1004-9665/2000/08(02)-0148-06　*Journal of Engineering Geology*　工程地质学报

岩石高边坡的时效变形分析及其工程地质意义*

黄润秋
(成都理工学院工程地质研究所　成都　610059)

摘　要　以某拟建水电工程近坝库岸的岩石高边坡变形体为典型实例,结合现场勘察,对岩石高边坡时效变形的地质表现进行了观察分析,从宏观和微观上揭示了岩体时效变形这一自然高边坡普遍现象的地质特征和变形形迹。并综合分析了该高边坡的变形破坏机制,探讨了其稳定性。研究结果表明,实例高边坡是一处于轻微变形阶段的变形体,其存在不会对工程建设产生重大影响。

关键词　高边坡　时效变形　变形破坏机制　稳定性评价
中图分类号: TU 457;　文献标识码: A

TIME-DEPENDENT DEFORMATION OF A HIGH ROCK SLOPE AND ITS ENGINEERING-GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

HUANG Run-qiu
(*Chengdu University of Technology, Chengdu*　610059)

Abstract　A lot of facts from field investigations show that a time-dependent deformation of a high rock slope could occur before its instability. Accompanied with this process, a potential slip surface develops gradually in the slope, and finally cut through due to progressive failure along it or some triggering factors. In this paper, the phenomena of time-dependent deformation of a slope on the left bank of Yalong River are described in detail. They reveal that the slope has experienced a long-term deformation and its mechanism can be considered as a slip along the weak bed plane and buckling on the foot of the slope. Further evidence indicates that the deformation of the slope is quite light, since the slope is under a stable condition at present.

Key words　High slope, Time-dependent deformation, Deformation mechanism, Stability assessment.

1　引　言

自 70 年代人们认识到岩石边坡失稳之前,一般都要经历一个随着时间而发展的变形破坏过程以来[1,3,4],对岩石高边坡变形破坏机制的研究一直为人们所关注。这里,最为重要的研究方法就是通过现象的观察和分析,研究岩石边坡所经历的时效变形过程及伴随这一过程岩体内部的破裂行为;力图通过这样的分析,阐明岩体失稳之前,潜在滑动面的孕育、累进性破坏及可能的贯穿过程,从而为岩石高边坡稳定性的评价及失稳预测提供基础。实际上,变形破坏机制分析已经成为岩体稳定性工程地质评价的一个重要部分,它帮助人们对具有复杂地质结构和变形历史行为的边坡作出稳定性的确切判断,进而发展了“变形稳定性分析”的概念[7,8]。

本文是作者研究过的一个比较典型的具有时效

*　收稿日期: 1999-04-05; 收到修改稿日期: 1999-06-10
基金项目: 国家杰出青年科学基金(编号: 49525204)和香港 Croucher 基金资助研究
作者简介: 黄润秋(1964-),男,博士,教授,主要从事工程地质和环境地质工作

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变形特征的岩石高边坡。通过勘察过程中对揭露现象的观察研究, 从宏观和微观上揭示了大量的时效变形现象, 通过对这些现象的综合分析, 提出了该边坡整体的变形破坏模式机制及其演化的时间效应过程。一方面, 分析确定了滑动面的位置及状况; 另一方面, 确定了边坡所处的变形状态, 从而从变形稳定性的角度提出了对边坡稳定性的分析。

2 边坡地质概况

所研究的边坡位于具有深切峡谷地貌特征的雅砻江某河段左岸, 是由变质砂岩、板岩组成的顺倾向边坡(图 1)。平面上呈"箕形"分布, 上、下游分别由冲沟切割。变形部分的坡体前缘抵江, 宽约 240 m, 高程 1640 m, 后缘高程至 1940 m; 前、后缘相对高差约 300 m, 顺坡纵长约 460 m, 平均坡角 37°, 面积 0.11 km^2, 水平最大发育深度 135 m, 总方量约 180 $\times 10^4 m^3$。

变形体主要发育于变质砂、板岩互层状岩体中, 总体产状为 N 25°~ 30°E/NW ∠33°~ 44°。断裂构造较为发育, 陡倾角断层 f_5、f_6、f_{6-1}及 f_3 分别从坡体后缘、中部及前缘穿过; 中缓倾角层间挤压(剪切)构造带多顺砂、板岩界面发育, 计有 15~ 20 条。

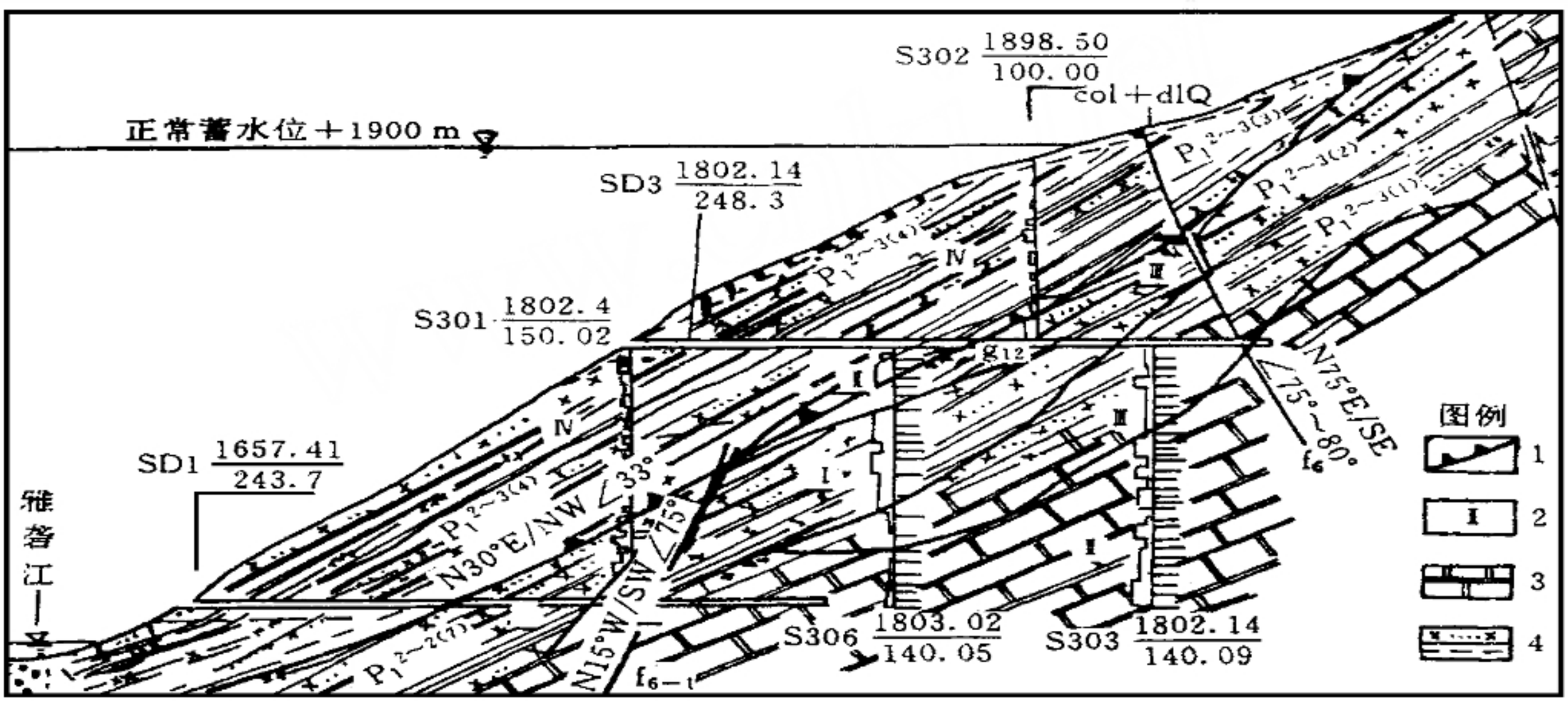


图 1 高边坡变形体工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering-geological profile of a high slope

1. 变形体边界, 2. 岩体分级编号, 3. 大理岩, 4. 砂板岩

3 边坡变形特征及形成机理分析

3.1 边坡变形破坏现象

变形体目前已施工了 2 条平硐和 4 个钻孔(图 1), 揭露了丰富的斜坡变形破坏现象, 归结起来, 可概括为以下几方面的特征:

3.1.1 岩体松动、质量降低

岸坡岩体松动与伴随河谷下切的卸荷-应力释放过程有密切的联系。但就变形体而言, 其松动范围及松动程度的变化不具备一般河谷卸荷导致松动的变化规律, 即岸坡浅表部强烈, 向坡体内部逐渐减弱至消失; 而是存在一个明显的松动下界, 下界以外的坡体均存在不同程度的松动, 只是在岸坡浅表部由于迭加卸荷作用而变得更为强烈; 下界以内的岩体, 完整程度高, 无松动迹象。这表明, 这一部份坡体的松动与岸坡的时效变形有紧密的联系。变形体中上部的 SD3 平硐揭露松动区的下界为水平距岸坡 135 m 处的 g_{12}层间挤压带(图 1)。g_{12}以外, 共发育松动张开裂隙 173 条, 各种顺层剪切面、带 30 余条。SD1、SD3 平硐松动张开裂隙发育频度及张开量随硐深的变化如图 2 所示。

岩体松动的结果, 导致变形体范围内岩体质量大幅降低。统计表明, g_{12}层间挤压带以外, 岩体质量指标(RQD)平均仅为 25%, 波速在 3000 m s^{-1}以下, 平均仅 1800 m s^{-1}; 而 g_{12}以内, RQD 值平均达 60%, 波速也迅速上升至平均 4700 m s^{-1}, 为前者的 2~ 3 倍, 属 Ⅰ、Ⅱ类岩体。岩体质量的大范围降

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

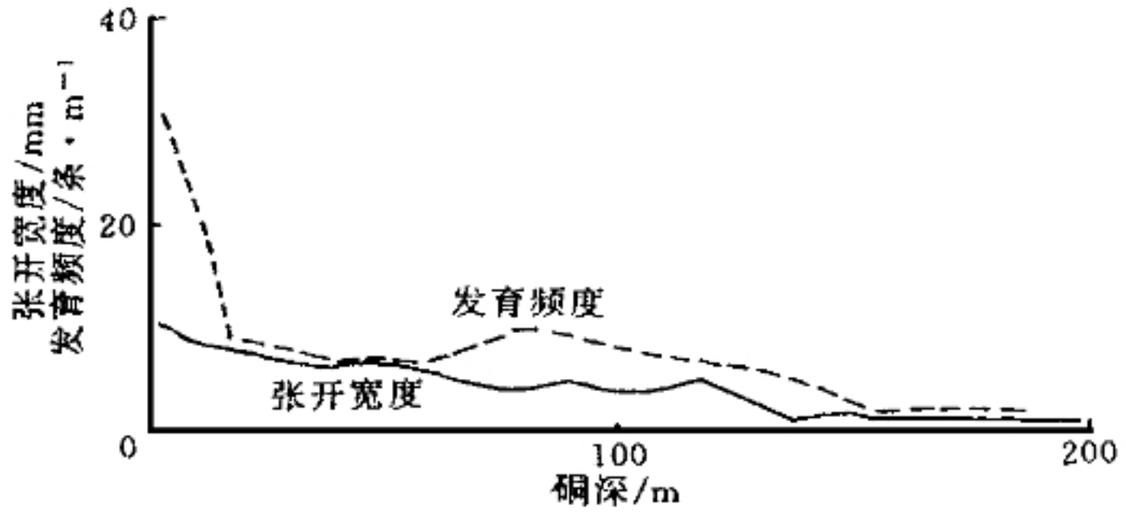


图 2 张开裂隙频度及张开宽度随硐深的变化

Fig. 2 Variation of aperture and frequency of opening fissures with distance from the slope surface

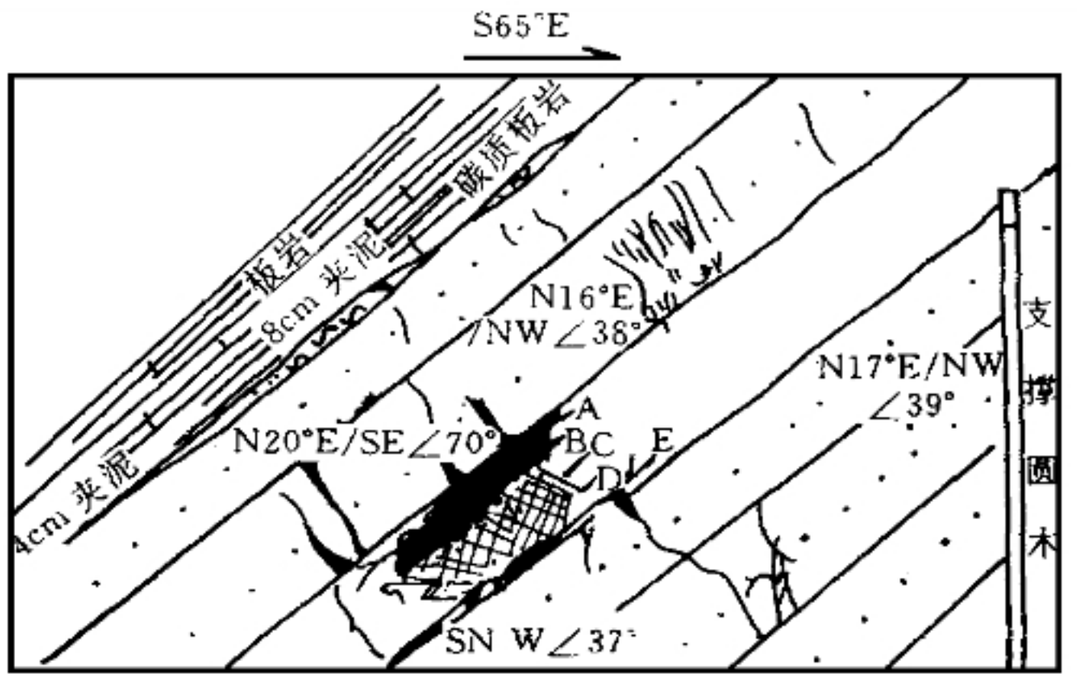


图 3 SD3 平硐 134~137 m 素描

Fig. 3 Sketch map of the main creep belt at 135 m of adit No. 3

A 灰色夹泥, 厚 1.5~2.0 cm, 软塑状态, 有地下水渗出;
B 泥夹角砾, 厚 1~2 cm, C 角砾夹泥, 厚 30 cm,
D 泥夹角砾, 厚 0.1~1.0 cm, E 灰黄色夹泥, 厚 1.5~2.0 cm

低, 显然是坡体长期变形、岩体松动所导致。

3.1.2 蠕滑带及上部坡体的顺层滑移

位于坡体中上部的 SD3 平硐揭露了上部坡体大量沿层间界面的滑移及其所导致的蠕滑面、带现象, 特征如下:

(1) 后缘蠕滑带: SD3 平硐揭露的坡体内最深、也是规模最大的顺层蠕滑带是 135 m 处的 g_{12}, 如图 3 所示。其厚度达 37 cm, 上、下壁均有 1.5~2.0 cm 厚的呈软塑状态的夹泥, 其间是厚达 30 cm 的蠕滑带物质, 以泥夹细小角砾及中部的角砾夹泥组成。整带物质松散、结构混杂, 并有地下水渗出, 充分表明了它对坡体变形的整体控制作用。

(2) 内部多层滑移- 张裂: 调查表明, 变形体除了沿 g_{12} 的整体变形外, 坡体内部也存在大量的次级蠕滑面, 这种蠕滑面尤其发育在砂、板岩的界面上, 为砂、板岩界面具有最大剪应力分布所致。如图 4 所示, 这种滑移往往导致两滑移面之间的张开, 其形成的张裂缝可宽达数厘米至十余厘米, 并充填碎块石。沿多个层面的蠕滑往往由它们之间的张裂缝连通在一起, 形成阶梯状张裂。实际上, 这种变形形式是导致坡体内部岩体松动, 质量降低的主要原因。

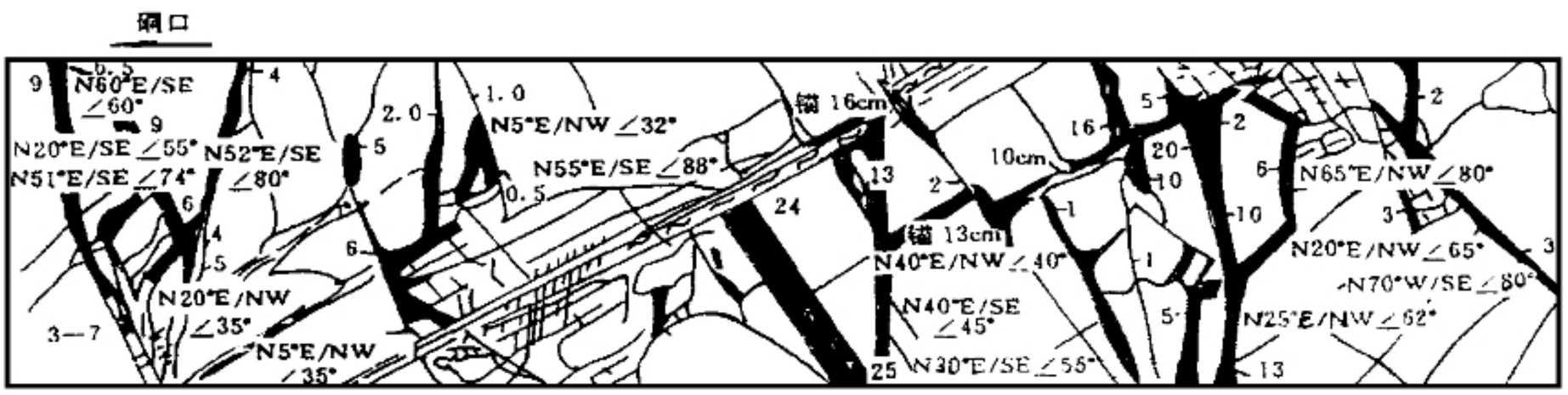


图 4 SD3 平硐 38~47 m 岩体阶梯状张性破裂素描

Fig. 4 Sketch map of stepwise tensile cracks at 38~47 m of adit SD3

3.1.3 蠕滑面、带的微观结构特征

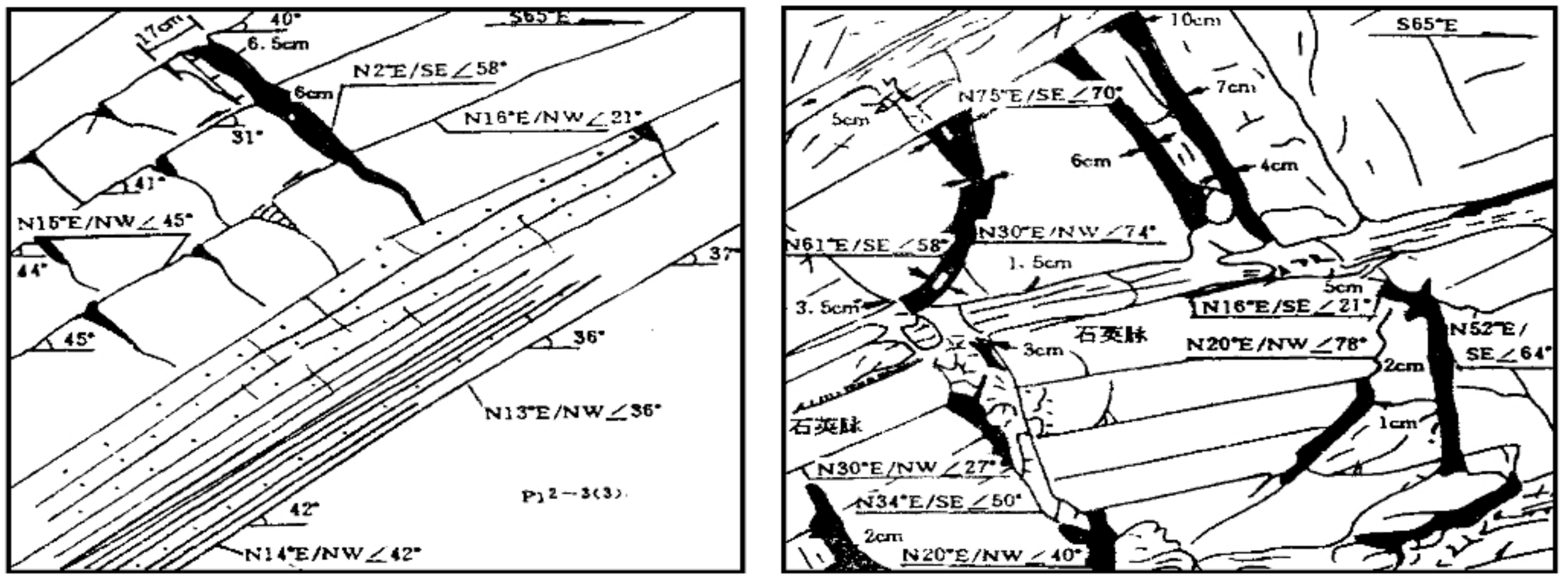
为进一步证明沿弱面顺层蠕滑的存在, 笔者对一些典型层间挤压带或面, 取其物质分离出石英颗粒, 对其表面结构进行了扫描电镜研究。结果表明: SD3 和 SD1 平硐层间挤压带微观结构特征有较大的差别, SD3 平硐石英颗粒多表现出两类结构(如表 1), 一类溶蚀程度较高, 呈孔穴状, 少量蜂窝状, 是过去构造历史的产物; 另一类则极为新鲜, 或在溶蚀程

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　错动带石英颗粒表面结构扫描电镜分析结果

Table 1　Surface texture of quartz grains from the main creep belt

编号	位置	产状	颗粒数	特　　征	鉴定结果
SD 1- g_5	三滩 1 号硐 20 m	N 15°E/NW ∠14°		表面结构大多呈贝壳状或次贝壳状, 部份颗粒上可见深、浅两种溶蚀结构	有次生错动
SD 1- f_2	三滩 1 号硐 28~ 24 m	N 8°W /SW ∠45°	12	70% 颗粒具有中等~ 强烈溶蚀, 可见溶蚀沟槽及孔洞, 仅少数见光滑断口	无或次生错动极弱
SD 1- f_3	三滩 1 号硐 28~ 35 m	N 8°W /SW ∠35°	9	表面结构大多呈不同程度的溶蚀状态, 浅者呈灰麻点状, 深者呈孔洞状, 并有石英晶体的重新生长	无次生错动
SD 1- g_{11}	三滩 1 号硐 105 m	N 7°W /SW ∠30°	9	一般都具浅~ 中等溶蚀表面结构, 部份颗粒可见光滑断口	无次生错动
SD 1- g_{12}	三滩 1 号硐 115 m	N 6°W /SW ∠33°	12	表面结构大多呈中等~ 强烈溶蚀状态, 呈孔、穴、磷片、絮状	无次生错动
SD 1- g_{15}	三滩 1 号硐 142 m	N 1°W /SW ∠36°	5	大多具浅度溶蚀, 呈条纹状或灰麻点状, 少见光滑断口	次生错动可能性小
SD 1- g_{16}	三滩 1 号硐 151 m	N 4°E/NW ∠33°	12	3% 的颗粒溶蚀较强烈, 其余一般都具浅~ 中等溶蚀结构	无次生错动
SD 3- g_{20}	三滩 3 号硐 50 m	N 5°E/NW ∠25°	10	表面结构一般均呈浅度溶蚀~ 新鲜状态, 仅少数颗粒可见溶孔	次生错动可能性大
SD 3- g_{18}	三滩 3 号硐 56 m	SN /W ∠30°	9	表面结构呈麻点状或鳞片状, 部份可见浅度溶蚀和新鲜断口两类结构	次生错动可能性大
SD 3- g_{16}	三滩 3 号硐 80 m	SN /W ∠46°	12	50% 颗粒呈贝壳状~ 次贝壳状断口, 其余也都可见新、老两类溶蚀结构, 少数呈中等溶蚀状态	有次生错动
SD 3- g_{13}	三滩 3 号硐 117 m	N 5°E/SE ∠45°	10	仅 20% 颗粒呈新鲜次贝壳状, 50% 具浅度溶蚀, 呈麻点状, 局部片状, 其余呈中等溶蚀, 具葡萄状, 结核状	次生错动可能性小
SD 3- g_{12}	三滩 3 号硐 124 m	N 23°W /SW ∠27°	7	40% 具贝壳状, 新鲜断面结构, 其余也多呈次贝壳状	有次生错动
SD 3- F_4	三滩 3 号硐 131 m	N 23°W /SW ∠27°	11	大多具轻度溶蚀, 呈条纹状, 并具新老两类溶蚀结构, 仅少数呈中等溶蚀	有次生错动



a　　b

图 5　SD 1 平洞 39~ 42 m (a)、64~ 66 m (b) 处岩体变形素描

Fig. 5　Sketch map of rock deformation at 39~ 42 m (a) and 64~ 66 m (b) of adit SD 1

度较高的颗粒上又显现出新的破裂面, 断口一般呈贝壳状或光滑状, 表明它们是近期挤压带错动所形成, 从而证明了上部坡体沿弱面顺层蠕滑的存在。SD 1 平硐石英颗粒表面结构则不然, 类型比较单一, 以中等~ 强烈溶蚀的孔穴状、蜂窝状表面结构为主, 甚至在一些溶孔、穴中还可见到新生长的、自形度很高的石英晶体。这表明, SD 1 平硐所位于的下部坡体并未表现出明显的晚期顺层滑移。

3.1.4　下部坡体的弯曲- 张裂变形

上述的层间挤压带微观结构研究表明, 下部坡体不存在明显的顺层滑移。实际上, SD 1 平硐所揭露的下部坡体变形迹象与 SD 3 平硐揭露的上部坡体变形迹象也有着本质的区别: 这一部位除浅表层 (< 20 m) 坡体由于层面切穿坡面, 而发生强烈的卸

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

荷松动、岩体顺层拉开外, 向内部, 变形形式主要以岩层的弯折- 张裂变形为主, 顺层滑移次之(一般仅1~ 2 cm)。如图 5(a) 所示为 SD 1 平硐 39~ 42 m 处揭露的岩体变形现象, 可见岩层表现出上缓下陡, 成向外隆起状, 层面倾角变化约 3°~ 4°, 并在岩层上部产生了向上开口的楔形张裂缝, 其最大张开宽度一般为 2 0~ 4 0 cm, 向下即逐渐尖灭。同样的现象在 64~ 66 m 处亦可观察到, 如图 5(b) 所示。SD 1 平硐沿硐深岩层产状的变化同样说明下部坡体岩层弯曲变形的存在, 如图 6 岩层倾角随硐深的变化曲线所示。可见, 65 m 以外(对应于 g_{12} 向下延伸的位置), 岩层倾角偏陡(除去近硐口的 10m), 一般在 41°~ 46°之间; 65m 以内, 岩层倾角过渡为正常岩层的产状, 即倾角 35°~ 40°。

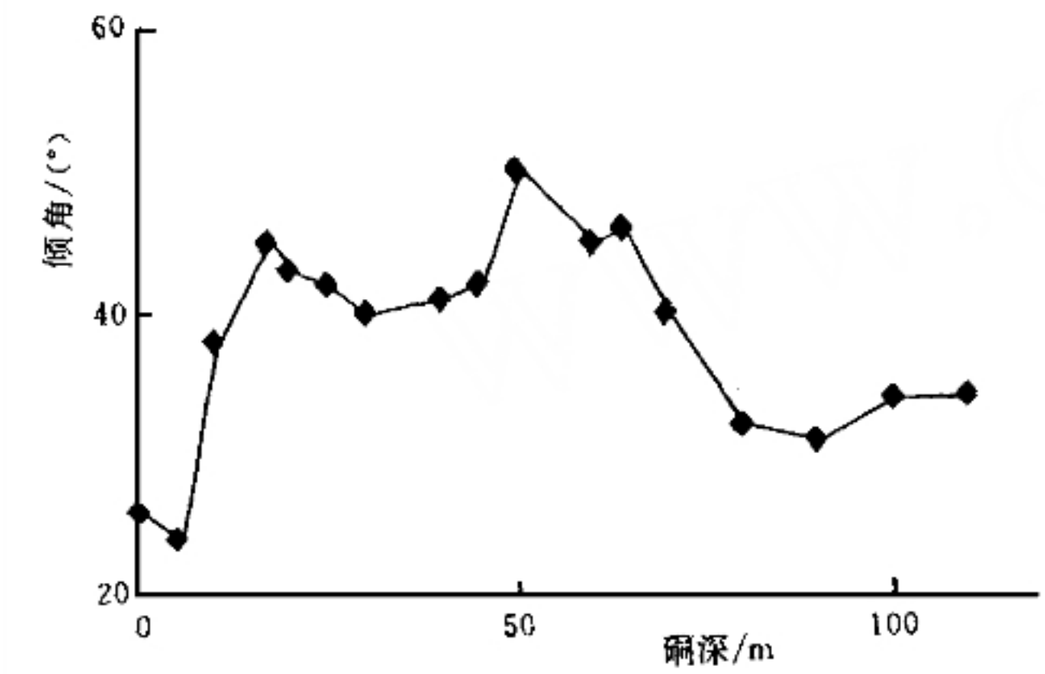


图 6 岩层倾角随硐深的变化曲线

Fig. 6 Variation of dip angle of rock layers with edit depth

3.2 边坡变形破坏机制模型

综上斜坡变形破坏现象, 不难得出该斜坡变形体变形破坏机制的“概念模型”。实际上, 它是一个受控于坡体软弱层间挤压带的“滑移- 弯曲”型变形体, 这种机制曾被许多作者报道过[3, 5]。如图 7 所示, 该变形体可分为变形性质不同的两部份, 即中上部的顺层滑移段和下部的弯曲- 隆起段。从力学机制上, 对应于“主动传力区”(Ⅰ区) 和“被动挤压区”(Ⅱ区), Ⅰ区坡体的自重下滑分力驱使坡体沿 g_{12} 产生顺层滑移, 而Ⅱ区由于岩层向下深入至河床以下, 故Ⅰ区所传递的力在此部位不能沿层面以滑移的形式耗散, 而产生被动挤压。其结果岩层只能通过产生垂直于层面的变形, 即弯曲- 隆起来协调上部坡体的作用力。这种主传力区的滑移和被动区的挤压隆起构成一个协调的体系, 控制了斜坡变形破坏的作用

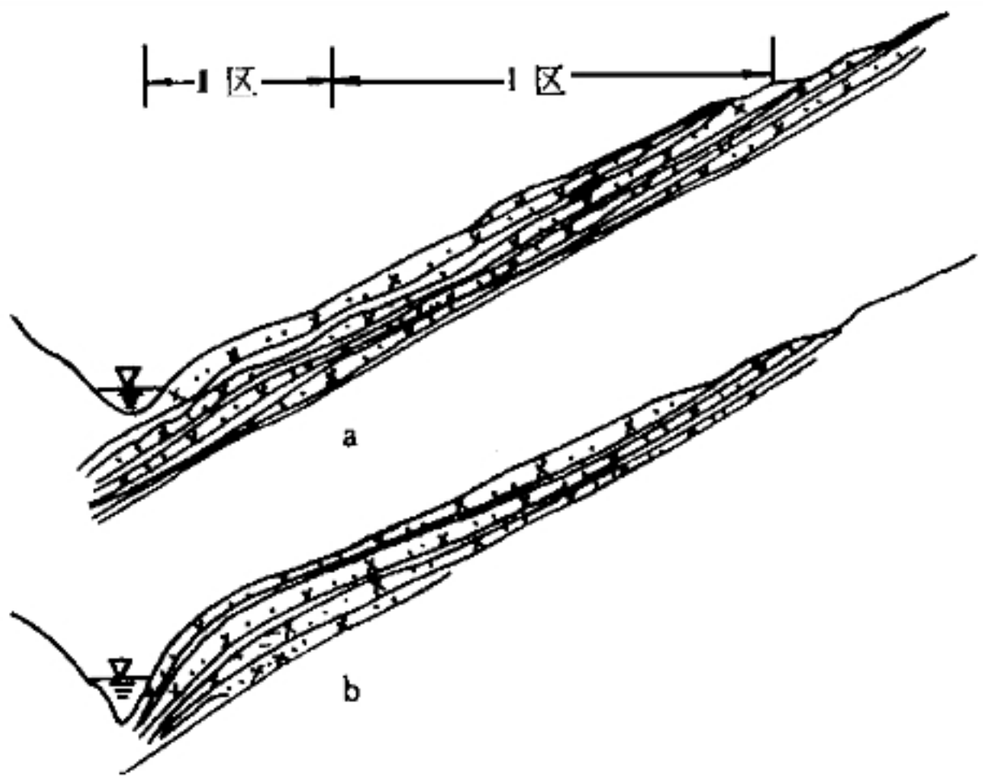


图 7 边坡变形破坏机制概念模型

Fig. 7 Geomechanical model of slope deformation mechanism

过程, 产生了目前边坡所呈现的上述一系列变形破坏现象。显然, 坡体的最终破坏只能通过被动挤压区的进一步弯曲、隆起, 导致形成新的连接蠕滑带与坡体表面的剪切破裂面而实现[1]。

由于勘探程度的限制, 准确确定主动区段和被动区段的长度目前还是比较困难的。但根据文献[4, 5]的研究, 这类变形弯曲段的长度大约是整个岩层长

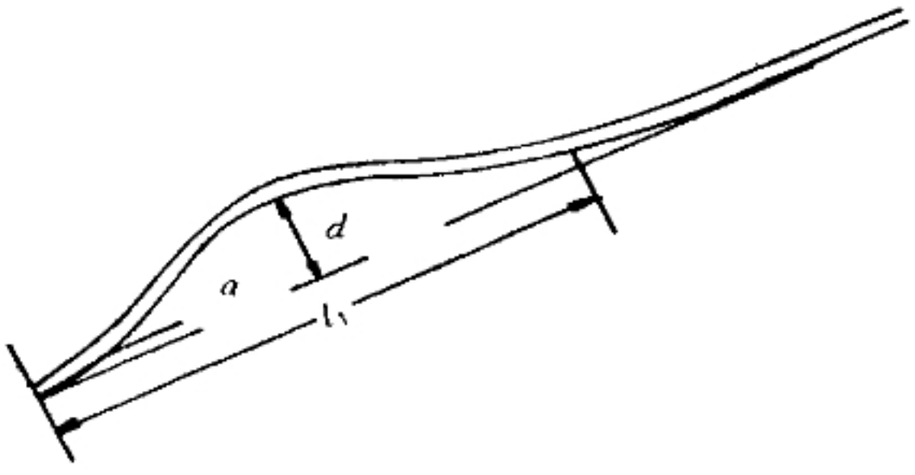


图 8 岩层弯曲模型

Fig. 8 Buckling model of a stratum

度的 0 5 倍(或 1/3~ 1/2 倍, 图 8), 则大致可确定弯曲段的长度约为 160 m, 从谷底沿 g_{12} 向上延伸大致可达 1710 m 高程; 弯曲的最高点也就对应在 SD 1 平硐附近的位置(1650~ 1670 m 高程), 这与地表这一带岩体强烈破碎、松动的现象基本是吻合的。

上述分析表明, 变形体的稳定性主要受下部坡体(Ⅱ区) 的变形程度控制, 从目前的变形状况来看, 这部份坡体的弯曲- 隆起变形程度还是较轻微的, 这可用以下的分析来判断:

(1) 由图 8 的模型, 弯曲段的应变可由下式计算:

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\epsilon = d/l_1 = \frac{1}{2}\tan\alpha$$

SD 1 平硐调查获得的 α 值平均为 3°, 计算得:

$$\epsilon = 0.0262$$

(2) 以弯曲段对应坡体河谷下切所经历的时间作为弯曲段变形经历的时间, 则弯曲段顶点对应高程大致相当于三级阶地高程, 即晚更新世初期, 以距今 15 万年计算, 则应变速率约为 5.5×10^{-14} m s^{-1}。这个应变速率甚至小于花岗岩的临界应变速率, 说明坡体的变形目前还处于变形发展阶段, 远未进入应力积累、破裂非稳定性扩展的累进性破坏阶段, 属变形处于轻微阶段的边坡。

4 结 论

研究表明, 岩石高边坡的失稳是一个动态的地质历史过程, 这种过程的力学行为就表现在它所经历的时效变形过程及伴随这一过程滑动面的形成及演化机理上。尽管在现实的情况下, 通过地质勘探和地表测绘揭露的是边坡在整个地质历史长河中地质和力学行为的一个片段。但是, 它却蕴涵着整个边坡的变形破坏历史。通过对它的分析, 不仅能了解边坡过去的行为, 更重要的是可以预测评价其将来可能的变形趋势。这对复杂地质结构条件下岩石高边坡的稳定性分析具有重要的工程地质意义。

尽管本文所揭示的边坡变形破坏机制已为人们所认识, 但它进一步表明: 岩石高边坡时效变形的研究, 关键是对实际地质现象的认识和综合分析。对某一个特定的边坡而言, 笔者所能观察到的现象总是局部的, 但是, 正是通过若干局部的, 乃至微观现象的观察才能上升到对整体的认识。在这一过程中, 特别应强调的是将局部的现象在空间上联系起来, 进行综合分析, 形成关于边坡变形破坏过程的整体图象, 即通常所说的“概念模型”的建立。

研究结果还表明: 本文的实例边坡是一处于轻微变形阶段的坡体, 变形目前还未进入应力积累和累进性破坏阶段。因此, 其存在不会对工程建设产生重大影响。

参 考 文 献

[1] 张倬元、王士天、王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of engineering geology. Beijing: Geologic Publishing House, 1981.

[2] 孙广忠. 地质工程理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
Sun Guangzhong. Theory and practice of geoengineering. Beijing: Earthquake Publishing House, 1996.

[3] 王士天等. 地表条件下岩体的粘性流动变形及其所导致的斜坡破坏[J]. 成都地质学院学报, 1983, **23**(2).
Wang Shitian, etc. Rheological deformation of rockmasses under near surface condition and related failure. Journal of Chengdu College of Geology, 1983, **23**(2).

[4] 王兰生、张倬元. 斜坡岩体变形破坏的基本地质力学模式[J]. 水文工程地质论丛, 1983.
Wang Lansheng, Zhang Zhuoyuan. Basic geomechanics models of slope deformation and failure. Discussion on Hydrogeology and Engineering, 1983.

[5] 王思敬. 金川露天矿边坡变形机制及过程[J]. 岩土工程学报, 1982, **4**(3).
Wang Sijing. Process and mechanism of slope deformation at Jinchuan open pit mine. Journal of Geotechnique, 1982, **4**(3).

[6] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, **1**(1).
Chen Zongji. Mechanics problems of long-term stability of underground tunnels. Rock Mechanics and Engineering, 1982, **1**(1).

[7] 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: 成都科技大学出版社, 1991.
Huang Runqiu, Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian. Systematic engineering geology study of high rock slopes. Chengdu: Publishing House of Chengdu Science and Technology University, 1991.

[8] 黄润秋、张倬元、王士天. 论岩体结构的表生改造[J]. 水文地质工程地质, 1994, **21**(4): 17.
Huang Runqiu, Zhang Zhuoyuan, WANG Shitian. Discussion on Epigenetic Recreation of Rockmasses. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994. **21**(4): 17.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net