

文章编号:0451-0712(2006)08-0192-05

中图分类号:U418.52

文献标识码:B

# 柔性防护系统在高速公路边坡防护中的应用

章普标<sup>1</sup>, 唐晓武<sup>2</sup>

(1. 浙江沪杭甬高速公路股份有限公司 绍兴市 312071; 2. 浙江大学岩土工程研究所 杭州市 310027)

**摘 要:** 介绍利用 SNS(Safety Netting System)边坡柔性主动防护系统治理业已开通营运的高速公路高风化边坡,包括破碎岩质边坡和泥石流边坡,该类边坡的最大特点是整体稳定但局部极不稳定。边坡柔性主动防护系统施工对高速公路正常通行影响小,系统通过柔性网作用到绳再作用到锚杆,可将局部失稳岩体的集中荷载向四周传递以充分发挥整个系统的防护能力,即局部受荷、整体作用,从而使系统能承受较大的荷载并降低单根锚杆的锚固力要求。并且系统具有开放性,观察监测简便直观,地下水可以自由排泄,避免了由于地下水压力的升高而引起的边坡失稳问题。施工完成后还可以为实行绿色护坡提供条件。采用 SNS 边坡柔性主动防护系统处治含风化岩质和泥石流边坡,施工方便快捷,防护针对性强,效果明显,并可以最大限度地减少对环境和公路运营的影响。不仅安全可靠,而且经济合理,适用于多种复杂地形,具有较高的推广和应用价值。

**关键词:** 高速公路; 柔性防护; 边坡; 防治

在山岭丘陵地区修建高速公路,难免遇到开挖后边坡的稳定问题。在自然稳定的边坡上开挖路基,必然会改变原地面地层结构的受力状态,原来处于稳定状态的地层,可能由于开挖形成临空的新边坡而引起不平衡失稳,导致滑坡、崩塌、风化剥落、泥石流等地质灾害。如果边坡地质状况比较好,开挖后的坡率又较缓,边坡一段时间内可以保持平衡稳定,但是也可能随着时间推移,在雨水侵蚀、冻融作用、岩体风化等各种因素影响下导致边坡失稳。严重的表现为整体失稳,发生滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,也可表现为坡面稳定问题,发生风化剥落、滚石、坍塌、散落等。即使整体稳定的高速公路路基边坡,坡面失稳也同样具有极大的危害性。高速公路由于行车速度快,各种障碍物与车辆的相对速度很大,相对动能也很大,即使边坡坡面小块石滚落侵占行车空间,也会给车辆造成严重危害,甚至导致车毁人亡。如果高速公路的车流量大,不仅危害的概率大,而且还可能会造成连环追尾恶性事故。因此高速公路建设期间,应该根据地形地质条件,采取合适的坡率,确定适当的防护形式进行妥善防护。如果营运通车以后,一旦发现边坡不稳定应立即进行处理,而处理方案尚应考虑正常通车需要。适用合理的防护工程对保证道路使用品质,提高投资效益和社会效益均具有重要意义。

## 1 工程概况

浙江东部某高速公路地处山岭重丘区,于 2000 年底建成通车,沿线约 45% 的路段路基为开山挖方而成,开挖后部分边坡坡面在建设期间采用了浆砌片石护面墙或锚杆挂网喷浆防护,而部分边坡由于地质状况及投资因素等原因,未采取防护措施。该高速公路地处亚热带季风区,气候温和,四季分明,年平均气温 16.5℃,最高气温 39.7℃,最低气温 -8.9℃,多年平均年降雨量为 1 395.2 mm,雨量分配不均,多集中在 5 月~6 月的梅雨季节和 8 月~9 月的台风季节,如 2005 年 9 月 11 日的登陆浙江的“卡努”台风,通过该地区时 24 h 最大降雨量达到 330 mm。故开挖后形成的边坡易风化、冲蚀、坍塌失稳<sup>[1~3]</sup>,危及高速公路的安全畅通。据调查,至 2005 年 4 月,该高速公路建设期间未防护的边坡按照风化程度基本形成了两类边坡体:一类为岩质边坡,原岩体风化程度轻,整体性较好,但开挖后经过 6~7 年时间的风化、冲蚀,坡面存在岩体风化、剥离、滑落、滚石、散落等危险,此类边坡以 K46+000~K47+000 为典型路段;另一类边坡为泥石流边坡,原始地质条件较差,风化情况很严重,覆盖层较厚(1~2 m),岩体破碎、整体性差,同时存在粘性土夹泥,以 K42+000~K44+000 为典型路段,每逢降雨,夹泥

就会被冲蚀流失,进而块石失稳滚落,边坡坍塌。第一类边坡可能慢慢转变为第二类边坡。虽然两类边坡均没有整体滑坡危险,但是由于边坡较高,滚落的泥石往往具有较大的动能,可能滚落至行车道,既可能对行车造成竖向冲击,同时高速公路由于行车速度快,泥石与车辆的相对速度很大,相对动能也就很大,也会给车辆造成更大危害的水平冲击,甚至导致车毁人亡。即使滚落的泥石没有直接冲击车辆而侵占行车道,也会因车辆高速行驶来不及反应而导致车辆失控。如果高速公路的车流量大,不仅危害的概率大,而且还可能会造成连环追尾恶性事故。若不及时处治任其长期发展,可能导致边坡整体失稳。

(1) 典型病害情况一: K46+000~K47+000 (岩质边坡)

K46+000~K47+000 路段边坡,高约 30~35 m,20 m 以下采用浆砌片石护面墙分级防护,20 m 以上未采取防护措施。裸露坡面设计坡比为 1:0.75。建设期间开挖时坡面不平整,超挖较多,局部也有欠挖,实际总体坡面坡率为 1:0.75~1:0.78。因坡面表部裸露无任何护面措施,经冻融等自然因素作用,裸露岩层风化速度很快,局部岩体解体程度较大。2005 年 4 月勘察发现坡面上部中心部分有明显浮石,且有一条长 20 m,宽 15 cm,深度达 1.5 m 的新鲜裂缝,如果不及时采取措施,岩块将会从母岩脱离滚落下来(如图 1 所示)。因为山坡较高,且坡率较陡,高处较大的块石滚落下来时,往往动能很大,可能会直接滚落到公路上,对公路行车安全造成严重威胁。



图 1 风化严重岩体及裂缝

勘察表明此边坡由强风化至微风化凝灰岩构成,参考周边土体的风化情况,发现此类岩石暴露后

遇水敏感,风化极其迅速,同类岩块经过两年风化后可以完全解体至无任何强度。2000 年底公路开通以来,营运业主每年都要组织多次清理浮石和突出的危险岩体。但是清不胜清,防不胜防,且随着时间推移,坡面仍然会风化解体产生易滑动石块及危岩(图 2),裂缝遇水后还存在加速扩展情况(图 3),需要对其采取防护处理措施。



图 2 危岩

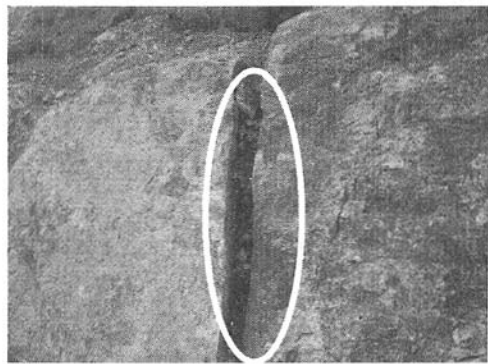


图 3 裂缝遇水后扩展加速

(2) 典型病害情况二: K42+000~K44+000 (块石夹泥边坡)

K42+000~K44+000 路段边坡高约 40~50 m,35 m 以下采用浆砌片石护面墙分级防护,35 m 以上未进行防护。此类边坡岩体风化严重,覆盖层厚 1~1.5 m,岩块破碎无整体性,岩块间隙充填粘性土夹泥(图 4 为未处理前的边坡状况)。遇到降水,夹泥易被冲蚀流失,块石将随着泥水逐步坍塌滑落。建设期间该边坡即发生过局部坍塌,但是期间未对坡面进行防护,而在裸露的坡脚设立了挡土墙,用以拦截坍塌的泥石。2005 年 4 月勘察发现边坡原设计坡比 1:0.75,实际坡面由于坍塌显得极不平整,中下部坡率约 1:0.8~1:1.1,上部逐步变陡至接近垂直。坡面上散布着滑落的大小不一的块石,



图4 未处理前的泥石边坡状况

建设期间设立的挡墙内已被坍塌的泥石基本填满。坍塌继续发展,泥石必将漫过挡墙,一旦滑落至高速公路,将直接危及行车安全。

勘察表明此二类边坡均不存在整体滑坡的稳定问题,只是坡面的风化岩石在不利的气候条件下如台风或暴雨袭击时就可能向下滑落。但是由于边坡较高,对高速公路的危害性很大,必须实施坡面防护。2005年4月业主组织对外治方案进行了分析,从防护可靠性、耐久性、施工难易、对公路正常通行的影响以及经济合理等多方面进行探讨,对削坡、浆砌片石护坡(护面墙)、锚杆挂网喷水泥混凝土防护等方案进行比较。方案比较表明削坡显然不合理,浆砌片石护坡(护面墙)、锚杆挂网喷水泥混凝土防护均能够抑制坡面进一步风化,又能够隔离地表水对坡面的冲蚀,从而稳定坡面。但是由于此二类边坡坡面比较破碎,前类坡面岩石遇水容易风化,后类边坡有大量的浮土浮石存在,均使护面结构与坡面的粘结强度难以保证。即使完工初期粘结良好,但随着水的渗入,坡面岩石遇水风化、土体膨胀、流失,护面结构与坡面将会逐渐分离,最终会成为徒有其表的表层覆盖壳,可能在不利的氣候条件如降水、冻融情况下坍塌破坏。该高速公路建设期间采用的浆砌片石护面墙在2005年3月发生了多处坍塌,锚杆挂网喷水泥混凝土防护也出现了大范围的剥落、大面积起壳,对高速公路正常通车营运造成极大威胁。实践证明在类似地质条件的边坡上采用浆砌片石护坡(护面墙)、锚杆挂网喷水泥混凝土防护效果不理想,防护工程使用耐久性差。另外高速公路已经开通营运,在边坡上部施工作业难度很大,坡面开挖平整难以实施、建筑材料运输非常困难,施工安全措施要求非常

高,施工期间用于保证车辆正常通行所需的辅助工程巨大,难以保证不影响正常营运。

综合比较后最终决定采用SNS柔性主动防护系统的边坡治理方案,方案比较表明这种系统建筑材料运输和现场施工对业已通车的高速公路通行影响最小,施工快捷方便,容易实施。系统具有局部受荷,整体作用的效果,其原理是锚杆与柔性金属网连成一个整体,覆盖在坡面上与岩面紧密结合,阻止或限制坡面岩体发生位移,确保坡面稳定并利用表层岩体的自我封闭作用实现长期稳定。为避免小块石滑落还可以考虑在金属主网之间增设 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 网格的金属小网,从而既能够承受较大的荷载,消除大块石滑落的安全隐患,又能有效防止小块石滚落,针对性强,防护可靠。因其柔性特征能使系统将局部集中荷载向四周均匀传递以充分发挥整个系统的防护能力,从而使系统能承受较大的荷载并降低对单根锚杆的锚固力要求,降低了对坡面的地质要求,在该高速公路上具有良好的适用性。另外,采用原材料为工程普遍应用的钢铁类金属材料,既易于获取又不昂贵,而开放的防护结构与封闭的防护结构相比,材料、施工都更具有经济性。与其他圬工防护工程相比,还可以节约为确保施工期间高速公路安全畅通而必需采取的临时防护工程,因而经济性更加明显。

## 2 SNS主动网防护系统工作原理

SNS(Safety Netting System)边坡柔性主动防护系统是以钢丝绳网通过锚杆联结打入边坡进行固定,形成柔性网紧密覆盖在坡面上,阻止或限制坡面岩体发生位移。其作用原理类似于喷锚和土钉墙等坡面防护体系,但因其柔性特征能使系统将局部集中荷载向四周均匀传递以充分发挥整个系统的防护能力,即局部受载,整体作用,从而使系统能承受较大的荷载并降低单根锚杆的锚固力要求,对地质条件适应性强。此外,由于系统的开放性,坡面渗水、地下水可以自由排泄,避免了由于封闭防护结构体后水压力的升高而引起的边坡失稳问题。系统的开放性使得边坡观察监测直观、简便,便于管理。坡面稳定以后可以防止或减缓岩体进一步风化,利用表层岩体的自我封闭作用抑制边坡遭受进一步的风化剥蚀。系统对坡面形态特征无特殊要求,不需要专门平整坡面,可以节约防护工程费用,不破坏和改变坡面原有地貌形态和植被生长条件,其开放特征给自然

或坡面绿化保留了必要的条件,绿色植物能够在其开放的空間上自由生长,植物根系的固土作用与坡面防护系统结为一体,从而抑制坡面破坏和水土流失<sup>[5~7]</sup>,反过来又保护了地貌和坡面植被,实现最佳的边坡防护和环境保护,美化公路的目的。为防止小

块石的滚落,可以在钢丝绳组成的主网之间增加钢丝绳格栅次网,次网承受的荷载通过钢丝绳网传递至主网。图5 为锚杆及SNS 主动网立体平面示意图。锚杆的可靠作用以及钢丝绳网的使用寿命是整个系统是否可靠的关键。

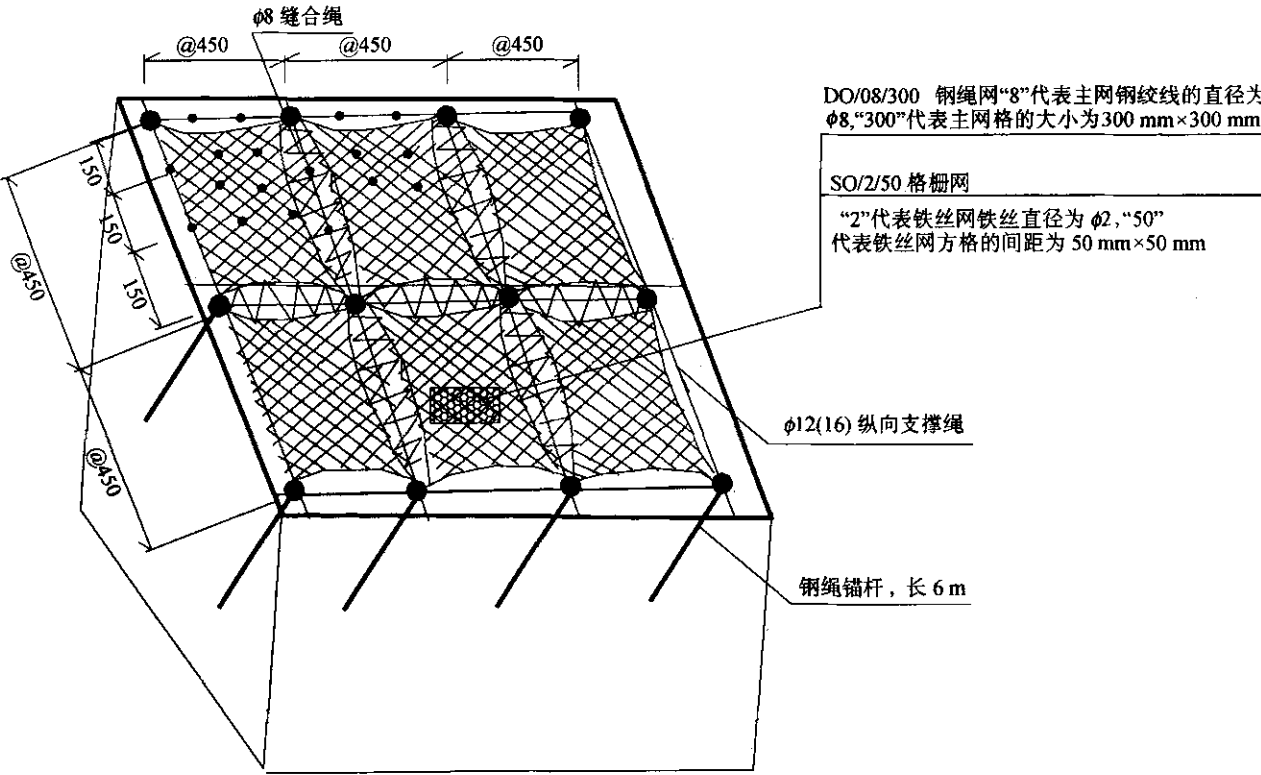


图5 大小锚杆及SNS 主动网立体平面示意

(1)锚杆抗拔力的确定。

一般SNS 边坡柔性主动防护系统只需2~3 m长锚杆,系统要求抗拔力>50 kN(不论是岩质还是土质边坡)。本工程因边坡风化较为严重,并且深度较深,出于安全考虑,设计锚杆长6 m,故其抗拔力要求有一定程度的增加,实际施工要求有效锚固长度不小于2 m,并严格控制注浆质量。参考了《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(2001),对岩质边坡与土质边坡设定不同的最低锚杆抗拔力要求如下:

- ①岩质边坡锚杆抗拔力>90 kN;
- ②土质边坡锚杆抗拔力>65 kN。

(2)金属网的防腐。

系统采用工厂化生产的钢构件。钢材的防腐技术种类很多,防腐寿命和经济指标也各有差异。本工程采用技术成熟、性价比良好的热镀锌处理的钢丝绳和钢丝隔栅,预计使用寿命可以达到30~50 年。

(3)施工程序。

工厂化生产的金属部件施工安装快速简便,基础工作主要是钻孔埋设锚杆。主要工序如下。

- ①清除坡面防护区域内威胁施工安全的浮土及浮石。由于浮土及浮石是不可能全部清除的,也无必要完全清除,只要能够保证不影响施工安全即可。若有树木,则截去枝干保留树桩,保留下的树桩将会穿过网孔重新生长出新的枝干。
- ②放线测量确定锚杆孔位。若标准孔位的岩土体极为松散破碎不利成孔,或标准孔位附近有天然凹坑可以利用时,则可以适当调整锚杆位置。锚杆位于低凹部位有利系统与坡面的紧密贴合,提高防护效果。
- ③按设计深度钻凿锚杆孔并清孔。
- ④注浆并插入锚杆。由于设计锚杆深度达到6 m,注入水泥砂浆要求比较高,施工时必须加以注意。
- ⑤从上向下铺设格栅网。
- ⑥安装纵横向支撑绳。为保证锚杆水泥砂浆具有一定强度,安装时间一般控制在锚杆注浆的5 d 后进行。

⑦从上向下铺设钢绳网并拉紧缝合。拉紧钢绳网可以促使系统紧贴坡面,取得最佳的防护效果。

### 3 SNS 主动网防护系统防护效果

该防护工程设计锚杆间距 $4.5\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ ,钢丝绳主网间距 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ ,格栅次网网格为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 。实际施工用钢丝绳作为锚索替代锚杆,间距根据地形条件选用天然低凹的部位而有所调整。锚杆埋设完工后进行了现场抗拔力测试,测试结果表明抗拔能力十分理想,普遍超过设计要求。锚杆抗拔能力测试也反映出锚杆的设计深度和抗拔力要求不甚匹配,锚杆的设计深度要求偏高,而相应深度的抗拔能力要求偏低,可以进一步优化减小锚杆深度。由于施工材料用料小,竖向运输主要靠人工辅以畜力,基本不影响高速公路正常行车。施工期间在防护边坡的坡脚,设置了简易临时防落网以确保行车安全。

整个工程于 2005 年 8 月底顺利完工,完工以后完全杜绝了大小块石滑落、坍塌,彻底消除了影响高速公路行车安全的不安全因素。由于系统不破坏和改变坡面原有地貌形态,其开放特征为坡面植物生长提供了必要的条件,风化岩土在植被生长条件下可以得到一定控制和改善。施工期间尽可能地保留了原来坡脚、坡面自然生长的绿色植物,施工结束后使其能够在防护系统开放的空间上迅速恢复生长,特别是当地一种名为葛藤的野生藤类植物,具有较强的生命力,可沿着坡面快速生长发展。植物根系的固土作用与坡面防护系统结为一体,抑制了坡面破坏和水土流失,反过来又保护了地貌和坡面植被,形成了良性循环,实现了安全、环保、美化的有机统一。

2005 年夏秋,浙江受到几次强台风的正面袭击,由 SNS 柔性网防护的高速公路边坡经受住了严酷的考验。2005 年 9 月 11 日夜,台风“卡努”登陆浙江正面袭击该高速公路,台风经过当地时风力达 12 级,最大 24 h 降雨量为 330 mm,在 K43+150 路段 SNS 系统“天罗地网”罩住了边坡上脱落的原本要滑落到高速公路上去的数块直径 1.2~1.5 m 大块石,避免了车毁人亡恶性事故的发生,保证了高速公路的正常营运和人民生命财产的安全,SNS 柔性网防护边坡取得了良好效果。

### 4 SNS 防护边坡的巡查和监测

采用 SNS 防护后,对边坡仍然需要定期巡查,在不利的天气情况下如暴雨、冻融以及经历近距离

爆破、地震后应加强巡查,必要时应进行监测。SNS 由于防护系统具有的开放性,可以直接观察山体岩石,巡查直观、简便。另外岩体变化、位移会改变 SNS 系统应力分布,因此网体的松紧状况改变、锚杆接头部位的距离变化也能反映出山体、坡面变化情况。可在锚杆中心画上十字线,以某一锚杆中心为基点,并精确量测各锚杆“十字”中心的坐标及相邻 8 根锚杆(左右上下及 4 个对角)的相对距离。施工后定期量测各锚杆“十字”中心的位置及相邻 8 根锚杆的相对距离,并进行比较分析,便能及时发现坡体变化,及时发现安全隐患。

对 SNS 网体本身,也要结合边坡巡查进行适当的检查和维护,如金属构件是否完好,隔栅有无破损撕裂,钢丝绳有无断丝等。若网内拦截了大量的泥土碎石、块石,将使防护网长期处于应力紧张状态,长期作用会降低系统防护能力,应该及时予以清除。

### 5 结论

综上所述,SNS 边坡柔性主动防护系统在防护整体稳定边坡,但含风化破碎岩质和泥石边坡中,效果较好,在已经通车的高速公路进行边坡防护更加具有优越性。主要原因是该系统施工简便,对已经通车的高速公路正常行车影响最小,经济优越性明显,系统具有局部受荷,整体防护的功能,从而能承受较大的荷载并降低单根锚杆的锚固力要求,防护针对性强、适用性强、防护效果好,具有较高的推广和应用价值。

### 参考文献:

- [1] 赵明阶,何光春,王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 王洲平. 浙江省地质灾害现状及防治措施[J]. 灾害学,2001,16(4).
- [3] 侯利国,何文选. 上三高速公路地质灾害及其处理措施概述[J]. 高速公路,2002,6.
- [4] 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J]. 工程地质学报,1996,4(4).
- [5] 殷坤龙,汪洋,唐仲华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报,2002,21(1).
- [6] 尚岳全,孙红月,侯利国,陈允法. 管网渗流系统对含碎石粘性土边坡的稳定作用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8).
- [7] 周德培,张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [8] 阳友奎,周迎庆,姜瑞琪,贺咏梅,彭伟,原振华. 坡面地质灾害柔性防护的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2005.