

路堑高边坡稳定性分析方法和工程实践

李刚¹ 周向辉²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院,陕西西安 710075; 2. 陕西省公路局,陕西西安 710068)

【摘要】 探讨了高速公路路堑高边坡的实用工程分类方法,重点分析了岩质高边坡的破坏模式、稳定性分析方法、附加荷载的考虑方法、计算指标的选取方法等问题,结合多年来高边坡设计工作中的经验,探讨了高边坡的设计方法和工程对策。

【关键词】 高边坡;破坏模式;稳定性;工程实践

【中图分类号】 U 457

Analysis of High Side Slope Stability and Some Experiences from Practices

Li Gang¹ Zhou Xianghui²

(1. The 1st Highway Survey and Design Institute of China, Xi'an Shanxi 710075;

2. Shanxi Highway Administration, Xi'an Shanxi 710068 China)

【Abstract】 The method of applied engineering classification of high side slope is analysed and discussed. Some main problems are analysed, such as the typical deformation pattern, the method of stability analysis, the selection of computation indices and ect. With the experiences from the practices of high side slope design in many years, the high side slope design method and the countermeasures in construction are discussed.

【Key Words】 high side slope; deformation pattern; stability; engineering practices

0 引言

在山区高速公路建设过程中,路堑高边坡设计和施工已成为一项重要内容,是一个难点,但又是无法避免的。交通部《公路勘察设计典型示范工程咨询示范要点》中要求:挖方深度(路中)大于30 m或挖方边坡高度大于1.6倍路基宽度值(四车道高速达40~45 m,六车道高速达53~56 m时),原则上改用隧道。实际工程中当地面横坡较陡时,中心挖方深度达30 m,一侧挖方高度可能小于10 m甚至填方,而另一侧边坡高度可达40~60 m,甚至更高。如设计为隧道,则可能严重偏压甚至是明洞,造价高而且运营费用高、效果差,设计为高边坡则造价低且养护运营简单。高边坡方案往往是可行的。但前提是工程安全可靠,且景观效果相对较好^[1]。如何进行路堑高边坡稳定性分析和防护设计成为一个重要课题。本文着重探讨岩质路堑高边坡的破坏模式、稳定性分析方法、指标选取和工程设计等问题。

1 破坏模式

1.1 边坡分类

为便于工程应用,边坡分类根据岩土性质大致分为土质边坡、类土质边坡和岩质边坡^[2]。

各种边坡破坏形态千差万别,均质土质边坡破坏一般拟合为圆弧面破坏(粘性土质)和平面破坏(砂性土质)以及特殊形态破坏(如黄土的螺旋曲线和裂隙面);类土质边坡主要是指坡残积土边坡,风化土边坡等,破坏一般沿坡残积结合面或坡残积与基岩面等处成近似圆弧面破坏;而岩质边坡破坏模式要复杂得多。岩坡的破坏类型从形态上可分为岩崩和岩滑两种,岩崩一般发生在坚硬岩体中。本文仅讨论岩滑。

1.2 岩质边坡失稳机理

岩质边坡不同于土质边坡,其特点是岩体结构复杂、断层、节理、裂隙互相切割,块体极不规则,边坡稳定性同岩体的结构、块体密度和强度、边坡坡度、高度、岩坡表面和顶部所受荷载,边坡的渗水性能,地下水位的高低等有关。

大部分岩坡在丧失稳定性时的滑动面可能有三种:一是沿着岩体软弱岩层滑动;二是沿着岩体中的结构面滑动;当这两种软弱面不存在时,也可能在岩体中滑动,但主要的是前面两种情况较多。

软弱岩层主要是粘土页岩、凝灰岩、泥灰岩、云母片岩、滑石片岩以及含有岩盐或石膏成分的岩层,这类岩层遇水浸泡后易软化,强度大大地降低,形成

软弱层。在坚硬的岩层中(如石英岩、砂岩等等)往往也有这类软弱夹层;结构面包括沉积作用的层面、假整合面、不整合面,火成岩侵入结构面以及冷缩结构面,变质作用的片理,构造作用的断裂结构面等等。这些地质构造作用形成的结构面往往都夹有粘土或泥质充填物,遇水浸泡后,结构面中的软弱充填物就容易软化,强度大大地降低,促使岩坡沿着它发生滑动。

1.3 岩坡的破坏类型

岩坡的破坏类型分为平面滑动、楔形滑动以及旋转滑动。平面滑动是一部分岩体在重力作用下沿着某一软弱面的滑动,一般需满足以下条件:

1)滑动面的走向必须与坡面平行或接近平行(约在 $\pm 20^\circ$ 的范围内);

2)滑动面必须在边坡面露出,即滑动面的倾角 β 必小于坡面的倾角 α ,即 $\beta < \alpha$;

3)滑动面的倾角 β 必大于该平面的摩擦角 φ_j ,即 $\beta > \varphi_j$;

4)岩体中必须存在对于滑动阻力很小的分离面,以定出滑动的侧面边界。

平面滑动不仅滑体克服了底部的阻力,而且也克服了两侧的阻力。在软岩中,如底部倾角远陡于内摩擦角,则岩石本身的破坏即可解除侧边约束,从而产生平面滑动。在硬岩中,如果不连续面横切坡顶,边坡上岩石两侧分离,则也能发生平面滑动。

楔形滑动是岩体沿两组(或两组以上)的软弱面滑动的现象。在挖方边坡中,如果两个不连续面的交线出露,则楔形岩体失去下部支撑作用而滑动。

旋转滑动的滑动面通常呈弧形状,这种滑动一般产生于均质的、非成层的、没有断裂面岩体中,在一定条件下可用圆弧法进行稳定分析。

严格而言,岩坡滑动大多属空间滑动类型。对只有一个平面构成的滑裂面或者滑裂面由多个平面组成而这些面的走向又大致平行者,且沿着走向长度大于坡高时,则也可按平面滑动进行分析,其结果偏于安全方面。

2 稳定性分析方法

2.1 影响边坡稳定性的因素

影响边坡稳定性的因素主要有内在因素和外部因素两方面。内在因素包括组成边坡的地貌特征、岩土体的性质、地质构造、岩土体结构、岩体初始应力等。外部因素包括水的作用、地震、岩体风化作用、工程荷载条件及人为因素等。内在因素对边坡的稳定性起控制作用,外部因素起诱发破坏作

用^[3]。

2.1.1 岩性和类型

岩性对边坡的稳定及其边坡的坡高和坡角起重要的控制作用。坚硬完整的块状或厚层状岩石,如花岗岩、石灰岩、砾岩等可以形成数百米的陡坡,如长江三峡峡谷。风化程度高的岩体、软弱岩体形成的边坡一般较缓。

2.1.2 地质构造和岩体结构的影响

在区域构造比较复杂,褶皱比较强烈,新构造运动比较活动的地区,边坡稳定性差。断层带岩石破碎,风化严重,又是地下水活动最丰富的地区,则极易发生滑坡。岩层的产状对边坡稳定也有很大影响。水平岩层的边坡稳定性较好,但存在陡倾的节理裂隙,则易形成崩塌和剥落;同向缓倾的岩质边坡(结构面倾向和边坡坡面倾向一致,倾角小于坡角)的稳定性比反倾的差,并且最易产生顺层滑坡;结构面或岩层倾角愈陡,稳定性愈差,如岩层倾角小于 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的边坡,除沿软弱夹层可能产生塑性流动外,一般是稳定的,大于 25° 的边坡,通常是不稳定的,倾角在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的边坡,则根据层面的抗剪强度等因素而定;同向陡倾层状结构的边坡,一般稳定性较好,但由薄层岩体或软硬岩互层组成时,则可能因蠕变而产生挠曲弯折或倾倒;反向倾斜层状结构的边坡通常较稳定,但垂直层面或片理面的走向节理发育且顺山坡倾斜时,也易产生切层滑坡。

2.1.3 水的作用

地表水和地下水是影响边坡稳定性的重要因素。不少滑坡的典型实例都由水的作用触发的。处于水下的透水边坡将承受水的浮托力的作用,而不透水的边坡,将承受静水压力;充水的张开裂隙将承受裂隙水静水压力的作用;地下水的渗流,将对边坡岩体产生动水压力;水对边坡岩体还产生软化或泥化作用,使岩土体的抗剪强度大为降低。

此外,工程荷载、地震、爆破等因素对边坡稳定性也会产生很大的影响。

2.2 边坡稳定分析与评价方法

边坡稳定性分析与评价的目的,一是对与工程有关的天然边坡稳定性作出定性和定量评价;二是要为合理地设计人工边坡和边坡变形破坏的防治措施提供依据。边坡稳定性分析评价的方法主要有:地质分析法(历史成因分析法)、力学算法、工程地质类比法、图解法、极限平衡法、数值分析法等等。

2.2.1 定性分析方法

该方法的优点是综合考虑影响边坡稳定的因

素,快速对边坡的稳定性做出评价和预测。常用的方法有:

1)地质分析法(历史成因分析法)

根据边坡的地形地貌形态、地质条件和边坡变形破坏的基本规律,追溯边坡演变的全过程,预测边坡稳定性发展的总趋势及其破坏方式,从而对边坡的稳定性做出评价,对已发生过滑坡的边坡,则判断其能否复活或转化。

2)工程地质类比法

其实质是把已有的自然边坡或人工边坡的设计研究经验应用到条件相似的新边坡和人工边坡的设计研究中去。这种方法需要对已有边坡进行详细的调查研究,全面分析工程地质因素的相似性和差异性。还应考虑工程的类别、等级及其对边坡的特定要求等。它虽然是一种经验方法,但在边坡设计中,特别是在中小型工程的设计中是很通用的方法。

2.2.2 定量评价方法

实质是一种半定量的方法,虽然评价结果表现为确定的数值,但最终判定仍依赖人为的判断。目前,所有定量的计算方法都是基于定性基础之上。

1)图解法

①用一定的曲线和借读图来表征边坡有关参数之间的定量关系,由此求出边坡稳定性系数,或已知稳定系数及其它参数(φ 、 c 、 γ 、结构面倾角、坡角或坡高),求出稳定坡角或极限坡高。

②利用图解求边坡变形破坏的边界条件,分析软弱结构面的组合关系,分析滑体的形态、滑动方向,评价边坡的稳定程度,为力学计算创造条件。常用的为赤平极射投影分析法及实体比例投影法。

2)极限平衡法

极限平衡法在工程中应用最为广泛。这个方法以摩尔-库仑抗剪强度理论为基础,将滑坡体划分为若干条块,建立作用在这些条块上的力的平衡方程式,求解安全系数。该方法的关键在于对滑体的范围和滑面的形态进行分析,正确选用滑面计算参数,分析滑体的各种荷载。基于该原理的方法很多,如条分法、圆弧法、Bishop法、Janbu法、不平衡传递系数法等。极限平衡法比较直观、简单,对大多数边坡的评价结果令人满意。

3)数值分析方法

目前常用的方法主要有有限单元法(FEM)、边界单元法(BEM)、离散元法(DEM)、块体理论(BT)等等。

有限单元法是目前应用最广泛的数值分析方

法。其解题步骤已经系统化,并形成了很多通用的计算机程序。其优点是部分地考虑了边坡岩体的非均质、不连续介质特征,能够接近实际地从应力应变角度分析边坡的变形破坏机制,对了解边坡的应力分布及应变位移变化很有利。其不足之处是:数据准备工作量大,原始数据易出错,不能保证整个区域内某些物理量的连续性,对解决无限域问题、应力集中问题等其精度比较差。边界单元法计算精度较高,在处理无限域方面有明显的优势。其不足之处为:一般边界元法得到的线性方程组的关系矩阵是不对称的,不便应用有限元中成熟的对稀疏对称矩阵的系列解法。另外,边界元法在处理材料的非线性和严重不均匀的边坡问题方面,远不如有限元法。离散元法弥补了有限元法或边界元法的介质连续和小变形的限制,可以直观地反映岩体变化的应力场、位移场及速度场等各个参量的变化,可以模拟边坡失稳的全过程,特别适合块裂介质的大变形及破坏问题的分析。其缺点是计算时步需要很小,阻尼系数难以确定等。块体理论能找出具有潜在危险的关键块体在临空面的位置及其分布,块体理论不提供大变形下的解答,能较好地应用于选择边坡开挖的方向和形状。但各种数值方法均需要有模型建立、参数选取、结果分析等过程,较之极限平衡法需耗费大量的时间和人力,且对使用者有较高的要求。极限平衡法计算过程简单,易于使用,在设计人员中应用较广,但假定多,不能反映边坡各部分的应力、应变情况。极限平衡法与数值分析法配合使用,互相验证,则效果更加理想。

4)近代理论计算法

近代理论计算分析是将土力学、岩石(岩体)力学、弹塑性力学、断裂力学、损伤力学等多种力学和数学计算方法应用于边坡稳定性的定量评价和预测。量化分析涉及到稳定性计算、失稳时间预报、稳定空间预测等。可以更充分地反映边坡演变的实际情况,是值得进一步探索完善的量化分析方法。

2.3 特殊荷载的考虑

2.3.1 静水压力

作用于边坡的静水压力主要包括两种情况:一是当边坡被水库淹没时,库水对边坡面所产生的静水压力;二是当裂隙岩石边坡的张裂隙充水时,裂隙中的水压力。

2.3.2 浮托力

处于水下的透水边坡,承受浮托力的作用,使坡体的有效重量减轻,这对边坡的稳定不利。对处于

极限稳定状态,依靠坡脚岩体重量保持暂时稳定的边坡,坡脚被水淹没后,浮托力对边坡稳定的影响就更加显著。

2.3.3 动水压力

动水压力是地下水在流动过程中所施加于岩体上的力。它是一种体积力。动水压力多假定与地下水面或滑面平行。如果动水压力方向和滑体滑动方向不一致,则应分解为垂直和平行于滑面的两个分量参与稳定计算。在边坡稳定的实际计算中,由于渗流方向不是定值,且水力梯度不易精确确定,一般则作简化假定,以采用不同的滑体块体密度将动水压力的影响计入。即计算下滑力时,采用饱和块体密度,计算抗滑力时,采用浮块体密度。

2.3.4 附加荷载

附加荷载的作用影响边坡的稳定性。例如,边坡坡顶附近建筑物引起的坡顶超载;材料堆放引起的荷载;高速公路路堑坡顶有地方道路时车辆荷载等等。

2.3.5 地震及爆破作用

地震对边坡稳定性的影响表现为累积和触发(诱发)等两方面效应。

1) 累积效应

边坡中由地震引起的附加力 S 的大小,通常以边坡变形体的重量 W 与地震振动系数 k 之积表示 ($S = kW$)。在一般边坡稳定性计算中,将地震附加力考虑为水平指向坡外的力。但实际上应以垂直与水平地震力的合力的最不利方向为计算依据。总位移量的大小不仅与震动强度有关,也与经历的震动次数有关。频繁的小震对斜坡的累进性破坏起着十分重要的作用,其累积效果使影响范围内岩体结构松动,结构面强度降低。

2) 触发(诱发)效应

触发效应可有多种表现形式。在强震区,地震触发的滑坡往往与断裂活动相联系。高陡的陡倾层状边坡,震动可促进陡倾结构面(裂缝)的扩展,并引起陡立岩层的晃动,同时引发裂缝中的空隙水压力(尤其是在暴雨期)激增而导致破坏。

碎裂状或碎块状边坡,强烈的震动(包括人工爆破)甚至可使之整体溃散,发展为滑塌式滑坡。

我国岩质边坡工程实践中,为量化评价爆破的影响,根据经验采取降低计算结构面的抗剪强度的方法实施, $\tan \varphi$ 值降低 15% ~ 30%, c 值降低 20% ~ 40%。理论计算,降低的低值和高值分别相当于地震烈度Ⅷ度和Ⅸ度时造成的影响。

2.4 稳定性分析指标选取

稳定性分析指标取得包括:室内试验指标,现场试验指标,相关经验指标和反算指标^[4]。

室内试验是结合边坡工程地质勘查,利用工程地质勘探孔取得原状样或扰动样,通过室内试验的方法,获取边坡岩土基本物理力学指标,求得岩土抗剪强度参数值。现场试验是在边坡工程现场进行现场大型剪切试验,或结合工程地质勘探钻孔进行孔内现场剪切试验,对于软弱地层亦可采用十字板剪切试验,以及其它结构面强度现场试验方法等,从而求得边坡岩土现场试验指标。相关经验指标在岩土工程勘查设计工作实践中,经验知识是不可或缺的重要内容之一。对于岩土强度指标,可以也应该通过工程地质类比的方法,利用即有工程中类似岩土的相关经验知识和指标数值,类比确定当前面临边坡工程强度指标。指标反算是根据给定边坡工程变形性状,判断边坡稳定程度或稳定系数,采用数值反分析方法,经过反算确定边坡岩土主要强度指标^[5,6]。

选择与确定力学性质指标的总原则:以反算指标为主,有条件结合各种试验指标进行校核,考虑室内试验指标一般偏低,而现场试验指标一般偏高的特点,反算指标介于室内试验指标和现场试验指标之间较为可靠。经验指标一般可以对拟定计算指标进行分析与判断,特别是,当发现反算指标与相关试验指标相冲突时,作为辅助手段,综合分析和判断确定计算指标。

3 路堑高边坡设计工程实践

3.1 动态设计总体思路

由于地质历史成因的复杂多变性,致使每一项岩土工程的地质结构均不相同。由于岩土介质的各向异性,特别是岩体具有规则或不规则的节理、裂隙、层理、结构面等,使得高边坡的破坏模式复杂多变,不能简单地套用经典模式。此外,高边坡工程地质勘察工作在有限的时间内通过有限的工作量,很难作到非常详实、可靠和全面,使得设计工作也很难保证与现场情况完全符合,处理力度可能过火,也可能不及,甚至方案错误。必须进行动态信息化设计与施工,这点已被业界认可。通过详细记录施工中的所揭露的地层情况、变形破坏痕迹等等信息及时地调整或修改设计。对于重要的高边坡工点,施工完成后也应该进行变形监测,并且作出长期稳定性评价^[7]。

高边坡工程设计总体思路如下:1)工程地质调

查(地形、地质、地下水等);2)工程地质勘探、评价;
3)防护加固工程方案(边坡类型、坡形坡率、稳定性
分析计算、防护加固工程对策);4)现场校对和重点
核查;5)动态跟踪与设计调整;6)竣工稳定性评价。

3.2 高边坡坡率设计原则和防护加固工程对策

3.2.1 坡形坡率设计原则

路堑边坡坡形一般设置为台阶式,台阶高度
8~12 m,完整岩体及顶级缓坡可设至 15 m 左右,
平台宽一般 1~3 m。对于高边坡,常在坡体中部设
置4~6 m 宽的中间平台,以减小坡脚应力,优化坡
体受力状态,使上下级边坡某种程度上分离。

边坡坡率一般根据边坡地质岩性、风化程度,通
常采用如下原则:微风化岩 0.25~0.50,弱风化岩
0.50~0.75,强风化岩 0.75~1.00,坡残积层 1.00~
1.25,松散软弱土层 1.25~1.50。

为了加强高边坡的景观效果,便于绿化,在有条
件的情况下,应尽量放缓边坡,能够顺应地形为最
佳,并将开挖后坡口线与原地面线圆滑过渡,而不致
于过于生硬。在一段边坡内也不必强调采用统一的
边坡坡率,完全可以在边坡中部高度大时采用较陡
的坡率值,而在边坡两端采用较缓的坡率值。只要
平滑过渡即可,但不要变化过于频繁。

3.2.2 防护加固工程对策

防护加固工程应针对边坡不同的变形破坏形式
或因素而采取不同类型的措施。主要有:坡面变形
类,浅表层变形类,块体变形类,深部变形类,坡脚应
力集中类和地表、地下水引排类等。

经验证明,许多滑坡的发生都与岩体内的渗水
作用有关。因此,各类防护加固措施均应结合地表、
地下水引排措施使用。

1)坡面变形类

对于微-未风化岩体:光面控制爆破后不防护或
喷混植草防护。弱-微风化岩体:挂网喷混植草防
护。强-弱风化岩体:挂网喷混植草防护或骨架类
(拱型、菱形、人字型等等)客土喷播植草防护。
全-强风化层:骨架类客土喷播植草防护。坡残积
层:骨架类客土喷播植草防护或三维土工网植草防
护。松散土层:三维土工网植草防护。

2)浅表层变形类

下伏弱-微风化岩:系统锚杆防护。上覆土层及
强风化岩:锚杆框架防护。

3)块体变形类

以预应力锚杆框架及墩垫防护为主。

4)深部变形类

以预应力锚索框架及墩垫防护为主。

5)坡脚应力集中类

以坡脚设桩、墙等支挡结构防护为主,或加厚护
面墙工程措施。

6)地表地下水引排处理类

对于坡体地下水引排,以仰斜平孔排水为主,
结合墙背盲沟及结构泄水孔处理,有时还可以用边
坡渗沟、支撑盲沟及重点部位引排等措施;对地表水
引排,一般在路堑顶设截水沟,坡面设急流槽,以
及平台排水沟、路堑边沟等组成综合地表排水系
统。

4 结 论

本文探讨了高速公路路堑高边坡的实用工程分
类方法,并重点分析了岩质高边坡的破坏模式、稳定
性分析方法、附加荷载的考虑方法、计算指标的选取
方法等问题,最后结合多年来高边坡设计工作中的
经验探讨了高边坡的设计方法和工程对策,可为有
关设计和研究人员提供参考。

参 考 文 献

- 1 GB 50330—2002 建筑边坡工程技术规范
- 2 JTJ 013—95 公路路基设计规范
- 3 李 刚,崔建恒.路基滑坡及高边坡推力计算探讨.高等
级公路,2000(4):31~35
- 4 刘祖典,党发宁.强度指标对滑坡稳定性的影响.岩土工
程技术,2002(3):140~143
- 5 李思平,张德政.基于软计算的边坡稳定性评价方法与实
现.岩土工程技术,2002(3):135~139;151
- 6 时卫民,郑颖人.岩质建筑边坡水平推力的计算.岩土工
程技术,2002(3):131~134
- 7 杨学堂,王 飞.边坡稳定性评价方法及其发展趋势.岩
土工程技术,2004,18(2):103~106

收稿日期:2005-02-28