

西安市黑河水库左坝肩渗透变形及稳定性分析

王勇智, 戚 炜, 赵法锁

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 通过对黑河水库左坝肩特殊的岩体组成及结构进行分析研究,以断层破碎带为主要研究对象,结合实验研究并运用有限元等计算方法,对单薄山梁的渗透变形及稳定性进行分析与计算,为实际工程的决策与治理提供理论依据。

[关键词] 左坝肩;单薄山梁;渗透变形;稳定性;黑河水库;西安市

[中图分类号] TU457 [文献标识码] A [文章编号] 1007-9955(2003)04-0067-06

[作者简介] 王勇智(1969-)男,江苏姜堰人,讲师,博士研究生,现从事地质工程与岩土工程教学与研究工作。

单薄山梁是一种较特殊的地质体,尤其是其中发育有特殊的岩体组成及结构特征时,在大的动水压力作用下,将产生复杂的工程地质作用。西安市黑河水库大坝左坝肩的单薄山梁在蓄水前就存在着严重的渗漏问题,这困扰着水库大坝的设计与施工。笔者通过对单薄山梁地区进行工程地质背景研究,以断层破碎带为主要研究对象,采用试验、模拟计算等多种方法对其渗透变形及稳定性进行分析研究。

中生代构造活动强烈,主要表现为逆冲推覆运动,加上后期山前深大断裂的影响,岩层褶皱强烈,并伴有许多次级小构造,断层破碎带分布普遍,多表现为层间错动的逆断层,并发育各种序次的节理裂隙。

1 工程地质背景

1.1 单薄山梁范围与地形

黑河水库坝轴线近东西走向,左坝肩为一近南北走向的单薄山梁,西临金盆古河道,东为黑河(图1)。其成因为隆升剥蚀,梁顶最高点高出现代河床200多米,呈现出西坡低缓东坡高陡的特征,山梁东坡——大坝左岸的坡度达 50° 以上。

1.2 岩土类型

研究区岩土类型主要为前震旦系宽坪群大镇沟组($AnZkd$)的变质岩和第四系松散堆积层,变质岩以云母石英片岩(Se)、绿泥石片岩(Sc)及钙质石英岩(Qu)为主,片理走向与单薄山梁走向垂直。

1.3 地质构造

水库坝址位于秦岭山前大断裂的下盘,由于古、

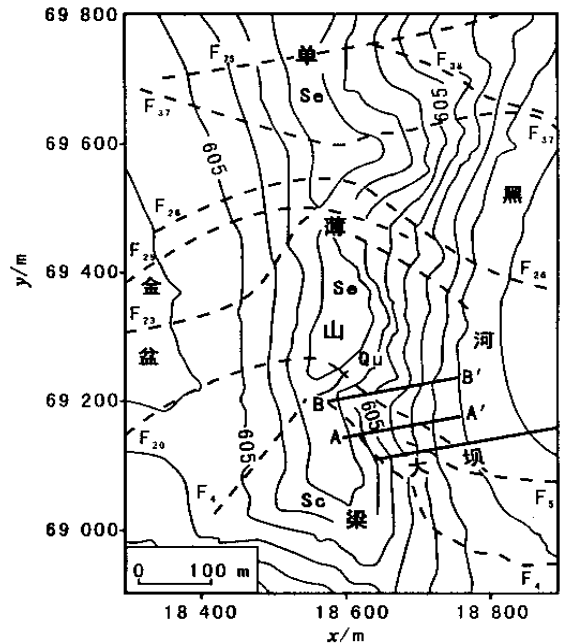


图1 研究区工程地质简图

Fig.1 Sketch of engineering geology map of the studied area

1.4 岩体结构面及其特征

研究区内岩体中结构面发育且分布复杂,其类型按成因可分为变质结构面和构造结构面两种,按规模和发育程度可分为II~V级4个级序。

变质结构面主要为片理,走向 $85^{\circ} \sim 110^{\circ}$,倾向 SSE 或 SSW,倾角 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,垂直最大主应力方向,为硬性 III 级结构面。

构造结构面包括断层、节理裂隙和层间错动面等。区内规模较大且对渗透变形起主要控制作用的断层共 8 条,从南向北依次为 F_4 、 F_5 、 F_{20} 、 F_{23} 、 F_{29} 、 F_{26} 、 F_{37} 和 F_{75} ,这些断层为软弱 II 级结构面。单薄山梁岩体中还发育多组构造裂隙,均为 III 级或 IV 级硬性结构面,近 SN 及近 EW 走向的较发育。

由于区内岩体结构面发育,各种不同产状和不同级别的结构面组合,将岩体分割成层状、薄板状及块状。各结构面成为岩体变形破坏的分割周界面或滑移分割面。

1.5 水文地质条件

大坝坝址区内地下水分为第四系孔隙水、基岩裂隙水和基岩承压水等 3 种类型。

单薄山梁段地下水位平缓,水力坡度较小($I = 0.025$),坡脚段水力坡度较大($I = 0.29$)。

对岩石的渗透性进行压水试验研究可得出以下规律:

(1)基岩弱风化层一般属中等透水层,微风化层属微—极微透水层。

(2)基岩透水性具有各向异性,透水层相互间隔不连续。

(3)断层泥透水性差,但断层破碎带透水性强,是渗漏的主要通道。

2 左坝肩渗透变形分析

岩体中渗透变形主要在软弱结构面上产生,对单薄山梁进行渗透变形研究就是要分析渗流动水压力与软弱结构面上抗渗力矛盾及其发展趋势。

2.1 渗透变形类型

据调查分析认为左坝肩单薄山梁中渗透变形形式有两种,分别相当于土体渗透变形中的物理化学潜蚀和管涌作用,以后者为主。渗透变形通过改变岩体的物理力学性质和渗透性质来影响岩体渗透稳定性。

2.2 单薄山梁岩体的渗透特征

通过对研究区内岩体工程地质特征的调查研究发现,在单薄山梁岩体中普遍存在断层破碎带、层间错动破碎夹层、节理裂隙夹泥和风化破碎岩体等 4 种软弱结构面。其渗透特征各具特点,对左坝肩的

渗透变形影响明显不同。

对左坝肩单薄山梁钻孔压水试验资料及导流洞施工地质资料综合分析后认为,单薄山梁山体中渗漏通道主要有沿 EW 向发育的规模较大且切穿单薄山梁与金盆古河道的断层破碎带,由南向北依次为 F_4 、 F_5 、 F_{20} 、 F_{23} 、 F_{29} 、 F_{26} 、 F_{37} 和 F_{75} 共 8 条,这些断层破碎带宽 $10 \sim 20$ m,深度较大。据钻孔压水试验资料统计,其单位吸水率为 $0.092 \sim 0.173$ L/min,对导流洞施工时的露水点进行统计发现,断层破碎带及其影响带渗漏量高达 $80 \sim 120$ L/min,最大达 210 L/min。

通过对单薄山梁岩组渗透变形特征的研究,证明断层破碎带是控制左坝肩单薄山梁岩体发生渗透变形破坏的主要因素。

2.3 岩组渗透变形试验研究

在主要切岭断层中取断层破碎带物质,依据水电标准(SD-128-035-87)进行软弱结构面高压渗透变形室内试验,取样 6 组 11 个,各种岩样的渗透变形特征值见表 1。

表 1 渗透变形试验数据统计

Tab. 1 Data of the filtration deformation test

岩样编号	$k_{20}/(\text{cm} \cdot \text{s})$	临界坡降	破坏坡降	备注
	$i = 1$	i_k	i_f	
F_{29-1}	1.20×10^{-5}	6.80	92.80	
F_{29-2}	5.20×10^{-5}	15.35	58.90	
F_{4-1}	6.00×10^{-5}	12.10	27.55	
F_{4-2}	1.90×10^{-5}	13.26	64.50	
F_{5-1}	3.00×10^{-6}	25.82	243.95	
F_{5-2}	5.00×10^{-6}	50.33	91.71	
F_{37-1}	1.30×10^{-6}	15.68	33.13	
F_{37-2}	7.20×10^{-6}	21.74	220.57	
F_{23}	1.30×10^{-6}	23.00	48.83	
碳质片岩 1	4.00×10^{-6}	44.48	94.00	
碳质片岩 2	2.00×10^{-4}	2.30		岩样中有较大裂隙

2.4 单薄山梁岩体渗透变形分析

通过上述研究及渗透试验分析可知,单薄山梁中的主要 8 条切岭断层破碎带对其渗透变形起主导作用。断层破碎带物质的临界水力坡度为 $6.8 \sim 44.48$,破坏时的水力坡度为 $27.55 \sim 243.95$ 。陕西省水利电力勘测设计研究院进行三维渗流模拟计算,分析其结果可知,未来水库正常蓄水后,在设置不同防渗帷幕方案的情况下,实际沿山体中产生的最大水力坡度为 1.544 ^[1]且均在灌浆帷幕附近,这

远远小于各主要切岭断层破碎带物质的临界水力坡度。所以从物理破坏的方式上分析,断层带物质不会发生渗透破坏。

3 左坝肩稳定性分析

对左坝肩单薄山梁稳定性进行研究,首先由三维有限单元法入手,分析整个单薄山梁的应力、变形及安全率特征,进而判断分析整个山梁的整体稳定性。结合三维渗流场模拟计算结论^[1]对蓄水前后有渗漏地段的边坡采用二维有限元及刚体极限平衡法进行分析计算,并确定其稳定性。

3.1 地质模型的建立

为建立地质模型,对地质条件进行简化。将单薄山梁分为 3 种主要介质: F₂₃ 断层以北为云母石英片岩(Se), F₂₃及 F₄ 断层间的 Se 与钙质石英岩 Qu 互层,采用强度较低云母石英片岩(Se), F₄ 断层以南为绿泥石片岩(Sc);构造只考虑上述 8 条主要断层的影响,岩土物理力学参数,经取样、室内常规试验、直剪试验,结合本研究的相关系列成果,取值见表 2~3。

表 2 未蓄水、无地震工况下计算参数

Tab.2 Selected parameters in the calculation of the no-water and no-earthquake conditions

岩土材料名称	$E/(MPa)$	μ	$\gamma/(MN/m^3)$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	$\tau_t/(MPa)$
绿泥石片岩(Sc)	6 000	0.15	0.03	3.5	38	4.7
云母石英片岩(Se)	5 000	0.17	0.028	1.5	35	3.5
松散物(Q ₄)	0.1	0.35	0.02	0.015	20	0.001
F ₄ 断层带物质	420	0.4	0.027	0.040	32	0.001
F ₅ 断层带物质	360	0.4	0.027	0.030	31	0.001
F ₂₀ 断层带物质	350	0.35	0.027	0.020	30	0.001
F ₂₃ 断层带物质	340	0.35	0.027	0.026	31	0.001
F ₂₉ 断层带物质	400	0.35	0.027	0.023	30	0.001
F ₂₆ 断层带物质	340	0.35	0.027	0.023	30	0.001
F ₃₇ 断层带物质	400	0.35	0.027	0.030	31	0.001
F ₇₅ 断层带物质	360	0.35	0.027	0.025	30	0.001

3.2 力学模型的建立

为了简化计算所用有限元力学模型并符合荷载及边界条件,便于离散化方案的实施,特作假设:

(1) 岩体符合小变形情况下的线弹性及弹塑性基本假定。

(2) 计算模型沿 x 轴方向(正东方向)取地理坐标 18 400~18 800,沿模型 z 轴方向(正南方向)取

表 3 蓄水后有地震、暴雨工况下计算参数

Tab.3 Selected parameters in the calculation of the extreme conditions

岩土材料名称	$E/(MPa)$	μ	$\gamma/(MN/m^3)$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$	$\tau_t/(MPa)$
绿泥石片岩(Sc)	6000	0.15	0.03	3.5	35	4.4
云母石英片岩(Se)	5000	0.17	0.03	0.5	32	3.0
松散物(Q ₄)	0.1	0.37	0.025	0.005	15	0.001
F ₄ 断层带物质	420	0.41	0.028	0.012	18	0.001
F ₅ 断层带物质	360	0.41	0.028	0.005	15	0.001
F ₂₀ 断层带物质	350	0.37	0.025	0.012	16	0.001
F ₂₃ 断层带物质	340	0.37	0.028	0.005	15	0.001
F ₂₉ 断层带物质	400	0.37	0.028	0.012	18	0.001
F ₂₆ 断层带物质	340	0.37	0.028	0.012	18	0.001
F ₃₇ 断层带物质	400	0.37	0.028	0.005	15	0.001
F ₇₅ 断层带物质	360	0.37	0.028	0.012	16	0.001

地理坐标 68 800~69 800,沿模型 y 方向(高程方向)取高程 400~700 m,计算模型及成果均以此坐标为准。东西南北 4 个侧面为水平杆约束,底面 3 个方向自由度全部约束,山梁东侧坝体范围采用水平 x 方向约束。

三维有限元分析计算过程中采用 8 节点块体单元进行结构离散化分析。应用岩土工程分析软件包——3D-Sigma 进行计算分析,其结果最终可直接获得。

3.3 计算及分析结果

3.3.1 三维有限元计算

3.3.1.1 计算荷载及工况

(1) 计算荷载组合:自重和地震惯性力。岩体自重按体力施加,并转换为等效节点荷载作用在各节点上。地震惯性力水平向东,地震影响系数取值为 0.125,程序将每一个单元上的惯性力转换为等效节点荷载作用在各节点上。

(2) 计算工况两种:未蓄水无地震力(天然工况)和蓄水有地震有暴雨(极端工况)。

3.3.1.2 计算及分析成果

将有关数据输入计算机,运行 3D-Sigma 软件包,可获得三维立体地质模型和三维有限元剖分图以及在天然工况和极端工况下,最大主应力、安全率及剪应力图^[2]。分析计算结果可知:

(1) 在以上两种工况下,单薄山梁上 F₄、F₅ 和 F₂₀ 断层交汇处以及 F₂₃ 与 F₂₉ 断层之间山梁顶的中

间地段均出现了拉应力集中现象,且拉应力较大,为 0.9 MPa 左右, F4 断层顶部由于片理产状与坡向一致,顺坡向也出现局部范围拉应力集中现象。

(2)在水库蓄水后,坝址一侧山梁上拉应力比天然工况下要小,这是由于坝体起到支护作用。但对于金盆段,由于在 594 m 以上沿坡面出现大范围拉应力区,其值在 0.1 MPa 左右,这对边坡坡积物稳定性是不利的。

(3)在以上两种工况下,沿坡面均出现剪应力集中现象,说明坡面有出现剪切破坏的可能性,但只是局部剪裂,不会发生整体破坏。

(4)从 F_4 、 F_{23} 、 F_{29} 和 F_{37} 断层最大主应力图^[2]对比分析发现,在天然工况下拉应力区主要集中在断层所在的山顶部位,在极端工况下,拉应力区有向坡两侧转移的趋势,特别是在金盆一侧这种趋势更加明显。

(5)安全率由计算结果分析可知^[21]:天然工况下整个单薄山梁的整体稳定性要高于极端工况。在后种工况下,沿断层面及金盆段出现安全率 < 1 的情况,局部出现坍塌破坏与剪切破坏,但整个山体是稳定的。

3.3.2 二维有限元计算

3.3.2.1 剖面位置及工况

在分别位于大坝轴线及坝址附近的两处渗漏带布置东西向的两条剖面 A-A', B-B' (图 1),对两剖面 (图 2, 图 3) 运用二维有限元并分别对无蓄水 + 无地震力 (天然工况)、蓄水 + 地震力、蓄水 + 地震力 + 暴雨 (极端工况) 等 3 种工况进行计算。

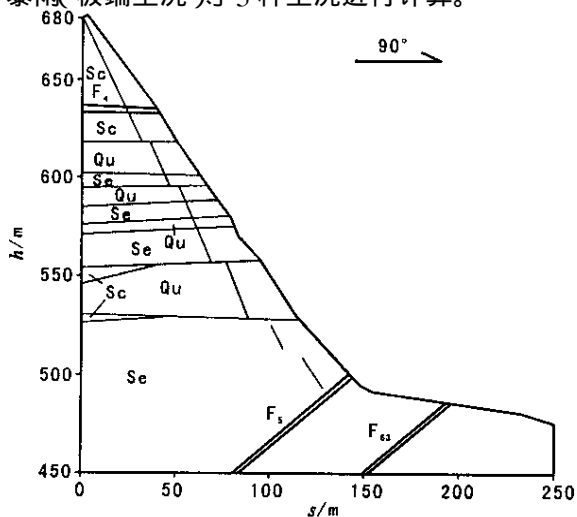


图 2 A-A'地质剖面示意图

Fig. 2 Sketch of A-A' geological section

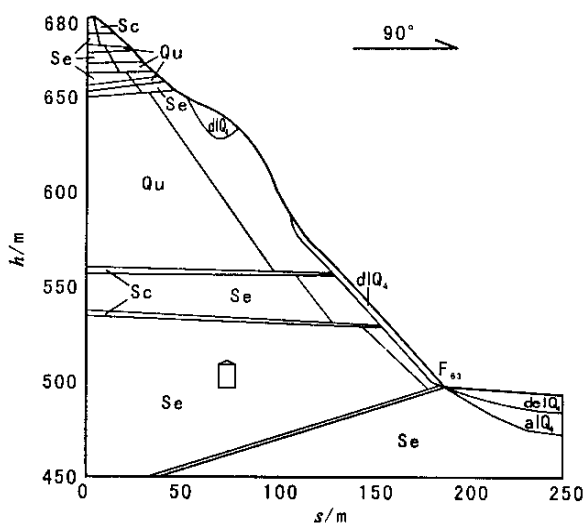


图 3 B-B'地质剖面示意图

Fig. 3 Sketch of B-B' geological section

计算采用 2D-Sigma 软件包,通过该软件计算,可提供破坏接近度、应力、应变等计算结果^[2]。

3.3.2.2 计算成果分析

(1)对于 A-A' 剖面所处的边坡,在天然工况下,坡体整体是稳定的,只是在边坡上部 F_4 断层出露处有局部的破坏。在水库蓄水的情况下,考虑地震影响,沿边坡中与坡面平行的节理裂隙及岩层层理面有局部破坏现象发生。而且在断层 F_5 与 F_{63} 中也出现了局部破坏状态,但边坡内部尚未形成贯通的破坏面,边坡整体仍是稳定的。若考虑有暴雨的影响,上述边坡发生破坏部位的范围相对更大,破坏扩大的范围主要是在边坡表部受到雨水浸润的边坡内,沿节理裂隙与层理面有局部的连续破坏,但在边坡中仍未形成连续贯通的破坏面。

(2)对于 B-B' 剖面所处的边坡,在天然工况下,坡体整体也是稳定的。在水库蓄水情况下考虑地震影响,在边坡中沿着与坡面平行的节理裂隙及层理面有破坏现象发生。在坡脚附近,形成了局部贯通的破坏面,出现小范围破坏。边坡表部所覆盖的坡积物发生破坏,但未形成贯通的破坏面,整体仍是稳定的。若考虑暴雨的影响,边坡中出现破坏部位的范围相对更大,破坏主要出现在边坡表部,因岩体受到雨水的浸润将沿其节理裂隙与层理面形成局部的贯通面。

3.4 极限平衡分析

3.4.1 计算剖面和计算模型的建立

极限平衡分析法所选用的计算剖面与二维有限元分析法所选用的两个剖面完全一致。通过运用剩

余推力法对左坝肩这两处岩体边坡计算其不同情况下的稳定性。

据前述分析可知,由左坝肩岩体面中普遍发育的一组节理裂隙与岩体的片理面组成潜在的折线型滑面,由此可建立 A-A' 剖面 and B-B' 剖面的计算模型(图 4,图 5)。

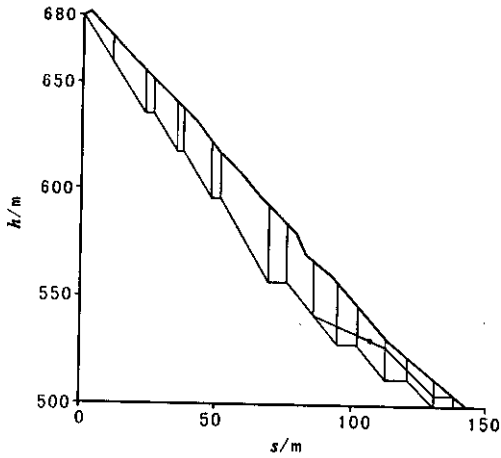


图 4 A-A' 剖面计算模型

Fig.4 Calculation model of potential slip plane A-A'

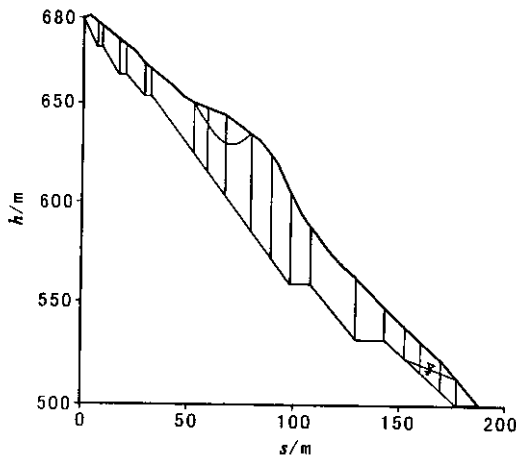


图 5 B-B' 剖面计算模型

Fig.5 Calculation model of potential slip plane B-B'

3.4.2 计算参数的选取

结合研究结果,综合选用极限平衡分析计算,所用参数见表 4。

作为影响斜坡稳定性的地震力,计算过程中按Ⅶ度地震烈度考虑,地震系数取 0.125,方向水平指向坡外。

考虑水库正常蓄水后,水库水位高程为 594 m,左坝肩单薄山梁中地下水位抬升,水位线埋深资料由三维地下水数值模拟计算获得^[1],在地下水位线以下的坡体计算中采用饱和重度、饱和内聚力和饱和摩擦角数据

表 4 极限平衡分析计算参数选取
Tab.4 Selected parameters in the analysis and calculation by the limit equilibrium method

材料类型	含水状态	$\gamma/(kN/m^3)$	c/MPa	$\varphi/(^\circ)$
强风化钙质石英岩	干燥	27	5.0	38
强风化钙质石英岩	干燥	26	2.0	35
强风化绿泥石片岩	干燥	26	3.0	35
弱风化绿泥石片岩	干燥	27	5.0	40
强风化云母石英片岩	饱水	28	4.5	38
强风化云母石英片岩	干燥	24	2.5	30
弱风化云母石英片岩	干燥	27	3.0	35
弱风化云母石英片岩	饱水	28	2.0	35
节理裂隙			0	20-30

3.4.3 计算结果及分析

将 A-A' 及 B-B' 剖面计算模型的剖分坐标及相关参数输入极限平衡剩余推力法计算程序进行计算,其结果见表 5。

表 5 边坡极限平衡稳定性计算结果

Tab.5 Calculated results of slope stability by the limit equilibrium method

计算剖面	A-A' 剖面的稳定性系数 k	B-B' 剖面的稳定性系数 k
未蓄水无地震	1.597	1.369
蓄水无地震	1.163	1.118
蓄水有地震	0.955	0.908

4 结论

(1)左坝肩单薄山梁岩体中沿东西向的 8 条切岭断层,规模较大,对单薄山梁的渗透变形起主导作用。

(2)通过渗透变形试验获得的断层带物质的临界水力坡度远大于单薄山梁中正常蓄水条件下,实际产生的最大水力坡度。因此,从物理破坏角度分析,断层破碎带不会发生渗透破坏。

(3)左坝肩单薄山梁在水库正常蓄水,并考虑有地震有暴雨等极端条件下,山体整体稳定性与目前状况相比要差,但整个山体是稳定的,局部会出现坍塌破坏与剪切破坏。

(4)对天然状态及水库正常蓄水条件下坡体稳定性分析,结果表明:拟建水库在未来蓄水情况下,坡体处于稳定状态,但安全储备不高,如有地震力作用并考虑暴雨的影响,岩体边坡都有发生变形破坏的可能性。

(5)考虑到室内渗透变形试验的局限性及断层带物质遇水后发生复杂的化学效应以及极端工况下,由于特殊的岩体组成及结构,局部岩体边坡的稳定性大大降低,不排除在单薄山梁岩体中发生渗透破坏的可能性。建议采取必要措施,进一步降低单薄山梁岩体中的水力坡度,防止渗透变形的发生,同时加固已有和将要发生渗漏的主要边坡坡岸。

[参 考 文 献]

[1] 刘登贵,等.西安市黑河引水工程金盆水利枢纽左岸单薄山梁

水文地质补充勘察及渗漏成因、工程危害与防治措施研究报告 [R].西安:陕西省水利电力勘测设计研究院,1999.

[2] 王勇智.黑河水库左坝肩单薄山梁渗透变形及稳定性研究 [D].西安:长安大学,2000.

[3] 赵法锁,等.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.

[4] 王思敬.坝基岩体工程地质力学分析 [M].北京:科学出版社,1990.

[5] 孙广忠.岩体结构力学 [M].北京:科技出版社,1988.

[6] 罗国煜,等.岩坡优势面分析理论与方法 [M].北京:地质出版社,1992.

ANALYSIS ON THE STABILITY AND INFILTRATIONAL DEFORMATION OF THE LEFT DAM SHOULDER OF HEIHE RESERVOIR , XI'AN CITY

WANG Yong-zhi , QI Wei , ZHAO Fa-suo

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering ,Chang'an University ,Xi'an 710054 ,China)

Abstract : The special rock mass compositions and structures especially the fault fracture zones of the Left Dam Shoulder of Heihe Reservoir are studied. After applying the simulated tests and the finite elements method , the stability and infiltrational deformation of filmsy the mountain have been analyzed and calculated. All the results are of important referential value for the decision-making and design of practical engineering projects.

Key words : left dam shoulder ; filmsy mountain ; infiltrational deformation ; stability ; Heihe reservoir ; Xi'an city

重 要 启 事

经报请国家科技部、国家新闻出版总署批准《西安工程学院学报》(长安大学学报地球科学版)从 2004 年起更名为《地球科学与环境学报》。

本刊的名称变化及对应的卷号如下：

1979~1997 年	西安地质学院学报	1~19 卷
1998~2002 年	西安工程学院学报	20~24 卷
2003 年	长安大学学报(地球科学版)	25 卷
2004 年~	地球科学与环境学报	26 卷~

本刊编辑部衷心感谢广大作者和读者曾给予本刊的关心与支持,并真诚欢迎地学界科技人员继续赐稿或订阅本刊(邮发代号 52-280)。

本刊地址:西安市雁塔路南段 126 号长安大学雁塔校区 邮政编码:710054
电话 029-5585151

《地球科学与环境学报》编辑部