某水库左坝山体边坡土层变形开裂原因分析

陈小丹，谢应恩，曾进群，张　挺，杨光华

（广东省水利水电科学研究院，广东 广州 510610）

摘　要：某水库山体边坡发生滑动，边坡土体和坡脚挡土墙均产生变形开裂，对水库大坝和厂房等构成严重威胁，为查明该现象产生原因，本文进行了详细分析和计算，根据分析结果提出了具有针对性的处理意见。对类似工程，特别是水库大坝的应急除险及达标加固工程，具有一定的借鉴价值。

关键词：边坡；滑坡；加固；挡土墙；变形；开裂

作者简介：陈小丹(1974－)，男，硕士，高级工程师，主要从事岩土工程研究、设计和技术咨询工作。

0　工程概况

该水库是一座以防洪、灌溉、发电为主的中型水库，坝高约31 m，坝长约100 m，坝顶高程132 m，水库正常水位128.40 m，总库容约1500万m^3。

该水库大坝始建于1958年，2002年开始进行了除险加固。2003年5月连降大雨，坝后左岸山坡出现大面积滑坡，现场采取了卸荷和压脚等工程措施，在坡脚建浆砌石挡墙。

采取以上措施后，左岸山坡土体的变形和沉降仍然不稳定。由于土体变形和滑动，使坡面、排水沟和坡脚挡土墙均产生开裂破坏。该水库施工过程中，发现左岸山体有多处出现明显渗水情况，现场也可见坡面有多处渗水和积水现象。

目前，该边坡对水库大坝和厂房安全构成严重威胁。笔者对该边坡变形开裂和渗水原因进行详细分析，并在此基础上提出具有针对性的处理方案。

1　工程地质和水文地质

根据钻孔地质资料，左坝肩的地层为：① 页岩，全风化层厚约3.9 m，含炭质及泥质，风化破碎；强风化层厚约9.3 m，含碳质，较破碎，节理、裂隙发育。表层透水性较强，分布在左坝山体下游坡。② 粉砂岩，该层与含炭质、泥质页岩互层，全风化层风化破碎；强风化层较破碎，节理、裂隙发育。全风化及强风化层透水性较强，整个左坝肩山体均有分布。③ 石英砂岩，为弱风化－微风化，岩石较完整坚硬，表层节理、裂隙及层理较发育，透水性较强，分布在左坝肩及其上游。④ 石灰岩，中厚层、厚层状，弱风化－微风化，岩石坚硬完整，分布在左岸上游隧洞进口附近。

地表未见断层及断裂带出露，钻孔也未见有断层及断裂带揭露。地层产状为NW70－73°/SW58－65°，产状稳定。

此外，在水库左坝山体还布置了3个钻孔和5个探坑，对土料进行检测工作，后来又增加2个钻孔以查明土层厚度。根据检测报告，土层厚度2～5 m，左岸山体出现开裂和滑移的深度不大，主要为地表人工填土及坡积残积土滑动或蠕动，未见深层基岩滑动面。

根据土料检测报告，三个勘探位置土体内摩擦角φ和粘聚力c试验结果见表1。由表可见，土体的摩擦角变化幅度较粘聚力变化幅度小一些。

表1　土料试验结果对比结果

参数	内摩擦角φ		粘聚力c	
	所有土样	三个勘探位置	所有土样	三个勘探位置
变化范围	9.4～25.2	15.0～20.9	4～48	12.5～29.0
最大值/最小值	2.7	1.4	12	3.1

2　左岸边坡和挡墙变形开裂原因分析

2.1　左岸边坡变形开裂原因分析

根据分析，左岸边坡变形开裂是由于浅层土体的蠕动变形和滑动破坏所导致，该边坡的土层较薄，厚度约2～5 m。场地内虽然存在有炭质、泥质页岩等软弱夹层，层面倾向大坝下游右侧，但是由于岩层的倾角较大，约为60°，远大于边坡坡角，所以存在深层岩土体滑动的可能性不大。

导致土体蠕动变形和滑动的主要原因有以下几个方面：

(1) 边坡土质的影响

边坡的覆盖层主要为填土和坡残积土，土体松散，粘性小，遇水容易软化，抗剪强度显著降低。

(2) 绕坝渗漏的影响

在水库左岸山体存在较严重的绕渗现象。左坝肩山体的地层以粉砂岩为主，还存在石灰岩、页岩等岩层。粉砂岩风化后较松散，较破碎，透水性较强，可能成为渗漏主要通道；此外，也存在石灰岩、石英砂岩、粉砂岩、页岩接触处及地层的层面顺层渗漏可能。钻孔ZK0403中，发现该钻孔水位与库水位基本一致，说明山体渗漏现象存在是确切的。施工过程中发现山坡多处渗水也说明山体渗漏情况的存在。

(3) 边坡排水不畅的影响

该边坡虽然在平台上设置了排水沟，但坡面没有排水设施，加上边坡坡度较缓，所以土体内积水很难排走，导致土体长期浸泡。

(4) 降水的不利影响

天气情况的变化对表层滑动面的稳定性影响很大[1]。降雨将大面积影响边坡土体，由于边坡表层土砂性很重，降水很容易下渗，但却很难排出，导致土体长时间浸泡，物理力学指标显著下降。此外，降

收稿日期：2006－07－30

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

雨在浅层土体内产生顺坡向渗透力，也是导致边坡失稳破坏的一个重要因素。对边坡进行圆弧滑动分析，岩土参数取值见表2，计算工况和计算结果见表3。

表2 计算参数取值表

序号	土层	原状土体			扰动及浸泡软化后土体		
		容重γ /(kN·m^{-3})	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	容重 γ/(kN·m^{-3})	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
1	表层土	19.5	35	20	20.0	10	15
2	强风化页岩	23.0	300	25	24	100	20

表3 计算工况和计算结果

计算工况	原状土体	扰动及浸泡软化后土体	
		不考虑渗透力	考虑渗透力
边坡安全系数	3.372	1.471	0.988
图号	图1	图2	图3

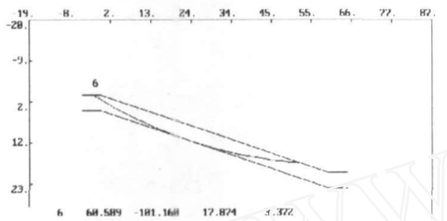

图1 原状土边坡稳定安全系数

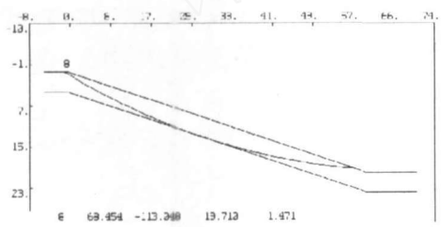

图2 土体软化后边坡稳定安全系数

根据以上分析和计算结果，该边坡不会产生深层滑动，如果土体不受扰动和水的影响，边坡安全系数很高；土体软化后，边坡稳定性明显降低，当边坡受水流渗透力作用时，将可能产生浅层滑动。

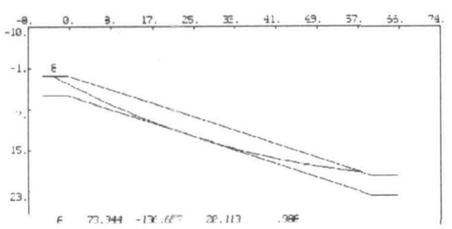

图3 土体软化并考虑渗透力作用时边坡稳定安全系数

2.2 挡墙变形开裂原因分析

在现场可以看到挡土墙下部已经开裂，局部浆砌石向外凸出。根据设计图纸，挡土墙的截面尺寸较大，如果仅仅受墙后主动土压力和水压力的作用，挡土墙是不会发生破坏的，因此，使挡土墙发生破坏的主要原因是由墙后浅层土体发生滑动破坏，滑动土体的剩余推力作用在挡土墙上，从而导致挡土墙产生开裂破坏。

挡土墙及浅层土体顺层滑动计算简图见图4。图中，G 为挡土墙剪切面 ab 以上浆砌石和填土的重量，W 为滑动土层的重量，J 为水流渗透力，水位以下按浮容重计算，V 为挡土墙剪切面 AB 的抗剪力，T 为土层滑动面的抗剪力，L 为滑动体长度，h 为滑动体厚度。

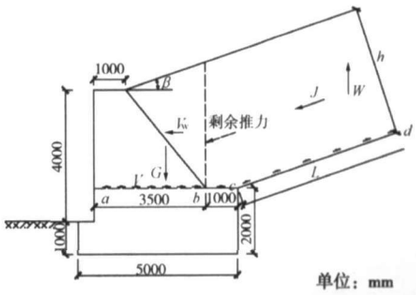

图4 挡土墙及墙后浅层土体顺层滑动计算简图

根据分析，挡土墙和土体最可能的滑动面为 $abcd$，在该滑动面上，滑动力较大而抗滑力较小。

该挡土墙已经破坏开裂，安全系数接近1.0，对挡土墙和浅层土体的受力进行分析，反算出浅层土体的力学参数。

不计挡土墙的抗拉强度，取挡土墙剪切面综合摩擦系数 $f=\tan\varphi=\tan45°=1.0$，挡土墙容重取 24 kN/m^3，土层的天然容重取 19.5 kN/m^3，水位以下取浮容重 9.5 kN/m^3。挡土墙和浅层土体的顺层滑动按平面问题考虑，取单宽进行分析，计算中做适当简化处理。

(1) 挡土墙受力分析

挡土墙由自重产生的抵抗弯矩（对图示中的 a 点取弯矩）为

$$M=G\times d=24\times3.5\times3\times3.5/2=441\ \text{kN}\cdot\text{m}\ ,$$

剪切面 ab 的抗剪力为

$$V=G\times f=24\times3.5\times3\times1=252\ \text{kN}\ 。$$

假设土体完全饱和，水位在地面上，则水压力产生的弯矩为

$$M_w=10\times3^2\times3/6=45\ \text{kN}\cdot\text{m}\ ,$$

水压力产生的剪切力为

$$V_w=0.5\times10\times3\times3=45\ \text{kN}\ 。$$

按剪切力平衡考虑，挡土墙受到滑动土体剩余推力水平分量为

$$P_1=V-V_w=252-45=207\ \text{kN}\ ,$$

按弯矩平衡考虑，挡土墙受到滑动土体的产生的弯矩为

$$\triangle M=M-M_w=441-45=396\ \text{kN}\ 。$$

假设剩余推力作用在 $2h/5$ 处，则剩余推力水平分量为

$$P_2=\triangle M/(2h/5)=330\ \text{kN}\ ,$$

取剩余推力水平分量

$$P_h=\min(P_1,\ P_2)=207\ \text{kN}\ ,$$

剩余推力为

$$P=P_h/\cos\beta=207/\cos18.4°=218\ \text{kN}\ 。$$

(2) 墙后浅层土体顺层滑动分析

将挡土墙受力分析计算得出的剩余推力反作用在墙后土体上，对土体的顺层滑动进行受力分析。

由于该边坡土体长期受水库绕渗影响，在降雨时期还受雨水影响，最不利的工况是土体完全饱和，水流在土体内顺层渗透；当土体发生软化，并受到渗透力的作用，边坡将处于最危险状态。

考虑渗透力影响时，边坡顺层滑动的稳定安全系数

$$K=\frac{T+P'}{W\sin\beta+J}=\frac{W\cos\beta\cdot\tan\varphi+c\cdot A+P'}{W\sin\beta+J}\ 。$$

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

式中，W 为滑动土体重量，$W=\gamma' Lh$，L、h 分别为滑动体长度和厚度，γ' 为土体浮容重；T 为滑动面抗剪力；J 为渗透力，$J=\chi_w iLh$，χ_w 为水容重，i 为渗流水力坡降，取 $i=1/3$；P' 为滑动土体剩余推力的反力；φ、c 分别为土体的摩擦角和粘聚力；β 为坡角。

取 $L=50$ m，$h=4$ m，$P'=P=218$ kN，$\beta=18.4°$，安全系数 $K=1.0$，对公式进行整理得 $1803\tan\varphi+50c-1049=0$ 取 $c=10$ kPa，得 $\varphi=17°$。

分析得出的参数与边坡按圆弧稳定分析时所采用的计算参数基本一致。这说明边坡稳定分析所采用计算参数是基本合理的。也说明挡墙是受边坡剩余推力的影响较大。

3 处理意见

根据对左岸边坡和挡墙的变形开裂原因分析，认为主要原因是边坡土体浸水软化和受渗透力作用。

该边坡的处理方案包括三方面内容，即对边坡和挡土墙进行加固处理，对水采取“上截”和“下排”方法进行处理。

(1) 对挡土墙和边坡进行加固，建议采用锚杆加格梁的方法进行处理。

(2) 挡土墙应增设排水孔，边坡采用坡体排水与坡面排水相结合的方法。采用 PVC 管花管外包反滤材料，长度要求进入强风化岩 1.0 m 以上，坡面排水采用纵横向排水沟。

(3) 沿坝轴线对左岸山体进行帷幕灌浆，截断库水的渗漏通道。灌浆前应利用先导孔应抽芯及做压水试验，用以补充地质资料，进一步查明左坝肩山体地质情况，以便调整钻孔深度、灌浆方式及灌浆参数等。

在以上三种处理措施中，边坡和挡土墙的加固以及边坡的排水对边坡的安全性影响最大，效果最直接、最明显。帷幕灌浆截断水库渗漏，对山体渗水和大气降水不起作用，截水效果取决于灌浆质量。

可以优先对边坡和挡墙进行直接加固，以及采取边坡排水措施，同时加强对边坡的观测，然后再进行帷幕灌浆处理，有条件时可同时采用以上措施。

4 结论及建议

(1) 通过对资料的详细分析及现场踏勘，认为该水库左坝肩山体边坡的变形开裂主要是浅层土体的蠕动变形和滑动破坏造成的，该边坡存在深层滑动的可能性不大。

(2) 该边坡产生变形开裂的现象有内因和外因，内因主要是地质原因，该山体的浅层土体遇水容易软化，力学指标显著降低；外因主要是水的影响，水的来源包括绕坝渗漏的水、坡顶山体的渗水和大气降水。水对边坡的影响主要表现在两方面：一方面是水使边坡土体产生软化，另一方面使渗水在浅层土体内产生的顺坡向渗透力，这也是导致边坡失稳破坏的一个重要原因。

(3) 水库左坝肩山体弱风化以上地层，透水性较强，节理、裂隙及层理较发育，在粉砂岩、石英砂岩及其与石灰岩，页岩的接触层面之间容易形成渗流通道，是坡面长期渗水的主要来源。降雨时，大气降水对边坡产生更大的影响，影响程度取决于降水的持续时间和降水强度。

(4) 处理方案包括三方面内容，即对边坡和挡土墙进行加固处理，对水采取“上截”和“下排”方法进行处理。其中以加固和排水措施最为直接有效。

(5) 对于类似工程，特别是水库大坝的应急除险及达标加固工程，具有一定的借鉴价值。

参考文献：

[1] 魏 宁，茜平一，傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学，2006，27(5)：778－781.

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