

滑坡防治方案的选择与优化

王恭先

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在对滑坡性质的深入了解和治理方案的精心比选基础上, 经过 40 余年预防和治理了数以百计的滑坡和高边坡变形, 均取得成功。在此提出确定防治方案应考虑 4 个因素和不同类型滑坡的治理方案(包括用桥梁和隧道绕避滑坡的方案及线路通过滑坡的 6 种方案), 可为预防高边坡和路堤填方引起的“工程滑坡”的处理方案提供参考。

关键词: 边坡工程; 滑坡; 防治方案; 选择和优化

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3867 - 07

CHOICE AND OPTIMIZATION OF LANDSLIDE CONTROL PLAN

WANG Gongxian

(Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The author of the paper and colleagues in Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation have already treated several hundreds landslides and high slopes during the past 40 years and all landslides are controlled successfully. All the successes are due to the deep understanding of property of landslide and comparatively choice of control plans. In this paper, the author puts forward four factors that should be considered when determining landslide control plan and treatment plans for different types of landslides(including a plan of constructing bridge and tunnel to avoid landslide and six plans of line going through landslide) as well as a plan for preventing “engineering landslide” caused by high slope and filled embankment for reference.

Key words: slope engineering; landslide; control plan; choice and optimization

1 引言

在铁路、公路、水利、矿山和城镇建设中, 滑坡危害之严重、治理费用之昂贵是众所周知的。一个中小型滑坡治理费用数百万元至千余万元, 大型和特大型滑坡治理常需要数千万元, 甚至上亿元。表 1 是几个滑坡的治理实例, 从中可以看出治理滑坡的巨大投资。

正确合理的防治方案不仅能防止古老滑坡复

活, 快速稳定滑坡, 而且可以节约治理费用。相反, 不合理的防治方案不是造成浪费, 就是多次治理而不能稳定, 增大投资成本, 甚至造成灾害。如重庆市渝黔高速公路向家坡滑坡, 两次勘察、两次设计, 先后做了四排抗滑桩, 花费 3 000 余万元, 仍未稳定滑坡, 不得不封闭交通, 再作勘察和治理, 共花费 5 000 余万元^[1]。因此, 优化方案设计一直是人们追求的目标^[2]。但滑坡的防治是一项复杂的系统工程, 一是滑坡的类型、性质、规模大小、破坏机制、发育阶段、稳定状态多样而复杂; 二是各种防治措

收稿日期: 2006 - 06 - 01; **修回日期:** 2006 - 07 - 02

作者简介: 王恭先(1936 -), 男, 1961 年毕业于唐山铁道学院铁道建筑系, 现任中铁西北科学研究院研究员、博士生导师, 主要从事滑坡机制及防治技术等方面的教学与研究工作。E-mail: xbmys@126.com

表1 滑坡灾害治理实例
Table 1 Control cases of landslide disasters

序号	滑坡名称	位置	体积 (10^4 m^3)	发生时间 /年份	灾害	治理 费用 /万元
1	韩城电厂滑坡	陕西韩城	500	1985	破坏电厂	5 000
2	海石湾滑坡	兰州市	600	1995	威胁工业广场主、副井安全	3 000
3	K190 滑坡	宝成铁路	30	1992	破坏铁路明洞断道 35 d、改线	8 500
4	八渡滑坡	南昆铁路	500	1997	破坏公路、渡口威胁车站安全	9 000
5	伯阳隧道滑坡	宝天铁路	70	2001	威胁隧道安全	3 000
6	K2370 滑坡	川藏公路	450	1997	破坏公路	6 000
7	向家坡滑坡	重庆市	110	2004	中断高速公路	5 000
8	戒台寺滑坡	北京市	700	2004	破坏千年古寺	5 400

施的适用条件及其对具体滑坡的适用性；三是被保护对象的重要性和对防治的要求不尽相同，因而方案是多样的，至今尚未总结出最优化的防治方案。作者根据 40 余年防治滑坡的实践经验，提出制定方案的基本思路和防治不同类型滑坡的一些方案供参考。

2 选择滑坡防治方案应考虑的基本因素

(1) 滑坡的性质、规模和稳定状态是制定防治方案的地质基础

滑坡的类型、规模、地形地质条件、主要作用和诱发因素、破坏机制和模式、目前的稳定状态及其在人为和自然因素作用下的发展趋势的正确分析和判断是制定防治方案的基础，设计人员必须深入了解和掌握^[3]。在以往防治失败的教训中，绝大多数是由于对滑坡定性判断不准或判断失误造成的。如漏判了古老滑坡，施工后滑坡复活；漏判了深层滑面，使抗滑工程埋深不足而变形；对人为活动影响估计不足缺少预防措施，施工中滑坡复活或新生；滑坡推力计算偏小，造成支挡工程被破坏等等。重庆市水江—武隆高速公路白马隧道进口大型古滑坡被漏判，洞口路堑开挖后滑坡复活，严重影响隧道和滑体上 18 户居民的安全。向家坡滑坡因漏判了深层滑面，使多排抗滑桩严重变形。

(2) 防治的目的和原则是制定方案的根据

① 保护对象的重要性不同，对滑坡稳定性的要求不同。如低等级公路与高等级公路，支线铁路与

干线铁路、高速铁路，水电站的库区和坝区，乡村人口稀少区和城镇人口密集区，临时性工程(如基坑)和永久性工程，影响路基的滑坡与危害桥梁(特别是大桥)和隧道的滑坡，对滑坡治理后的稳定度要求不同，前者达 1.15~1.20 即可，后者常需达到 1.20~1.30，甚至更高。高地震烈度区的滑坡还应考虑地震作用下的稳定系数，水库库岸滑坡应考虑水位变动下的稳定度。

② 滑坡的剧滑危险性和危害性不同，治理要求也不同。滑坡的滑面倾角陡、剧滑危险性大、灾害严重者，常需采取应急措施，如滑坡上部减重、前缘反压，地表和地下排水、夯填地表裂缝和加强监测等，防止剧滑破坏，并应尽快勘察，制定永久治理方案。对缓慢蠕动型滑坡，危害不很严重者，则可从容勘察和治理。前者安全系数取大值，后者则可适当减小。

③ “一次根治、不留后患”已成共识。但对规模巨大、性质复杂的滑坡，短期内不易查清其性质，治理投资巨大、危害不很严重者，则应加强监测，统一规划，逐步勘察，分期治理。

④ 有些公路、铁路路基或桥梁位于滑坡的上缘，可以只保公路和铁路安全而不治理整个滑坡以节省投资。

(3) 详细分析各种防治措施的适用条件及其对要防治的滑坡的适用性

防治滑坡的措施有改线绕避滑坡，局部改变线路平面位置和纵坡，减重、反压，排水和支挡工程等，必须结合要防治的滑坡的具体地形地质条件综合分析比选而形成合理的方案。如在选线、选厂阶段尽量避开大型滑坡和滑坡连续分布地段，岩层顺倾地段和厚层堆积层地段，否则应采取预防措施。减重、反压是治理滑坡见效快且经济的措施，但对环境保护要求高和有重要建筑物的地方不宜采用，只能采用支挡和排水措施。当地下水发育且分布比较清楚时，在滑体外或上部作隧洞截水是十分有效的，但地下水分布不清时则只能采用仰斜孔群排水，且孔深应穿过滑动带。当滑坡有多层滑面时，最好采用抗滑桩支挡，但当滑面在边坡上出露时抗滑桩悬臂太高，不经济，可用锚索框架或与桩联合支挡等。

(4) 综合考虑方案的可靠性、耐久性、先进性、经济性，对社会环境的影响及施工的难易程度等

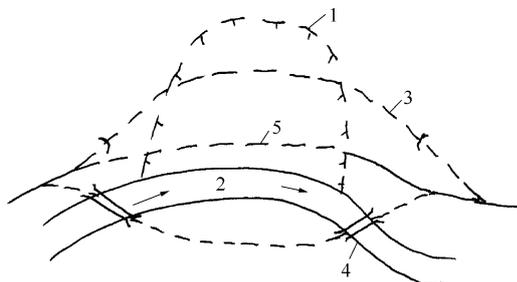
综合分析以上各个因素，多方案进行比选，才能作出符合实际的优化方案^[4]。

3 各类滑坡的防治方案

首先应说明,除绕避滑坡的方案外,凡需治理的滑坡,其防治原则都是针对造成滑坡的主要原因采取主要措施,辅以其他措施进行综合治理。因此以下讨论均以主要措施为主。

3.1 绕避滑坡的方案

贯彻“地质选线”的原则,详细查明滑坡的状况,尽量避开大型滑坡和滑坡连续分布地段,可以用桥梁跨河绕避,也可以用隧道绕避,见图 1。但新改线路不应有新的滑坡。隧道洞顶依据岩体质量好坏距离滑动面应大于 10~15 m,不使隧道开挖影响滑坡稳定,或滑坡滑动影响隧道安全。成昆铁路选线时曾绕避 100 余处滑坡。宝天铁路在葡萄园车站东、西两段分别采用两跨渭河避开滑坡群和大型滑坡区,大大改善了运营条件。2003 年 12 月在云南保山—龙陵高速公路开工之前,作者建议全线最长的镇保隧道出口改移位置,避免了隧道穿越滑坡的风险。



1—滑坡; 2—河流; 3—隧道; 4—桥梁; 5—通过滑坡方案

图 1 绕避滑坡方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of avoiding landslide plan

3.2 线路通过滑坡的治理方案

当线路无法或不宜避开滑坡时,针对滑坡的不同情况可采用下述治理方案。

3.2.1 稳定性较高满足设计要求的滑坡

如某些崩塌性滑坡,滑动距离长,重心降低多,抗滑段较长,又无河(沟)水继续冲刷的,主要是控制人为作用因素,如填、挖工程位置和数量,灌溉水及生产、生活用水防渗等。完善地表排水系统,一般可不做支挡工程。当滑坡前缘有河沟水冲刷时,应做防冲刷工程。

3.2.2 稳定性不满足设计要求的滑坡

目前处于稳定状态,但在人类工程活动下可能

局部或整体失稳的古老滑坡,或已经活动的滑坡,采用以下治理方案:

(1) 有条件时局部调整线路平面位置和纵坡,不在滑坡的主滑段和牵引段填方,不在抗滑段挖方,或尽量减小填、挖高度,最好在主滑和牵引段挖方减载,在抗滑段填方增加其稳定性,如图 2 所示。稳定性不足时须设排水和支挡工程。

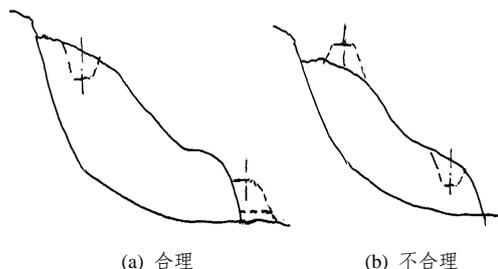


图 2 滑坡上填、挖方位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of fill and cut place of a landslide

(2) 当滑坡地下水发育时,应首先设置地下排水工程,降低滑坡地下水位和滑带土孔隙水压力,提高其稳定性,减少支挡工程量。如 20 世纪 60 年代在成昆铁路甘洛 1#滑坡(600×10⁴ m³)采用垂直钻孔群将滑坡地下水排入古河道中提高其稳定性,未做支挡工程,滑坡一直保持了稳定^[5]。2001 年在重庆市万州—梁平高速公路张家坪大滑坡设置截水隧洞和仰斜孔群排水后,将滑带土内摩擦角提高 1.5°,滑坡推力减小了约 2 000 kN/m,等于减少了一排抗滑桩,效益十分明显^[6]。

(3) 桥梁通过滑坡的治理方案

桥梁是重要建筑物,一旦被破坏后果十分严重。因此,一般不以桥梁通过滑坡。但近年来山区高速公路受地形限制,也为减少填方对滑坡稳定性的影响,采用了一些桥梁通过古老滑坡的方案,如云南保山—龙陵高速公路有多处滑坡是桥梁通过的。但桥梁对滑坡移动比路基更敏感,为保桥梁安全,可采用在桥墩山侧或河侧设一排抗滑桩或在每个桥墩前设 3 根抗滑桩保桥梁安全。有条件时,也可在滑坡前缘填土反压保滑坡稳定,见图 3,并应先治滑坡后做桥梁墩台。

当桥梁位于上、下两级滑坡之间时,两级滑坡的滑动均可能危害桥梁,则需在桥梁山侧和河侧均设支挡工程。当填方高度不大时,不如将桥改为路基填方而设抗滑桩板墙更为经济。

(4) 隧道通过滑坡的治理方案

隧道一般也不应穿过滑坡设置,已成线上隧道

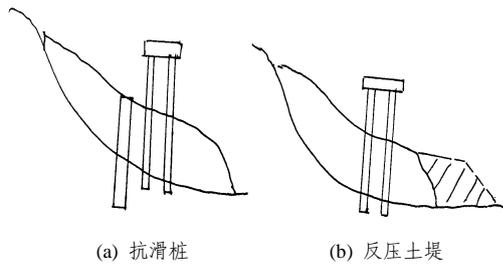


图3 保护桥梁的支挡工程

Fig.3 Retaining engineering for protecting bridge

被滑坡挤压变形或错断者时有发生，如成昆铁路东荣河1#隧道通车20a后因河流冲刷古滑坡复活将隧道错断，不得不在滑坡上部减重下在隧道两侧作两排抗滑桩保隧道安全。

隧道进、出口穿越滑坡者，如前述的伯阳隧道、白马隧道、宝鸡—天水高速公路甘泉隧道，都在开挖后发生了变形。作者在山西祁县至临汾高速公路常家山隧道出口不得不穿越古滑坡的情况下，采用洞口两侧各作3根锚索抗滑桩稳定滑坡，滑体注浆保隧道施工安全取得成功，见图4。

(5) 减重和反压方案

在滑坡的主滑和牵引段挖方减重，在抗滑段及前缘反压是最经济有效的处理方案，尤其对已经有变形迹象的滑坡能取得快速稳定滑坡的效果。与支挡工程结合，能减小滑坡推力，减少支挡工程量，节约投资。在有条件时应尽量采用。成昆铁路会仙4#桥滑坡主要用减重和反压稳定了滑坡。多数滑坡是减重与支挡相结合以节省投资。

减重不能引起上部和两侧山体新的变形(如浅层滑坡滑动)。对多级牵引式滑坡不能因前级减重引

起后级滑动。

反压应有一定高度，不能造成滑坡“越顶”滑动。填土下应做透水垫层或盲沟排水，不能堵塞地下水通道。

(6) 只保工程安全而不处理整个滑坡的方案

当线路从滑坡后缘附近通过时，可在线路外侧做一排锚索抗滑桩或锚拉桩保线路安全而不治理整个滑坡，见图5。因为滑坡上部范围小，推力小，可节约投资。在成昆铁路莫洛滑坡及316国道天水稍子坡3#滑坡均采用此方案取得成功。北京戒台寺滑坡也仅保寺庙在庙前做锚索抗滑桩而不处理整个滑坡。

(7) 支挡工程方案的选择

支挡工程，包括抗滑挡墙、抗滑桩、锚索抗滑桩、锚索框架(地梁)、微型桩群和反压土石堤等，由于其稳定滑坡见效快，是大多数滑坡治理常采用的措施，但也是造价最昂贵的工程，其合理选择非常重要。

① 支挡工程位置的选择

抗滑支挡工程一般设在滑坡的抗滑段滑体较薄处，充分利用滑坡自身的抗滑力而减少支挡工程量。但当被保护的對象如路基、桥梁、建筑物等位于滑坡的中、上部时，只能依据保护对象的需要选择支挡工程位置，已如前述。高速公路沿线的抗滑桩工程为保护环境和视角及施工中的安全，将桩埋入一级或二级边坡平台，是值得推广的方案。

② 结构型式的选择

结构型式选择取决于滑坡推力大小、滑面埋深和施工条件。

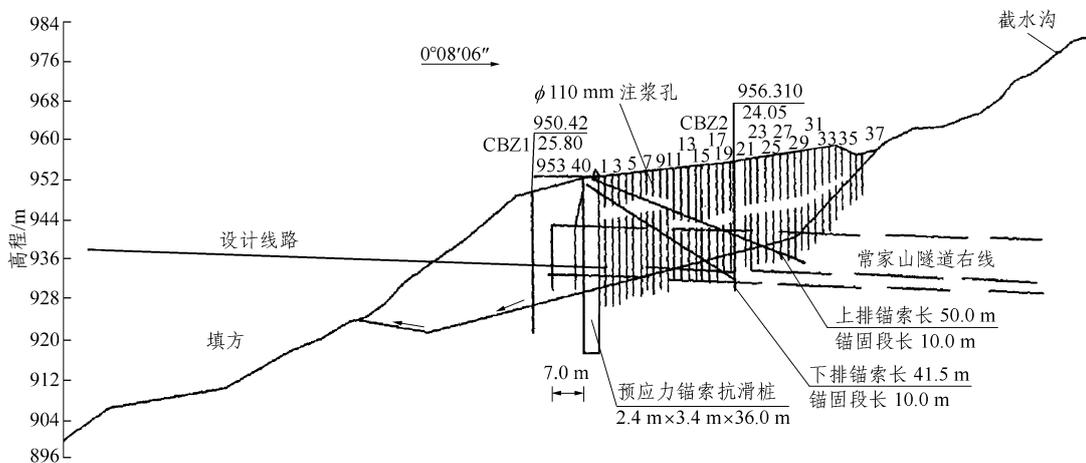


图4 隧道穿越古滑坡处理方案

Fig.4 Treatment plan for tunnel going through old landslide

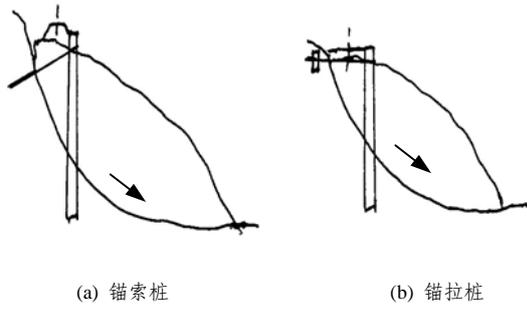


图 5 锚索桩和锚拉桩

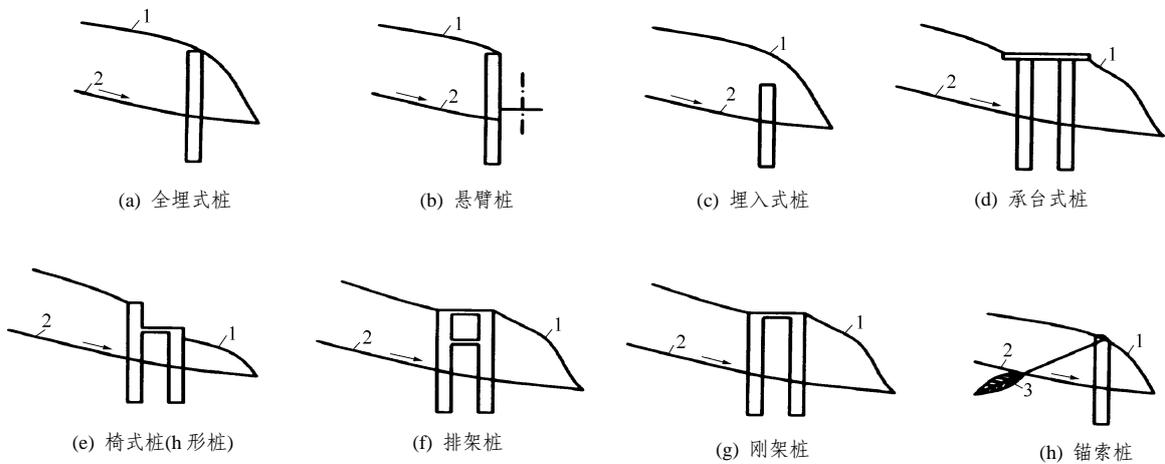
Fig.5 Anchor cable pile and anchor draw-pile

当滑坡推力小于 300 kN/m，滑动面埋深小于 2~3 m 时，可用抗滑挡土墙。当滑体含水量较高时，可与墙后支撑盲沟一起使用。墙高应保证滑坡不会“越顶”滑出。

当滑坡推力为 300~1 000 kN/m 时，采用普通抗滑桩或锚索抗滑桩，滑坡推力为 1 000~1 500 kN/m 时，最好采用锚索抗滑桩以减小桩身截面和埋深。更大的滑坡推力，则需设两排桩，或桩与锚索框架共同抗滑，或分级支挡。

当有多层滑面时，应分层计算滑坡推力，支挡工程应保证各层滑坡的稳定。图 6 所示为抗滑桩的结构型式。

值得提出的是，多层滑面的滑坡，各层的活动状态和复活的可能并不相同，可采用不同的安全系数计算滑坡推力。当深层滑面在排水后无滑动可能时，抗滑桩不一定要锚入深层滑面以下。这样可减小桩长，节约投资。



1—地面线；2—滑动面；3—锚索

图 6 抗滑桩结构型式

Fig.6 Types of anti-slide pile structures

4 预防“工程滑坡”的方案

所谓“工程滑坡”是指无古老滑坡迹象，但具有产生滑坡的地形地质条件，工程施工中发生的滑坡。有开挖边坡形成的滑坡，也有填堤和弃土形成的滑坡，前者更为常见。

4.1 预防边坡开挖形成滑坡的方案

高度大于 30 m 的高边坡开挖后发生变形和滑坡的事例最多，因此是预防的重点。

4.1.1 高边坡的特点

高边坡是将地质体的一部分改造成为人为工程设施，因此其稳定性受控于坡体的地质结构(地形地貌、地层岩性及在边坡上的分布，地质构造和水文地质条件)及人为改造的程度(坡形、坡高、坡率，相应的排水和加固工程及施工方法)。高边坡设计对地质条件的依存性、预测性、风险性以及科学施工的要求都是十分突出的特点。

4.1.2 设计原则

(1) 查清坡体结构和岩体结构，正确预测边坡的破坏模式和范围是设计的基础。

(2) 尽量减小边坡的总高度

高度小于 30 m 的边坡设计符合岩土体强度条件的坡形和坡率。大于 30 m 的边坡设计较陡坡率(应保持施工中稳定)结合排水和支挡加固工程以减少边坡的总高度。贯彻“固脚强腰”原则，既保证整体稳定，又保证局部稳定。

(3) 保护环境与美化环境的原则

尽量减少植被破坏，避免“扒山皮”式刷方，加固和防护措施应与环境相协调。

(4) 动态设计、信息化施工原则

随着边坡开挖揭露的地质情况，调整原设计使之符合边坡的实际条件。边开挖，边支护，防止坡体长期暴露、松弛、风化、雨水渗入而发生变形。

4.1.3 设计方法

由于高边坡地质结构的复杂性和多样性，其设计方法还是综合采用工程地质分析比拟法、力学计算法和经验法。因为高边坡尚未开挖，变形没有发生，其破坏模式和范围只能根据坡体结构进行预测，然后才能进行力学计算。除了类均质土坡可用滑面搜索法找出最不利滑面外，一般岩质边坡的破坏面(潜在滑动面)皆受控于结构面、软弱夹层和风化界面，只能通过工程地质调查分析确定。其破坏范围与开挖坡高有一定关系，一般水平计算长度为坡高的1.5~3.0倍。顺层边坡，当岩层倾角10°~15°时，为4~6倍，大于15°时，可达6~10倍。可从当地类似条件已发生的变形进行比拟。然后进行推力计算。

坡形和坡率设计：一般设计为台阶形，土质边坡和全风化岩质边坡，每级坡高6~8 m，其他岩质边坡8~10 m，坚硬岩层也可10~12 m或更高。每级边坡之间设2~3 m宽的卸荷平台，对高度大于40 m的边坡，最好中部(或岩性分界处)设宽4~6 m的宽平台以调整坡脚应力。坡率设计参照有关规范和地区经验，有支挡工程的边坡可适当采用较陡的坡率。

4.1.4 高边坡的排水和支挡方案

(1) 排水系统

完善高边坡周围的地表排水系统防止边坡变形已成共识。但地下排水工程由于前期地质资料不足常被忽视。实际上地下水对保持边坡稳定是非常重要的。对地下水特别发育的边坡，采用隧洞截水是必要的，如京珠高速公路粤北段K108高边坡、渝黔高速公路向家坡滑坡均在坡体上部设置了截水隧洞和渗管，对疏干边坡保持其稳定起了重要作用。一般边坡只要有地下水出露，在出水段设置仰斜排水孔排水是不可缺少的，但孔深应达到潜在滑动面以下。孔间距为5~10 m。

(2) 支挡工程方案

支挡工程的布设必须贯彻“固脚强腰”的原则。坡脚应力和地下水集中，最易破坏而引起整个边坡

失稳，应加强支挡，此为“固脚”。边坡中部支挡主要防止局部浅层滑动。由于支挡型式很多，以下只简单归纳6种类型：

① 类均质土坡，总高度不足30 m，可能从坡脚滑出时，见图7(a)，根据推力大小，可在坡脚作抗滑挡墙，或抗滑桩，渗水处设仰斜排水孔。

② 当边坡较高，只有一层滑面从坡脚滑出且推力较大时，可在坡脚或一级边坡平台上设一排抗滑桩，并应先作桩，后开挖桩前土体，以保坡体稳定，见图7(b)。

③ 近水平岩层下伏软弱岩层可能发生挤出型滑坡时，可用抗滑桩加固。也可对边坡用锚索加固，坡脚软岩用钢花管注浆加固，见图7(c)。

④ 当有多个软弱夹层会发生多层滑坡时，可采用分层支挡，浅层用锚索或长锚杆束支挡，深层用锚索抗滑桩或桩与锚索相结合，见图7(d)。

⑤ 当滑坡从边坡上剪出时，在坡脚作桩悬臂太高，不合理，可采用锚索支挡，见图7(e)。也可采用半坡抗滑桩支挡，但必须保证桩的锚固条件，如桩前边坡用锚索加固，见图7(f)。

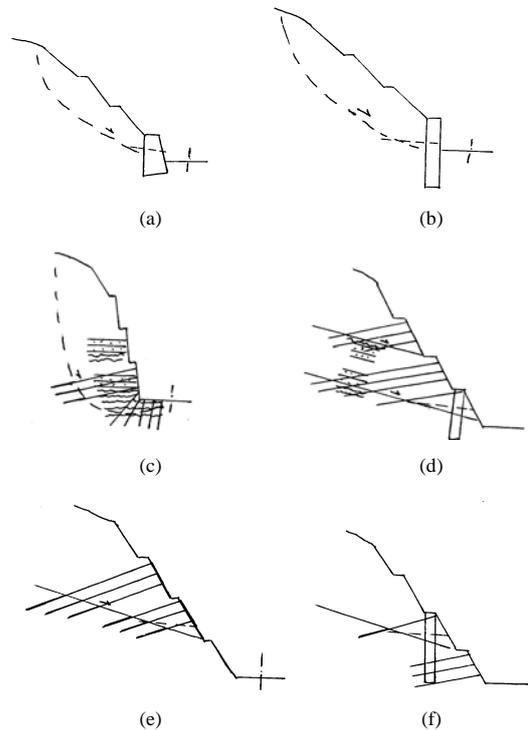


图7 边坡支挡方案示意图

Fig.7 Schematic diagram of slope retaining structures

⑥ 当滑体和滑床岩体较完整，滑带薄且推力不大时，可采用微型桩排(直径100~300 mm)加固，桩头必须用钢筋混凝土梁进行联结。

4.2 路堤滑坡的处理方案

(1) 变形类型

- ① 陡坡填堤
- ② 沟槽填堤
- ③ 软基上填堤

(2) 变形原因

① 下伏土层软弱; ② 坡度较陡; ③ 地下水发育且处理不当, 填方加载。

(3) 防治方案

- ① 软基处理: 挖除换填或作其他处理。
- ② 排水工程: 地表截排水沟, 堤体下盲水排水或仰斜孔排水。
- ③ 支挡工程: 可根据具体地形地质条件采用以下措施——路堤下侧反压护道、抗滑挡土墙和支撑盲沟、抗滑桩板墙或锚索框架、滑坡钢锚管注浆加固(穿过滑带)。

5 结 论

(1) 滑坡灾害严重, 治理费用昂贵, 选线、选厂、选址时应尽量避开大型滑坡和滑坡崩塌连续分布地段。治理方案应多方案比选、优化选择。

(2) 详细的工程地质调查、勘探与分析是制定治理方案的基础。

(3) 滑坡治理方案中应优先考虑地表及地下排水工程。

(4) 抗滑支挡工程造价昂贵, 必须结合每个滑坡的具体地形地质条件和保护对象的要求选择合理的工程位置和结构型式, 进行多方案比选, 既保滑

坡稳定, 又可节省投资。

参考文献(References):

- [1] 王恭先. 边坡滑坡的原因分析及防治办法[J]. 重庆建筑, 2005, (6): 18 - 21.(Wang Gongxian. Analysis of slope landslide formation and control methods[J]. Chongqing Architecture, 2005, (6): 18 - 21.(in Chinese))
- [2] 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 1 - 9.(Wang Gongxian. State of the art of landslide controlling engineering measures at home and abroad[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1): 1 - 9.(in Chinese))
- [3] 徐邦栋. 滑坡的分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.(Xu Bangdong. Analysis and Control of Landslide[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [4] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.(Wang Gongxian, Xu Junling, Liu Guangdai, et al. Landslides and Landslide Control Technique[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [5] 交通部科学研究院西北研究所. 滑坡防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.(Northwest Research Institute of China Academy of Railway Science. Landslide Control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [6] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 818 - 3 826.(Wang Gongxian. Key technique in landslide control and its handling measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 818 - 3 826.(in Chinese))