

公路高边坡稳定性评价及支护优化设计

巨能攀, 赵建军, 邓 辉, 黄润秋

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 公路高边坡具有数量多、地质条件复杂及施工速度快等特点, 施工期变形破坏事例频发。基于这一现状, 依托皖南山区汤屯高速公路, 提出一套操作性强的公路高边坡优化设计研究方法。通过“高边坡普查→提出优化设计分区建议→筛选重点边坡→重点边坡优化研究”的工作思路, 形成优化设计研究成果, 由业主、设计、施工等单位将科研成果快速应用于高边坡施工。将变形理论与强度理论相结合, 形成基于地质过程原理的重点高边坡稳定性评价和灾害控制方法, 通过边坡变形稳定性分析, 判断边坡变形破坏模式及发展过程; 结合施工及监测反馈信息, 分析目前所处阶段、潜在滑动面位置等。然后, 利用强度稳定性分析方法得出边坡治理设计所需数据, 进行优化设计, 再采用变形理论结合施工和监测反馈信息验证支护效果, 进一步优化设计, 确定最终方案。实践结果表明, 这套方法保证了公路高边坡的快速施工和正常运营。

关键词: 边坡工程; 边坡稳定性评价; 支护优化设计; 变形理论; 边坡强度理论

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)06 - 1152 - 10

STABILITY EVALUATION OF HIGH SLOPE FOR HIGHWAYS AND OPTIMIZED SUPPORT DESIGN

JU Nengpan, ZHAO Jianjun, DENG Hui, HUANG Runqiu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The high slopes of highways have many features, such as the large number, the complicated geological conditions, the high-speed construction, etc.. Based on the feature that deformation occurs frequently during construction period, a perfect operation method of optimized design is proposed with a specific case of Tangkou—Tunxi expressway construction in Southern Anhui Province. Through the work flowchart of general survey of high slope→proposing advices on partitions of optimizing design→choosing key slope→optimized analysis of key slope, the research results of optimized design for high slope are achieved. With the efforts of employer, designer and constructor, the scientific research results are employed quickly in engineering construction. Based on the combination of deformation theory and strength theory for slope engineering, the stability evaluation and geohazard controlling methods for key high slope are performed on the basis of geologic process principle. Through the stability analysis of deformation theory for slope, the modes of slope deformation and failure, the development processes of deformation and failure can all be determined. Combining with feedback of construction and monitoring data, both the present stability state and potential position of sliding surface can be analyzed. Afterwards, using the analytical method of strength stability, the required data for the design of slope support can

收稿日期: 2009 - 02 - 18; **修回日期:** 2009 - 03 - 10

基金项目: 四川省青年科技基金资助项目(07JQ0065)

作者简介: 巨能攀(1973 -), 男, 博士, 1997年毕业于成都理工学院水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事工程地质和岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: jnp@cdu.edu.cn

be achieved; then the design can be optimized. Subsequently, in terms of deformation theory and the feedback information of construction and monitoring, the support results can be verified; and the further optimization can be realized. The detailed practice shows that the proposed method can realize high-speed excavation of high slope and normal service for highways.

Key words: slope engineering; slope stability evaluation; optimized support design; deformation theory; slope strength theory

1 引言

一般来讲,高边坡是指高度大于 30 m 的岩质边坡和大于 20 m 的土质边坡^[1]。公路路线长,穿越地质单元众多,边坡数量多,地质条件复杂;受地质条件的影响,潜在失稳边坡数量多,施工初期既可能出现多处变形甚至失稳;更为不利的是其施工工期短,边坡卸荷速度快。与露天矿山边坡相比,公路边坡为永久边坡,必须保证公路运营期安全;它也不同于水电工程边坡,设计阶段地质资料匮乏,设计及建设单位对灾害预见及处治经验不足,施工期间边坡变形破坏事例频发^[2~4]。因此,开展施工期边坡地质条件与支护方案复核,进行优化设计,对于保证公路高边坡正常建设和运营具有重要意义。

目前,高边坡的支护优化设计多限于对单体边坡的研究,在施工地质调查的基础上,采用极限平衡方法对边坡稳定性进行验证,通过监测反馈信息指导,提出优化设计方案^[5~13]。针对高速公路这种存在大量高边坡的线状工程,目前还没有形成一套从地质调查、稳定性评价、优化设计到施工验证的系统体系,稳定性评价也少见将变形理论应用于支护优化设计中的实例。

以皖南山区铜黄高速公路汤口—屯溪段高速公路(汤屯高速公路)54 个高边坡为例,本文开展公路高边坡稳定性评价及支护设计优化研究,探讨大量高边坡从普查、重点高边坡研究到科研成果应用和检验的高边坡支护设计优化思路,提出了一套操作性强的公路高边坡支护优化设计方法,可用于指导公路、铁路高边坡支护优化设计,对其他类型的高边坡设计也具有一定的指导意义。

2 公路高边坡优化设计工作思路

由于山区高速公路路线长,往往分为数个标

段,由不同的施工单位同时施工,高边坡数量多,这就为高边坡的安全管理和优化设计的实施带来一定困难。往往造成科研与设计脱节、设计与施工脱节,科研成果不能快速反映到施工图设计和高边坡施工中。结合这一现状,在项目实施的过程中形成了一套行之有效的高边坡优化设计模式,见图 1。

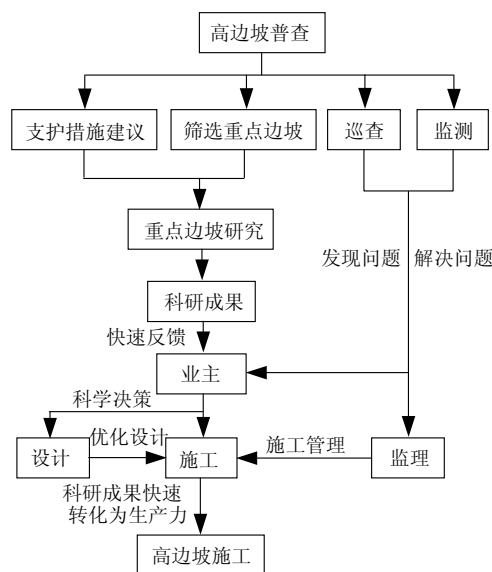


图 1 工程优化设计工作思路

Fig.1 Work flowchart of optimized engineering design

高边坡优化设计的主要内容包括:

(1) 由科研单位紧密结合现场实际条件,遵循“高边坡普查→提出优化设计建议→筛选重点边坡”的研究思路,通过高边坡普查,定性评价全线高边坡稳定性,对稳定性较好的高边坡提出设计优化建议,筛选出地质条件复杂、稳定性差的高边坡进行重点研究。对重点边坡跟踪施工过程进行岩体结构调查,采用定性、定量方法相结合,研究边坡稳定性状况,提出合理的支护优化建议。

(2) 科研单位通过科学研究,提供详实的现场资料,为业主和设计单位提供优化设计的基础资料和有针对性的建议。业主根据资料进行科学决策,由设计单位进行快速优化设计,施工和监理单位进行优化施工,保证研究成果快速应用到生产实际

中。对设计变更更大的边坡业主组织专家进行评审，业主根据评审意见，组织优化设计单位进行边坡优化设计，并通过监理单位对高边坡施工进行控制；对变形边坡，由业主组织科研、设计单位沟通意见，确定应急治理方案，再组织监理、施工单位召开边坡应急治理会议，制定详细的边坡治理工程实施方案。

这种工作模式保证了科研成果快速地应用到生产实际中，对高边坡的正常施工和安全运营起到重要作用。高边坡普查是进行优化设计的基础，稳定性差的重点边坡稳定性研究是进行优化设计的关键，如何选择合理的优化设计方案则是本项研究的核心技术。

3 高边坡普查

高边坡普查是指在分析前期勘察资料的基础上，在开挖前对全线高边坡周边地质环境及已开挖揭露的地质现象进行调查，重点研究开挖边坡岩体结构分区特征、已有变形破坏现象等，分析边坡各分区可能的变形破坏模式，并对不同类型岩土体及结构面进行物理力学性质快速试验，采用定性分析方法结合一定的定量计算，对边坡稳定性进行分区，复核设计方案与地质条件的适宜性并提出优化设计初步分区建议。其主要工作内容是分区研究，包括岩体结构分区、稳定性分区、支护优化分区建议。

高边坡普查的目的是提出全线高边坡优化设计分区建议，并筛选出重点研究边坡。重点研究边坡应满足以下条件之二：(1) 地质条件复杂；(2) 稳定性差；(3) 高度大(>40 m)。高边坡普查流程见图 2。

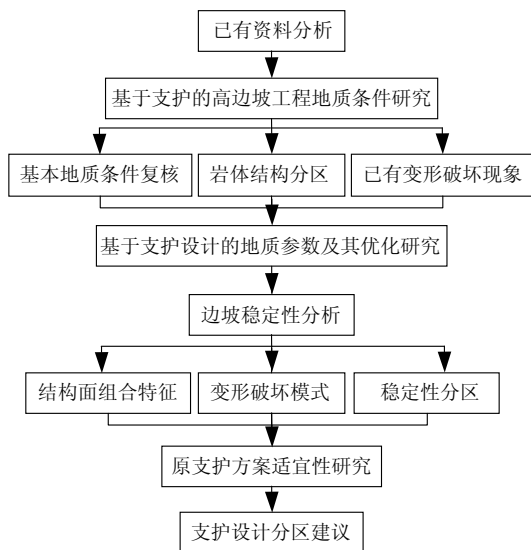


图 2 高边坡普查流程图

Fig.2 Technical flow chart of general survey for high slopes

普查结果表明，汤屯高速公路沿线主要发育砂岩、板岩、花岗岩以及千枚岩。其中，砂岩较完整但普遍发育层间软弱夹层(厚度 10~20 cm)，顺层边坡稳定性较差；陡倾板岩及千枚岩岩体较破碎，总体上呈次块状~碎裂结构，公路沿线两岸均发育多处倾倒变形体，倾倒变形体开挖可能引起碎裂结构边坡整体变形；花岗岩中节理裂隙发育，变形破坏模式以小规模块体失稳为主。开挖边坡的变形破坏模式主要有块体失稳、平面滑移及近圆弧形滑动 3 类，共有 23 个边坡产生了不同程度的变形破坏，见表 1。

表 1 边坡变形破坏模式统计表
Table 1 Statistics of slope failure modes

变形破坏模式	形成条件	数量
平面滑动 (顺层滑移)	层间软弱夹层发育的砂岩顺向坡，倾角小于坡角时为滑移-拉裂，倾角大于坡角时为滑移-弯曲	3
近圆弧形滑动	土质边坡、板岩和千枚岩倾倒变形体边坡，受最大剪应力面控制	5
块体失稳	各种类型岩质边坡，发育倾坡外结构面，倾角小于坡角；或结构面组合形成楔形体；或隧道洞口发育陡倾夹泥节理	15

根据上述分析，选取 12 个整体稳定性差的重点高边坡进行专题研究，在进一步施工过程中，其中 3 处顺层高边坡均产生严重变形，5 处倾倒岩体开挖边坡产生较大规模变形。

4 重点高边坡稳定性评价及支护优化设计

4.1 基于过程模拟与控制的高边坡稳定性评价及灾害控制方法研究

高边坡岩土体具有地质体所具备的“地质过程”特性，“岩石高边坡稳定性评价”的核心就是要阐明边坡变形破坏的过程和机制，并从地质力学的角度进行刻画，岩石高边坡稳定性评价更应该是一个“变形稳定性”问题。变形稳定性分析是通过高边坡变形破坏现象的分析和机制的研究，充分利用现代数学-力学理论和计算机技术，采用数值模拟方法实现高边坡变形破坏演变的全过程模拟和过程控制，根据模拟结果对稳定性现状进行评价^[14-15]。常用的方法有有限元法、有限差分法、离散元法和非连续变形分析(DDA)方法等^[16~19]。变形稳定性分析可以模拟边坡的应力环境及变形特征、分析边坡可能的变形破坏模式、确定潜在滑面的位置等，但

目前还没有提供治理设计所需的稳定性系数及推力值的成熟计算方法。因此, 将基于变形理论的稳定性分析方法与基于强度理论的稳定性分析方法结合起来, 形成了基于过程模拟与控制的高边坡稳定性评价及灾害控制方法。

工作流程的主要技术思路如下: (1) 通过高边坡变形稳定性分析, 判断边坡可能的变形破坏模式、变形破坏发展过程等; (2) 根据变形破坏机制结合施工及监测反馈信息分析目前所处稳定性状况、潜在滑动面的位置等; (3) 利用强度稳定性分析方法, 得出边坡治理设计所需数据, 进行支护优化设计; (4) 采用基于变形理论的边坡稳定性评价方法结合施工和监测反馈信息, 研究支护结构与边坡的相互作用关系, 验证支护效果, 进一步优化, 确定最终优化方案, 见图 3。

可以说, 高边坡稳定性评价及支护优化设计是贯穿整个高边坡施工期的动态过程, 充分体现了高边坡这一地质体形成、演化的地质过程。

4.2 重点高边坡稳定性评价

根据上述思路, 对重点研究边坡, 跟踪施工过程中进行岩体结构及边坡变形破坏迹象的精细描述, 结合边坡监测及施工反馈信息, 分析坡体内部结构特征, 建立能够反映控制性结构面空间展布特征并具有清晰边界条件的二维或三维地质模型, 并根据边坡结构特征选择不同的计算方法研究边坡变形破坏模式和稳定性状况(见图 3)。

根据汤屯高速公路高边坡的实际特征, 边坡变形破坏模式总体上可以分为两类: 结构面控制型边坡和最大剪应力面控制型边坡。结构面控制型边坡又可以分为: 块体失稳型边坡和软弱结构面控制型滑坡。在岩体结构精细描述的基础上, 建立三维地质模型。前者采用三维离散元模拟寻找控制边坡整体稳定的关键块体的位置、规模及其变形和运动特征, 再采用块体理论进行块体稳定性评价, 确定合理的支护参数。后者可采用有限差分法模拟边坡开挖过程中不同阶段、不同部位的应力应变特征, 预测边坡变形所处阶段, 结合施工和监测信息反馈判断潜在滑动面的位置及其性状, 在此基础上采用强度稳定性评价结果进行边坡稳定性评价。

土质边坡、散体结构和碎裂结构边坡的稳定性一般受最大剪应力面控制。该类边坡采用二维及三维有限元分析方法研究边坡开挖过程中各阶段不同部位应力、变形和破坏区的分布位置及发展趋势, 判断潜在滑动面的位置, 在此基础上, 采用强度稳定性分析方法进行边坡稳定性评价, 提供支护设计参数。

汤屯高速公路沿线板岩和千枚岩分布地区分布大量似层状的碎裂结构倾倒变形体, 在普查的 54 个高边坡中, 有 17 个边坡产生过不同程度的倾倒变形, 根据调查, 倾倒变形体岩体中普遍存在明显的折断面。倾倒变形体的稳定性不仅受岩体结构的影响, 也受岩体中折断面展布及其特征的影响。因此, 针对倾倒变形体, 将离散元与有限元或有限差分法结合, 通过以下途径进行评价:

(1) 首先采用离散元法模拟倾倒变形的演化过程, 研究倾倒变形的范围。

(2) 然后结合现场调查建立地质模型, 采用基于变形理论的边坡稳定性评价方法研究边坡变形破坏模式。对小变形或未变形边坡采用二维有限元法

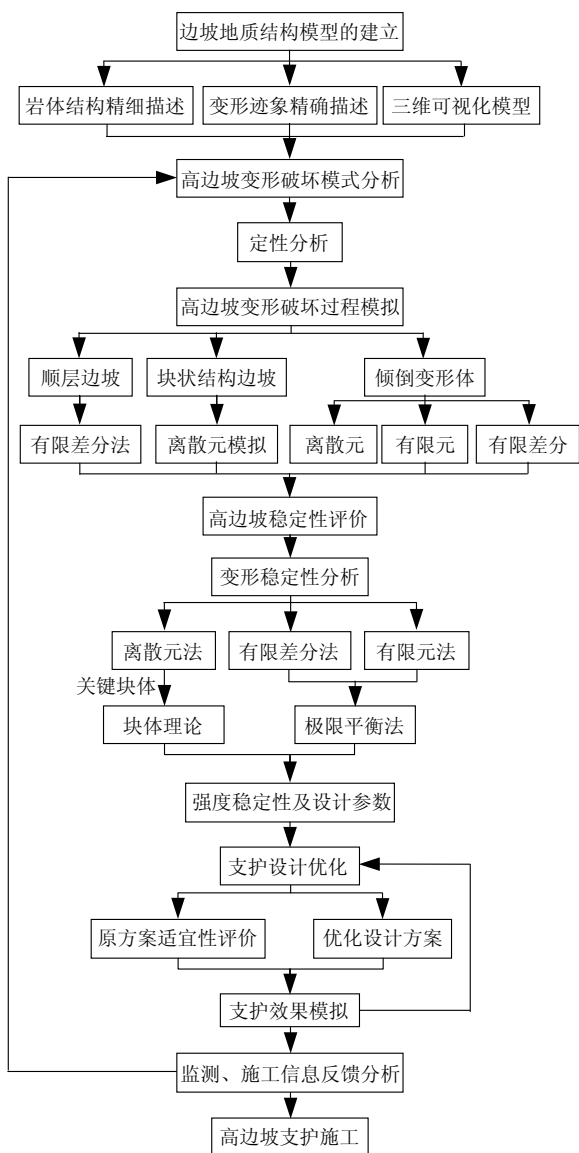


图 3 重点高边坡稳定性评价及支护优化设计实施步骤
Fig.3 Operation steps of key slope stability evaluation and optimized support design

研究坡体内部应力、变形发展，确定潜在滑动面；对于产生大变形的边坡采用三维有限差分法模拟边坡坡体内部应力、变形等分布特征，结合监测和施工反馈信息确定滑动面。

(3) 最后采用强度理论进行边坡稳定性评价，得出支护设计参数。

4.3 重点高边坡支护优化设计

根据变形破坏“过程模拟”，研究高边坡开挖过程所处变形破坏阶段，根据地质体目前所处的演化阶段和其变形破坏机制，选定支护方案，并根据规范进行初步静力学设计；运用数值模拟手段，进一步研究地质体和治理工程结构之间的相互作用，并根据相互作用特点进行方案优化和设计^[15]。高边坡优化设计采用“过程控制”技术，以准确的地质模型建立为基础，边坡稳定性评价为关键，原设计方案适宜性评价为前提，以高边坡变形控制及灾害控制为指导思想，通过一定支护措施将高边坡的变形控制在工程边坡允许范围之内，并通过变形稳定性分析及监测反馈验证其效果，进一步优化，针对不同破坏模式的边坡采用不同支护方案，见表 2。

表 2 高边坡优化设计方案

Table 2 Optimized schemes of high slope support design

变形破坏模式	优化设计方案
平面滑动 (顺层滑移)	关键是采用锚索控制主滑部位变形，若滑面底部较缓可采用锚拉桩，若底部滑面也较陡则采用锚索 优选削方减载，若不存在削方条件，支护重点是采用锚
近圆弧形滑动	管注浆改善岩土体力学特性或采用锚杆控制边坡小变形；还需做好坡面防护和排水
块体失稳	若块体底滑面为贯通夹泥结构面，可采用锚索控制块体变形；若结构面为一般性节理，可采用长锚杆，并做好坡面防护，限制块体的运动

4.4 高边坡研究实例分析

根据上述研究思路，在普查的基础上，选择重点研究边坡，跟踪施工过程进行详细的岩体结构调查和描述，建立反映边坡结构特征的三维地质模型，并根据岩体结构特征选择对应的研究方法，通过业主、设计、施工等单位的共同努力，将科研成果快速反映到高边坡的支护中，有效地保证了高边坡在建设及运营过程中的安全。本文以层间软弱结构面控制的顺层高边坡为例，详细分析其实现过程。

4.4.1 研究实例基本特征

2 - 7 高边坡由含层间软弱夹层的薄层状砂岩与泥质粉砂岩互层组成，地层倾角与坡角相同(53°)，为顺层边坡，原设计采用 10~12 m 的框架锚杆进行防护。边坡开挖过程中出现多处浅表层顺层破

坏；2004 年 9 月 25 日，边坡开挖至最下一级边坡顶部时，在其上部边坡大部分锚杆框架已施工的情况下，边坡中部后缘产生了连续分布的弧状拉裂缝(见图 4)，裂缝张开宽度最大达 50 cm，错台达 20 cm。业主立即组织相关单位组成“高边坡应急指挥小组”，全面开展高边坡应急治理，科研单位通过高边坡岩体结构精细描述和定性分析，提出了补充勘察和监测布置方案，并立即开始实施，以指导高边坡优化设计。

4.4.2 高边坡变形原因分析

根据调查发现，2 - 7高边坡岩体结构具有以下特点^[20~22]：

(1) 岩体呈薄层状碎裂结构，层间普遍发育 10~30 cm厚的层间软弱夹层，由次生泥夹岩屑组成。

(2) 开挖面两侧岩体结构明显好于中部，两侧岩体呈次块状结构，中部岩体呈散体~碎裂结构。

(3) 边坡中部AK3+730~AK3+870段岩体极为破碎，且越向下开挖岩体越破碎，岩体破碎程度和风化程度明显高于该地区同类边坡。

(4) AK3+790附近第一、二级边坡地层出现明显的上翘现象，而两侧岩层产状均与区域上地层产状一致。

(5) 水平钻孔表明，边坡内部存在一个明显的松动下限，以外岩体较破碎呈强风化，以内岩体完整呈弱风化。

产生上述特点的原因可能有2种：其一，边坡中部受构造作用影响强烈，为断层错动带或褶皱核部部位；其二，边坡在地质历史上产生过变形。

根据区域工程地质条件分析，边坡处无区域性断层或褶皱发育，且松动下限以内岩体完整，这与构造成因类型岩体结构不符，因此可排除第1种情况。边坡为中倾角顺向坡，倾角陡于自然坡脚，岩性为软硬相间的薄层状岩体，贯通性的层间软弱夹层发育，因此，边坡存在产生滑移 - 弯曲变形的地质条件。根据岩体结构分区特征结合钻孔揭露岩性特征分析，自然斜坡中上部沿层间软弱夹层产生过滑移，由于滑面未临空，底部产生溃屈变形，强烈弯曲部位位于第一级边坡处。边坡开挖至第一级时，部分强烈弯曲岩体被挖除，变形体前缘抗力降低，诱发沿软弱夹层的顺层滑移复活，由于弯曲部位岩体破碎，在上部推力作用下，可能沿最大剪应力面贯通产生滑面，与层间软弱夹层组合形成贯通的滑动面。这也是边坡开挖至第一级时才产生整体变形且不断发展的主要原因。

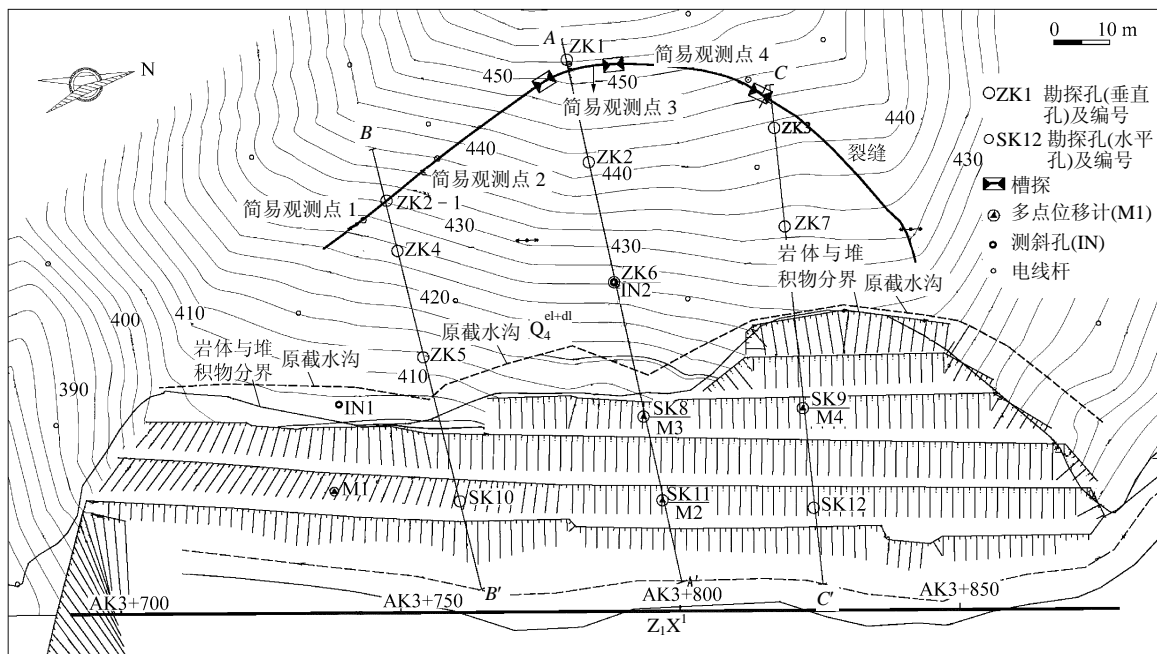


图 4 2-7 高边坡平面图(单位: m)
Fig.4 Plan of high slope 2-7(unit: m)

4.4.3 滑动面的确定和变形机制分析

根据上述分析, 层间软弱夹层为控制该边坡变形的的主要结构面, 要评价边坡稳定性必须准确地确定该软弱夹层的位置。滑动面主要根据岩芯分析和变形监测数据确定, 并采用数值模拟和施工反馈信息进行验证。

根据对钻孔岩芯的详细编录和分析, 竖直钻孔 ZK6 在 16.2~17.0 和 21.2~21.7 m 为灰白色强风化破碎泥质粉砂岩, 21.7 m 以下主要为青灰色弱风化砂岩夹薄层泥质砂岩; 测斜仪 IN1 监测结果表明, 竖直方向上坡体内部变形主要集中在 11~17 m, 其中 13~17 m 段为变形最大区域(见图 5), 与 ZK6 岩芯中的泥质粉砂岩夹层相对应。与 ZK6 处于同一剖面的水平钻孔 SK11 中 9.00~9.65 和 10.85~11.75 以及 15.2~16.2 m 为强风化砂岩块石夹岩屑和泥; 同一高程上的水平多点位移计 M1 监测结果显示: 距孔口 0.0, 5.0, 12.0 m 存在明显的位移, 27.0 和 40.0 m 均未见明显向坡外的位移(见图 6)^[21]。

由此可推断, 中上部滑面为钻孔 ZK6 揭露的 16.2~17.0 m 段强风化泥质粉砂岩与石英砂岩接触面上的层间软弱夹层, 下部滑面可能沿破碎岩体内部的最大剪应力面形成。根据上述分析建立边坡地质结构模型, 见图 7。

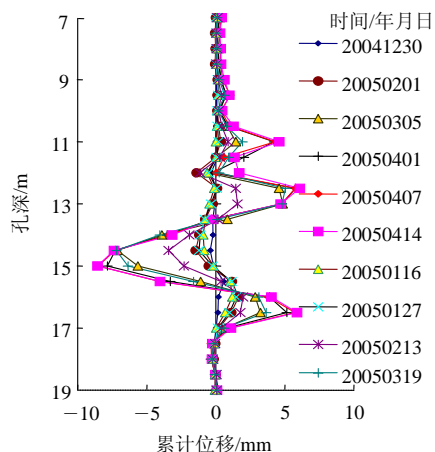


图 5 IN1 测斜孔累积位移 - 孔深关系曲线
Fig.5 Accumulative displacement-depth curves of inclinometer IN1

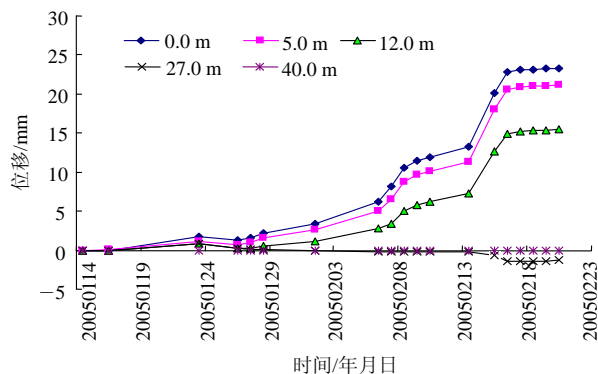


图 6 多点位移计 M1 位移 - 时间关系曲线^[21]
Fig.6 Accumulative displacement-time curves of multipoint extensometer M1^[21]

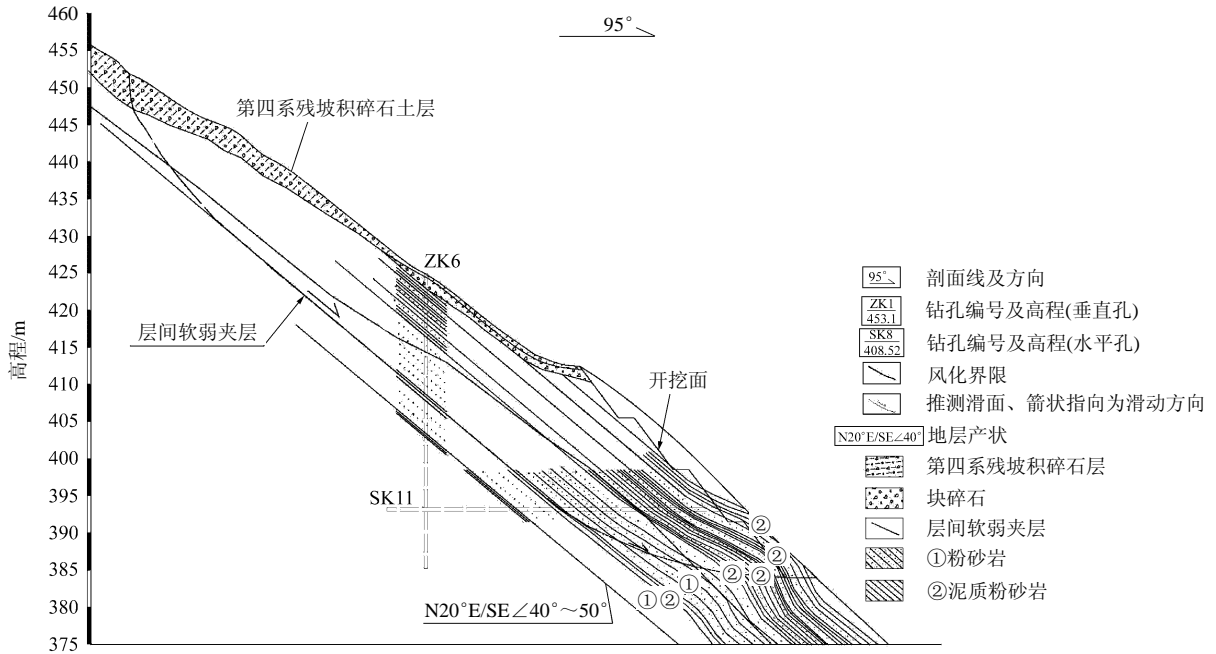


图7 AK3+799工程地质剖面图

Fig.7 Engineering geological profile of cross-section AK3+799

为了验证上述分析结果分析边坡变形破坏机制，采用三维有限差分法模拟边坡开挖过程中的应力和变形特征，结果表明，开挖至第一级边坡时软弱夹层出现拉应力及剪应力集中现象，同时软弱夹层以上部位岩体中最小主应力也表现为拉应力。在这种应力环境下，坡体中上部沿软弱夹层产生顺层剪切滑移，由于底部未临空，在上部坡体强大推力作用下，底部破碎岩体块石发生旋转逐渐形成破裂面。坡体内部总位移表现为平行于软弱夹层方向上部量值(4~6 cm)，明显大于下部位移(2~4 cm，见图8)，这与整个施工过程的变形监测数据较为吻合(见图9)。

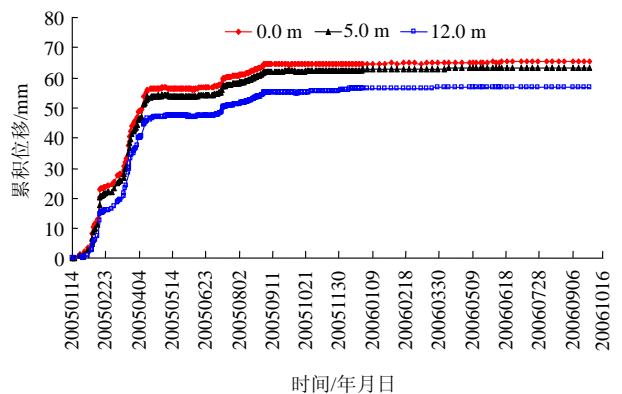


图9 M1多点位移计累积位移-时间曲线

Fig.9 Accumulative displacement-time curves of multipoint extensometers M1

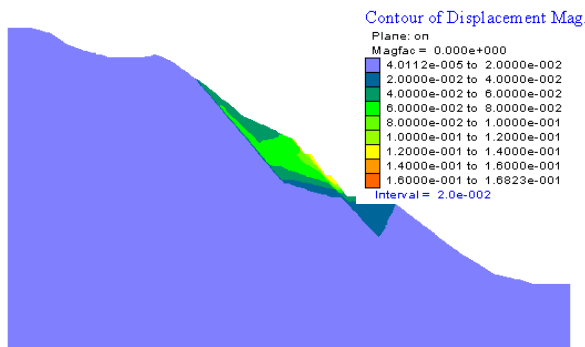


图8 AK3+728.5剖面总位移分布图(单位: m)

Fig.8 Contours of total displacement magnitude of cross-section AK3+728.5(unit: m)

数值模拟结果验证了上述定性分析结果的准确性，说明边坡处于滑移-弯曲变形复活的初期阶段，中上部滑面已产生明显的位移，底部滑面处于发展贯通阶段，一旦底部滑面贯通，边坡将产生整体失稳，必须进行治理。

4.4.4 高边坡支护优化设计

图10为2-7高边坡支护优化方案剖面布置图。根据边坡地质条件、岩体结构、监测信息以及数值模拟结果等进行综合分析，研究了边坡的变形机制、确定了滑动面的位置，采用基于强度理论的极限平衡法利用所建立的地质模型进行稳定性评价，提供

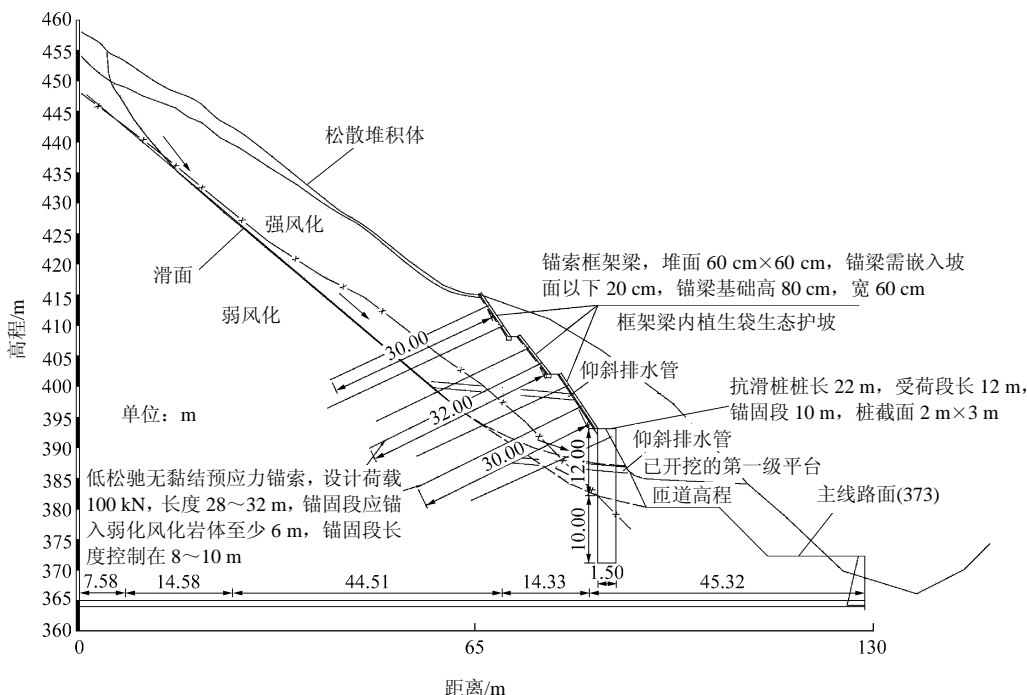


图 10 2-7 高边坡支护优化方案剖面布置图

Fig.10 Profile of optimized support scheme for high slope 2-7

边坡治理设计所需的稳定性系数、推力值等。计算参数以现场斜剪实验为基础, 采用工程类比、反演等方式进行综合取值, 天然状态下层间软弱夹层取 $c = 62.5 \text{ kPa}$, $\varphi = 28.5^\circ$; 饱和状态下层间软弱夹层取 $c = 50 \text{ kPa}$, $\varphi = 26^\circ$ 。在自重+暴雨工况下, 推力值达 2 581.268 kN, 原设计 10~12 m 的框架锚杆不能满足边坡稳定性要求, 必须进行优化设计。由于边坡变形速度快, 如果处治不当, 可能引起边坡失稳, 造成难以估计的损失。因此, 治理工程的实施必须在减缓边坡变形速率的前提下进行。

根据上述分析, 滑面上陡下缓, 中上部滑体为变形启动和加速的主体, 对边坡稳定性起控制作用。因此, 采用如下优化设计方案和施工顺序: “坡体内部排水消除不利影响因素→预应力锚索控制中上部沿软弱夹层的变形进行应急治理→预应力锚索抗滑桩控制潜在剪出口的变形→框架梁坡面防护→锚杆框架控制浅表部变形”(见图 10)。采用三维有限差分法对支护效果进行分析表明, 支护工程实施后, 表层向临空方向最大位移量值为 2.8 cm, 塑性区也大为减少, 但坡面上软弱夹层出露部位塑性破坏仍比较明显, 需做好坡面护坡。可见, 优化方案能够保证边坡的整体稳定。

4.4.5 施工及监测信息反馈分析

边坡治理工程施工是在监测结果的指导下, 由科研单位跟踪施工过程, 对锚索钻进速率、孔口返回岩粉、钻孔内地下水等情况进行跟踪调查。根据统计, 锚索钻孔一般在 19 m 以后速率趋于稳定, 且孔口返回物多为青灰色砂岩岩屑, 同时小桩号侧多数钻孔在 20 m 左右存在积水, 以内地下水不发育。上述特点均说明分析确定的滑面位置的合理性, 并说明锚索锚固段岩体结构满足要求。

施工过程中, 3~4 月初出现多次连续强降雨, 边坡变形速率明显增大, 说明地下水对边坡稳定性影响强烈, 施工过程中不定期检查仰斜排水孔的排水效果, 修复和增设了大量排水孔; 待 4 月中旬应急治理的锚索全部张拉完成后, 边坡的变形逐渐趋于稳定, 仅在降雨后出现短时增大现象。优化治理方案实施后边坡的变形得到有效的控制, 如图 9 所示, 经过 2 个雨季的检验, 边坡稳定性较好。

5 结 论

结合汤屯高速公路工程实践, 提出了公路高边

坡稳定性评价及优化设计的工作思路和研究方法,对公路、铁路等工程边坡研究具有一定的指导意义,主要要点和应用情况如下:

(1) 由业主、科研、设计和施工等单位共同参与的高边坡优化施工管理模式保证了科研成果快速应用到施工图设计和高边坡施工中。

(2) 提出了“高边坡普查→提出优化设计分区建议→筛选重点边坡→重点边坡优化研究”的公路高边坡优化设计研究思路,并建立了普查和重点边坡的研究技术路线。

(3) 采用基于过程模拟与控制的边坡稳定性分析及灾害控制技术进行重点边坡优化设计研究,将变形理论和强度理论相结合,在定性分析的基础上,选择适当的评价方法,通过变形稳定性分析,判断边坡可能的变形破坏模式、变形破坏发展过程等,根据变形破坏机制结合施工及监测反馈信息分析目前所处稳定性状况、潜在滑动面的位置等,然后利用强度稳定性分析方法,得出边坡治理设计所需数据,进行优化设计,再采用基于变形稳定性分析方法结合施工和监测反馈信息,验证支护效果,进一步优化,确定最终优化方案。

(4) 通过产生顺层滑移的重点高边坡详细研究,阐述了重点高边坡支护优化设计的详细过程,对于类似工程边坡的支护优化设计具有一定的参考价值。

本研究提出的公路高边坡稳定性及支护优化设计研究思路和方法已在安徽省汤屯高速公路、黄塔桃高速公路高边坡优化设计中得到应用,保证了高速公路建设和运营期间的安全。

致谢 本文工作是在安徽省交通投资集团长达 4 a 的支持和配合下完成的,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 王恭先. 高边坡设计与加固问题的讨论[J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(8): 5 - 9.(WANG Gongxian. Discussion on design and reinforcement of high slopes[J]. Journal of Gansu Sciences, 2003, 15(8): 5 - 9.(in Chinese))
- [2] 祝玉学, 张绪珍, 王国中. 露天边坡优化设计方法[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(2): 11 - 21.(ZHU Yuxue, ZHANG Xuzhen, WANG Guozhong. Optimum design method for mine pit slope[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(2): 11 - 21.(in Chinese))
- [3] SINGH V K, SINGH J K, KUMAR A. Geotechnical study for optimizing the slope design of a deep open-pit mine, India[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64(3): 303 - 309.
- [4] BYE A R, BELL F G. Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit, South Africa[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 449 - 466.
- [5] 张俦元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Analytical theory of engineering geology[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [6] YAN E, WANG J, HE M. Study on slope engineering rock mass of highway in mountainous area[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(4): 347 - 351.
- [7] 胡新丽, 唐辉明, 陈建平. 高速公路顺层路堑边坡优化设计方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 373 - 376.(HU Xinli, TANG Huiming, CHEN Jianping. Optimum design method for bedding slope of expressway[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(1): 373 - 376.(in Chinese))
- [8] 贾致荣, 郭忠印, 房建国, 等. 济青高速公路南线路堑边坡动态优化设计[J]. 公路, 2007, (12): 17 - 21.(JIA Zhirong, GUO Zhongyin, FANG Jianguo, et al. Dynamic optimum design of cut slope of south route in Jinan—Qingdao Expressway[J]. Highway, 2007, (12): 17 - 21.(in Chinese))
- [9] 乔东华, 唐 然. 某高速公路边坡动态优化设计[J]. 中外公路, 2007, 27(3): 55 - 59.(QIAO Donghua, TANG Ran. Dynamic optimization design of a highway slope[J]. Chinese and Foreign Road, 2007, 27(3): 55 - 59.(in Chinese))
- [10] AL-HOMOUD A S, TAL A B, TAQIEDDIN S A. A Comparative study of slope stability methods and mitigative design of a highway embankment landslide with a potential for deep seated sliding[J]. Engineering Geology, 1997, 47(1): 157 - 173.
- [11] 张发明, 刘 宁, 赵维炳, 等. 岩质边坡预应力锚索加固的优化设计方法[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 187 - 190.(ZHANG Faming, LIU Ning, ZHAO Weibing, et al. Optimizing design method of prestressed cables in reinforcing rock slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 187 - 190.(in Chinese))

- [12] 陈静曦, 章光, 袁从华, 等. 顺层滑移路堑边坡的分析和治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 48 - 51.(CHEN Jingxi, ZHANG Guang, YUAN Conghua, et al. Analysis and treatment of bedding-slip cut slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 48 - 51.(in Chinese))
- [13] 柴贺军, 陈谦应, 石豫川. 缓倾角顺层边坡变形的破坏机制及其防治的优化设计[J]. 广西交通科技, 2002, 27(3): 9 - 12.(CHAI Hejun, CHEN Qianying, SHI Yuchuan. Demolishment mechanism for slow obliquity gradated slope deformation and optimized design on its prevention[J]. Guangxi Communication Science and Technology, 2002, 27(3): 9 - 12.(in Chinese))
- [14] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 525 - 1 544.(HUANG Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 525 - 1 544.(in Chinese))
- [15] HUANG R Q, XU Q. Process simulation and control of geologic hazards[J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(9): 641 - 647.
- [16] 邓荣贵, 周德培, 李安洪, 等. 顺层岩质边坡不稳定岩层临界长度分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 178 - 182.(DENG Rongui, ZHOU Depei, LI Anhong, et al. On the critical length of unstable rock stratum on bedrock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 178 - 182.(in Chinese))
- [17] 范文, 愈茂宏, 李同录, 等. 层状岩体边坡变形破坏模式及滑坡稳定性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 983 - 986.(FAN Wen, YU Maohong, LI Tonglu, et al. Failure pattern and numerical simulation of landslide stability of stratified rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 983 - 986.(in Chinese))
- [18] 李桂荣, 余成学, 陈胜宏. 层状岩体边坡的弯曲变形破坏试验及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 305 - 311.(LI Guirong, SHE Chengxue, CHEN Shenghong. Curved deformation damage test and FE analysis of slope with layered rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 305 - 311.(in Chinese))
- [19] CORKUM A G, MARTIN C D. Analysis of a rock slide stabilized with a toe-berm: a case study in British Columbia, Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(7): 1 109 - 1 121.
- [20] 赵建军. 公路边坡稳定性快速评价方法及应用研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2007.(ZHAO Jianjun. Study and application of rapid slope stability evaluation method for highway[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [21] 巨能攀, 赵建军, 邓辉, 等. 黄山高速滑移弯曲边坡变形机制分析及应急治理对策[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 474 - 481.(JU Nengpan, ZHAO Jianjun, DENG Hui, et al. Analysis of deformation mechanism of sliding to bending slope and study of deformation emergency control at Huangshan expressway[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 474 - 481.(in Chinese))
- [22] 黄润秋, 赵建军, 巨能攀, 等. 汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 239 - 246.(HUANG Runqiu, ZHAO Jianjun, JU Nengpan, et al. Study on deformation mechanism and control method of rock bedding slope along highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 239 - 246.(in Chinese))