

黏土矿物对金盆水库软弱变质岩边坡失稳影响研究

于德海¹, 彭建兵²

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 针对西安市金盆水库软弱变质岩边坡的地质条件, 在细致分析黏土矿物的主要特性及形成机制的基础上, 从微观到宏观的不同尺度, 系统研究了黏土矿物对软弱变质岩边坡失稳的影响。结果表明, 软弱变质岩成因复杂, 矿物成分多样, 水稳定性差, 易于生成黏土矿物; 而次生黏土矿物的形成将引起源矿物、矿物集合体及岩块特性的显著变化, 诱发岩石向松散介质转化, 并触发黏土矿物在宏观结构面中的聚集和泥化夹层的形成, 导致结构面及岩体强度衰减, 进而促进边坡变形破坏, 对边坡演化及失稳的贡献显著。

关键词: 黏土矿物; 金盆水库; 软弱变质岩; 边坡失稳

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0045-05

中图分类号: TV223

Influence of Clay Minerals on Instability of Soft Metamorphic Rock Slope in Jinpen Reservoir

YU De-hai¹, PENG Jian-bing²

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. Faculty of Geology Engineering and Geodesics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In view of the geological condition of soft metamorphic rock slope in Jinpen Reservoir, the influence of clay minerals on soft metamorphic rock slope is systematically studied through a careful analysis of the main properties and formation mechanisms of clay minerals, from micro to macro levels. Results show that soft metamorphic rock can easily produce clay minerals because of such characteristics as complex origin, various mineral composition, and weak water stability. However, clay minerals in rock may bring about marked changes in some properties of parent minerals, mineral aggregation or rock and promote rock to evolve toward loose medium. Moreover, the illuviation of clay minerals in macro discontinuities and the formation of mudded intercalation will cause the strength of discontinuities and rock mass to decrease. To sum up, clay minerals may accelerate deformation of slopes and their contribution to slope evolution and failure is notable.

Keywords: clay mineral; Jinpen Reservoir; soft metamorphic rock; slope instability

黏土矿物, 由于其细小的单晶尺寸及特有结晶习性, 往往呈现出特殊的物理、水理及力学特性, 对边坡失稳具有普遍而重要的影响, 已引起一些学者的关注^[1-4]。如文献[5]在研究香港深湾道滑坡的演化过程时提出, 滑坡的发生与次生高岭土等黏土矿物及其在不同结构面中的积聚密切相关。然而, 以往的相关研究很少以软弱变质岩边坡的特定问题为对象, 而黏土矿物却广泛分布于软弱变质岩构成的斜坡中。因此, 系统研究黏土矿物对软弱变质岩边坡的作用, 对深化斜坡失稳机制的认识具有深刻意义。

金盆水库是建国以来西安市兴建的规模最大, 投资最多且关系长远的一项跨世纪的城市基础设施建

设重点工程, 以解决西安城市供水为主, 同时兼有农田灌溉及水力发电功能。水库建成后, 向西安市年供水量可达 $3.05 \times 10^8 \text{ m}^3$, 灌溉农田 $2.47 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 年发电量为 $5.7 \times 10^{11} \text{ kWh}$ 。由于其意义重大, 水库的安全问题, 尤其是坝肩软弱变质岩边坡的稳定条件广受人们的关注。然而自 2005 年夏季以来, 由于雨量较往年明显增多, 随着坡体渗水量的增加, 水岩相互作用强烈, 黏土矿物增多, 导致边坡变形加速, 局部地段甚至发生严重滑塌。鉴于此, 本文以西安金盆水库为研究背景, 在细致讨论黏土矿物的主要特性及形成机制的基础上, 从微观到宏观的不同尺度, 系统研究了黏土矿物对软弱变质岩边坡失稳的影响。

1 区域地质环境条件

1.1 地形地貌

滑坡体位于大坝右岸放水塔的 NE30° 方向约 150 m 处的高陡边坡上, 总体呈 NE-SW 向(滑坡轴线 30°~210°) 展布, 坡度为 38°~40°, 主滑方向 210° 左右。滑坡分布在高程 624~760 m 范围内, 宽 80~120 m, 长 120 m, 平均厚度约 20 m, 总体积 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 左右。滑坡右边界向西拐过斜梁, 相应坡段有喷护层护坡, 后端出露的是相对稳定的基岩; 左边界落在一个地貌上不太明显的小冲沟中, 其落差坡度与周围的斜坡地貌基本一致。滑坡上部地形相对宽缓, 坡度角 25°~33°, 局部地段受水库修建期间的工程便道、平台及人工堆积影响, 地表植被尚未完全恢复(如图 1 所示)。



图 1 滑坡体地形地貌特点

1.2 岩性条件

研究区出露前震旦系宽坪群大镇沟组第一岩性段和第二岩性段, 基岩主要由云母石英片岩和绿泥石片岩组成, 其片理面产状稳定, 基本呈条带状展布。

(1) 云母石英片岩: 灰黑—暗灰色, 风化色呈灰褐—黄褐色, 薄层状。该岩体柔性大, 片理发育, 云母多沿片理面分布, 石英则构成连续性极好的微细脉体(脉体宽约 1~2 mm 或更细) 顺片理分布, 黏土质成份与浅灰—灰白—白色的石英细脉呈平行相间排列, 局部含碳质, 表层风化强烈, 呈碎片状, 强度较低。

(2) 绿泥石片岩: 呈黑绿—灰绿色, 风化后呈黄褐色, 中—薄层状—厚层状, 其质地细腻, 总体连续性、完整性都较好, 致密、较坚硬。

1.3 地质构造

研究区位于秦岭东西向构造带北缘西骆峪—田峪背斜南翼, 岩层走向约 NW290°—NE70°, 总体倾向 SE—SSE, 倾角 32°~60°。区内的地质构造在燕山早期以前, 主要受近 S—N 向挤压应力的作用, 致

使这一时期形成的断裂构造以逆冲性质居多; 但自燕山晚期以来, 构造应力场发生了转化, 变成以 NW—SE 向拉张应力为主, 在这种应力作用下, 断层破碎带和层间挤压带多呈疏松状, 同时, 也形成了系列张性裂隙, 使得岩体中的应力逐渐解除和释放, 从而形成低地应力区。

1.4 水文地质

研究区地下水以基岩裂隙水为主, 说明区内岩体较为破碎, 岩体中存在的裂隙, 构成了地下水的主要流动通道和储水空间。坡体内的地下水, 主要受地表大气降水的补给, 并且由于岩体裂隙发育的不均一和沟谷切割的影响, 其水量分布也很不均匀。

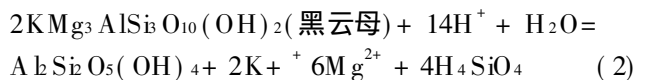
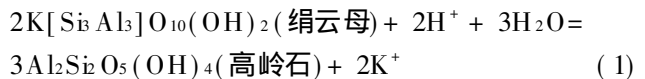
2 黏土矿物与边坡失稳

2.1 黏土矿物的形成机制及宏观特征

软弱变质岩成因复杂, 矿物成分多样, 像片岩多由云母、绿泥石等片状矿物和角闪石、蓝闪石等柱状矿物, 以及石英、长石等粒状矿物组成, 其中既包含铁镁矿物, 又有云母类及长石类矿物, 在水的作用下易发生蚀变而生成黏土矿物。

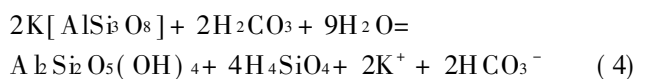
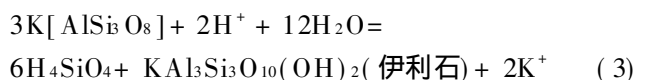
铁镁矿物, 如角闪石在酸性水溶液中可以淋出 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 形成蒙脱石; 随着 Ca^{2+} , Mg^{2+} 的进一步淋失, 最后可形成高岭石。

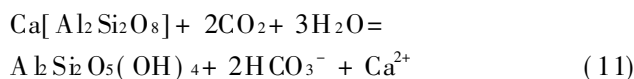
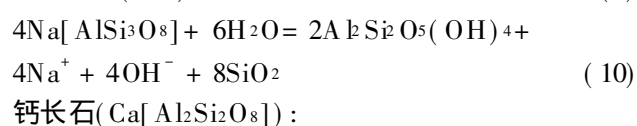
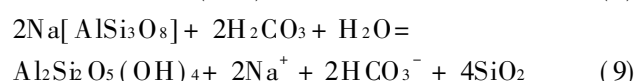
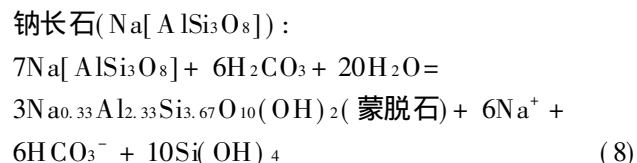
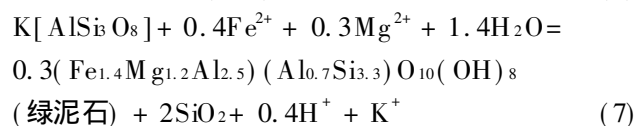
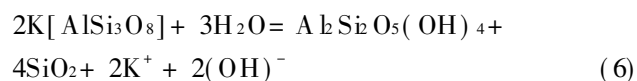
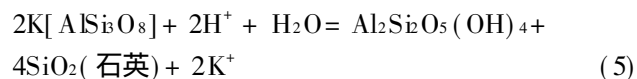
云母类矿物吸水性好, 更是易于水化, 在许多情况下会游离出 K_2O , SiO_2 等成分, 而形成水云母、高岭石等黏土矿物, 如



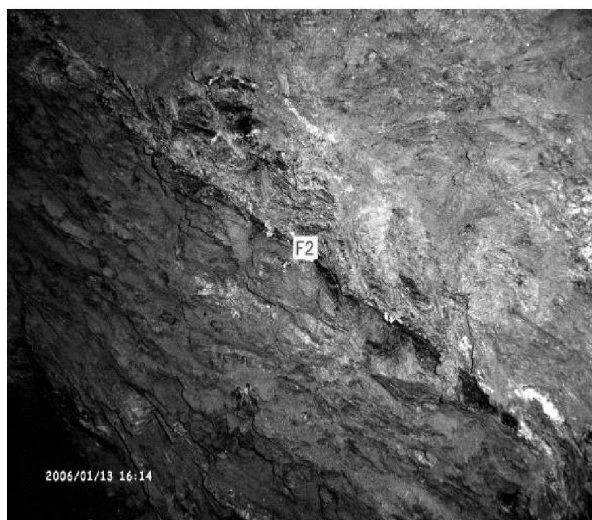
长石是地壳中分布最广的硅酸盐矿物, 占造岩矿物的 46%, 且大多包括在 $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ 这 3 种成分体系中, 是表生黏土矿物的最主要母源。斜坡岩体地下水大多起源于雨水, 雨滴形成后便会吸收大气中的 CO_2 , 进入饱水带之前就已成为碳酸化地下水, 因此, 降水起源的渗入水具有与长石发生反应的显著潜势。随着反应的进行, 长石被消耗, 高岭石、蒙脱石、伊利石及绿泥石等黏土矿物形成。长石的 3 个理想端元与水反应生成黏土矿物的主要化学方程式可表示如下^[6-12]。

钾长石 ($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$):





泥化夹层是黏土矿物积聚的宏观显现, 它的工程性质极坏, 往往成为边坡岩体滑动破坏的控制面, 而在软弱变质岩系中更是常有云母片岩、绿泥石片岩形成的软弱夹层。软弱夹层在和完整基岩接触的部位常因构造应力或重力作用的影响而产生剪应力集中, 导致该位置的岩层被揉搓, 岩石结构发生破坏, 孔隙增大; 这样在地下水循环强烈的条件下, 软弱夹层逐渐被冲刷、溶蚀、软化, 物质成分发生变化, 最终破坏彼此间的胶结, 进而形成泥化夹层。在金盆水库的平硐中可清晰揭露出泥化夹层, 如夹泥层 F_2 , 厚 1~5 cm, 产状 $168^\circ \angle 49^\circ$, 与岩层基本一致, 延续性强, 呈灰黑色, 柔软可塑, 错动明显(图 2a); 泥化夹层 F_3 , 产状 $162^\circ \angle 46^\circ$, 厚 5~10 cm, 黄色相间伴有黑色, 内中夹杂有颗粒成分, 具塑性, 压缩性高, 有部分挤出现象(图 2b)。



a 夹泥层 F_2



b 泥化夹层 F_3 中的杂色夹层

图 2 金盆水库平硐中的泥化夹层

从泥化夹层的矿物成份分析结果(图 3 及表 1)来看^[13], 泥化带中黏土矿物的相对百分含量分别为 60%, 26%, 47%, 石英的相对百分含量分别为 30%, 35%, 40%, 两者在泥化带矿物成分中占据了很大的比重, 而造岩矿物则逐渐被消耗, 如长石类矿物仅占 5%, 15%, 6%。造成这一结果的原因, 是由于软弱变质岩的造岩矿物与地下水发生一系列化学反应后(式 1—11), 其生成物主要是黏土矿物和 SiO_2 。同时也反映出, 泥化夹层的矿物组成与黏土矿物的形成机制基本吻合, 且所含的黏土矿物越多, 越易泥化。可见, 黏土矿物是形成泥化夹层的物质基础, 水化是形成泥化夹层的必要条件。

2.2 黏土矿物的微观机制

一般来说, 泥化夹层中黏土矿物的性质与其稳定性密切相关, 泥化夹层的这种特性主要与黏土矿物的胶结类型、结构形态、定向排列方式等微观因素有关。含有黏土矿物的泥化夹层, 其胶结类型通常有两种情况, 一是石英、长石等粗颗粒“搭架”, 黏土矿物充填于粒间, 形成孔隙式胶结; 二是黏土矿物构成杂基, 石英、长石等粗颗粒“悬浮”于杂基中构成“斑晶”, 并与杂基形成基底式胶结。泥化夹层的胶结类型决定了其微观结构形态, 前者主要形成蜂窝状结构, 后者则构成叠瓦式结构。对于软弱变质岩而言, 泥化夹层中片状的伊利石矿物含量较多(见表 1), 故结构单元体

多以微集聚体或黏粒片呈叠瓦式结构排列。当泥化夹层承受外载时,无论何种结构,由于黏土矿物粒径极其细微,受最小阻力原则的控制,静荷载驱动的破裂面一般仅会绕晶或擦晶而不会切晶扩展,从而在晶体表面形成微细擦痕,或呈现出明显的叠片状定向排列特点,这些微观机制都为泥化层发生滑移的宏观迹象提供了有力证据。

2.3 黏土矿物对边坡失稳的影响

黏土矿物广泛存在于边坡的各类结构面和滑动面中。由金盆水库平硐所揭露的情况看,由于宏观结构面作为地下水运移和排泄的通道,径流交替频繁,水一岩反应强烈,易聚集成具有一定厚度的黏土矿物富集带,而成为其主要的形成和聚集场所(如图 3a);另外,在降雨期间,随着地下水水力梯度及渗透速度的增大,来自浅部土壤层的黏土矿物会通过包气带大孔隙进入坡体内部,并发生渗流迁移,除少量排出斜坡外,大部

分会在岩体不同部位的结构面中沉淀、富集(如图 3b)。而黏土矿物的聚集将导致结构面和两侧岩块黏聚力及内摩擦角的下降,从而降低结构面和岩体的强度,另外由于黏土矿物对岩块的包裹,造成岩块棱角的钝化及表面糙度的降低,将削弱不同岩块之间的直接联系,使得岩块的自由度及活动度加大,岩体结构由岩块一岩块接触向岩块一黏土一岩块接触转变,造成岩体整体性的渐进衰退,边坡的稳定性也会随之受到影响。同样,作为滑坡体的界面,滑面在边坡稳定研究中居于重要地位。在金盆水库坝肩边坡上可清晰见到滑动面和其上的擦痕(图 4),由于滑面错动强烈,在水的作用下一般都已泥化,因此在物质组成中,大多含有不同数量的黏土矿物。由于黏土具有较强的粘滞性及很低的摩阻力,富含黏土矿物的滑面在滑体与滑床之间起到润滑作用,且黏土矿物的含量越多,其润滑效应越显著,从而促进边坡的蠕变。

表 1 泥化带矿物组成与相对百分含量统计

试样编号	取样位置	矿物百分含量/%												
		伊利石	蒙脱石	高岭石	绿泥石	闪石	石英	钠长石	微长斜石	方解石	白云石	黄铁矿	菱铁矿	其它
3	F ₄₁	22	10	10	18		30	5					3	2
5	F ₄₀	2		4	20	2	35	15		12	4	3		3
7	F ₄	21	6	5	15		40	4	2				4	3



a 结构面内形成的具有一定厚度的黏土富集带



b 结构面中填充的来自浅部土壤层的黏土

图 3 金盆水库平硐中结构面内的黏土夹层

此外,由于黏土的低渗透性,滑面往往可将滑体与周围介质隔离,使之成为独立的水文地质单元。这样,滑体就可以有效拦截坡体范围内的下渗降水,导致地下水的峰值水位、坡体被“蓄满”的几率及水力梯度等指标增大。相应地,坡体水力耦合的显现程度、变形程度及边坡稳定性对降水的敏感度等也将随之提高,从而加快边坡的演变及失稳进程。

3 结论

(1) 软弱变质岩成因复杂,矿物成分多样,既包含铁镁矿物,又有云母类及长石类矿物,在水的作用下易发生蚀变而生成黏土矿物;并且在软弱变质岩系中更是常有云母片岩、绿泥石片岩形成的泥化夹层,泥化夹层是黏土矿物积聚的宏观显现,它的工程性质

极坏,往往成为边坡岩体滑动破坏的控制面。

(2) 含有黏土矿物的泥化夹层,胶结类型主要有孔隙式胶结和基底式胶结两类,前者主要形成蜂窝状结构,后者则构成叠瓦式结构。对于软弱变质岩而言,泥化夹层中片状的伊利石矿物含量较多,故结构单元体多以微集聚体或黏粒片呈叠瓦式结构排列。



图4 边坡的泥化滑动面及擦痕

(3) 黏土矿物与边坡演化之间并非简单的单向驱动关系,而是彼此驱动的互馈体系。边坡演化在造成岩体质量、整体性及稳定性降低的同时,将提高岩体的松动程度、贮水及导水能力,优化降水入渗及地下水径流条件,从而促进黏土矿物的形成与积累,而这些结果反过来又会促进边坡演化,如此往复,直至边坡失稳。

[参 考 文 献]

[1] 徐则民,黄润秋,唐正光,等. 黏土矿物与斜坡失稳[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 729-740.

[2] 严春杰,唐辉明,孙云志. 利用扫描电镜和 X 射线衍射仪对滑坡滑带土的研究[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 89-92.

[3] 毛新虎,赵法锁,毛彦龙,等. 黑河水库大坝右坝肩滑体底滑带结构特征分析[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(1): 50-53.

[4] Shuzui H. Process of slip-surface development and formation of slip-surface clay in landslides in Tertiary volcanic rocks, Japan [J]. Engineering Geology, 2001, 61(4): 199-219.

[5] Kirk P A, Campbell S D G, Fletcher C J N, et al. The significance of primary volcanic fabrics and clay distribution in landslides in Hong Kong [J]. Guangdong Geology, 1998, 13(1): 64-70.

[6] 孙治军,马丽,张民,等. 山东主要果园土壤的黏土矿物组成及其吸附特性[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 57-60.

[7] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. The Journal of Geology, 1993, 101(2): 295-303.

[8] 李德文,崔之久,刘耕年. 风化壳研究的现状与展望 [J]. 地球学报, 2002, 23(3): 283-288.

[9] 张汝藩. 扫描电镜在矿物变化研究中的应用: 长石的黏土矿物转化 [J]. 地质科学, 1992(1): 66-71.

[10] 史基安,晋慧娟,薛莲花. 长石砂岩中长石溶解作用发育机理及其影响因素分析 [J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 67-75.

[11] 秦建华,潘桂棠,杜谷. 新生代构造抬升对地表化学风化和全球气候变化的影响 [J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 517-525.

[12] 艾瑶,高明,戴水汉. 地下水与玄武岩反应趋势分析 [J]. 高校地质学报, 1998, 4(2): 220-228.

[13] 赵法锁. 坡体平面旋转机理及稳定性研究 [M]. 西安: 西安地图出版社, 1999: 52-55.