

山区高速公路边坡勘察设计常见问题分析

袁从华, 吴振君, 陈从新, 卢海峰

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 在山区高公路上经常遇到顺向坡、滑坡蠕变体和陡反倾坡。对于顺向坡, 是否稍陡倾的坡体就应加固, 而稍缓倾坡体可以不加固, 边坡专家根据现场情况给出相应的工程措施主要是基于顺层边坡中的主要控制层位、相关特性和场地地质条件得出缓坡预加固、稍陡坡整体稳定的结论。从红砂岩显示倾角、倾向异常着手, 通过多方面的分析调查, 该岩层的特性以及反分析潜在滑动面力学特征, 分析判断该切坡体为一蠕滑变形体, 进而强调采用抗滑桩预先加固的工程处理方式, 通过实际切坡变形破坏证明边坡专家的分析判断和工程措施的正确性。对于红砂岩反倾陡边坡, 由于存在软弱夹层和顺坡向节理的切割, 边坡岩性强度随雨水渗透软化, 特别是现场有类似自然层倾倒变形特征, 需要采取工程加固措施。边坡专家能根据工程场地性质, 综合分析控制层随时间变化特征及对稳定性起控制性因素, 能预先提出合理的工程措施, 避免或减少工程损失, 达到事半功倍的效果。

关键词: 边坡专家; 缓倾顺层坡; 红砂岩; 预加固; 反向陡倾坡

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Analyses of common problems in survey and design of mountainous expressway slopes

YUAN Cong-hua, WU Zhen-jun, CHEN Cong-xin, LU Hai-feng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: There are many consequent slope, creep deformation slope and steep countertendency slope during the construction of mountainous expressway. To consequent slope, whether slightly steep slope should be reinforced or slightly slow slope should not be reinforced, the slope expert may give corresponding method which is based on control layer, the engineering geology condition and characteristics. From the devolution of red sandstone tendency and dip angle showing in site, we make conclusion that the slope is a creep deformation slope which is based on many researches on rock characteristics and back analysis of characteristics about slide surface; we emphasize the importance of pre-reinforcement by anti-slide pile; and it is approved by real deformation failure that the analyses and methods made by slope expert is correct. For red sandstone steep countertendency slope, the rock mass strength changes with the infiltration of rainwater for the existence of weak intercalation and joint; and it is important to reinforce the slope which had been in dumping deformation. The slope expert can make comprehensive analysis on the characteristic changing and control factor on stability, and make reasonable engineering method which may reduce the engineering loss.

Key words: slope expert; gently inclined consequent slope; red sandstone; pre-reinforcement; steep countertendency slope

1 引 言

我国西部山区是基础设施和经济相对落后地区, 在大力发展交通建设的今天, 西部山区高速公路建设是其重点, 而我国人口众多, 耕地较少, 高速公路选线时既要考虑沿线经济和发展, 同时还要尽量少占用耕地, 因此, 山区高速公路的桥梁, 隧道较多, 高切边坡也众多, 山区本身就是地壳运动

的结果, 其地质结构、地层、地形地貌复杂多变, 线路的地质勘察由于受专业、认识等的影响, 对线路边坡中某些地质现象认识不全而未加重视, 其边坡施工设计措施在某些重要地段或工点针对性不强, 主要根据公路路基设计规范考虑岩石种类、风化程度、边坡高度等设计边坡, 造成加固防护措施不力, 在施工中出现一系列的边坡稳定性问题, 有的造成已施工的加固措施损毁和经济损失; 相反,

收稿日期: 2010-04-30

第一作者简介: 袁从华, 男, 1961 年生, 硕士, 副研究员, 主要从事岩土力学测试、路基及边坡研究与设计工作。E-mail: ych_yts@126.com

对于较稳定边坡，加固过于强大，则造成浪费。而在施工前，请边坡专家对沿线进行调查分析，结合现场的地质现象、工程对象边坡的工程地质特征、所切边坡的实际状况和设计措施，利用边坡专家的知识经验，可以发现边坡在现有设计措施条件下可能出现的工程问题，及时反馈给工程管理和设计人员，调整相应设计方案，减少工程损失和工期浪费，达到事半功倍的效果，本文将通过几个实例说明请有经验的边坡专家在施工前调查的重要性。

2 两个缓倾顺层灰岩边坡的加固措施比较

2.1 缓倾顺层灰岩边坡的预加固

缓倾顺层边坡由于控制关键层位有所不同，其工程处理方式也有所不同，有很多缓倾顺层边坡出现滑坡^[1-5]，需要根据边坡地质条件综合分析其工程处理方式。

在某高速公路 K56+300 附近的边坡，为奥陶系红色泥质瘤状灰岩，为完全顺向坡，岩层倾角为 17° ，最大切坡高度（为二级坡）约 23 m，基本无工程加固措施，而边坡专家在施工前现场调查分析提出的建议为采用锚杆预先加固，见图 1，即在坡顶线外的坡面设置 3 排锚杆，锚固端超过第 1 级坡的坡顶顺层高度，即预先加固第 2 级坡切层的顺层高度，完成第 1 级坡施工后，对第 2 级坡面进行锚杆预加固，加固深度超过坡脚线的顺层高度。

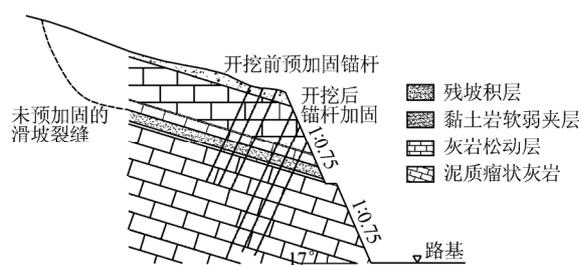


图 1 有软弱夹层的平缓顺层坡预加固剖面图

Fig.1 Profile of pre-reinforcement on gently inclined slope with weak intercalation

该地形坡面需要加固的依据是：①沉积环境，红色泥质瘤状灰岩是滨海浅海相沉积环境，大水时期，入海河流能将黏土等细小颗粒输送到较远的滨浅海地段沉积，即灰岩中有夹泥层的沉积条件。在紧邻现场 K56+290 有一个滑坡陡壁，在高约 35 m 的陡壁上，可见两个明显的凹陷夹层，为形成陡壁后雨水对软弱夹层冲侵蚀的结果，即在工程区现场可见灰岩层的夹泥层。②结构构造上，有两组构造

节理将岩体切割，一组节理的走向与岩层倾向一致，与路线直交，倾角接近直立，发育密度为 0.3~0.5 条/m，延伸长度十几米至几十米，充填物质为雨水带进后沉淀的黏性土和小块石，该组节理由于走向顺山坡角，有的溶蚀明显形成溶蚀沟槽，另一组与路线平行，倾角为 $67^\circ \sim 83^\circ$ ，延伸长度一般为几十米，这两组节理再加顺层的切坡可能形成大块体的顺层滑动。③地形地貌：在紧邻此坡的地段有一顺层滑坡遗迹，两侧受与公路直交的节理控制，后缘受与公路大致平行的节理控制，出口为自然坡的临空面，推测滑动面为第 3 个软弱泥岩夹层，因为在滑坡侧陡壁上还可见两个软弱夹泥层。另外，在这一工程区的自然坡脚还可见多处顺层滑坡体，即自然条件下有沿软弱夹层的顺层滑坡。④力学特性：岩层的黏土岩夹层为相对隔水层，在降雨期间，地下水沿裂隙下渗时易于汇集此层，使黏土岩夹层软化甚至泥化，强度显著下降，此段自然坡形地表平缓，汇水面积大，有形成软化的条件，工程切坡暴露软弱夹层时，坡上地表水下渗易于汇集在软弱夹层中，充分饱和软化后，对该同类岩层的室内试验结果为 $\varphi=9^\circ \sim 13^\circ$ ， $c=9 \sim 23$ kPa，这种软化后的泥岩在 17° 顺层中可以产生顺层滑坡。针对图 1，软弱层在不同 c 、 φ 条件下的稳定性系数 K 见表 1。由表可看出，当 φ 取值为 $9^\circ \sim 11^\circ$ ， c 值在 20 kPa 时，基本低于稳定平衡；当 φ 取值为 $12^\circ \sim 13^\circ$ ， c 值在 20 kPa 之上时，略高于稳定平衡条件，但不满足长期稳定性条件。

表 1 软弱夹层边坡在不同 c 、 φ 条件下的稳定性系数
Table 1 The safety factor of weak intercalation slope under different c , φ conditions

编号	φ / ($^\circ$)	c / kPa	K
1	9	17	0.90
2	10	17	0.96
3	10	19	1.00
4	11	13	0.92
5	11	19	1.06
6	12	13	0.98
7	12	17	1.07
8	13	11	0.99
9	13	13	1.04
10	13	21	1.22

实际施工中，切坡开挖没有采用预先锚杆加固措施，开挖上部第 2 级坡时在第 2 级坡脚出现第 1 层黏土岩夹层，厚度为 12 cm，在当年的 5 月份，雨水相对较多季节，产生顺层大块体滑坡，滑坡后

缘在坡顶线外侧约为 30 m，顺线路长几十米，滑坡后缘还可见新的变形裂缝，最后采用抗滑桩加固后再切坡施工，产生该滑坡既影响工期，同时也造成一定工程损失。

2.2 中倾顺层灰岩边坡的不加固

在 K168~K201 的路段右坡，出露的岩层为三迭系嘉陵江组中厚层状灰岩，右坡与岩层构成顺向坡，岩层倾角多在 20°~24° 之间，切坡为 2~4 级坡，切坡外还有顺坡向的自然坡，设计方案为 2、3 级坡预应力锚杆加固，边坡专家现场调查后建议取消预应力锚杆加固，在切坡施工时，采取相应措施，减少爆坡对岩层面黏结强度和完整性的振动、松动破坏，在局部采用短锚杆对潜在顺层滑坡块体进行加固，建议不强加固的理由是：①在沉积环境和岩性结构上，该岩层为灰色灰岩，为深海相沉积，层间基本无夹泥层，与层面大角度相交的节理有 2~3 组，切穿多个层面，只是将岩体变成大小不等的块体。②在地形地貌上，为长期的侵蚀剥蚀，有多层的顺层露头，未见顺层滑坡，在此区域有多个顺层方向的采石场，其高度可达几十米，坡角陡于高速公路切坡坡比，也未见滑坡痕迹。③在力学特性上，灰岩层面的强度较高^[6]，对于倾角为 24° 的顺坡面岩层，见图 2， φ 为 28°~30°， c 为 10~60 kPa 时，当考虑 3~10 m 地下水作用时，其稳定系数计算结果见表 2，其 K 值仍大于 1.5，满足稳定要求，且层间强度对水的敏感性不强，即层面强度遇水饱和后强度没有显著下降，因而自然的切层顺向坡和较大的顺坡向采石场都是相对稳定的。④对于切坡，由于爆破对层面的振动和松动破坏，使其层间 c 显著下降， φ 值也将变成残余强度，当 $c=0$ ， $\varphi=26^\circ$ 时，浅表层松动块体 K 值接近于 1，造成坡表一些块石存在滑移和掉块，因而建议在局部采用短锚杆对坡面进行加固。实际施工中，没有采用预应力锚杆加固，切坡施工时基本稳定，只是有局部小块体失稳，与边坡专家分析预测完全一致。

表 2 不同剪出口、不同后缘及不同 c 、 φ 条件下边坡稳定性系数

Table 2 Slope safety factor with different shear openings and crest crack under different c , φ conditions

剪出口 编号	K			c / kPa	φ /(°)
	后缘 1	后缘 2	后缘 3		
1	1.55			10	28
2	1.50	1.69		30	28
3	1.35	1.51	1.67	30	30
4	1.46	1.60	1.74	60	30

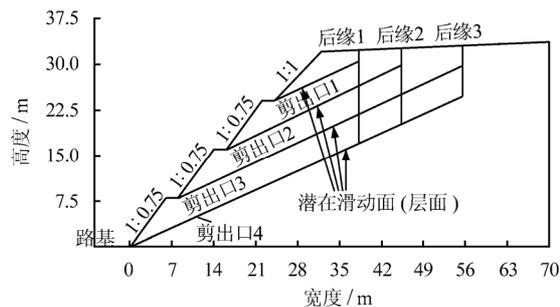


图 2 顺层灰岩边坡稳定性计算分析

Fig.2 Computation and analysis of limestone consequent slope

针对该节的两个灰岩顺层边坡实例，仅从岩性、切坡高度和风化程度考虑，则 2.1 节的不加固和 2.2 节的加固设计基本是正确的。但该两例边坡最主要受到层面和软弱夹层的特性控制。另外，边坡专家能根据岩性成分差别分析判断其沉积环境，并从地形地貌及小区域内是否有顺层滑移等综合分析入手，辅助稳定性计算，分析判断其是否需加固，最后的分析结论与最初的设计方案相反。根据边坡实际开挖出现的情况看，边坡专家的这种综合分析是符合现场实际的，若能在具体施工前变更，将避免出现边坡失稳和减少过分加固，相应削减工程造价，达到事半功倍之效。

3 红砂岩坡体的预加固

红砂岩在我国中南和西部分布较为广泛，高速公路中红砂岩滑坡极为频繁^[2, 7-10]，由于红砂岩抗风化能力弱、遇水易软化、易崩解、节理发育、层间有更软弱的泥岩夹层，自然坡中就容易出现滑坡或者蠕滑。图 3 为红砂岩区的地形地貌和高速公路设计所需切过的地层，在一便道上横过拟建高速公路的切层显示了该地层的主要信息，该小区域内的红砂岩为三叠系巴东组泥砂岩，岩层产状为 82°∠18°，与拟建高速右坡构成反向坡，切坡高度为 4 级，拟采用锚索（杆）框架加固。根据该切坡边缘便道上所切剖面的地层信息，在拟建高速公路路基处有一红砂岩小向斜褶曲，明显与该区域地层构造不相符，需要分析造成这一结果的原因。图 4 是这一切坡中心的典型断面，切坡地段自然坡较陡。自然坡条件下，在某特定条件时可能产生蠕滑现象，其主要理由有：一是从构造上看，便道上揭示的小向斜褶曲可能是由于坡中上端的蠕滑在坡下端顺层蠕变变形的结果，而非构造原因造成的结果，在坡上端平缓地段有居民的房屋。据现场走访和调查，建房一段时间后，墙壁上普遍有裂口，走向与自然

坡向垂直, 裂缝最宽可达十几厘米, 说明坡体有缓慢变形并且不均匀, 坡体的蠕滑可能造成坡下端的小向斜褶曲现象。二是从岩性结构特点看, 在拟切坡段自然坡较陡, 坡上有较大的汇水面积, 由于该红砂岩抗风化能力较弱, 节理裂隙发育, 有崩解特性, 雨水易于渗透软化岩层, 可能发生牵引式滑动, 即前缘较陡段出现蠕滑变形后, 坡后岩土体又出现相对临空, 使其滑动向上发展, 这也是坡上房屋一段时间后开裂的原因。三是边坡的稳定性是随着季节气候特点而变化的。在雨季, 由于岩土体的软化特性而使坡体处在平衡状态附近; 在旱季, 雨水较少, 坡体潜在滑动面由于少雨, 抗剪强度 c 、 φ 值提高, 坡体稳定性明显高于极限平衡状态, 此时坡体相对稳定, 工程切坡将导致坡体更陡, 地下水渗透路径相对下移, 坡体产生明显变形。而变形裂隙又为地下水下渗透提供通道, 进一步软化坡体, 潜在滑动面强度下降, 坡体产生牵引失稳^[17]、向上发展、失稳范围扩大, 将导致工程加固强度提高, 工程处理费用增加。基于以上分析, 建议对切坡体采用抗滑桩预先加固的处理方案, 而实际工程施工仍按预应力锚索(杆)框架措施, 该工程加固顺序是先切坡, 再进行锚索施工, 在切坡至第2级坡脚时, 坡面正在进行锚索加固施工, 坡顶外十几米到40m有多处产生明显的大致平行于路线的裂缝, 导致正施工的锚索失效。重新开展勘察和设计, 最后认为, 潜在蠕滑体后缘距中心线近200m, 工程采用4排 2×3 m的抗滑桩100多根。工程处理费用几千万, 工期损失超过半年。

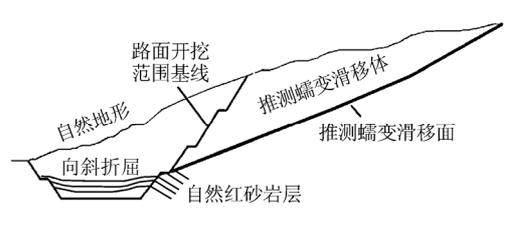


图3 切坡前变形推测示意图
Fig.3 Diagram of conjectural deformation before slope cutting

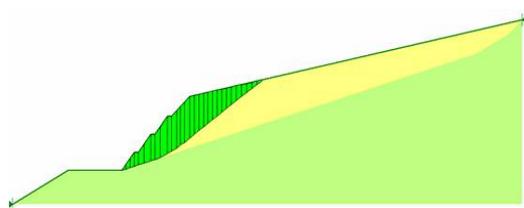


图4 切坡地形图
Fig.4 Map of slope cutting

若采用抗滑桩预先主动加固, 可在工程切坡前, 在第2级台阶和切坡顶线外适当距离设置2排抗滑桩, 预先防止因切坡变陡和临空形成的滑坡以及因牵引而向上逐步发展的结果, 即预先防止了潜在蠕滑体变形失稳的扩大, 也阻止了该岩土体因变形扩大发展而导致的潜在滑动面抗剪强度的迅速下降, 相应地减少工程加固量。图5为该自然坡反分析计算图。A为剪出口, 高出拟建高速公路路基约3m; B为开始的蠕滑后缘。在AB蠕滑体失稳后, 蠕滑牵引体将向上发展至C、D点等, 该蠕滑体沿公路沿线方向长约140m, 最后发展的宽度可超过150m, 可形成一个规模几百万立方米的大滑坡体, 而抗滑桩的预先加固可阻止这一潜在巨大发展的滑坡体。

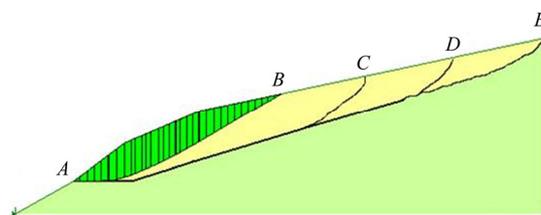


图5 参数反分析图
Fig.5 Diagram of back analysis of parameters

对切坡体的抗剪强度给定一系列组合后可得到切坡前后自重状态下稳定性如表3所示, 切坡将造成坡体稳定性明显下降。

表3 稳定性计算表
Table 3 Calculation table of stability

c / kPa	φ / ($^{\circ}$)	切坡前稳定性 K_1	切坡后稳定性 K_2
27.3	22.7	1.390	1.025
24.8	20.7	1.258	0.928
22.5	18.8	1.120	0.838
20.5	17.1	1.027	0.759

该坡体切至第2级后, 坡顶之外十几米至30多米产生裂缝, 说明切坡后坡体稳定性系数略小于1。因此, 可以判断切坡前潜在滑动面软化后的 c 值在20~26 kPa间, φ 值在17°~22°间, c 、 φ 值在这区间的潜在蠕滑面应不是原岩层, 与一般的块石土层接近^[11], 这也间接说明潜在滑动面岩土体是在长期蠕变移动后的破碎体, 即从潜在滑动面的力学特性上说明不是反倾的红砂岩原岩体, 而是经过蠕变、滑动面附近岩体已破碎的松散结构体。

从该坡有局部异常的小向斜结构特征、地形地貌特点, 坡体上房屋经过一段时间开裂开始, 经计

算分析潜在滑动面力学特性综合判断该坡体是一蠕滑变形体，这种红砂岩蠕滑体在变形后，雨水下渗软化滑动面土体，使其强度下降。在切坡时，坡体稳定性安全系数会迅速下降，可造成边坡产生较大的变形破坏，而预先采用抗滑桩加固坡体，弥补因工程切坡造成的边坡稳定性系数下降，从而提高其稳定性。从岩层结构构造特点、地形地貌、变形特征、力学特性综合分析该边坡是一潜在特大型的蠕滑体着手，再根据红砂岩易于软化的特性分析需预先加固，已设计的锚索加固方式是要在工程切坡后才能进行施工，而在切坡中很可能造成滑动面稳定性下降，坡体产生变形破坏，继而再造成滑动面强度因雨水下渗而下降的连锁不利反应，而预先加固的抗滑桩能避免这一不利结果。事实上，采用锚索加固方式的实际效果是还未来得及进行锚索张拉时，坡体外已产生变形，与预先分析一致。有经验的边坡工程专家能从各方面的信息综合分析、判断工程边坡的稳定性，能预先预见工程中潜在问题，需要采取的有针对性的工程措施，最大限度避免工程事故，减少工程损失。

4 反向陡倾高边坡的加固

岩层倾向与边坡面反向的边坡，一般来说是相对稳定的，但反向边坡是否真正稳定，与岩性、岩层结构、岩层厚度、边坡坡率、地形地貌及边坡高度等相关。高山地区的自然地形地貌中，有很多反倾的自然坡体发现有岩层出现明显的倾倒变形^[10, 12-15]，例如：中薄层灰岩、粉砂岩、页岩、泥砂岩等。发生倾倒变形的山体坡度多在 30°~60° 间，岩层反向倾角多在 40°~80° 间，发生倾倒变形的山体高差多在几十米至几百米。通过这些现象的观察分析，一是可以发现反倾边坡的倾倒变形多为中薄层、软岩层、较陡倾的岩层中，主要是由于这类岩层中有相对软弱的夹层，雨水易于沿层渗透软化岩层面，层间强度降低，使岩层间容易错动；二是岩层厚度较薄，抗弯抗折能力较差，高陡边坡时容易产生倾倒；三是在长期的地质构造活动中，有多组与层面大致直交的节理，这些节理面与坡面同向，切坡时节理面倾角小于坡面角，与顺向坡的切脚坡有相同性质，即产生顺节理的顺坡向滑动，因此，在高速公路切坡中，要特别注重这类反倾岩层切坡中的倾倒滑移边坡问题。

在某高速公路 K323+220~K323+310 的坡面，岩层为三迭系巴东组粉砂质黏土岩、粉砂岩，如图 6 所示，岩层倾角为反坡向 64°，切坡高度为 6 级

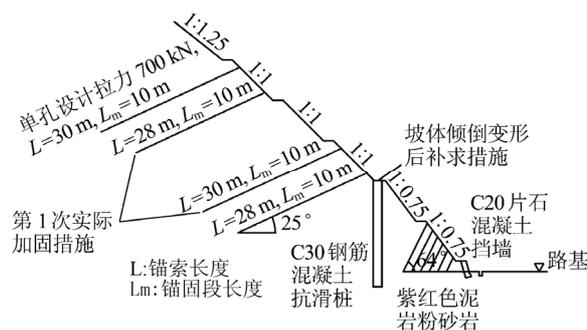


图 6 反陡倾泥岩、粉砂岩设计施工剖面图

Fig.6 Design and construction profile of mudstone and siltstone steep countertendency slope

坡，下部 2 级坡比为 1:0.75，中间为 1:1，最上部为 1:1.25，岩层中节理裂隙发育，在该岩层的山体冲沟附近发现两组顺坡向节理倾角为 30°~50°，即存在着切坡陡于顺坡向节理角，有较明显的产生顺节理的滑移潜势。另外，在该地段附近的冲沟中自然坡的岩层有倾倒变形现象，如图 7 所示，即自然坡遭侵蚀变陡，且地表雨水渗透，径流较多段可使自然坡产生倾倒变形。因此，在切坡角多为 45°~53° 的工程边坡中，可能产生倾倒变形。有工程经验的边坡专家查看现场地形、地质条件并经分析后建议采取边削坡边加固的施工方法，加固方式主要为预应力锚索框架，加固范围为 1 级坡中上部到第 5 级坡面，坡脚设置挡墙，而该工程最后依然采用的是仅在第 3、第 5 级坡面为预应力锚索框架的最初设计，施工方式为边削坡边加固，加固完成削坡至第 2 级坡脚后不久，第 2 级坡面大部分和第 3 级坡面中下部分产生明显的倾倒变形，即岩层间有错动，下层相对向下、上层向上的错移，导致第 3 级坡面部分钢筋混凝土锚索框架产生剪断，说明倾倒下滑力大，仅在第 3、第 5 级坡面加固，其加固力是不够的。同时也说明当初边坡专家的建议是合适的。工程边坡出现倾倒滑移后，边坡专家现场查看分析后建议在第 2 级台阶设置抗滑桩，由于考虑到边坡上部的加固不足，倾倒滑移潜势较大，建议在抗滑桩上部设置 1、2 排锚索，增加抗滑桩的抗倾覆能力，在第 2 级边坡增设锚索框架加固，而最后设计方落实的是仅有 2 m×2.5 m，抗滑桩桩距 5 m，桩长 21 m，在路基下 2~3 m，在抗滑桩施工完成并削坡至路基坡脚后不久，坡面再一次出现倾倒变形，已施工完成的第 2 级台阶上的抗滑桩出现最大外倾超过 30 cm 的变形，第 2 级整体坡面大部以及第 1 级坡面中上部和第 3 级坡面中下部出现较明显的倾倒变形。

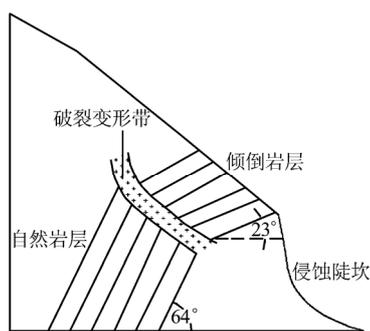


图7 红色泥质粉砂岩的倾倒破坏
Fig.7 Toppling failure of red laminar marlstone

采用离散元方法对削坡至第2级坡脚情况进行了数值模拟, 计算软件为 UDEC。加固方案为: 坡面锚索行距为 3 m, 加固位置见图 8, 每根锚索加固力为 700 kN, 其极限抗拉力约为 1 260 kN, 边坡

岩体和岩层面的计算参数见表 4, 计算模型中岩层面间距为 0.25 m, 迭代 50 000 步后边坡的变形见图 8, 不平衡力-迭代步数曲线表明边坡已经趋于破坏。由计算结果可知, 第 3 级坡面的锚索拉力已经超过了锚索的屈服强度, 这说明加固的锚索范围小, 也说明边坡专家事先建议的 1 级边坡中上部至第 5 级坡面的加固范围是合理的。边坡的破坏模式主要表现为层间错动为主, 失稳范围主要为 1~3 级坡, 破坏方式和破坏范围和实际相当, 这些也间接说明计算分析的合理性。

在其他参数不变的情况下, 调整了岩层面的间距, 由计算结果发现, 随着岩层面的间距增大, 边坡由倾倒破坏逐渐过渡到稳定状态, 因此, 岩层厚度较小是此类边坡发生倾倒破坏的一个重要条件。

表 4 计算参数
Table 4 Calculation parameters

岩体						岩层面				
凝聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /kPa	体积模量 /kPa	剪切模量 /kPa	密度 /(g/cm^3)	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /kPa	法向刚度 /(kPa/m)	切向刚度 /(kPa/m)
80	33	80	4.2×10^5	2.5×10^5	2.6	5	9	0	4×10^5	5×10^5

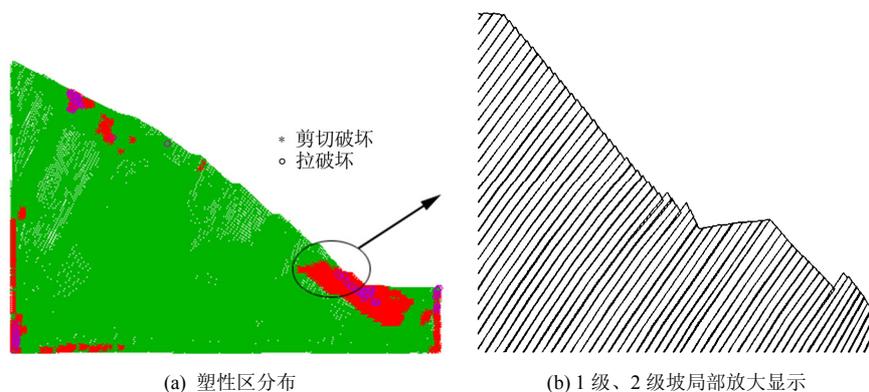


图 8 加固后边坡的倾倒变形
Fig.8 Toppling deformation of the reinforced slope

反思为什么在边坡专家查看现场地质条件后, 已提出较具体的加固建议, 而设计方落实的加固措施却打折扣, 减少加固, 主要是一般设计人员认为反倾边坡较稳定, 而边坡专家的认识与其相反, 该边坡较高陡, 岩层为中厚层泥质粉砂岩黏土层, 反向倾角为 64° , 且红砂岩易于软化, 有崩解性, 岩层间有更软弱的夹层, 雨水下渗后层间抗剪强度低, 该坡面上还有更高的顺向自然坡, 汇水面积较大, 有雨水下渗软化的条件, 这类坡容易出现倾倒变形^[16]。事实证明边坡专家的认识判断和建议的加固措施不是盲目保守的, 是切合实际的。在出现第 1 次

倾倒滑移而增加抗滑桩加固时有工程经验的边坡专家建议添加桩加锚索的加固措施, 第 2 级坡面增加锚索框架, 而设计人员认为即使出现第 1 次倾倒滑移变形, 增加抗滑桩以后也是足够的, 说明在很多设计人员头脑中, 对其下滑倾倒潜势认识不足, 因而再次出现工程加固桩的明显外倾变形, 导致工程出现一而再, 再而三的工程事故, 同时也说明有工程经验的边坡专家合理建议的重要性。

5 结论

(1) 对于顺层坡来说, 影响边坡稳定性不仅

是岩层的顺坡向倾角, 更主要的是软弱类层及其在边坡中的部位, 地表水对其软化影响往往是更决定性的因素, 需对其重点关注, 对影响边坡稳定性的主要控制因素进行分析, 特别关注软弱夹层的抗剪强度随时空的变化和工程特性, 以便作出恰当的工程处理措施。

(2) 自然坡的滑坡蠕变体在对其前缘切坡时, 边坡稳定性系数会迅速下降。在工程线路勘察时, 需特别关注异常的岩层倾角倾向变化情况, 并对其进行分析判断。对于易于软化, 切坡容易产生变形并引起岩体强度下降的边坡, 最好采用切坡前的预先加固, 既能避免因切坡岩体变形的抗剪强度下降, 导致加固力增大, 又能防止因切坡变形损坏已设加固导致工程损失和工期浪费。

(3) 反倾层状岩层大多数情况下稳定性较好, 但对于陡倾 ($40^{\circ} \sim 70^{\circ}$) 反倾边坡中薄层状岩层来说, 由于地质构造的作用与层面大致直交的节理与坡面构成顺坡向, 同时层间有相对软弱层, 雨水渗透软化且自然坡条件下相对较高陡, 容易导致反倾切层边坡出现倾倒滑移, 反倾层状岩层的岩性、倾角、岩层厚度, 坡高, 地形地貌等是高陡反倾层状边坡的主要稳定性影响因素, 高陡反倾自然坡的蠕变体及其深度也是工程设计的重要参考依据, 在进行工程加固时, 需要考虑岩体的长期软化的强度。

(4) 从该文的几个事例可以看出, 有工程经验的边坡专家对重点边坡和有代表性的边坡进行现场调查分析后, 根据边坡岩性特点, 现场实际地形地貌特点, 并结合工程条件, 对岩体特别是对工程起控制性的软弱夹层的强度变化特性有充分了解, 提出切合实际的工程处理建议, 能有效地避免工程潜在损失或过度加固造成的浪费, 达到事半功倍的效果。

参 考 文 献

- [1] 张位华. 贵州第高速公路缓倾角层状边坡滑坡分析[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2008, 37(3): 188—202.
ZHANG Wei-hua. The study of stratified side slopes with gently inclined bedding from some highway of Guizhou province[J]. **Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)**, 2008, 37(3): 188—202.
- [2] 袁从华, 王荣彪, 周健, 等. 平缓红砂岩滑坡特征及警示分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2050—2055.
YUAN Cong-hua, WANG Rong-biao, ZHOU Jian, et al. Landside features of gentle inclined red sandstones and their alarming analyses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 2050—2055
- [3] 袁从华, 章光, 杨明亮, 等. 某公路顺层滑坡的整治及对区域选线的反思[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 428—430.
YUAN Cong-hua, ZHANG Guang, YANG Ming-liang, et al. A way of harnessing an old landside of a highway and thinking about the selected route of the zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 428—430.
- [4] 冯学钢. 缓倾角层状边坡变形破坏机制及整治措施[J]. 公路, 2005, (6): 86—91.
FENG Xue-gang. A study on mechanics and counter measures of deformation and failure of stratified side slopes with gently inclined bedding[J]. **Highway**, 2005, (6): 86—91.
- [5] 邹定湖, 左重辉. 确定缓倾灰岩层面力学参数的经验与教训[J]. 湖南水利水电, 2005, (3): 31—32.
- [6] 张慧, 胡学军, 余子华. 高速公路顺向坡层面抗剪张度参数试验研究[J]. 地质科技情报, 2005, (增刊): 184—188.
ZHANG Hui, HU Xue-jun, YU zi-hua. Experimental study on shear strength of consequent slope bedding surface of freeway[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2005, (Supp.): 184—188.
- [7] 袁从华, 倪俊. 高速公路中红砂岩滑坡特征及整治[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 745—748.
YUAN Cong-hua, NI Jun. Treatment and characters of red sandstone landslides in expressways[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 745—748.
- [8] 金福喜, 卿笃干, 彭环云, 等. 常吉高速某红砂岩滑坡治理及分析[C]//第二届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集(2). 长沙: 湖南大学出版社, 2008.
- [9] 李志勇, 邹静蓉, 谢强. 红砂岩路堑边坡滑坡与分析及整治[J]. 中南公路工程, 2001, (2): 1—3.
- [10] 邵江, 李仁成, 周德培, 等. 近水平红层路堑边坡滑动机理和防治对策[J]. 工程地质学报, 2005, 12(2): 174—178.
- [11] 夏元友, 蒋超. 云南祥临公路滑坡滑带土抗剪强度指标的统计分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 920—924.

- XIA Yuan-you, JIANG Chao. Statistic analysis of shear strength of the slope in Xianglin Road in Yunnan Province[J]. **Rock and soil Mechanics**, 2006, 27(6): 920—924.
- [12] 韩贝传, 王思敬. 边坡倾倒变形的形成机制与影响因素分析[J]. 工程地质学报, 1999, (3): 213—217.
- HAN Bei-chuan, WANG Si-jing. Mechanism for toppling deformation of slope and analysis of influential factors on it[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, (3): 213—217.
- [13] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 24(11): 1362—1366.
- CHENG Dong-xing, LIU Da-an, DING En-bao, et al. Analysis on influential factors and toppling conditions of toppling rock slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 24(11): 1362—1366.
- [14] 任先明, 聂德新, 刘高. 反倾向岩质斜坡变形破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2707—2710.
- REN Xian-ming, NIE De-xin, LIU Gao. Studies on deformation and failure properties of Anti-Dip Rockmass slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp. 2): 2707—2710.
- [15] 黄润秋, 唐世强. 某倾倒边坡开挖下的变形特征及加固措施分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 49—54.
- HUANG Run-qi, TANG Shi-qiang. On the deformation characteristics and reinforcement measures of a toppling slope under excavation[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2007, 34(6): 49—54.
- [16] 李玉倩, 李渝生, 杨晓芳. 某水电站边坡倾倒变形破坏模式及形成机制探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, (3): 39—46.
- LI Yu-qian, LI Yu-sheng, YANG Xiao-fang. Patterns and mechanism of slope deformation and failure of a certain hydropower station[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2008, (3): 39—46.
- [17] 袁从华, 童志怡, 卢海峰. 牵引式滑坡特征及主被动加固比较分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2853—2858.
- YUAN Cong-hua, TONG Zhi-yi, LU Hai-feng. Analysis of characteristics of retrogressive landslide and comparison between active and passive reinforcements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2853—2858.
- ZHANG Xiao-wei. Study on the relationship between support pressure of deep-buried tunnel and span[J]. **West China Exploration Engineering**, 2009, (7): 163—165.
- [13] 黄朱林. 扁平率对大跨隧道围岩及支护稳定性影响分析[J]. 西部探矿工程, 2008, (11): 196—198.
- HUANG Zhu-lin. Stability analysis of surrounding rock and support in the tunnel with large span under the effect of flat ratio[J]. **West China Exploration Engineering**, 2008, (11): 196—198.
- [14] 黄生文, 司铁汉, 陈文胜, 等. 断层对大跨度隧道围岩应力影响的有限元法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3788—3793.
- HUANG Sheng-wen, SI Tie-han, CHEN Wen-sheng, et al. Finite element analyses of influence of fault on large-span tunnel surrounding rock stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3788—3793
- [15] YE Bin, ZHU He-hua, XIA Cai-chu, et al. Comparison of different excavation sequences of large-span unsymmetrical arcade tunnel[J]. **Tunnelling and underground Space Technology**, 2004, (19): 415.
- [16] 张顶立, 王梦恕, 高军, 等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 290—296.
- ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, GAO Jun, et al. Construction technique of large-span tunnel under condition of complicated surrounding rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 290—296.
- [17] 潘洪科, 杨林德, 黄慷. 公路隧道偏压效应与衬砌裂缝的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3311—3315.
- PAN Hong-ke, YANG Lin-de, HUANG Kang. Research on unsymmetrical load effect and lining cracks of a highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3311—3315.

上接第 270 页