

新安江大坝坝基页岩性状变化研讨

马晓辉 彭汉兴 杨光中

(河海大学工程技术总公司 南京 210098)

摘 要 以新安江大坝右岸坝基薄层页岩为例,依据多年大坝观测试验资料和软岩泥化机理,提出从软岩矿物和化学成分的变化、结构构造特征以及坝基渗流等四方面的评价准则,评判新安江大坝页岩性状的变化.

关键词 软岩泥化 坝基渗流 冰岩作用

中图号 TV642.3

水库蓄水,大坝坝基软岩在水的长期浸泡下性状的变化,是最为人们所关注的地质问题之一.若软岩性状恶化,形成泥化层,将导致坝基岩石强度的降低,从而影响大坝的稳定.坝址环境下软岩性状变化的检测与评价,是大坝运行管理中迫切需要解决的问题,也是坝址工程地质研究的重要内容.新安江大坝右岸坝基分布有薄层页岩夹层,在水的长期浸泡下性状是否恶化或出现泥化夹层,目前存在尖锐的分歧.笔者以此为例进行讨论,并提出坝基软岩性状变化的判别准则,以供讨论.

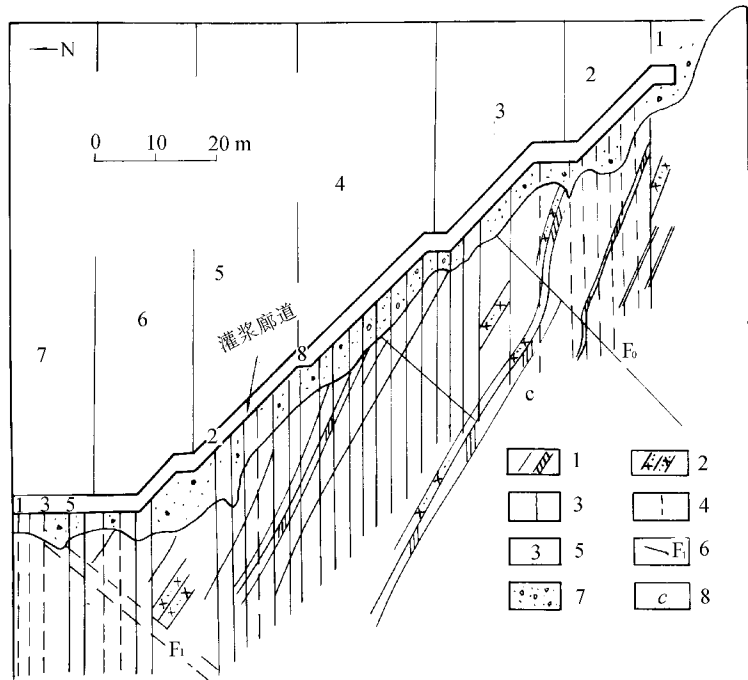
1 坝区地质及大坝运行概况

新安江大坝位于浙江建德市境内,坝高 100 m,为一混凝土宽缝重力坝,共 26 个坝段.大坝座落于紫金滩倒转背斜反常翼上,岩层陡立(倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$).河床及左岸坝基(8~25 坝段)为石炭系唐家坞组砂岩,右岸坝基(0~7 坝段)为泥盆系西湖组石英砂岩,其中夹有多层页岩和砂质页岩,最厚的两层为 0.5~2.5 m(编号 Sh_1 和 Sh_2),并贯穿整个坝基,其余呈不连续透镜体状分布(图 1).

页岩矿物成分主要为石英、白云母,其次为高岭石、叶腊石、蒙脱石.页岩化学成分明显地反映出其矿物组成特征,其中 SiO_2 含量达 70% 以上,其次为 Al_2O_3 和 K_2O ,而 CaO 和 MgO 含量甚微(表 1).

表 1 岩石及钻孔泥化岩芯化学成分
Table 1 Chemical composition of rocks and argillous core in boreholes %

岩石名称	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	烧失量
灰绿色页岩	75.79	0.86	15.34	0.26	0.11	0.030	3.02	0.33	
黑色炭质页岩	74.92	0.77	14.99	0.13	0.43	0.030			3.35
紫红色页岩	69.79	8.85	15.13	1.88		0.080			2.89
紫红色砂质页岩	77.75	0.90	13.84	0.28	0.29	0.010	3.06	0.36	
石英砂岩	93.40	1.05	3.31			0.002			
泥化岩芯	72.06	0.87	17.52	0.50	0.50		3.34		3.56



1—页岩 2—石英砂岩 3—常年排水孔 4—季节排水孔(常年不排水孔未画出);
5—排水孔编号 6—断层及编号 7—混凝土 8—石炭纪

图 1 新安江大坝右岸坝地质剖面

Fig.1 Geological profile of right bank of Xinanjiang Dam

新安江大坝自 1960 年至今已安全运行 39 年,在长期渗流观测中,曾发现一些异常迹象:

a. 灌浆廊道总排水量逐年下降,但 2[#],3[#] 坝段排水量常年不衰^[1],在相近库水位下,由 1966 年占总排水量的 23% 至 1991 年占 41%. 该廊道内,右岸坝基共 44 个排水孔,其中常年排水的孔占 37.4%,高库水位时排水,低时不排水的孔占 30.8% (见图 1),且分布较集中,以 3~4 坝段最多、流量最大,但各孔间差值大. 其中 3 坝段 3[#] 孔(编号灌 3—3,下同)排水量大者可达 7.72 m³/d,而邻近的 2[#] 和 4[#] 排水孔的排水量仅为 0.35~0.71 m³/d,5[#] 排水孔则不排水. 坝基扬压力孔水位差值亦大,大者可高出邻近孔水位 10~20 m. 总之,坝基地下水分布很不均匀,存在集中渗流带.

b. 坝基水的地球化学环境发生明显变化. 与建坝前两岸岩体地下水环境相比,水的酸碱度(pH)和氧化还原电位(Eh)有了明显变化. 建坝前,峡谷山区地下水径流条件好,多处于氧化环境,且多为中性、弱碱性水. 建坝后,右岸坝基多为弱酸性、中性水,pH 极小值仅为 5.25,河床及左岸坝基多为碱性、强碱性水,pH 极大值可达 12.6(图 2). 不少排水孔水中(尤其是河床坝基中)含有 H₂S(0.05~4 mg/L),溶解氧含量少,甚至不含. 该坝基地下水多处于弱还原、还原环境. 从水中所含与岩性性状变化相关的离子含量变化来看(图 2),下层库水中 SiO₃²⁻ 含量甚微,右岸坝基水中略有增加,河床及左岸坝基水中含量较多. 库水中 K⁺ + Na⁺ 含量甚少,坝基地下水中略有增加,最大值仅 5.29 mg/L(灌 5—5 孔). 地下水中 Ca²⁺ 含量不高,极大值仅 23.84 mg/L(灌 7—4 孔),略高于库水中的含量,2[#],3[#],4[#] 坝段水中 Ca²⁺ 含量低于库水中的含量,这与其 pH 值低有关.

c. 坝基排水孔口有胶状物析出. 据统计,右岸坝基约有三分之一的排水口可观察到此现象,析出物多的可阻塞排水孔口. 对此成因已有论述^[2],但只着重论述了析出物中铁、锰、钙等元素的迁移与富集,而与坝基软岩性状变化有关的 SiO₂,Al₂O₃ 迁移与富集研究很少. 新安江坝基析出物化学成分取样分析 42 个,其中 SiO₂ 含量一般不超过 10%,但约有 25% 的样,含量在 20% 以上,最高达 59.57% (表 2),此在三种颜色析出物(红、黑、白)中均有,从分布上看,绝大多数分布在河床坝基,右岸仅 2 个,左岸没有. 析出物经 X 射线分析,不产生衍射峰,表明均为非晶质胶体.

d. 右岸坝基部分排水孔出现塌孔淤堵,此多发生有页岩的排水孔内,孔内淤积物最厚可达 27.27 m(灌 3—9),灌 2—3 孔连续扫孔 11 d,孔深曾扫至 29.56 m,但后又淤至 27.05 m. 淤积物岩性多为粉红、灰白、灰黑

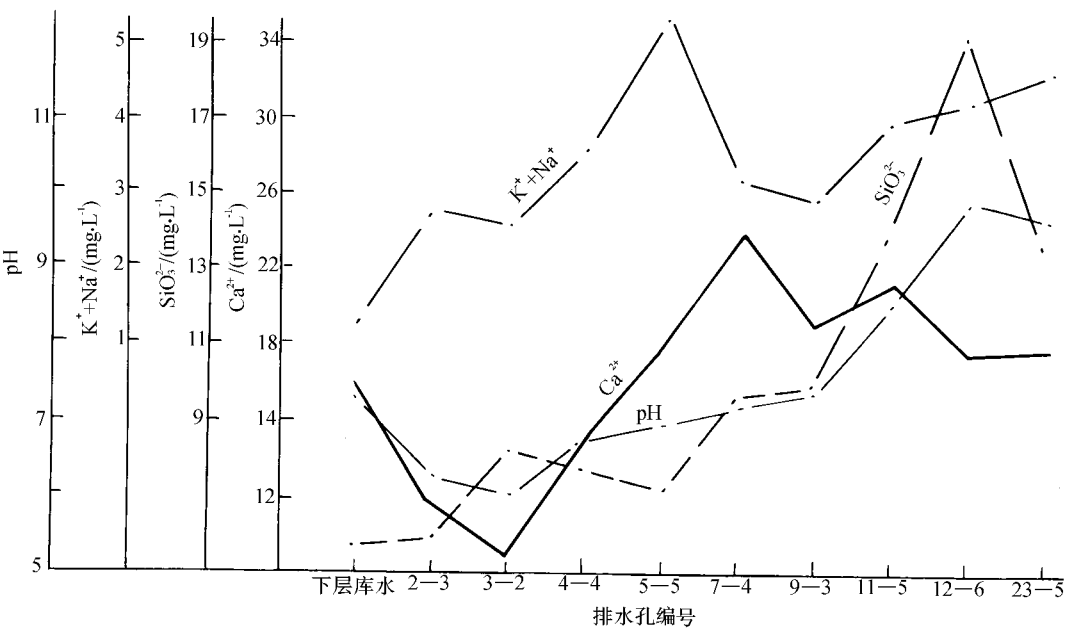


图 2 灌浆廊道排水孔水化学成分(1975 ~ 1983 年均值)

Fig.2 Chemical composition of water in drainage holes of grouting gallery(average for 1975 ~ 1983)

色页岩碎片及粉砂粒.经测试,这此淤积物的矿物成分为石英、白云母、叶腊石、高岭石等,与页岩成分一致.

表 2 部分排水孔口胶状析出物化学成分

Table 2 Chemil composition of colloidal coagulums at the drainage holes								%
排水孔号	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	烧失量	析出物特征
灌 3—2	29.89	30.74	5.78	9.92		0.20		棕红色
灌 4—6	4.0	75.90	1.17	0.36	0.06		19.20	棕红色
灌 7—4	0.85	0.54	0.27	41.01	1.36	0.27	36.68	白色
灌 11—5	30.83	8.48	2.67	22.21	痕迹	1.79	25.51	白色
1—2—C	2.41	78.41	0.11	0.29		0.17		棕红色
2—7—2	26.86	45.15	4.48	8.73		0.85	14.39	棕红色
2—11—2	59.57	7.34	6.47	9.85	1.35	0.31	17.71	浅棕黄色

注 2—7—2 代号为 2# 排水廊道 7 坝段 2# 排水孔.

鉴于上述异常迹象的存在,90 年代初,对坝基页岩性状进行勘查,勘察部门通过钻探取芯,“以野外目测鉴定结果为主要依据”^[3],认为坝址环境下页岩泥化有了发展,仅在坝基下 10 m 范围内,平均泥化比例达 30.55%.但由于钻进过程中机械力和水的作用,易使软岩岩芯泥化,故此并不能确切地说明岩层已发生泥化.如黄河盐锅峡大坝,曾依据钻孔泥化岩芯认为坝基存在多层泥化夹层,后经开挖竖井验证并不存在泥化夹层^[4],这是很好的例证.为此,必须对坝基页岩是否出现泥化层进行全面论证.

2 岩泥化机理及其判别依据

坝址环境下,软岩经水长期浸泡性状变化(泥化)的判别依据,首先应根据软岩泥化的机理.软弱夹层或软岩泥化机理在 70 ~ 80 年代,曾在有关坝址地质勘察中做了大量的研究工作,取得了长足的进展,研究成果表明软岩泥化是水与岩石间相互作用的产物^[5,6].地下水是一种溶液,在作用过程中,它导致了软岩部分易迁移元素被溶解、迁移或交换,造成软岩或原生矿物的粘土化.同时,在元素迁移过程中,水中的元素也可与原岩中难溶或残留的成分相互凝聚形成新的次生矿物,其结果使软岩(或软弱夹层)向泥或松散土转变,且保留原有的结构构造特征和原生矿物的假象,这种结论已从不同岩体的泥化带(层)形成机理研究中得到证实(表 3).

长江三峡坝址为花岗岩结晶岩体,在 F₅₄ 断裂带附近出露宽几厘米到 3 ~ 5 m 的泥化带中除残留原结晶

表 3 不同岩体原岩与泥化带矿物化学成分对比

Table 3 Comparison of chemical and mineral composition between argillous zone and different rocks

坝址	原 岩					泥 化 带(层)				
	岩石名称及 矿物成分	主要化学成分/%				岩石名称及 矿物成分	主要化学成分/%			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O
三 峡	闪云斜长 花岗岩	62.63	17.02	4.69	1.51	粘质粉土	67.93	14.12	2.37	2.23
F ₅₄ 泥化带	斜长石 55%, 石英 25%, 黑 云母、角闪石 等 20%					蒙脱石、伊利 石、埃洛石、水 铝英石、石英 石、方解石				
构皮滩	粘土质骨针 硅质岩	69.02	5.91	7.45		粘土-重粘土	48.42	20.06	2.89	
01 泥化层	玉髓 45%, 水云母 25%, 有机质 15%, 方解石 15%					伊利石、 高岭石				
葛洲坝	粘土岩	52.80	14.10	8.30		粘 土	52.50	23.80	0.70	2.60
202 泥化层	伊利石、蒙脱 石、绿泥石					伊利石、蒙脱 石、绿泥石				

岩石约 10% 的石英外,其余原生矿物(斜长石、黑云母等)均蚀变为次生粘土矿物(蒙脱石、伊利石),但仍保留斜长石晶形,并出现水铝英石、方解石等次生矿物.泥化物化学成分与原岩相比, SiO₂ 和 K₂O 含量增加, Al₂O₃ 和 CaO 相应减少.该泥化带已伸入地下新鲜岩体约 30 m.

乌江构皮滩坝址泥化层出露于二迭纪碳酸盐岩层所夹的页岩层中,页岩泥化仅发育于岸坡地段,厚 2 ~ 5 cm,其化学成分与原岩相比有了很大变化,原岩中 SiO₂ 和 CaO 含量减少,而表生环境下(pH = 4 ~ 9)惰性的 Al₂O₃ 相对富集,形成以伊利石、高岭石为主的粘土层.

葛洲坝坝基为白垩纪红色碎屑岩层,其中夹有粘土岩软弱夹层,岩性较紧密,主要为碳酸盐胶结.泥化层与原岩相比,粘土矿物成分未发生变化,但化学成分中 CaO 明显减少,铁、铝倍半氧化物含量相对增加.离子交换量不变,泥化层中含水量和总比表面积均有增加,这些说明粘土岩中的胶结物——碳酸盐被淋溶,是泥化层形成的主因.

上述三个泥化带(层)均是开挖后发现的,共同的特征是仍具有原生结构构造特征.

软岩泥化实例及其形成机理的研究为判别坝址环境下坝基软岩性状变化提供了重要依据,再结合坝址环境特征及渗流观测资料进行评判,是可以得出正确结论的.归纳起来,判别依据有四条:

a. 矿物成分的变化.泥化主要表现在原岩中矿物成分的泥化(风化蚀变)和次生粘土矿物的形成.葛洲坝坝基岩层时代新,红色粘土岩泥化过程最简单,仅是胶结物的水解、迁移.结晶岩中泥化带的形成过程最为复杂,历时长,其形成于距今 20 万年前的中更新世时期.

b. 化学成分的变化.坝址水环境的变化,有利于岩石中部分元素(呈离子或胶粒)的迁移与富集,软岩泥化必然反映在化学成份的改变上,尤其是岩石胶结物的溶解、迁移常是泥质岩泥化的主因.

c. 岩石的结构构造特征.泥化是地下水作用下的产物,泥化层保留着原岩的结构特征,但在钻进中易受扰动,原样结构特征不易保持,分析时应排除外力影响.

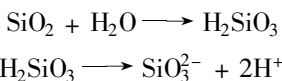
d. 坝基渗流特征.水质定期分析成果则是反映软岩中元素是否被水迁移的重要依据.排水孔口胶状析出物的沉淀,其成份与数量可反映软岩在水解过程中组分呈胶体迁移的特征及强度,而机械管涌的出现更是重要依据.

3 新安江大坝坝基页岩性状变化讨论

新安江大坝坝基页岩夹层主要分布在 1[#] ~ 4[#] 坝段基础,其中包括 Sh₁, Sh₂ 两条主要页岩层. 页岩矿物成分中以石英、白云母为主,在风化性状上此两种矿物属稳定、较稳定矿物,不易为水分解. 钻孔泥化岩芯和排水孔中页岩坍塌淤积物的矿物成分经测试,均与页岩一致,尽管淤积物在水中浸泡时期长,但矿物成分仍未发生变化,说明页岩抗水解性良好.

页岩化学成分中以硅、铝为主,含量达 85% ~ 90%,易溶和难溶盐含量甚少,其中钙、镁氧化物含量一般为 0.3% ~ 0.7%,最大仅为 1.88%,不属于胶结物成分. 页岩化学成分组合也说明页岩抗水解性良好. 从水中离子、胶粒迁移看,右岸坝基排水孔中的水中 Ca²⁺ 和 K⁺ + Na⁺ 含量甚少,尤其 2[#] ~ 4[#] 坝基水中 Ca²⁺ 的含量少于库水中的. 析出物中除灌 3—2 及灌 7—4 孔外,其余孔的 CaO 含量均小于 3%,灌 4—6 孔淤堵严重,析出物中 CaO 含量也仅为 0.36%,均反映出水中钙迁移量甚微. 水中钙的来源还包括混凝土和帷幕的溶蚀. 因此,从化学成分迁移来说,右岸坝基页岩除灌 3 ~ 2 孔外,不存在易溶或难溶盐因水解造成泥化层的问题.

SiO₂ 和 Al₂O₃ 是页岩中的主要成分,其迁移状况与页岩泥化密切相关. SiO₂ 在水中的迁移方式有两种:一是离子态,岩石、水泥中晶质、非晶质 SiO₂ 经水解,形成偏硅酸,进一步离解,以 SiO₃²⁻ 迁移,即



二是胶态,呈 SiO₂ 负胶体在水中迁移,在排水孔口以胶体沉淀.

SiO₂ 的溶解度大小与溶液的 pH 值有关,pH 值小于 9 时,其溶解度小且与 pH 值无关;pH 值大于 9 时,溶解度随 pH 值的增大而急剧加大. 多年水质监测成果表明(见图 2),右岸坝基中多为弱酸性与中性水,水中 SiO₃²⁻ 含量最高的灌 7—4 孔,含量为 9.64 mg/L,较库水中的含量高 3.88 mg/L. 其次为灌 3—2 孔,含量为 8.16 mg/L. 其余多与库水相近. 河床及左岸坝基水 pH 值多大于 9,因而水中 SiO₃²⁻ 较丰富,是库水中的 2.4 ~ 3.3 倍.

胶体析出物中 SiO₂ 的含量,反映出 SiO₂ 胶体的迁移程度. 右岸坝基灌 3—2 孔样含 SiO₂ 量达 29.89%,成为析出物中的主要成分,与该孔离子态 SiO₃²⁻ 含量较多相一致,反映出 SiO₂ 的迁移量较大. 灌 7—4 孔中的 SiO₃²⁻ 含量较大,但析出物中含量仅为 0.85%,SiO₂ 总的迁移量不大,河床坝基砂岩区析出物中 SiO₂ 的含量比右岸中的丰富,此与水的 pH 值高有关.

坝基地下水中 SiO₂ 的来源有三:一是库水,二是帷幕与混凝土的腐蚀,三是岩石(页岩与石英砂岩). 右岸坝基除灌 3—2 孔外,其余迁移量不大,且地下水处于弱酸性、中性环境,亦不利于硅的迁移,故右岸坝基总体上不存在由于硅的迁移而形成泥化层的条件.

Al₂O₃ 属惰性元素,在强酸强碱环境下才易迁移,在右岸坝基条件下迁移甚微,析出物中含量甚低即是佐证.

从地质环境考虑,右岸坝基处于倒转背斜反常翼,岩石倾角陡,挤压紧密. 据地面裂隙统计,裂隙率仅为 0.5% ~ 1.0%,以横张和剪切裂隙为主,层面裂隙不发育,页岩透水性差,为相对隔水层. 地下水分布不均匀,水仅存在于张开的裂隙中,此在大坝宽缝中基岩露头上很少见到地下水渗出,且坝基有干孔存在即是佐证,它说明坝基地下水分布很不均匀,不是所有的坝基岩石(包括页岩)均处于水的长期浸泡中(即处于地下水的作下),钻探取出的岩芯也证明了这一点. 因此,在地质、水文地质上均不利于页岩短期内形成泥化层.

右岸坝基灌 3—2 孔,无论是水中或析出物中 SiO₂ 的含量均较丰富,且邻近排水孔均常年排水(见图 1),其中灌 3—3 孔排水量为坝基最大的(扇形排水孔除外). 1970 年用食盐扩散法测定,在孔底附近渗透速度达 12.6 m/d. 从渗流量及水质两方面看,水中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的迁移量较大,是岩石受化学潜蚀即泥化的标志.

坝基排水孔淤堵物的矿物成分与页岩一致,说明钻孔坍塌主要是页岩在水和机械力作用下产生的物理破坏与软岩泥化关系不密切.

以上从矿物和化学成分变化,以及大坝地质环境特征三方面详细论述了坝基页岩总体上不存在泥化层,个别孔的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 迁移量较大与岩石性状变化有关,需进一步加强观测.

4 结 语

- a. 软岩泥化是水岩间相互作用的产物,即水岩间水文地球化学作用的结果,它导致了元素的迁移富集及矿物(包括胶结物)的演化,从而形成泥化层.从这一机理出发,结合坝址地质环境和渗流观测资料,提出的判别坝基软岩性状变化的四项依据是能成立的、可靠的.
- b. 从已有的资料(包括钻孔资料)分析,新安江大坝右岸坝基页岩总体上并未发生泥化,但存在局部泥化现象.
- c. 右岸坝基有析出物排出的孔有 36 个,但分析样仅 1/3,水样分析量也少,为进一步证实这一结论,还需要进行必要的勘探和更多的观测分析工作.

参 考 文 献

1 马晓辉,彭汉兴.新安江水电站软弱夹层初析.浙江电力,1992(6) :15 ~ 20
2 施希京,彭汉兴.新安江水电站坝基析出物成因分析.河海大学学报,1993,21(2) :65 ~ 71
3 吕兆富.新安江大坝 2,3 坝段页岩泥化勘探成果分析.大坝与安全,1993(3) :25 ~ 28
4 姚 仁.盐锅峡大坝坝基软弱岩层性状检查试验成果分析.大坝与安全,1994(3) :16 ~ 24
5 彭汉兴,吕民康,王建平.软弱夹层泥化过程中的水文地球化学作用.河海大学学报,1992,20(1) :73 ~ 78
6 曲永新.某水利工程泥化夹层的形成及变化趋势和研究.地质学报,1977(4) :17 ~ 21
7 施希京,彭汉兴,吕民康.一种岩体断裂泥化带的形成机理和矿物演化探讨.河海大学学报,1991,19(5) :76 ~ 82

Discussion on Characteristic of Shale under Xinanjiang Dam Foundation

Ma Xiaohui Peng Hanxing Yang Guangzhong
(Engineering & Technical Corporation , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Abstract A fundamental criterion is proposed on the basis of the survey and study on the softening rock argillization. The criterion involves the change of mineral and chemical composition structural characteristics and seepage flow. The characteristics of the shale under the Xinanjiang dam are judged by the criterion.

Key words softening rock argillization ; seepage flow ; water-rock interaction