

羊毛湾水库土坝裂缝产生与成因分析

张伯平¹,董玉文¹,宋俊儒²,王亚峰³

(1.西北农林科技大学水建学院,陕西 杨陵 712100;2.咸阳市水利机械施工公司,陕西 咸阳 713300;
3.咸阳市水利水电勘察设计院,陕西 咸阳 712000)

摘要:分析了羊毛湾水库土坝裂缝的产生和发展过程,认为主要是由于大坝右坝段下伏黄土层在正常高水位浸水湿陷所致.黄土结构性在排列和联结两方面具有涵盖其粒度、密度和湿度等对土性影响敏感的功能,所以浸水湿化后结构强度不断丧失产生湿陷变形,而且湿陷变形具有突变性、不连续性及不可逆性等失稳破坏特征,使湿陷性黄土的体变与剪切变形同时发生,且随着一次又一次正常高水位蓄水使其浸水而变形发展,累积在坝体至坝面出现隐裂缝和显裂缝.针对以上分析和勘察试验研究探讨了对坝体的除险加固措施.

关键词:黄土湿陷;土坝裂缝;加固措施

中图分类号:TV641.2;TU311 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2002)01-0098-06

羊毛湾水库位于陕西省乾县以西 30 km 多的漆水河中游,控制流域面积 1 100 km²,总库容 1.20 亿 m³.水库始建于 1958 年,1962 年停工缓建,1966 年复工续建,1969 年 12 月下闸蓄水,1973 年 5 月枢纽全部建成,是渭北高原修建最早的大型水库.

由于水库座落在岩溶发育的石灰岩基上,坝基第三系红土砾石层基本缺失,右坝段坝体下伏厚度约 9~22 m 湿陷性较强的黄土,致使投入运行以来出现大坝裂缝、坝区塌坑和“龙头”漏水等问题,被列为全国 43 座重点病险库之一.

1991 年由陕西省水利厅负责,委托了省内外 5 个大的科研院所做了大量的勘察、试验研究工作,并请全国 40 位专家专门开会,对该水库大坝进行安全论证,在此基础上对水库渗漏和坝区塌坑问题进行了多次反复补救处理,对大坝裂缝进行观测.本文是在 1991 年大坝安全论证会论证意见和多年观测资料分析及试验研究的基础上,对大坝裂缝的产生与成因进行分析,并提出处理措施.

1 土坝变形观测与裂缝查验情况

1.1 土坝概况及变形特征

水库大坝属碾压壤土均质坝,其右坝段(0+400~0+600 m)下存在厚度约 9~22 m 的强湿陷性黄土(图 1 和图 2).因此水库大坝变形有两个显著特点:其一是坝体在上覆土体自重作用下的压缩变形;其二是下伏湿陷性黄土层浸水后的湿陷变形.后期补做试验证明右坝段下伏黄土层均为 Q₃ 和 Q₄ 黄土,湿陷系数分别为 0.085 和 0.066,均属强湿陷性黄土,是工程修建时留下的隐患.试验资料见表 1.

表 1 坝体碾压土与下伏 Q₃、Q₄ 黄土土性试验结果

Table 1 Test results of compacted soil of dam body and underlying loess Q₃ and Q₄

土层名称	含水量/%		干容重/(kN·m ⁻³)		土粒比重 G	孔隙比		湿陷系数 δ _s (蓄水前)
	蓄水前	蓄水后	蓄水前	蓄水后		蓄水前	蓄水后	
碾压黄土	19	19~20	16.0	16.3	2.72	0.7	0.68	
Q ₄ 黄土	12.1		13.5		2.72	1.021		0.066
Q ₃ 黄土	13.0	23.7	12.3	14.1	2.71~2.73	1.21	0.93	0.085

收稿日期:2001-01-02

作者简介:张伯平(1945—),男,陕西蒲城人,副教授,主要从事岩土工程研究.

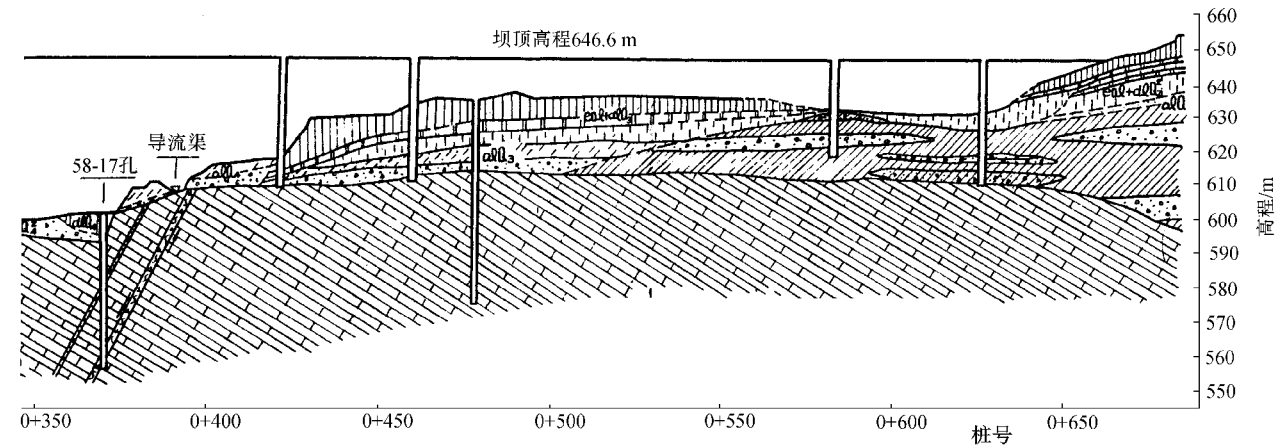


图 1 坝轴线右坝段工程地质剖面

Fig.1 Geological profile of right dam section

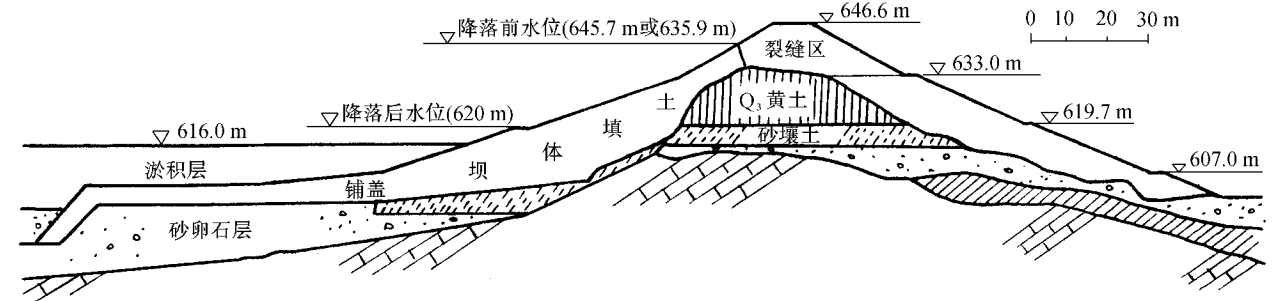


图 2 0+460 坝体断面

Fig.2 Cross section of dam body at 0+460

1.2 土坝变形观测和裂缝检查情况

截止 2000 年,水库蓄水 30 年,有 3 次达到正常高水位 635.9 m,累计天数 258 d,其中 1984 年汛末至 1985 年春,连续 181 d 水库水位在 635.6 m 高程以上,是水库高水位蓄水最长时段。

大坝变形观测是从蓄水后第 7 年开始的,即 1976 年 11 月,既未测到施工期填土的变形,又未赶上 1970 年前后水库初期较高蓄水位时 Q₃ 和 Q₄ 黄土湿化引起的湿陷变形观测。但从 1976 年以来的观测和多次大坝裂缝探测检查结果,仍取得了许多宝贵的资料。

1.2.1 坝体表面纵向裂缝情况

大坝右坝段(桩号 0+327~0+642)背水坡高程 639 m 以上坝面先后出现三组纵向裂缝,最大缝长 297 m,深 4.4 m,缝宽 8 cm,裂缝是随库水位抬升、运用年限增长、自坝顶向背水坡依次产生,由右坝段桩号 0+407~0+561 段最先产生,然后向坝中部河槽部位延伸,详见表 2。

表 2 大坝纵向裂缝的特征

Table 2 Characteristics of longitudinal cracks

裂缝编号	发现日期	库水位 <i>H</i> 变化情况	裂缝高程 <i>Z</i> /m	裂缝初期位置桩号	初见裂缝		最终裂缝	
					长度 /m	宽度 /mm	长度 /m	宽度 /mm
1	1973-07-28	首次蓄至 630 m 以上,然后再降至死水位	646.6	0+532~0+561	28.4	4	向南 120~向北 82	20
2	1973-07-28	首次蓄至 630 m 以上,然后再降至死水位	643~644	0+441.3~0+458.3	17	20	向南 88~向北 192	60
3	1978~1979 年	第二次蓄至正常高水位,然后降至死水位	639~641.4	0+407.1~0+466.5 0+424.7~0+476.1	17.6 及 9.6	8 及 3	向南 80~向北 126	11
4	1984~1985 年	第三次蓄水至 635.9 m 以上,连续 181 d	636 高程附近	0+470~0+475	5	3	20	8
1~3	1984~1985 年	第三次蓄水至 635.9 m 以上,连续 181 d	与前述对应	与前述对应			20~50	5~20

由表 2 可见,首次高水位蓄水时,首先在右坝段的下游坡上端开裂产生纵裂缝,第二次高水位后才向南错开延伸,每次开裂都在水库高水位后水位下降较深时发现,裂缝发展、延伸及扩宽的速度,以初次蓄水时最快,第二次短暂高水位时发展减慢,而第三次长期(1984~1985 年)高水位时裂缝发展速度又回升,2 号裂缝和 3 号裂缝 1986 年还以每日约 10^{-5} 的应变速度在扩宽,直至 1987 年后才基本稳定,详见图 3。

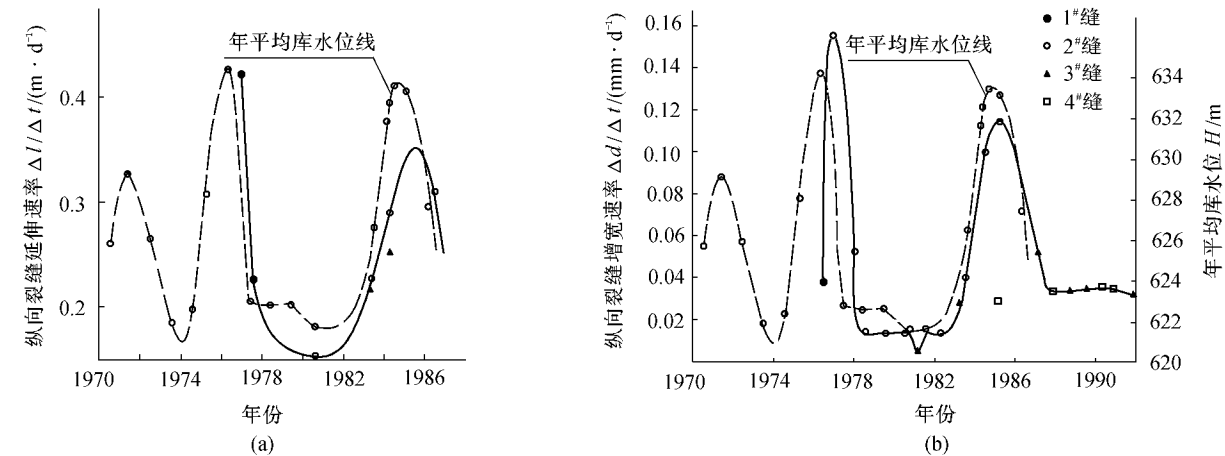


图 3 裂缝发展速度与水库蓄水位变化对应关系
Fig.3 Development rate of crack vs. water storage level

1.2.2 坝体横向裂缝情况

坝体表面先后出现横向裂缝 4 条,均出现在右坝段桩号为 0+420~0+450 和 0+518~0+650 段坝顶防浪墙,缝宽一般 4~6 mm,最严重的一条在桩号 0+573 处(称 2 号横裂缝),最大缝宽 10 mm,缝深约 4.3 m,1987 年 4 月发现后已经处理,后经观测,裂缝仍有扩张趋势,但极微小。

1.2.3 坝体内部隐蔽性裂缝

1980 年安装坝体浸润线测压管时,在坝桩号 0+292 0+373 0+479 0+591 和背水坡(距坝轴线 18.6 m)桩号为 0+479 等 5 个钻孔中,高程为 623~638 m 处发现漏水现象,漏水量约 10~29 m^3/h ,后又在桩号 0+373 处挖井检查,发现在高程 621~624.5 m 处有隐蔽性纵向裂缝。

1.2.4 大坝坝体位移和变形观测

以大坝水平位移观测资料绘制坝体横向位移曲线(图 4(a)),可以看出,由于坝体右坝段下伏黄土在高水位下浸水湿陷,致使坝体右坝段下游坡面上端和坝轴线附近坝体均向上游水平位移,最大位移量在坝上游坡上端,测至 1987 年秋在坝顶下游约 14 m 坡面(即高程约 632 m)处的坡体向上游水平位移约 10 mm 左右,上游坝坡越偏下端位移量越小,而下游坡下端则向下游水平位移,但位移量很小。以大坝坝体沉降变形观测资

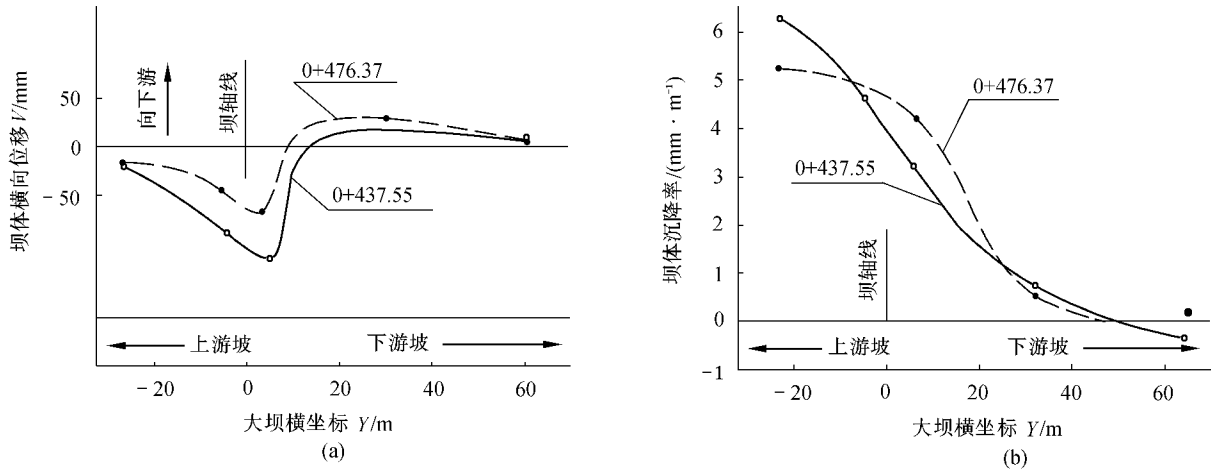


图 4 坝体变形的横向分布
Fig.4 Transverse distribution of dam body deformation

料除以观测点坝高(包括填土厚度和黄土台地厚度),可得坝体各观测点的坝体沉降率(mm/m),画出最大变形断面沿大坝横坐标的坝体沉降率(图 4(b)),从图 4(b)可以看出最大沉降率出现在坝轴线附近,而在下游坡的上端沉降率出现突变,其中断面 0+476.37 的沉降率由 4.3 mm/m 降到 0.5 mm/m ,而断面 0+437.55 的沉降率由 3.2 mm/m 降到 0.7 mm/m ,这样便在下游坡上端出现不同部位的差异沉降和变形,这与坝体水平位移方向突变区间相吻合,是坝下游坡面上端出现多条纵向裂缝的原因所在。

2 土坝变形及裂缝开展的理论分析

羊毛湾水库大坝的变形主要是水库蓄水后黄土覆盖层湿陷引起的,湿陷性黄土在间歇高水位蓄水,且又降至死水位的情况下,对大坝变形影响一直在间断发生。水库的三次 630 m 高程以上蓄水的入渗和坝体自重使黄土胶结削弱,结构强度逐渐丧失,库水位下降又会解除土体的悬浮状态,增大土骨架的有效应力,以致土体结构破坏而下陷,初次湿陷尤为强烈,后二次高水位时,因浸渍范围扩大,提高了土的饱和度,然后水位再大幅降落,相当于压缩应力又大量提高,这时大坝变形和开裂又急剧发展。由于坝体各段湿陷性土层厚度差异很大,同时坝上游坡比下游坡浸水快而充分,所以上部坝体向库区和向河谷位移,以致与相对不动的坝体拉裂,在湿陷性黄土区及其近旁坝体出现纵、横裂缝。

从更深刻的意义分析,综合表征土结构性在排列和联结两个方面的指标(土结构性参数或构度)将会在一定程度上具有涵盖粒度、密度和湿度等对土力学性质特征影响的功能,即反映 3 个因素的功能^[1],黄土由于其显著的柱状节理和大孔隙结构形成特殊结构性与其力学性能紧密对应,其联结特征为结构的可稳性,土粒的排列特征为结构的可变性,黄土可稳性和可变性均较强,使其为结构性较强的土。可稳性主要在荷载增长的前期起作用,可变性主要在荷载增长后期起作用,没有可稳性的丧失,就不会有可变性的发挥。可稳性的丧失是一个损伤过程,量变引起质变,其后果是初始结构由调整到破坏。可变性的发挥是一个愈合过程,其后果是次生结构的形成和发展。羊毛湾水库大坝右坝段下伏厚层黄土在大坝荷载压力和高水位时库水入渗浸渍共同作用下,既使土颗粒排列方式和联结特性发生改变,土中的化学物质胶结弱化、溶解,联结力减小,又使水膜楔入,使黄土中架空孔隙失稳变化,黄土的结构势释放,柱状节理破坏,大孔隙结构丧失,发生湿陷变形。

由于黄土湿陷变形具有突变性、不连续性、不可逆性等失稳破坏特征^[2],且黄土湿陷变形对土体的结构参数和物化参数的变化十分敏感,所以羊毛湾水库每次高水位时都会引起下伏黄土的湿陷变形。坝体各部位不均匀的体积变形伴随而来发生剪切变形及坝体的位移,又由于土体原孔隙结构失稳破坏后形成较稳定的结构越来越多,即使应力增加的幅度较大,但发生失稳破坏的孔隙体积却越来越小,反映在体积变形会随应力的增长变缓。湿陷性黄土属欠压密土,剪应力作用下将发生体缩效应,且剪应力越大体缩越显著,这种现象属剪应力与体应变的交叉效应^[3]。大坝土体在体积变形与剪切变形共同作用下出现纵、横隐裂缝和显裂缝,且随着一次又一次的体积变形和剪切变形,使其裂缝延伸和变宽。

由于黄土存在着未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷^[4],在双线法湿陷试验中,浸水压缩曲线与不浸水压缩曲线之间的变形系数差被称为该土样在该压力下的饱和湿陷系数或最大湿陷系数,而中间湿度下的湿陷系数称为未饱和湿陷系数,饱和湿陷系数(δ_s)与未饱和湿陷系数(δ_s')之差称为“剩余湿陷系数(δ_s'')”。

$$\delta_s'' = \delta_s - \delta_s' \quad (1)$$

所以羊毛湾水库大坝在每次蓄水高水位时都会发生新的变形,其坝体隐裂缝和显裂缝都会程度不等地伸延和发展。如果把羊毛湾水库大坝第一、二次短期高水位蓄水引起下伏黄土湿陷看作未饱和湿陷,那么第三次较长高水位蓄水自然会引引起下伏湿陷性黄土的继续湿陷,引起大坝新的裂缝的产生和发展,这就提示人们,羊毛湾水库第三次较长历时高水位蓄水时下伏黄土层是否达到饱和湿陷或最大湿陷,而下伏黄土层是否还会有剩余湿陷,这是对工程稳定性至关重要的量化分析,也是大坝采取处理措施和科学管理的重要依据。只要下伏黄土还有剩余湿陷量存在,就会继续湿陷,直至湿陷潜力全部消耗殆尽。

3 土坝裂缝的发展与加固措施

为了探清大坝裂缝现状和发展前景,2000 年对大坝裂缝进行了普查,同时对下伏黄土层取样进行了物理力学性质试验,并与 1991 年大坝安全鉴定结果比较,大坝裂缝数量和走向基本和 1991 年大坝安全鉴定时相同,无大的变化,只是下游坡面上 639~641.4 m 高程纵向裂缝宽度有所增加,最宽处达 80~100 mm,裂缝长

度增加不大. 对大坝右坝段下伏黄土试验分两个钻孔取样, 一是在纵裂缝最发育的坝段(0 + 450) 坝顶部位; 另一个是在纵裂缝尾端、横裂缝发育、黄土层较厚的右岸(0 + 530) 坝段, 试验结果如表 3.

表 3 2000 年春对大坝下伏黄土层取样试验结果

Table 3 Test results of the sample loess underlying the dam for 2000

取土点 桩号	取土点高程 /m	土层名称	含水量 ω /%	干容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和度 /%	土粒比重 G_s	孔隙比 e	湿陷系数 δ_s'
0 + 450	635 ~ 615	Q_3, Q_4 黄土	16.3	15.84	59.5	2.724	0.72	0.0046
0 + 530	635.6	Q_4 黄土	16	15.4	57.0	2.72	0.76	0.022
	631.6	Q_4 黄土	14	15.0	46	2.72	0.82	0.025
	627.6	Q_3 黄土	14	15.2	48	2.724	0.80	0.038
	623.6	Q_3 黄土	14	15.4	50	2.724	0.76	0.032

从表 3 可以看出坝体 0 + 450 段下伏黄土层湿陷系数 $\delta_s < 0.010$, 湿陷性已基本消失, 这是由于三次高水位蓄水已使该段黄土层得到充分饱和湿陷, 剩余湿陷量接近零, 所以可以推断坝体裂缝已经基本稳定, 不会由于黄土层的湿陷再发生发展. 而 0 + 530 坝段下伏黄土层湿陷系数均大于 0.010, 属湿陷性黄土, 特别是 Q_3 黄土层湿陷系数为 0.032 ~ 0.038, 属中等湿陷性黄土, 但与 1991 年大坝安全鉴定试验资料比较可以看出该黄土层已产生了大量非饱和湿陷. 根据公式(1) 的概念计算, Q_4 和 Q_3 黄土非饱和湿陷系数已分别达到饱和湿陷系数的 66% 和 59%, 剩余湿陷系数分别占饱和湿陷系数的 36% 和 41%. 若按湿陷性黄土层厚度计算剩余湿陷变形量, 该坝段 Q_4 黄土层厚度以 4 m 计算, Q_3 黄土层厚度以 10 m 计算, 则剩余湿陷量分别为 $0.0235 \times 4 = 0.094$ (m) 和 $0.035 \times 10 = 0.35$ (m), 合计为 0.444 m, 说明该段坝体下伏黄土层剩余湿陷还会给坝体造成一定威胁, 为了大坝安全, 必须对该段下伏黄土层进行认真处理.

首先应对坝体右坝段下伏黄土层进行充填灌浆, 以改变湿陷性黄土的大孔隙结构和柱状节理, 增大其干密度, 减小其孔隙比, 消除剩余湿陷量; 其次对填筑碾压坝体各部位进行劈裂灌浆, 一方面增大坝体的密度, 另一方面提高坝体填筑土体的均质性, 减小坝体的渗透性、坝体的变形以及不均匀沉降, 增大坝体的稳定性; 最后应对坝体及坝面原有的裂缝进行挖填处理, 以提高坝体的整体结构和坚固性.

4 小 结

a. 羊毛湾大坝裂缝是由于右坝段下伏黄土层浸水湿陷所引起的, 水库于 1969 年下闸蓄水后曾三次蓄水位达正常高水位, 后又降至死水位, 使下伏黄土层饱和浸水或非饱和浸水而发生程度不等的湿陷引起大坝变形, 致使坝体产生程度不等的纵横裂缝.

b. 下伏黄土的湿陷变形与填筑坝体不同的变形产生剪应力和剪切变形, 使坝体产生张裂缝和向迎水坡的横向变形, 所以该坝体裂缝是体积变形与剪切变形统一的突变模式或剪应力与体应变的交叉效应.

c. 由于三次正常高水位蓄水时间均不很长, 所以坝体 0 + 530 段下伏黄土层仍未达到饱和湿陷量, 即还存在一定剩余湿陷量, 约占饱和湿陷量的 36% ~ 41%, 合计剩余湿陷变形为 0.444 m, 所以从长远利益考虑, 必须认真进行加固处理.

d. 应首先对下伏湿陷性黄土层进行充填灌浆, 以消除剩余湿陷量; 其次应对填筑坝体进行劈裂灌浆, 以增加坝体密度和均质性, 最后应对坝体原有的裂缝进行挖填处理, 以提高坝体的整体结构和坚固性.

参考文献:

[1] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6) : 651 ~ 656.
[2] 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报, 1986, 19(3) : 86 ~ 94.
[3] 苗天德, 刘忠玉, 任九生. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4) : 383 ~ 387.
[4] 孙建中, 刘健民. 黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3) : 365 ~ 367.

Causes of Yangmaowan Earth Dam Cracks

ZHANG Bo-ping¹, DONG Yu-wen¹, SONG Jun-ru², WANG Ya-feng³

(1. College of Water Conservation and Architectural Engineering , Northwest Science and Technology Univ. of Agriculture and Forestry , Yangling , Shaanxi 712000 , China ;

2. Xianyang Hydraulic Engineering Construction Co. Ltd , Xianyang 713300 , China ;

3. Xianyang Hydraulic and Hydroelectric Engineering Design Institute , Xianyang 712000 , China)

Abstract :The causes of Yangmaowan earth dam cracks and the trend of their development are analyzed. It is considered that the immersion-induced collapse of the loess layer underlying the right dam body is the main cause. The loess structure is sensitive to some factors , including granularity , density , and moisture , so the weakening of the loess structure after immersion leads to collapse-induced deformation of the earth dam. The deformation failure has the characteristics of mutation , discontinuity , and unreversibility , resulting in the simultaneous occurrence of body and shear deformation. The reservoir storage at the normal high water level once and again promotes the dam body deformation , and the accumulation of deformation leads to the implicit and explicit cracks. Based on the above analysis and exploring tests , danger removal and reinforcement measures for the dam body are studied.

Key words : immersion-induced collapse of loess ; earth dam crack ; reinforcement measures

欢迎订阅

全国水利系统优秀期刊 江苏省优秀期刊

欢迎投稿

水利水电科技进展

新颖 实用 快捷



(也可直接汇款

双月刊 A4 开本 彩色封面 64 页 2002 年全年定价 30.00 元 全国各地邮局均可订阅

国际标准刊号 : ISSN 1006—7647

国内统一刊号 : CN 32—1439/ TV

国外发行代号 : DK 32003

至编辑部订阅
(中国出版对外贸易总公司)

另加 6.00 元邮费)
国内邮发代号 : 28—244

编辑部地址 : 210098 南京市西康路 1 号

联系电话 : (025) 3786335

电子信箱 : jz@hhu.edu.cn

银行账号 : 南京工行宁海路分理处

4301011409001024513