

文章编号: 0451-0712(2005)06-0086-06

中图分类号: U418.52

文献标识码: B

# 缓倾角层状边坡变形破坏机制及整治措施

冯学钢

(四川省交通厅公路水运质量监督站 成都市 610059)

**摘 要:** 以国道 108 线广(元)南段公路缓倾角层状边坡的变形和失稳破坏为典型结构,在滑坡区岩体结构、水文地质条件、岩体水力学特征、滑坡形态特征和滑坡运动学特征等综合分析基础上,重点讨论了滑坡变形破坏的模式及产生的主要控制因素,并对滑坡进行了稳定性综合评价。在此基础上,对不同整治措施的技术可行性及经济指标进行比较分析,提出了经济、合理、有效的整治方案。

**关键词:** 缓倾角层状边坡; 变形破坏机制; 稳定性评价; 整治措施

公路建设是在地质体上进行的人类工程活动,在建设过程中,由于忽视或未重视边坡地质体及地质环境的分析与评价,常引发一系列的边坡变形或边坡滑动等地质灾害问题。例如四川省境内的高速公路及重点公路建设过程中,国道 108 线西昌段、成雅高速公路、318 国道的二郎山隧道进出口引道段、国道 107 线岳阳市四方岭段以及川藏公路等,均不同程度地出现了边坡(滑坡)地质灾害或产生了边坡失稳的问题,从而严重影响了工程建设及运营的正常运行,也使得对公路边坡的加固或整治费用远高于修建道路的费用。

国道 108 线广(元)南段公路通过地段大多为低山丘陵红层分布区,建设中遇到了公路路基高填深挖等一些特殊工程地质问题。由于该段路线长、跨越地质、地貌单元较多,从勘察设计到施工的周期短,未能全面地认识沿线的路基工程地质条件,也未能及时地发现和解决存在的工程地质问题。沿途的路线边坡虽在路基开挖期间进行了一定程度的处理,

但在工程建设过程中仍有多处边坡发生坍塌、滑动和崩落,严重影响了已通车路段的行车安全和公路正常使用,阻碍了当时正在施工路段的路面铺筑和交通工程设施等工程的施工。

广南段公路路线基本沿着构造线方向展布,使得路堑边坡有一侧构成顺层坡。尽管这些顺层边坡倾角很小,一般均在 10 余度,但在施工过程中多处发生变形或者滑动破坏,不仅造成巨大的经济损失,而且延误了工期。施工中采取了一些加固措施但效果不佳,其主要原因是对工程边坡的地质条件认识不足,尚未查清边坡变形破坏的主控因素和变形破坏机制,因此,治理措施具有盲目性,不能达到治理的目的,甚至造成大的浪费。

本文在对边坡岩体工程地质特征和岩体力学条件进行充分调查分析、对缓倾角层状边坡的变形破坏机制进行研究和稳定性评价的基础上,提出了较为合理的边坡整治、支护方案,通过实施后的工程验证说明,方案是合理有效的。

收稿日期: 2005-04-22

## Test of Red Clay and Its Application to Embankment Fill

SUN Xiang-nan, XUE Wei

(Gezhouba Group's No. 5 Engineering Co. Ltd., Yichang 443002, China)

**Abstract:** According to the characteristics and test results of the red clay in Guiyang — Xinzhai Expressway, the construction of backfill test section is carried out. Through analyzing the process and results of tests, the optimum constructive parameters are determined that instruct the red clay to be used for embankment construction in the 90th area of the road bed.

**Key words:** red clay; test; optimum water content; embankment fill

## 1 研究区工程地质概况

### 1.1 工程概况

国道108线广南段公路边坡主要以侏罗系砂岩、泥质粉砂岩和泥岩为主,第四系只在近河床部位分布较普遍,而在边坡的中上部只有薄层覆盖,滑坡的形成与边坡岩体的性质有关。本文对缓倾角层状边坡变形破坏的分析研究,主要是以国道108线广南段K24、K28这2段典型边坡为例进行讨论。

K24滑坡位于广元市盘龙镇共和村三队、嘉陵江Ⅱ级阶地以北,地处嘉陵江冲刷岸,地势南东低北西高,国道108线广南段K24+850~K25+090路段从滑坡体中部通过。从20世纪50年代至80年代,曾出现过多次小范围滑坡,未造成较大的危害。1997年6月开始在滑坡前缘修筑高速公路,由于路基开挖、放炮震动,1998年6月滑坡整体发生蠕滑变形。

1999年4月,滑坡中部产生大幅度滑动解体,滑坡堆积物覆盖约2/3路基,直接对公路建设造成危害。

K28滑坡位于广元市中区盘龙镇东南部4 km,地处嘉陵江冲刷岸,地势南东低北西高,相对高差为106 m。地形坡度下缓上陡,坡面倾向嘉陵江,坡度为 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。平台后缘是巨厚层砂岩形成的陡崖,坡度为 $65^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,高度约为25~32 m,基本上为岩质顺层滑坡。

### 1.2 工程地质条件概述

国道108线广南段属于四川省北部丘陵地貌单元,以浑圆形山丘为主,路基处于嘉陵江冲刷岸,地形坡度上陡下缓,坡面倾向嘉陵江,受岩性影响,在泥质含量高的岩性部位为宽缓的平台或缓坡,巨厚层或厚层砂岩常形成陡崖。

该区出露地层主要为侏罗系中统沙溪庙组和白田坝组砂泥岩,其次是残坡积层、滑坡堆积层以及人工填土。地质构造上位于走马岭向斜南翼,为单斜构造,岩层倾向为 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$ ,倾角为 $11^{\circ}\sim 13^{\circ}$ 。构造裂隙和卸荷裂隙发育,总体上平直稍粗糙,多夹软塑状的表生夹泥,给边坡稳定带来直接危害。该区地下水按赋存状态分为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水,大气降雨和江水是地下水的主要补给来源,基岩风化裂隙带富水性强,微风化基岩富水性较弱,从开挖基坑出水量来看,旱季松散岩类孔隙水基本干枯,风化基岩裂隙水赋存量较大。

## 2 边坡变形破坏的概念模型

研究区边坡岩体缓倾向坡外,岩体中发育有平

行于坡面的和近垂直于坡面的2组节理,并在多处出露泉水。在风化、卸荷作用下,降雨沿裂隙渗入岩体中,使裂隙张开并向深部发展,加快了岩体的变形破坏进程,最终发展成滑坡。本文以国道108线广南段K24、K28这2处边坡变形破坏的实例为研究重点,分析该区缓倾角层状边坡的变形及破坏机理。

### 2.1 K24滑坡的变形与破坏

K24滑坡称为八庙梁滑坡,位于广元市盘龙镇、嘉陵江Ⅱ级阶地以北,国道108线广南段K24+850~K25+090路段从滑坡体中部通过。该区地形北高南低,其中八庙梁山标高为509.60 m,区内最低标高为469.65 m。八庙梁东北侧为李家沟,西侧为庙子沟,南侧为嘉陵江Ⅰ、Ⅱ级阶地,其上为密集的农舍。该区三面临空,有利于滑坡形成。

国道108线在修建过程中,在滑坡中前部挖方、放炮,破坏了斜坡的自然平衡,致使滑坡上裂隙贯通并形成连续滑动面,加之地下水活动频繁,促使滑坡得以复活,产生滑动。

#### 2.1.1 滑坡的基本特征

八庙梁滑坡平面形态呈碟形,外貌形态呈罗汉肚形,中部向山外突起,两侧向山内收敛。滑坡边界北起山顶洼地后缘,标高为507.30 m;南至杨家院子前,标高为474.73 m;西边以庙子沟(K24+875)为界;东边至K25+090。滑坡体前缘至后缘高差为32.57 m,坡向为 $145^{\circ}$ ,坡度为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,纵向呈阶梯状。滑坡体平均长为192 m,平均宽为215 m,平均厚为10.3 m,总方量约 $3.268\times 10^5\text{ m}^3$ 。

根据钻孔揭示,八庙梁滑坡体自上而下可分为残坡积粉质粘土、散粒岩体及层状碎裂岩体(如图1所示)。

#### 2.1.2 滑(面)带土特征

滑动面形状呈弧形,后缘较陡,后缘倾角为 $20^{\circ}\sim 38^{\circ}$ ;前缘反翘,倾角为 $0^{\circ}\sim -13^{\circ}$ 。次级滑面位于滑坡散粒岩底部和贯通性裂隙岩石底部,深层滑面位于强风化泥岩层底面与泥质砂岩接触带。滑面上泥岩被泥化,泥质包裹砂岩角砾,并见摩擦痕迹。

滑带土的物质组成为青灰色泥质页岩泥化的粉质粘土,夹次棱角状泥岩碎块,含水量为 $10\%\sim 23\%$ ,呈可塑至软塑状,厚度为15~25 cm。

#### 2.1.3 滑坡的变形特征

八庙梁滑坡从20世纪50年代至80年代曾产生过多次小范围滑坡,未造成较大的危害。1997年6月开始在滑坡前缘修筑高速公路,由于路基开挖、放炮

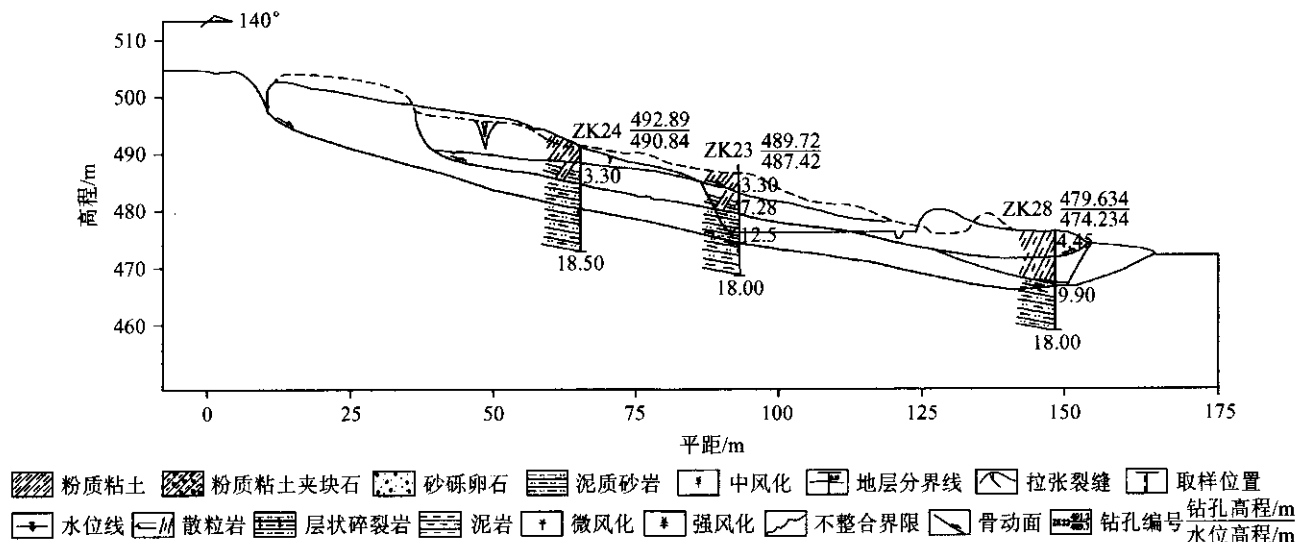


图1 K24 滑坡工程地质剖面

震动,1998 年 6 月滑坡整体发生蠕滑变形。1999 年 4 月,滑坡中部产生大幅度滑动解体,滑坡堆积物覆盖约 2/3 路基,直接对公路建设造成危害。

2.2 K28 滑坡的变形与破坏

K28 滑坡位于广元市盘龙镇东南部 4 km,地处嘉陵江冲刷岸,地势南东低北西高,相对高差为 106 m,地形坡度下缓上陡,坡面倾向嘉陵江,坡度为 10°~25°。平台后缘是巨厚层砂岩形成的陡崖,坡度为 65°~80°,高度约 25~32 m。

2.2.1 滑坡的基本特征

该滑坡平面形态呈“蚕豆”状,外貌形态呈高陡

斜坡。滑坡基本上为岩质顺层滑坡。滑坡边界南起 K28+530 公路右侧,北至 K28+930 公路右侧,平均长约 400 m。老滑坡后缘位于公路左侧原地面陡壁,前缘位于嘉陵江枯水位以下,宽度约 90 m。滑体平均厚度为 8~10 m,总方量约  $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。新滑坡后缘位于公路右车道,局部跨越公路中线,前缘进入嘉陵江中。

根据钻探资料来看,滑坡体从上至下分为人工填土或弃土、粉质粘土夹碎块石或巨石以及似层状碎裂岩(如图 2 所示)。

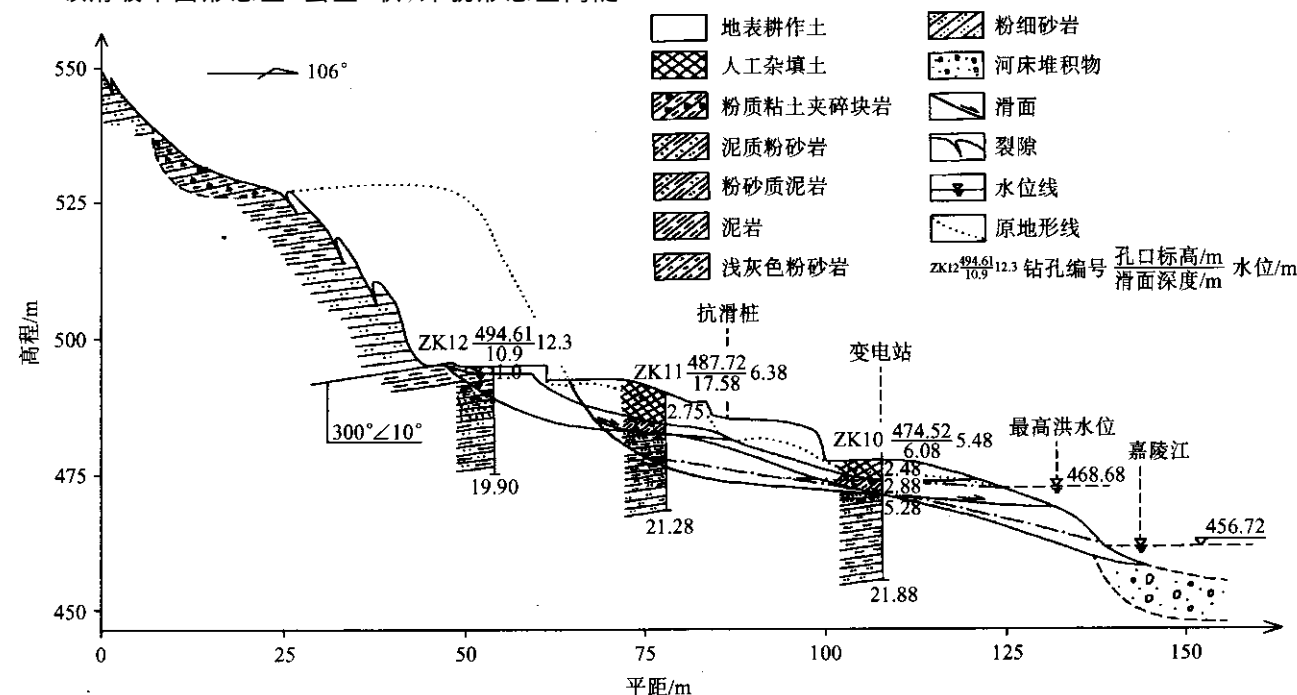


图2 K28 滑坡工程地质剖面

钻孔及勘察资料揭示该滑坡有 2 个滑面, 深层滑面深度为 8~10 m, 浅层滑面深度为 3~6 m。滑动面角度上陡下缓, 呈折线形或阶梯状。从钻孔岩芯观察, 滑动镜面不太明显, 但滑带土清楚。在 ZK29 孔 12.4~12.6 m 深度范围见到软塑状粘土夹碎块石, 根据投影计算的滑面倾角为  $67^{\circ}\sim 69^{\circ}$ , 滑动面追逐卸荷裂隙发育。另外, 从抗滑桩基坑中可观察到在 12~15 m 深度发育上窄下宽的陡倾滑移拉裂缝, 裂缝宽度为 15~20 cm, 内充碎石夹泥。

### 2.2.2 滑坡的变形特征

由于嘉陵江江水冲刷坡脚, 造成边坡失稳。由于滑坡卸荷减载, 减少了下滑推力, 有利于老滑坡的稳定, 所以滑坡中、上部变形小或不明显。但由于在滑坡中、前部即公路右侧路基填方加载, 原来基本处于稳定状态的斜坡平台产生滑移, 右侧砌坎置于滑体碎裂岩之上, 雨季必然下滑, 因此, 公路右侧路基及边坡砌坎变形尤为明显。

## 2.3 缓倾角层状边坡变形破坏机制

### 2.3.1 边坡变形破坏的模拟研究

采用二维有限元计算软件“2D— $\sigma$ ”进行数值分析, 计算得到斜坡变形网格和破坏接近程度等值线。当斜坡形成以后, 在各种表生地质的长期作用下, 斜坡已显示出变形特征。从破坏接近程度等值线图中可以看出, 在老滑带上, 滑带土的破坏接近程度一般在 0.8~1.0 之间, 其中间局部部位的破坏接近程度大于 1, 说明老滑坡体在新滑坡滑动以后, 基本趋于稳定, 但如果遇到强降雨或地震, 也有可能产生失稳破坏。新滑带土的破坏接近程度一般在 1.0 左右, 个别部位大于 1.5~2.0, 说明新滑坡体在滑坡发生以后, 处于蠕滑阶段, 必须采取抗滑支挡措施。

### 2.3.2 边坡变形破坏机制分析

(1) 滑移—拉裂型变形破坏。该类型边坡的特点是坡度小、坡高也不大, 以广南段 K24 边坡为典型。边坡岩层层面和 2 组陡倾裂隙构成的不利结构面组合, 是控制这类边坡变形破坏的主要因素之一。其中, 软弱的层面缓倾坡外, 施工开挖过程中极易暴露, 由此产生典型的滑移—拉裂型滑坡。

(2) 塑流—拉裂型变形破坏。该类边坡的特点是边坡高陡, 在巨大的自重应力和卸荷回弹作用下, 极易产生滑移—压致拉裂变形, 从而在边坡岩体中产生一系列的下宽上窄压致拉裂缝。当然, 在暴雨作用下, 若后缘拉裂缝发育, 也可能产生平推式滑坡。由

于边坡下部岩体由软弱泥岩、页岩构成, 在长期自重应力作用下, 也可能产生塑流—拉裂变形破坏。

## 3 滑坡稳定性计算

根据前期勘察资料和现场调查, 利用室内试验资料, 在校核原有资料的基础上, 对 K24、K28 滑坡分别进行了稳定性评价。本次计算采用不平衡推力法进行稳定性评价, 计算中考虑了地下水引起的孔隙水压力和动水压力, 分滑带土饱和和天然状态 2 种方案进行评价。

计算结果表明, K24 滑坡浅层滑面在天然和饱水情况下均处于不稳定状态; 深层滑面在天然状态下处于稳定状态, 但饱水状态下稳定性系数大大低于安全系数 (1.25), 这与野外地质调查和观测的迹象吻合。对于浅层滑坡体, 应采取排水和增强浅层滑坡抗剪力的防治工程措施。对于深层滑坡体, 由于天然状态下稳定性很好, 饱水状态下稳定性系数大大低于安全系数, 从安全角度考虑也需对其进行加固处治。考虑到该滑坡体后缘山体平缓单薄, 两侧沟谷发育, 大气降雨是滑坡体地下水的唯一补给来源, 只要设置完善的地表截排水系统, 即可大大提高深层滑坡体的稳定性。因此, 在构筑完善的截排水系统的基础上, 仅针对浅层滑面采取抗滑支挡措施, 可以降低处治工程费用。

对 K28 滑坡计算结果表明, 在饱水状态下, 浅层滑面、中层滑面的稳定性系数皆小于 1.0。它们的滑动破坏, 将会对路基的稳定性构成威胁。在天然状态下, 该滑坡的上游段将会发生失稳, 这已被现场的变形和破坏特征所证实。嘉陵江水位的上涨将会对滑坡的稳定性造成影响, 从枯水位起, 随着水位上升到洪水位, 滑坡上游段稳定性将会逐渐降低, 到洪水位时降到最小。因此, 应使滑坡体中地表水有效排出, 防止水的入渗, 避免因滑带饱水而降低稳定性系数致使滑坡再次失稳。同时, 增加滑坡底滑面的抗剪强度, 防止坡体沿滑面发生剪切破坏。

## 4 缓倾角层状边坡整治措施研究

国道 108 线广南段公路岩质边坡大多为缓倾角层状岩层。由于路线基本沿着构造线方向展布, 使得路堑边坡总有一侧构成顺层边坡, 如广南段 K24、K28 边坡, 过境段 K10 和崔家垭隧道进口边坡。在这种缓倾角层状岩质边坡中开挖, 边坡岩体的变形破坏特征与厚层状岩体或陡倾边坡有着明显不同。缓

倾坡外的层面构成理想的底滑面,而陡倾坡内的裂隙构成后缘边界,与边坡走向近于垂直的陡倾裂隙构成侧向边界。这种结构面不利组合,极易导致边坡岩体整体失稳。

岩层有 2 个对边坡稳定具有重要意义的工程性质:第一,是其垂直于层面方向上的抗拉强度较低,出现陡倾裂隙的地方甚至为 0;第二,是层面处的抗剪强度远比完整岩石低。这 2 个特性决定了层状岩层对开挖产生的特殊力学反应,开挖后边坡的应力分布与破坏同均质岩体有着明显差异。边坡开挖后,边坡中缓倾角结构面和陡倾角结构面控制着边坡的变形破坏方式,在边坡治理和施工控制中应针对缓倾角结构面(即层面)进行。

#### 4.1 边坡加固整治方法

边坡加固处治方法较多,诸如削方减载、截排水系统、抗滑挡墙、抗滑桩以及锚固措施等,在各种地质环境和工况条件下均有成功和失败的例子。究其原因,主要在于对工程边坡的地质条件认识不足,对边坡变形破坏的主控因素和变形破坏机制研究不够深入,导致加固处治设计具有盲目性,不能达到治理的目的,或造成过大浪费。下面在针对 K24、K28 边坡变形破坏影响因素及机制研究的基础上,对 4 种治理措施的适用性和处治效果进行评述。

(1)削方减载。削方减载是一种常用的、行之有效的边坡处治方法,但其约束条件比较严格。首先,必须有可供减载的施工场地。因削方减载应在潜在滑移面的“主滑段”进行,而这些地段常常坡度较陡,场地狭窄。其次,应有足够的弃渣场。最后,对于已通车的公路边坡,削方减载将影响正常交通。K24 边坡二维有限元计算分析结果表明,由于边坡坡度较小,最大及最小主应力的应力集中不太明显,仅在坡体底部滑动带上有一定的剪应力集中。显然,削方减载对改变边坡应力状态,提高边坡稳定性的作用不大。但部分削方减载可减小残余下滑推力,降低支挡结构的工程费用。

K28 边坡二维有限元计算分析结果表明,由于边坡坡度较陡,最大主应力、最小主应力和剪应力的应力集中均较明显。此时,削方减载可以降低边坡坡度、改善边坡应力状况,从而提高边坡的整体稳定性。但由于弃渣场问题,加之 K28 边坡清方后会影响到后坡的稳定性,故不能采用这种措施。

(2)截排水系统。据地面地质调查显示,国道 108 线广南段缓倾角层状边坡在施工过程中多处滑坡基

本上均在雨季产生,表明该类边坡的失稳与地下水的物理地质作用密切相关。此外,K24、K28 边坡二维有限元分析结果表明,在饱水状态下,边坡岩体应力集中程度、剪切位移量等较之天然状态要大。而边坡稳定性计算结果也更直接显示,这类边坡在饱水状况下稳定性明显降低。事实上,这类看似稳定的缓倾角层状边坡在天然状态下稳定性一般较好,频繁地发生滑坡只能说明地下水物理地质作用的影响较大。

因此,针对这类边坡,设置完善的截排水系统不仅是有效的,而且是必须的。应注意的是,截排水系统应在路基施工前期完成,有效保证施工的安全,并抑制边坡开挖可能导致的边坡稳定状况恶化。截排水系统失败不仅浪费人力物力,且可能导致地表水集中下渗,使边坡稳定状况更差(如广北段 K33 边坡)。因此,必须在截排水系统设计中,充分考虑边坡岩土体的特点及其变形破坏机制,设计尽可能有效的方案。

(3)抗滑桩及抗滑挡墙。抗滑桩及抗滑挡墙的作用机理、设计理论和施工技术都比较明确和成熟,在工程实践中应用比较广泛。这种边坡加固措施的缺点在于:①被动受压,不能充分发挥岩土体的自身强度;②对地基岩土体强度要求较高;③工程造价较高;④机械化程度较低(人工挖孔桩),施工周期较长;⑤对深层滑动面无能为力。K24 边坡二维有限元计算分析结果表明边坡岩体应力集中不明显,采用削方减载的方法效果不佳,针对这类坡度较低的缓倾角层状边坡,除设置完善的截排水系统外,抗滑桩无疑是一种行之有效的办法。

K28 边坡二维有限元计算分析及边坡变形破坏机制以滑移—压致拉裂为主,发育的倾拉裂缝(间距约 1~3 m)和较陡的边坡坡度特点,抗滑桩虽起到一定程度的抑制变形作用,但不能完全消除边坡岩体变形。可以认为,对这类边坡坡度较陡的缓倾角层状边坡,抗滑桩的功能不能有效发挥。

(4)锚固措施。锚固技术因其独特的加固效应、简便的加工及施工工艺、经济的造价,在岩土加固工程中有重要地位。尤其在现今技术条件下,无论块状岩体还是土体(硬土层或软土层),都可以使用锚固技术来加固。K24、K28 边坡的二维有限元分析和物理模拟结果都显示出,岩体应力最集中部位、位移变形最大部位均在边坡表层岩体中。针对这种情况,在边坡表面设置短锚杆,抑制边坡表部岩体变形是行

之有效的。

但值得注意的是,锚固措施仅使得边坡表部岩体应力集中程度降低、变形量减小。对于深部岩体应力状况和变形没有明显的改善,不能阻止整个边坡岩体的滑移—压致拉裂变形。因此,短锚杆支护宜处理边坡表部不稳定岩体,或作为施工临时支护措施。当然,针对 K28 这类边坡,这种支护措施可限制边坡岩体累进性破坏,对改善边坡稳定状况是有作用的。而对于 K24 边坡,由于坡度较小,不适宜施做锚杆。

#### 4.2 边坡加固处治方案

K24 为坡度小且坡高也不大的缓倾角层状边坡,由于应力集中程度较小,削方减载对改善边坡稳定状况不起作用,不宜采用。而且,这类边坡由于坡度小,坡高不大,锚杆或锚索难以很好地发挥作用,抗滑桩或抗滑挡墙无疑是最好的加固处治方法。K24 边坡稳定性计算结果表明,深层滑坡在天然状态下稳定性很好,满足规范要求的安全系数(1.25);在饱水状态下,接近极限平衡状态,稳定性系数为 1.02~1.04,大大低于规范要求的安全系数。然而,该边坡后缘山体平缓单薄,两侧沟谷深切,坡体地下水主要补给来源为大气降水和地表水。有效防止地表水和大气降水入渗,即可保证深层滑坡体的稳定性系数满足规范要求。因此,该边坡应在构筑完善的截排水系统的基础上,针对浅层滑面采用抗滑桩加固,这种处治方案将大大降低加固工程造价。

K28 为高陡的缓倾角层状边坡,应力集中程度非常明显,后缘削方减载有利于边坡稳定,但其后缘为公路路基,公路线形要求限制了采用削方减载的方法。公路左侧的上边坡高陡,不宜采用抗滑桩,而采用短锚杆,可有效抑制边坡表部岩体变形,防止边坡岩体累进性破坏导致边坡局部甚至整体失稳。公路右侧滑坡体(下边坡),单一采用抗滑桩不能完全消除路基基础范围内岩体的变形,这将对公路路基和路面构成威胁。若采用锚拉抗滑桩,对抑制路基下部岩体的变形效果要好得多。因此,对 K28 左侧高陡上边坡采用了短锚杆工程整治措施;公路右侧滑坡体(下边坡)采用了锚拉抗滑桩和构筑完善的截排水系统的工程整治措施。

国道 108 线广元南段公路边坡整治措施实施后经历了 3 年时间的考验,公路边坡稳定,整治方法适宜且有效,取得了良好的整治效果。

#### 5 主要结论及认识

(1)对于缓倾角层状边坡,无论边坡陡缓,地下水的物理地质作用对边坡稳定性的影响均较大。因而,需构筑完善的截排水系统。

(2)对于 K24 这类坡度小的缓倾角层状边坡,由于边坡岩体应力集中程度很低,削方减载对边坡稳定状况没什么影响。但通过削方减载可有效降低残余下滑推力,降低抗滑桩等支挡工程费用。

(3)对于 K28 这类高陡的缓倾角层状边坡,由于应力集中程度较高,削方减载虽然行之有效,但考虑到路基和后坡的稳定性,以及弃渣场等问题的严重性,也不宜采用。鉴于该边坡变形破坏属滑移—压致拉裂型,压致拉裂缝发育较深,且较密集,抗滑桩的支护效果不能充分发挥,宜采用锚拉抗滑桩。短锚杆支护对边坡表部岩体的稳定性有较大的提高,虽然不能大大提高边坡岩体的整体稳定性,但从限制边坡岩体的累进性破坏角度看是有益的。

(4)边坡开挖过程中为防止边坡整体或局部失稳,除了严格按设计要求进行爆破并及时支护外,还应根据现场地质情况,及时调整开挖坡比。

(5)边坡加固处治措施有多种,每种措施都是有条件的。因而,加固措施的选择应因地制宜,选择 1 种或几种措施综合处治,以期达到最佳效果。

(6)对于开挖可能造成失稳的边坡,宜在开挖前进行加固处治。

#### 参考文献:

- [1] 冯学钢. 缓倾角层状边坡变形破坏机制及整治措施研究[D]. 成都理工大学, 2004.
- [2] 黄润秋, 张倬元, 王士天. 高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都科技大学出版社, 1991.
- [3] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 地质出版社, 1994.
- [4] 孙玉科, 李建国. 岩质边坡稳定的工程地质研究[J]. 地质科学, 1965, (4).
- [5] 孔德坊. 工程岩土学[M]. 地质出版社, 1992.
- [6] 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法[M]. 地质出版社, 1993.
- [7] 王士天, 严明, 黄润秋. 高边坡变形破坏机制及稳定性评价[M]. 西南交通出版社, 1994.
- [8] 林峰, 黄润秋. 抗滑桩间距估算方法[A]. 第四届全国青年工程地质大会论文集[C]. 中国地质大学出版社, 1997.

文章编号: 0451-0712(2005)06-0092-04

中图分类号: U416.01

文献标识码: A

# 路面结构层模量的反算精度

孙瑞华, 谈至明

(同济大学教育部道路和交通工程重点实验室 上海市 200092)

**摘 要:** 给出了具有较高精度的两层路面结构模量反算回归式,在此基础上,讨论了弯沉测量误差和面层厚度偏差的传递效应。最后,定量分析了 FWD 系统的随机误差和面层厚度误差对面层和地基模量反算结果的影响。

**关键词:** 道路与铁道工程; 路面工程; FWD; 模量反算; 误差传递

应用 FWD(落锤式弯沉仪)的弯沉盆数据来评估路面各结构层模量,是一种高效方便的路面结构无破坏评价方法,对此的研究在国内外已经开展 20 多年了。但是,大多数的研究没有考虑 FWD 弯沉盆的测量误差和结构层厚度偏差对模量反算结果的影响,从而也无法正确地估计结构层模量反算结果的精度。

## 1 两层路面结构的模量反算回归式

利用多层弹性体程序计算得到 792 个两层路面

结构的 FWD 弯沉盆数据,两层路面结构参数见表 1。FWD 的落锤重 50 kN,加载半径 15 cm,弯沉传感器布设如表 2。

表 1 两层路面结构参数

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比
面层	$h=0.25\sim 0.85$	$E=400\sim 2\,000$	0.25
地基	无限深	$E_0=25\sim 100$	0.35

基金项目:上海市重点学科建设项目资助

收稿日期:2005-01-25

## A Study on Mechanism and Countermeasures of Deformation and Failure of Stratified Side Slops with Gently Inclined Bedding

*FENG Xue-gang*

(Highway and Waterway Engineering Quality Supervising Station, Department of Communications of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Deformation and sliding failure of stratified side slops with gently inclined bedding have occurred in Guang-Nan section of No. 108 national highways during the construction period. On the basis of comprehensive analyses of structure of rock mass, hydro-geological condition and rock mass hydraulic property of slide district, and landslide shape and its kinematics character, the models of the mechanism of deformation and failure and main induced factors are mainly discussed in this paper. Consequently, stability calculation and synthesis valuation of the landslides are performed. Last, technique feasibility and economic target of landslide control measures are compared and an economic rational countermeasure is put forward.

**Key words:** stratified side slop with gently inclined bedding; mechanism of deformation and failure; stability valuation; countermeasure