国家,山区铁路、公路、水电站等工程都不可避免地要开挖人工边坡或紧邻自然山坡修建,由此而来的有关崩塌落石类斜坡地质灾害防治是必须加以解决的问题。特别是近年来国内基础设施建设步伐的加快,加之有关工程建设项目等级的提高以及国家经济建设战略的西移,斜坡地质灾害的有效防治对有关工程特别是西部山区工程的顺利建成和建成后的安全运营就显得更为重要。完善传统的防治措施、尝试并探索更为先进可靠的新技术新措施,不论是从经济上还是从技术发展的要求上都显得迫切而重要起来。

崩塌落石本身仅涉及少数不稳定岩块,其发生通常并不改变斜坡的整体稳定性,防止落石造成道路、建筑物的不能正常营运或破坏以及人身伤亡是其防治的最终目的。这就是说,防治的目的并不是一定要阻止崩塌落石的发生,而是要防止其带来的危害。因此,崩塌落石防治可从防止其发生和避免造成危害两个方面考虑,在传统的工程防护措施中,前者通常通过锚杆加固、锚喷和浆砌片石护坡以及危石的嵌补和支顶等措施来实现,通常可将这类措施统称为主动防护;而后者通常采用圬工拦石墙、金属拦石栅栏、明洞或棚洞等拦挡式结构,通常

可统称其为被动防护。具体方法的选取主要取决于崩塌落石历史、潜在崩塌落石特征及其风险水平、现场地貌及场地条件、防治工程投资和维护费用等。

和本文将重点介绍的能够适应各种工程环境条件和崩塌落石灾害动力特征、以钢丝绳网为其主要构成特征的 SNS 柔性拦石网系统相对应的传统工程技术是拦挡式防护结构。作为该类被动防护方法,它并不试图阻止岩石崩落,但必须避免崩岩到达需保护的對象上。棚洞和明洞防护在我国交通领域特别是铁路上应用较多,虽其防护功能较强,但其工程造价很高,特别是在坡脚可用场地狭窄而必须增加开挖或河谷护岸工程来修建棚洞基础时会引起投资巨增,之所以得以广泛应用在很多情况下是因过去缺乏更有效而经济的防护方法时的不得已而为之的措施。以砼、石材等构筑的圬工拦石墙或由木材、钢材(废旧钢轨、型钢)和金属格栅构成的拦石栅栏,是我国过去崩塌落石防护的主要拦截手段,但由于这些结构抗剪能力弱、自稳性较差或者整体刚性较高,其抗动力冲击能力都较弱,其中圬工建筑物因需设置宽大的基础,常需进行大量的额外开挖从而危及后侧坡体的稳定性并破坏原始地貌和植被,且在高陡边坡时几乎无法修建。

2 SNS 柔性拦石网系统的原理和特征

SNS(Safety Netting System)柔性拦石网系统是利 用钢绳网作为主要构成部分来防护崩塌落石危害的柔性安全防护系统,其与以圬工结构为代表的传统方法的主要差别在于系统本身具有的柔性和高强度,更能适应于抗击集中荷载和/或高冲击荷载,且在大量的室内外试验和理论分析计算基础上建立的系统的标准化部件形成,使系统的设计计算原理趋于科学化和标准化,确保了系统的安全可靠和施工作业快速和标准化;此外,系统设置后的较小视觉干扰和最大限度的维持原始地貌和植被,在美化环境方面的社会效益是其他方法无法比拟的。

SNS 被动防护系统是一种能拦截和堆存崩岩、以具有足够高的强度和柔性的钢绳网为主体的金属柔性栅栏式被动拦石网(如图1)。它以落石所具有的冲击动能作为最主要的设计参数,已开发完善了足以适应各种形式和规模崩塌落石的不同标准化形式(PX型、CX型、AX和CAN型),其防护能量一般为40—2350kJ,并已能对高达5000kJ的更高能级进行特殊设防;它能在系统的设计弹性范围内安全地吸收落石的动能并将其转变为系统的变形能而加以消散,且这种功能基本上与落石在网上的冲击点位置无关。其传统的拦挡结构的主要差别在于系统的柔性和强度足以吸收和分散传递预计的崩岩能量并使系统受到的损伤最小,在设计上不仅考虑了易于安装,同时还考虑了在象悬崖这样的恶劣地形条件下要实现这种安装,即用最少量的锚杆和最少量的开挖来实现最快速的施工安装是该系统设计的一大明显特征。整个系统由钢绳网、减压环、支撑绳、钢柱和拉锚五个主要部分构成,系统的柔性主要来自于钢绳网、支撑绳和减压环等结构,且钢柱与基座间亦采用可动联结以确保整个系统的柔性匹配。

2.1 钢绳网

钢绳网是系统的主要构成部分,且往往是遭受冲击的第一部分,必须将来自于落石的冲击力传递到支撑绳、钢柱等其他部件上,并最终传给锚杆。由于钢绳网具有非常高的强度和弹性内能吸收能力,只要对落石特征进行了正确的分析并进行了正确的系统设计选型,在大多数情况下它是无需维护

的。此外,钢绳网由热镀锌的高强度钢绳(1770Mpa)加工而成(分为菱形和环形网孔,环形网亦可由钢绞线加工而成(分为菱形和环形网孔,环形网亦可由钢绞线加工而成),从而确保了其长期寿命需求的防腐能力,目前设计使用寿命可达30—50年。

2.2 支撑绳和减压环

冲击荷载必须从钢绳网传给支撑绳,因此支撑绳在设计上必须确保其具有与网内冲击点位置无关的恒定响应特征,在特定位置设置摩擦式“减压环”的双支撑绳设计形式除能实现这一功能外,还实现了能量消散、绳网下垂和维护需求间的最佳平衡。减压环为对系统起过载保护作用的重要部件,它为一在结点处按预先设定的力箍紧的环状钢管,使用时钢绳顺钢管内穿过,当与减压环相连的钢绳所受拉力达到一定程度时,减压环启动并通过塑性位移来吸收能量,从而实现其起过载保护作用功能。

2.3 钢柱和锚杆

钢柱的主要作用是作为系统的直立支架,钢柱与基座间的可动联结确保了钢柱遭受直接冲击时基座地脚螺栓的免遭破坏;与各拉锚绳相连的柔性双股钢绳锚杆,其带套管的环套设计能最好地吸收高冲击荷载,尤其是在锚杆轴线与其受力方向不在同一直线上时,这种锚杆形式具有最好的自适应能力。

当落石冲击拦石网时,其冲击力通过网的柔性得以首先消散并将剩余荷载从冲击点向钢绳网系统周边沿图2途径逐级加载,最终传到锚固基础和稳定地层,且由锚杆及其基础承受的该最终剩余荷载已减到很小的程度,系统各构成部分的能量分配如图3所示。在该加载途径中,当落石能量超过钢绳网的能量吸收能力时,减压环将进一步增大系统的柔性和抗冲击能力。由于加载途径由具有不同能量或荷载消散能力的各种部件构成,为合理确定系统各部件的结构尺寸,确保各部件的柔性和强度相互匹配,使整个系统处于均衡的最佳状态,避免此强彼弱的不合理设计带来的材料浪费,必须弄清各加载途径内所分担的荷载大小,对此,在SNS系统的开发过程中,除对系统进行理想化条件下的理论计算来进行均衡设计之外,已进行了大量的室内外试验来实现标准化和均衡化设计,从而通过确保

系统施工作业标准化、快速化和设计最优化来达到 SNS 防护系统科学、经济和安全可靠的目的。

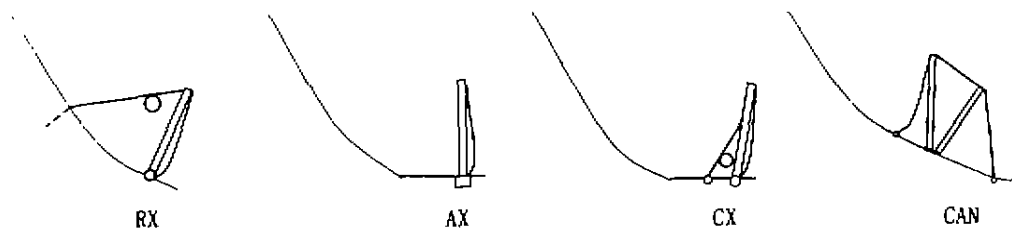


图1 各类型 SNS 被动防护系统横断面示意图

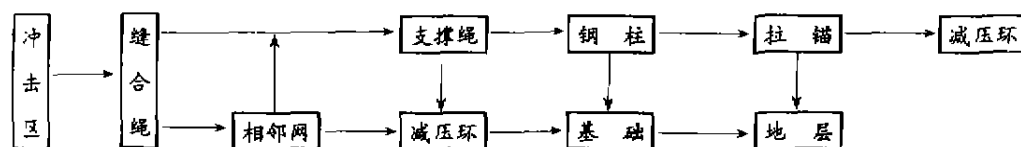


图2 SNS 被动防护系统加载途径

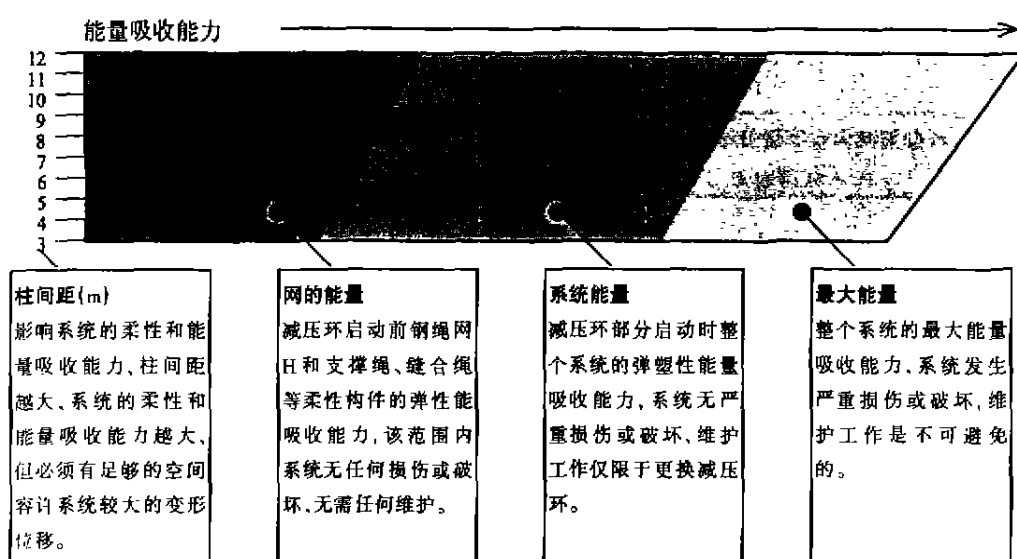


图3 SNS 被动防护系统各构成部分能量分配示意图

由于系统明显的柔性特征,根据简单的动量定理 $Ft = m\Delta v$ 可知,当落石与拦档结构发生接触碰撞时,由于刚性结构允许变形较小,相互作用时间短,必然产生较大的冲击荷载;同样,根据功能原理,落石的动能通过作功的方式转换为系统的变形能,若不考虑摩擦作用,即有 $E = W = Fd$,可见,由于刚性系统的变形或者说是位移极小,其承受的冲击力很大。相反,SNS 柔性系统在同等条件下承受的冲击力较小,因此相比于刚性系统仅采用较小尺寸的轻型结构即可拦截高能量的大块落石。两者

作用原理的示意性对比如图4,特征对比见表1。

3 SNS 被动防护系统的设计

在一般性的结构设计中,我们都习惯地通过外部作用施加到各结构部件上的荷载来进行结构尺寸设计。然而,对冲击这种动力外部作用,其冲击荷载大小的计算在理论上至今还没得到可靠的解决,为克服这种设计理论上的被动局面,在 SNS 柔性拦石网系统的开发过程中,巧妙地采用了冲击动

能来取代冲击荷载,并结合大量的室内和现场试验来使系统的定量设计成为现实。在此基础上,系统的设计就成为一种不涉及结构尺寸计算的简单而标准化的系统选型工作。

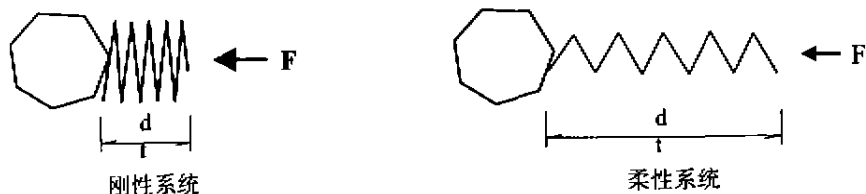


图 4 刚性和柔性系统抗冲击作用对比示意图

表 1 传统刚性系统与 SNS 柔性系统主要特征对比

| 性能特征 | 刚性系统 | SNS 柔性拦石网点系统 |
|-------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 结构类型 | 钢、木、砼拦档结构 | 带减压环的钢绳网系统 |
| 能量范围 | 低能范围 0—50kJ | 标准化体系已高达 2350kJ, 并已能设计出 5000kJ |
| 系统内力 | 高 | 低 |
| 部件尺寸 | 牢固但规模庞大笨重 | 牢固而质轻的轻型部件 |
| 视觉干扰 | 庞大建筑物或墙体 | 小型可透视建筑物 |
| 施 工 | 简单易行, 但劳动强度大, 工期长, 常干扰其他作业或运营 | 简单易行的标准化装配作业, 工期短, 不干扰其他作业或运营 |
| 辅助工程 | 常需大量的额外开挖, 破坏原始地貌和植被 | 仅作少量锚固, 不破坏原始地貌和植被 |
| 设计可靠性 | 无计算冲击荷载需要的变形量, 且缺乏试验资料, 系统结构尺寸设计困难 | 在大量的理论分析计算和室内外试验基础上已建立了标准化的设计计算体系 |

当确定采用 SNS 柔性拦石网系统后, 系统的设计工作主要就在于根据现场条件和实际需要确定系统的类型 (RX、CX、AX 或 CAN)、能级、系统高度、系统长度和现场布置位置等。系统类型的选择主要取决于地形、系统设置后内侧的通行要求以及所需防护能级等, 其中因 RX 型系列的能级范围涵盖了常见落石的冲击动能范围而得到最广泛的采用。系统长度取决于防护对象的规模或展布范围、潜在落石的分布范围特别是其危害威胁的范围。这两个方面的设计一般来讲容易实现的。

系统能级、系统高度和现场布置位置的设计是设计成功与否的关键。包括落石的速度、动能、运动形式、弹跳高度和运动轨迹在内的落石运动特征是合理设计的根本前提, 其中尤以动能和弹跳高度最为重要。这些特征参数的可靠确定除决定于经验和正确的分析计算模型外, 还取决于图 5 所示有关现场特征内容的详细调查。在此基础上, 采用有

关运动学理论和相应的简化模型是可以根据以下主要公式进行有关参数的模拟计算的。

滚动或滑移模式时的加速度

$$a = g(\sin\theta - \mu\cos\theta)$$

弹跳模式触地后的速度

$$V'_x = A_1\cos\theta - A_2\sin\theta$$

$$V'_y = A_2\cos\theta - A_1\sin\theta$$

$$A_1 = R_t(V'_x\cos\theta - V'_y\sin\theta)$$

$$A_2 = R_n(V'_x\sin\theta + V'_y\cos\theta)$$

落石冲击动能

$$E = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = 1.2 \times \frac{1}{2}mV^2$$

式中 g 为重力加速度, μ 为坡面摩擦系数, θ 为坡面角, V'_x 、 V'_y 、 V'_x 、 V'_y 分别为落石触地弹跳前后 x 和 y 方向 (水平和铅直方向) 上的速度, R_t 、 R_n 分别为坡面的切向和法向阻尼系数, m 为落石的质量, V 为落石冲击拦石网前的速度, I 为落石的转动惯量, ω 为落石冲击拦石网前的角速度。为省去落石转动

动能部分的计算,通常在落石的平动动能的基础上乘以 1.2 的系数来一并考虑。其余有关位移和速度的计算公式不在此处列出。一般来讲,这种计算可以采用手算的方法,但计算工作量极大,最好能通过计算机来实现。在这方面,由瑞士布鲁克集团公司委托德国 GEOPLAN 工程地质与土木工程咨询公司开发的 ROCKFALL 专用软件得到了最为广泛的应用,它通过岩块的几何形状、初始运动方式、坡角、坡面粗糙度、坡面法向和切向阻尼系数、滚动阻尼系数等基本参数及其不确定性特征来模拟得出落石的冲击动能、弹跳高度、运动轨迹以及它们的统计量,在此基础上即可确定系统在边坡横断面上的合理位置以及所需系统的最小高度和最小能级。

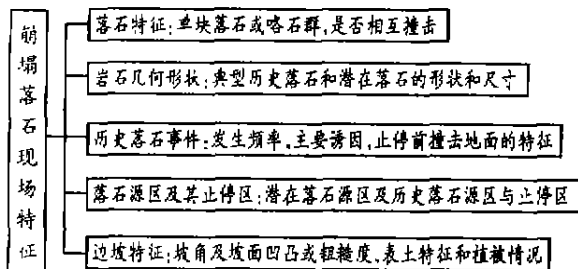


图5 崩塌落石现场特征的调查内容

作为系统的施工设计,尚需设计确定其在边坡坡面上的平面布置。通常情况下,系统尽可能沿某一等高线附近延伸,当这种要求难以满足而使系统走向落差较大时,系统可以分段沿不同的等高线布置;当这种落差较小时,亦可采用非直角的平行四边形网块来适应这种落差。进一步地,我们可以根据现场条件和防护要求来确定系统的柱间距,一般来讲,柱间距与系统柔性亦即抗冲击能力成正比(图4),但柱间距越大,系统受落石冲击时顺边坡倾斜向下的变形位移越大,系统的有效高度亦将暂时明显降低,从而使系统变形后侵入防护限界或使系统的后续防护功能暂时失效,为此,我们一般选择 5—10m 的间距,当无条件限制时,宜选用 10m 标准间距。最后,根据坡面覆盖条件设计有关锚固形式,一般而言,当坡面基岩裸露(或覆盖层较薄)且完整性较好时,钢柱基础和拉锚锚杆采用直接钻孔注浆锚固方式;当覆盖层较厚或裸露基岩破碎时,可采用带注浆花管(除起护壁作用外,其分布花

孔允许高压浆液渗入孔外软弱层)的直接钻孔高压注浆锚杆锚固方式或砼基础锚固形式。

4 讨论与结语

近年来,随着 SNS 系统设计原理及其标准化系统开发的成熟,已在国外公路、铁路、矿山、水电站、江河湖泊海洋堤岸及市政崩塌落石灾害防护领域得到了广泛应用,自 1995 年该项技术引入国内以来,在已完工的数十个公路、铁路、水电站和矿山崩塌落石工程现场发挥了巨大作用,其可靠的安全性、施工的快速标准化和综合技术经济优势等已被广大岩土工程技术人员认识。总结起来,与传统的圬工结构相比,SNS 系统的综合技术经济优势主要表现在以下几个方面:(1)足够的柔性和强度使其能防护传统圬工方法不能防护的高能量落石(高陡边坡的大块落石);(2)对设防区域的原始地貌环境具有极强的适应性,可以在不作额外开挖的条件下进行施工,从而减小整体工程开挖量、不破坏坡体原有稳定性和坡面原有植被;(3)系统设计原理详实可靠,并实现了标准化的均衡设计;(4)标准化部件安装作业,确保施工作业简单易行和快速化,不形成对其他作业的干扰,劳动强度小;(5)系统维护工作量小且简单易行;(6)系统寿命较长,一般可达 30—50 年,必要时只需更换少量部件即能延长使用寿命。

参考文献

- 1 Yingqing Zhou & Tianbin Li. Assessment of risks, hazard and mitigation of rockfall in Dahekou Hydropower Station. Proc. of the 7th Int. Symposium on Landslides, De Terrain, July 17 - 21, 1996, 435 - 440
- 2 Duffy John D. & Smith Duane D. (1989). Field Tests and Evaluation OF Rockfall Restraining Nets. Research Report No. CA/TL - 90/05, California Department of Transportation, Office of Transportation Materials and Research
- 3 胡厚田. 崩塌与落石. 北京:中国铁道出版社, 1998
- 4 阳友奎. 岩崩灾害及其 SNS 柔性防护. 铁路工程建设科技动态报告文集(铁路地质和路基工程分册), 1997, PP.160—165