

文章编号: 1000-7598-(2004) 02-0246-06

路堑边坡工程的动态仿真分析

晏鄂川, 唐辉明, 何 淼

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 高速公路建设中不可避免地会遇到各种结构类型的斜坡, 其稳定性状况在很大程度上决定了工程的投资和工期。因此, 研究其工程适宜性具有较大现实意义。从影响路堑边坡稳定性的各种因素出发, 应用岩体力学理论和数值模拟技术研究边坡开挖过程中的变形破坏特征, 分析地下水、时效特性和工程措施优化等对边坡稳定性的影响, 对边坡信息化设计和施工具有一定指导意义。研究表明, 路堑边坡岩体的变形破坏特征符合卸荷岩体力学行为, 在最优坡度设计基础上, 应当及时进行加固。

关 键 词: 路堑边坡工程; 变形破坏特征; 时效特性; 动态仿真分析

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Real-time simulation for slope engineering of highway

YAN E-chuan, TANG Hui-ming, HE Miao

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of the highway, the slope engineering is increasingly manifold in many different ways. For the sake of recognizing the characters of excavation engineering rock mass in nature, authors, who are based on the factors influencing the slope, the deformation and destruction characters and discussed, the methods of rock mass mechanical analysis and the numerical simulation of the slope engineering rock mass are proposed and carried. Some results are achieved in research. The characters of deformation and destruction of the slope is not alike that of the regular loading rock action, but according to unloading rock mass mechanics action. The stability analysis of slope rock mass must attach importance to hydraulics and unloading effect, at the same time, some essential measures such as in time reinforcing, avoiding watery process should be considered. It is helpful to promote the information design of the slope engineering.

Key words: slope engineering; characteristics of deformation and failure; time-effect character; real-time simulation

1 前 言

工程动态仿真是目前工程科学研究的热点之一, 也是信息化时代的要求。目前国内外计算机仿真系统的主要方式为实时仿真和预制式仿真。所谓实时仿真, 是根据用户设定的初始条件, 立即进行分析计算和推断, 并利用可视化技术模拟整个过程。这种仿真方式对硬件的运算速度和图形处理能力的要求很高, 只有在高档图形工作站上才能实现。所谓预制式仿真, 就是事先设定各种初始条件的组合, 对各种情况进行分析计算和推断, 将结果及相应的过程制作出来并储存在计算机中。在运行过程中, 一旦用户设置好初始条件, 即调用相应的

结果并完成整个过程的模拟。在相同的硬件环境下, 预制式仿真的速度比实时仿真快, 且在一般高档微机上也能实现, 但需要非常巨大的存储空间, 且开发工作量比实时仿真要大得多。

高速公路与普通公路最显著的差别是设计的坡度、弯度有相当严格的要求, 在山区高速公路和一级汽车专用线中, 不可避免地会遇到大量纵横向延伸较远的高陡边坡, 其稳定性问题直接关系到高速公路的安全施工和正常运营, 引起了设计和科研人员的广泛关注。因此, 从新的角度认识、研究和设计路堑高边坡, 具有十分重要的理论意义和工程价值。

本文应用岩体力学理论和数值模拟技术, 根据

路堑边坡的开挖过程和施工程序,对地下水作用、加固时效和预应力效果等多个路堑边坡设计中必须考虑的基本问题进行了动态仿真分析,直观形象地刻画了边坡应力和位移变化的全过程,对边坡信息化设计和施工具有一定的指导意义。

2 影响路堑边坡稳定性的因素

2.1 地形地貌

开挖的人工边坡是改变自然地形而出现的新的地形形态,因此,它与地形地貌有着直接的关系。在中、高山区,地形陡峻,自然地质作用强烈,常常出现高边坡;在开阔的河谷盆地,地形则相对平缓,自然地质作用缓慢,对边坡稳定性的影响相对简单。

2.2 地层岩性

自然界土石结构、力学性质、抗风化能力等都不相同,因此,不同岩性组成的边坡的稳定性亦不相同。其中,区别最大的是土质边坡和基岩边坡,其边坡变形状况和稳定坡角差异极大。

2.3 地质构造

斜坡体内的各类结构面不但破坏了岩体完整性,而且降低了岩体强度,因此,边坡通常沿层面、片理面、节理面及断层面发生变形。软弱结构面对边坡稳定性的影响取决于下列因素:结构面产状与边坡产状的几何关系;结构面性质;结构面发育程度;结构面的组合关系。

2.4 水文地质条件

绝大多数边坡处于地下水循环带内,直接的接受大气降水渗入。一个地区的降雨量、降雨的季节性和集中性都直接影响边坡的稳定性。斜坡体内运动着的孔隙、裂隙水,不但可使岩石发生溶解和软化,而且,会产生静水压力、渗透压力作用于边坡使其稳定性大为降低。因此,边坡岩体的透水性、含水性、软化性及水的补给、径流、排泄条件对边坡稳定性都有不同程度的影响。

3 路堑边坡工程岩体特性

天然岩体是赋存于地应力场中经历了多次构造运动的复杂地质体,其主要特点是未受到人为扰动,是工程前期岩石力学研究工作的内容与对象。而工程岩体^[1]是指施工开挖后力学性状发生变化的岩体,是施工期岩石力学研究工作的内容与对象。天然岩体受人为扰动后成为工程岩体,其物理力学性质发生了很大变化,应力状态和地下水渗透性质也发生明显地改变。

边坡开挖后,原有平衡体系遭到破坏,岩体应力发生重分布,即在临空面(或自由面)附近主应力的方向都发生较大变化,形成卸荷应力场,尤其是深切高陡边坡更是如此。由于边坡侧向约束作用较小,这种卸荷作用由边坡自身岩体来承担,从而形成量级和范围较大的二次应力场,使得原有裂纹不断扩展,并产生新的裂纹,宏观上表现为岩体向自由面方向的扩容,且变形参数和强度参数降低。从形成机制上讲(图1),卸荷应力状态实质上相当于在原有应力状态下叠加了一个侧向拉应力 P_2 ^[2],使得工程岩体自由面极易产生平行于最大主应力 P_1 方向的张裂纹,并逐步向岩体内部调整转移。

在开挖爆破动力作用下,边坡工程岩体内形成卸荷松弛带和塑性屈服区^[3],这对边坡的稳定与变形发展不利。开挖后的岩体变形可分为开挖瞬间的弹性变形、分步开挖累积的时效变形以及开挖完成后的后期流变。

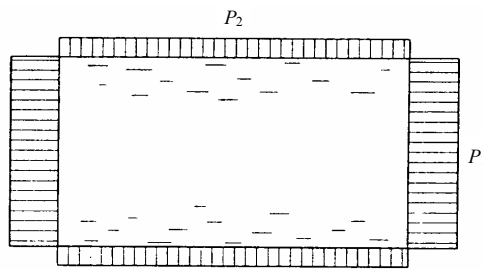


图1 试样应力及微裂纹分布示意图
Fig.1 The sketch map of stress and micro-crackle distributing on the sample

4 路堑边坡工程动态仿真分析

4.1 路堑边坡基本特征与支护设计

4.1.1 地形地貌

研究区为浅切割溶蚀丘峰沟谷地貌,单面山中缓坡地形,最大高差为89 m。斜坡走向北西,两侧为“V”形冲沟,谷底宽40 m,沟底坡度约为10°。公路轴线处山体厚约300 m,地形坡度约为20°,沟谷两侧坡度稍陡,其中,西侧约为30°,且多为顺向坡。

4.1.2 地层岩性

斜坡区主要出露中三叠系关岭组第一段(T_2g^1),局部第四系覆盖(厚度小于1 m)。 T_2g^1 可分为3层。① T_2g^{1-1} :紫红色中薄层状粉砂质泥岩、泥灰岩夹数层中厚、中薄层状灰岩(或泥质灰岩),局部夹斑块状灰绿色泥岩。② T_2g^{1-2} :灰及青灰色中薄层状泥质白云岩与灰色泥质灰岩互层。上

部与紫红色粉砂质泥岩交界处附近发育褐黄色泥化夹层, 厚约 1 cm, 是边坡失稳的潜在弱面。

③ T_2g^{1-3} : 紫红色粉砂质泥岩与中薄层灰岩互层, 中部灰岩较多, 上下泥岩较多。

该处中, 桩孔最大开挖深度为 23 m, 地面以下约 10 m 为 T_2g^{1-3} 紫红色泥岩与灰岩互层, 10 m 以下为 T_2g^{1-2} 泥质灰岩, 开挖范围内不会涉及 T_2g^{1-1} 。

4.1.3 地质结构

该斜坡为一南倾的单斜构造, 产状比较稳定, 岩层倾向 $150^{\circ} \sim 180^{\circ}$, 倾角 $19^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。岩体内主要发育二组节理: 一组倾向 $290^{\circ} \angle 67^{\circ}$, 裂面平直, 间距 $5 \sim 10$ cm, 延伸长几十厘米; 另一组倾向 $30^{\circ} \angle 78^{\circ}$, 裂面平直, 间距 $10 \sim 15$ cm, 延伸较短。

根据钻孔和野外调查可知, 山脊轴线部位强风化层下界直到公路开挖面岩体为弱风化, 一般呈碎裂状结构或裂隙块状结构, 下部中风化岩体呈镶嵌碎裂结构。

4.1.4 水文地质

由于区内泥岩为弱透水层, 而泥质灰岩溶蚀程度不太强烈, 因此, 该区岩体透水性不大。地表水流将主要沿坡面流失, 部分下渗, 除长时间强降雨外, 通常斜坡不会有大量地下水渗出。地下水位埋深在开挖路面以下, 以漫渗方式溢出地表或向地下渗透。

4.1.5 岩体物理力学参数建议值

根据试验值及其工程地质类比, 确定这几类岩体及结构面的力学参数见表 1。

表 1 岩石力学性质
Table 1 Mechanical properties of rocks

岩石类型	干抗压强度 /MPa	湿抗压强度 /MPa	c /MPa	ϕ / ($^{\circ}$)
泥质白云岩	56.7	49.6	0.72~0.80	46
泥质灰岩	11.30	10.20	1.23	41
粉砂质泥岩	48.7	31.4	0.19	37
泥化夹层			0.02~0.05	10~33
滑 面			16.6	19.5

4.1.6 支护工程设计

该段路堑边坡中轴的开挖深度为 23 m, 通过优化设计拟采用喷锚网联合支护方案, 具体方案为 1:1.25 放坡, 5 排锚索, 4 排锚杆支护。通过边坡变形数值分析^[4], 以检验工程措施是否达到最优, 从而有利于指导施工。

4.2 路堑边坡工程动态仿真分析

4.2.1 计算模型与方案及参数

(1) 计算模型

根据图 2(a) 所示的数字高程模型, 选择图示的

标志剖面, 结合斜坡工程地质特征, 建立了如图 2(b)~2(h) 所示的计算模型。模型充分考虑了边坡施工过程中对变形起控制作用的结构面。边界采用铰支座约束, 即左右两边无水平位移, 底边无竖向位移, 而允许表面及内部单元产生大变形。模型单元数为 50×28 , 网络由计算机自动生成。为模拟边坡的变形规律, 对内部单元进行了全程跟踪, 被跟踪单元如图 2(h) 所示, 按 x 轴坐标值大小分别为 I~VII 号单元。I 和 II 号单元、IV 和 V 号单元、VI 和 VII 单元分别为一、二、三级坡面临空单元和被锚固单元, III 号单元为潜滑体内部单元, 目的就是对各区段、各种深度、锚固单元与非锚固单元, 施加预应力与非预应力单元的不同情况进行对比分析。

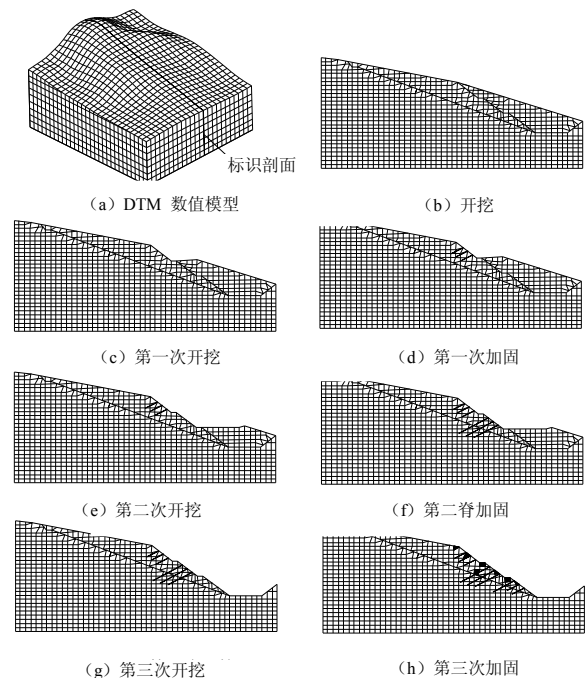


图 2 大变形动态仿真网格图

Fig. 2 The map of grid for FLAC simulation

(2) 计算方案

采用 FLAC 程序来模拟边坡的动态过程。根据工程施工程序, 分三步开挖、三步加固共 6 种工况进行模拟。在开挖过程中通过卸荷作用, 将模拟区的应力场与初始地应力场叠加为开挖、加固后的二次应力场, 卸荷过程中的位移累积至最终位移。共分 7 个阶段, 其中, $0 \sim 2000$ 时步为开挖前天然状态; $2000 \sim 4000$ 时步为第一次开挖, $4000 \sim 6000$ 时步为第一级加固; $6000 \sim 8000$ 时步为第二次开挖, $8000 \sim 10000$ 时步为第二级加固; $10000 \sim 12000$ 时步为第三次开挖, $12000 \sim 14000$ 为第三级加固 (以下时步分配如无特别说明与此相同)。

(3) 计算参数

在试验测试和估算的岩石力学参数基础上,对岩土体介质材料计算参数赋值如表2。

表2 计算参数取值表

Table 2 Calculation parameters of the model

材料类型	参 数 取 值
完整岩体	剪切模量 $G=12\ 000\ \text{MPa}$, 体积模量 $B=2\ 000\ \text{MPa}$, $\phi=45^\circ$, $c=0.07\ \text{MPa}$, 密度 $\rho=2.6\ \text{g/cm}^3$ 。
松动岩体	剪切模量 $G=10\ 000\ \text{MPa}$, 体积模量 $B=1\ 600\ \text{MPa}$, $\phi=36^\circ$, $c=0.05\ \text{MPa}$, 密度 $\rho=2.6\ \text{g/cm}^3$ 。
结构面	$c=0.03\ \text{MPa}$, $\phi=20^\circ$, 切向刚度 $K_s=500\ \text{MPa}$, 法向刚度 $K_n=1\ 000\ \text{MPa}$ 。
锚 索	直径 $d=3\ \text{cm}$, 弹模 $E=2\times 10^5\ \text{MPa}$, 屈服强度 $Y=1.5\times 10^3\ \text{MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_s=2\ 000\ \text{MPa}$, 预应力 $T=100\ \text{t}$ 。

4.2.2 模拟结果分析

(1) 应力分析

边坡开挖前,剪应力等值线分布与坡面近于平行。第一次开挖后,坡面剪应力略有增大,第一级锚固后,剪应力集中于锚固区域,量级达 $1\ \text{MPa}$ 。第二次开挖后,剪应力于坡脚处集中,量值减小,第二级加固后,剪应力升至 $10\ \text{MPa}$,等值线与锚索包络线近于重合。由于锚索加固集中于第二级,因此,在第三次开挖及第三级加固后,剪应力调整符合边坡应力分布规律,对量值影响不大。由此可知:预应力锚索内端点相连构成了一个连通的应力集中带,因此,在设计锚索时应长短不齐地布置,以防形成平滑的剪切破坏带。

由各追踪单元的剪应力全程曲线(图3)可知,IV号标志单元在第二次加固、VII号标志单元在第三次加固时,剪应力发生重分布,而II号标志单元在第一次加固后,剪应力无大幅度变化,因此,锚索施加的预应力对边坡体应力重分布起控制性作用。

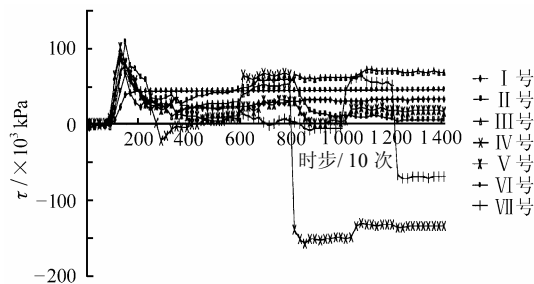


图3 边坡中各追踪单元的剪应力全程曲线

Fig.3 Shearing stress histories curves of the tracing element

(2) 变形与位移分析

图4~6为边坡7个标志单元的 x 方向位移, y 方向位移及总位移全程曲线,图7为 x 方向变形速

率全程曲线。从第一次开挖至第三级加固共6个阶段的边坡变形矢量图可知,对于坡面及其内部不同部位的标志单元, x 方向位移变化趋势各异,位移量值差别明显, y 方向位移表现出趋势上的一致性,总位移则受 x 方向分量的影响,与 x 方向位移变化近似。这说明工程开挖行为主要影响 x 方向的位移,而 y 方向位移主要与重力场作用有关。因此,将分析 x 方向的位移变化规律作为研究的重点。

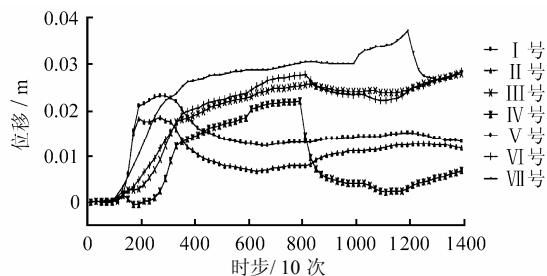


图4 各标志单元 x 方向位移全程曲线

Fig.4 x -displacement curves of the tracing element

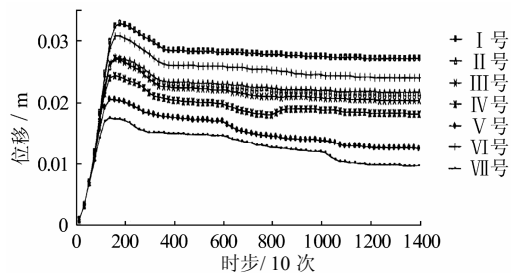


图5 各标志单元 y 方向位移全程曲线

Fig.5 y -displacement curves of the tracing element

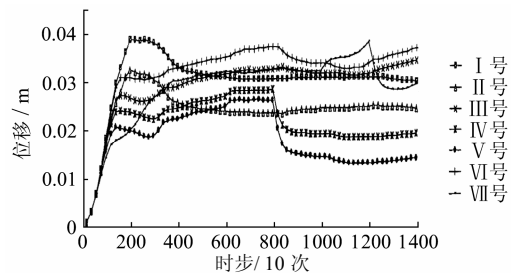


图6 各标志单元总位移全程曲线

Fig.6 Total displacement curves of the tracing element

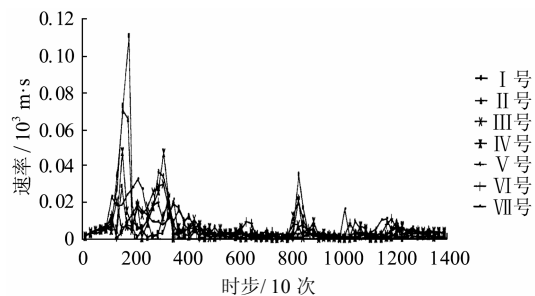


图7 各标志单元 x 方向变形速率全程曲线

Fig.7 Deformation rate curves of the tracing element in x -direction

对于第一,二,三级坡面上的单元(取坡顶部为一级,以下为二,三级),在锚固前,第一级单元位移小于第二级,第二级小于第三级,说明边坡开挖卸荷后,越接近坡脚变形越大。

对于同一坡面上被锚固和非锚固单元,开挖过程中产生的位移量及变化趋势接近。被锚固单元在加固后位移明显缩小,如V号及VII号标志单元,但非锚固单元受锚固作用影响不大,在加固后仍维持原有的变形。

对于锚杆加固单元(II号单元)和预应力锚索加固单元(V号及VII号单元),II号单元因加固作用减少的变形量 2 mm,小于V号单元减少的变形量 16 mm 和VII号单元减少的变形量 9.2 mm,而第二级坡面上作用三排锚索,在第三级坡面仅作用一排锚索,这是导致V号单元锚固效应明显的原因。

从图 7 知,边坡开挖后,坡面迅速发生位移达到最大值,而因加固作用减小的位移则是缓慢发生,第二级,第三级坡面较第一级坡面发生的位移逐级滞后,这与开挖步序完全吻合。

(3) 地下水作用分析

图 8 为V号标志单元在无地下水、施工期饱水、施工后饱水状态下的位移全过程曲线。由图可知,施工期间饱水时,边坡在第一次开挖后位移增加至无水时的近两倍,并逐渐增大。

锚固作用因地下水作用而不明显,锚索作用减少的位移量 4.2 mm,远小于无水时的 17.1 mm,且逐渐恢复至原有值。施工期间无水,而工程完毕后遭遇地下水时,其位移稳定值也由原来的 6.39 mm 增至 16 mm。由此可知,地下水对边坡变形影响显著,因此,工程施工应避免在雨季进行,以免因地下水作用造成锚固体失效。

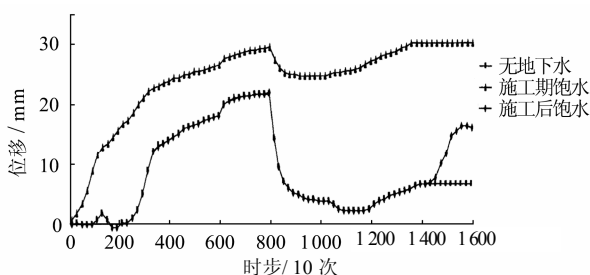


图 8 地下水作用对边坡变形的时程曲线
Fig.8 Displacement curves of the slope under effect of groundwater

(4) 加固时效分析

图 9 为边坡开挖完毕后及时加固和滞后加固两

种状态下IV号标志单元的位移全程曲线。由图可知,边坡在滞后加固时发生的位移 15.6 mm 明显大于及时加固时的 6.39 mm,滞后加固对锚固所起减小位移量的作用明显削弱。

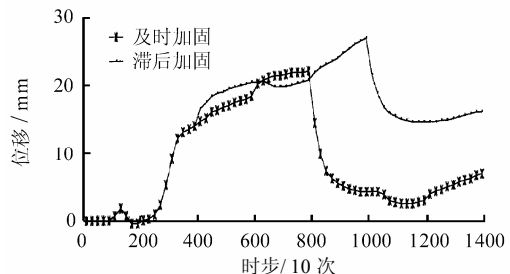


图 9 加固时效位移对比曲线
Fig.9 Displacement curves of the time-effect during reinforcing

由此可知,及时加固对边坡工程起着非常重要的作用,滞后加固甚至是发生滑坡后再进行治理,不仅花费巨大,而且,达不到理想的加固效果,这一点应引起工程界的高度重视。

(5) 预应力效果分析

图 10 为IV号标志单元在各级预应力作用下的位移全过程曲线。由图可知,该单元在 100t 预应力作用下累积位移量最小,随着预应力值的减小,累积位移量逐级增大。需要特别指出的是,该单元无锚固措施时与施加预应力为零锚固时的累积位移时程曲线重合,意味着常规锚杆(索)在没有施加预应力的状态下无调节边坡变形的作用(可以推断,锚杆不宜用于加固边坡较为深部的软弱层变形)。预应力的影响对整个边坡的变形状况起着关键性作用,这与前述应力分析结果一致。

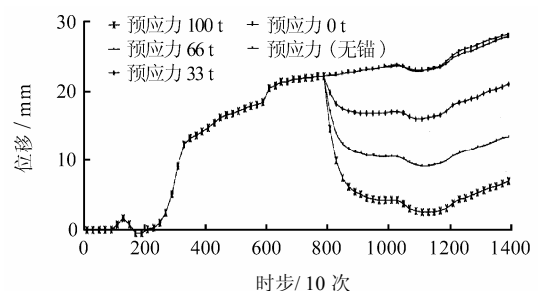


图 10 不同量级预应力加固效果位移对比曲线
Fig.10 Displacement curves under different levels of prestressing reinforcing

5 结 语

综上所述,在分析影响路堑边坡稳定性因素的

基础上,应用岩体力学理论和数值模拟技术研究边坡在工程开挖过程中的变形和破坏特征,可以直观形象地刻画边坡变形及应力变化的全过程。研究表明,路堑边坡岩体的变形破坏特征符合卸荷岩体力学行为,在最优坡度设计基础上,考虑水的作用、边坡变形的时效特性、工程措施优化等,应当进行及时加固,避免水的弱化作用。更重要的是在各种状态下的动态仿真,能为设计提供有力的反馈,从而对工程措施优化、信息化设计和施工起到了超前预报与辅助决策的作用。

参 考 文 献

- [1] 晏鄂川,唐辉明.工程岩体稳定性评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.1—21.
- [2] 李天斌,王兰生.卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,1993,12(4):321—327.
- [3] 哈秋龄,李建林,张永兴,等.节理岩体卸荷非线性岩体力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.208—315.
- [4] 唐辉明,晏鄂川,胡新丽.工程地质数值模拟的理论与方法[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.169—180.

