

地震中土石坝破坏原因的探讨

张安然

黄河水利职业技术学院

摘要: HT水库坝体为低塑性粉土构成的均质坝,平时易在浸水后出现垮塌沉陷,台风豪雨时易受库水侵蚀,地震时又易于出现剪力抵抗强度不足的破坏现象。HT水库坝体完工后至今,曾出现管涌及龟裂等破坏现象。过去因对坝体破坏成因认知有限,复建工作仅聚焦于所侦测到的位置及深度的裂缝,因而在修复后约六年又在地震规模 $ML=6.4$ 的地震中破坏。本论文基于卫星影像图及位移速度矢量分布图辨识HT水库邻近地区存在剪裂带及剪裂构造,同时亦基于现地影像图发现甲仙地震后HT水库坝体内除了存在裂缝外,亦明确存在走向不同的剪裂构造,由于剪裂构造的交会轴线破裂程度高,因而易成为库水向下游坡面流动的管状出水道。对于HT水库而言,由于邻近转弯处的一段坝体下游边坡已在地震2年后出现局部湿润现象,由于这种湿润现象为坝体管涌破坏的前兆,因此建议本段坝体必须基于本论文结论,局部进行劣质材料的置换,借以增加坝体耐侵蚀性与耐振性,并在坝体内错动的剪裂构造消除后避免管涌破坏的发生。

关键词: 土石坝;地震;剪裂带错动;管涌破坏

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.05.014

基于蓄积库水量及建筑经费的最佳化考量,在坝体选址时,经常选择座落在山区或丘陵走向不同的溪流或河川交会的隘口。地震对坝体的影响有两种,其一为相邻两点错动诱发断层及断裂构造所造成的影响,另一为断层错动诱发振动所造成的影响。

过去国内外坝体设计与坝体安全评估,均仅考虑上述断层错动诱发振动所造成的影响,并在坝址存在断层及断裂构造的情况下,在动力分析中都假设断层与断裂构造距离坝体数公里以上,乃至在完全忽略断层与断裂构造影响的前提下,地震中不安全的坝体也都被评估为安全;而地震后破坏坝体原因的调查及坝体修复,也都基于断层错动诱发振动所造成的影响,因而在完成修复后不久又再度出现龟裂破坏现象。因此未来坝体设计与坝体安全评估,应该在考量地震对坝体所有影响的前提下,才有可能趋于与事实相符。

为了克服上述问题,本文基于过去曾在地震中出现龟裂的HT水库坝体,探讨水库安全评估所采用的动力分析方法及修复工程各项调查的目标及成效,的后提出能够兼顾地震对坝体的两种影响的设计或安全评估方法,并提出符合实际状况的坝体破坏原因,期望未来坝体能因此而减少在地震中出现破坏现象。

一、HT水库地质概况

HT水库位于标高204米以下的新化丘陵的西缘,而HT水库西侧与平原相接。由于数条东西向溪河截切新化丘陵,各溪河呈现老年期河谷型态。且在剪裂带持续错动下,本区地形存在下列特殊现象:(1)流、环流丘、牛轭湖等地形发达;(2)河道有侧向加宽的趋势,并于两岸形成泛滥平原;(3)地盘缓慢抬升,河床持续不断向下切割,河道两岸岩层出露。

该地区的地层可区分为更新世崎顶层、全新世的阶

地堆积层及冲积层,将各地层的岩性或组成概述如下:

(一) 崎顶层

崎顶层分布于HT水库以东的新化丘陵地区,岩性主要为砂质泥岩、厚层泥质砂岩及粉砂岩所组成。有一部分地区特征为棕黄色厚层至块状砂岩与厚层暗灰色砂质泥岩互层,地形上呈猪背岭带状分布,当中砂岩胶结疏松。

(二) 阶地堆积层

阶地堆积层主要分布于区域内各溪流两岸,以不整合型态覆盖于崎顶层上,其组成包含未固结的砾石、砂及泥等,粒径最大可达数10cm以上。

(三) 冲积层

冲积层主要分布于区域内各溪流河床上,由未固结的砂、泥组成,局部夹杂砾石。

二、HT水库震后变形情况

(一) 变位地形

剪裂带错动,其垂直分量会使地层出现高低差,而其水平分量会使地层出现水平错移;这种地形在构造地质学上称为变位地形。

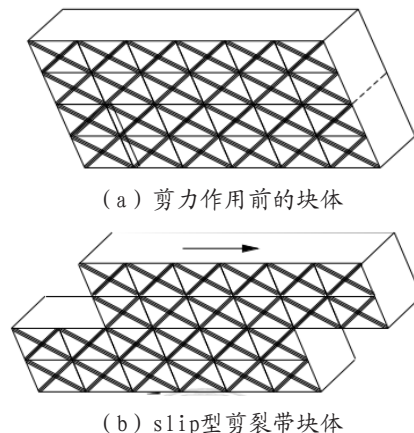
变位地形在形成初期比较明显,但因侵蚀及堆积作用,变位地形难以保存。变位地形包括:(1)构造陷落:包含断层谷、断层池、地堑、断层沟、断层鞍部、断层角盆地等;(2)构造崖(tectonic scarp):包含断层崖(fault scarp)、挠曲崖(flexure scarp)、断层小崖(fault scarplet)、逆断层小崖(reverse scarplet)及三角切面(triangular facet)等;当中有些断层崖具线状构造,有些则经由河流侵蚀而成河蚀崖;(3)构造隆起:包含地垒、断块脊、压力脊、山丘、断块山地等;(4)水平断错:包含断错河、断错河阶、闭塞丘等。

(二) 剪裂带构造

总剪裂带宽度系指相邻两平行的主变形剪力间的宽度;在主变形剪力作用下,总剪裂带宽度范围将出现推进剪力、Riedel剪力、共轭Riedel剪力及压缩构造等剪裂构造。

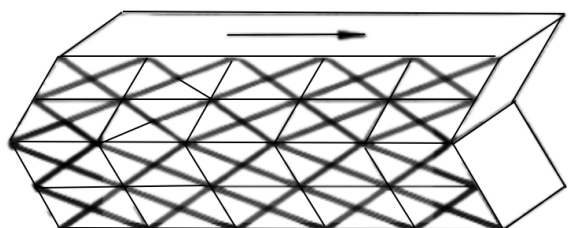
(三) 剪裂带构成机制

图1显示Hertzberg、slip及twinning等两种不同的剪裂带构成机制。



(a) 剪力作用前的块体

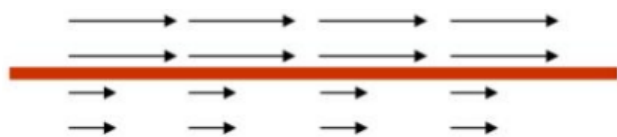
(b) slip型剪裂带块体



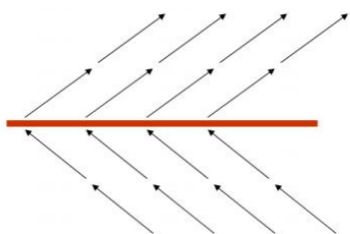
(c) twinning型剪裂带块体

图1 Hertzberg所提剪裂带构成机制

图1所示两种剪裂带构成机制亦可基于图2所示速度矢量分布图表示；当中速度大小骤变者为slip型剪裂带构成机制，而方向骤变者为twinning型剪裂带构成机制。



(a) slip型剪裂带



(b) twinning型剪裂带

图2 速度矢量分布图中的剪裂带的类型

(四) 剪裂构造

当地球板块间存在frictional slip时，地震在stick-slip现象出现时产生。而在slip过程中，亦衍生出如图1所示的Riedel剪力、共轭Riedel剪力、推进剪力及压缩构造等剪裂构造。因此在有感地震中，地球板块的局部化变形持续发生，剪裂构造土壤的破裂程度及渗透性系数因而持续增加，地下水因而易于在剪裂带中汇集或流动，而破裂程度较高的剪裂带土壤也因易于溶于地下水或随地下水流动，因而易于造成形状或色泽的变化。

此外，剪裂构造亦因剪裂面延伸而存在于弯曲或起伏的地形，蜿蜒曲折、高低起伏的山区河谷；剪裂构造地形乃与侧向压缩后土层在Rankine被动土压力范围所出现的交错的两群剪裂构造有关。

三、HT水库坝体局部龟裂及潜在问题的探讨结果

由剪裂带或剪裂构造辨识结果，得知HT水库坝体转弯处已存在成群交错的剪裂带或剪裂构造。这些剪裂带或剪裂构造会在平时持续累积错动量，且会在地震时大幅增加错动量，因而使得水库水流加速向下游流动；特别是在走向不同的剪裂带或剪裂构造的交会区，由于破碎程度更可观，因而容易成为库水向下游流动的管状出水道，这种机制的存在使得HT水库坝体转弯处潜藏管涌破坏危机，而这种管涌破坏已曾在大地震后的洪水中发生，因而证明坝体内存在的剪裂带或剪裂构造于平时与地震时错动量的累积效应是必须加以重视的。

四、现有坝体动力分析适用性的探讨

目前在现有水库安全评估中，在地震相关资料搜集

过程中，虽曾进行强地动衰减公式的研选、地震目录的整理与分析、活动断层及强地动纪录的搜集等；但在坝体动力分析中，地震力的输入则仅包含与场址设计PGA及频率内涵有关的加速度历时曲线，完全未考虑断层、剪裂带或剪裂构造错动的影响。

以三义断层作为设计断层，基于GoogleEarth卫星影像图可直接量得坝体与三义断层间的最短距离为3.3km。

在大地震前的历次安全评估中，持续以三义断层作为设计断层，安全评估结果均认为坝体在可能的最大地震作用下安全。

然而坝体却在大地震中，因车笼埔断层错动诱发剪裂构造错动，坝体因局部化变形而衍生规模不一的错动破坏。

大地震虽然因为剪裂带或剪裂构造错动而造成坝体邻近地区地形的局部改变；但整体而言，坝体邻近地区地形的局部改变似乎源于旧有的剪裂带或剪裂构造的再错动或再错动的延伸。换句话说，坝体在选址前，坝址所在位置就已经存在断层、剪裂带或剪裂构造；平时，断层、剪裂带或剪裂构造的微幅错动量持续累积，大地震中，断层、剪裂带或剪裂构造的错动量大幅增加，因而造成坝体的严重破坏。

目前在坝体的安全评估中，坝体动力分析所采用的方法仍然延续此方法，因而使得坝体安全评估结果不符合实际需要。

有文献也曾记载坝体的破坏情形，然而在坝体破坏后，中国所做的调查报告，直接显示坝体座落在十数条断层、剪裂带或剪裂构造上方。

对于走向不同断层、剪裂带或剪裂构造而言，当其交会区延伸进入上游库区时，由于这种交会区的破裂程度比较显著，因而在库水向下游流动中形成管状出水道，终至坝体管涌破坏。而在坝体管涌破坏后，坝体内仍残留一些管涌洞，管涌洞确实位于走向不同的剪裂构造交会区。

对于HT水库而言，由过去历史得知在坝体转弯处（即2010年的修复区）曾发生过管涌破坏的地方。由于HT水库坝体动力分析均遵循传统方法，在完全忽略剪裂带或剪裂构造错动对水库安全所造成影响的前提下，分析结果完全无法反应构造地震下坝体龟裂破坏的实际行为。

基于剪裂带或剪裂构造的辨识结果，得知HT水库坝体转弯处明确存在一些剪裂带及剪裂构造。平时这些剪裂带及剪裂构造均随相邻两点位移速度矢量大小的持续增加或方向的持续改变而持续发育，因而在剪裂带或剪裂构造错动量适当大时，剪裂带或剪裂构造交会区因而成为库水向下游流动的管状出水道，这可能是坝体下游边坡局部出现湿润现象的主要原因，而坝体下游边坡出现湿润现象为坝体管涌破坏的前兆。

综合上述讨论结果得知在构造地震中，坝体安全评估除了需要考虑地震诱发的振动对坝体所造成的影响外，更需要考虑地震诱发错动对坝体所造成的影响。

五、均质坝适合材料的探讨结果

表1显示不同性质土壤的各种工程重要因素，表1也显示作为碾压的均质坝及运河断面的侵蚀抵抗而言，各种材料适合性。由表1得知对于既有的分类为ML的粉土而言，其渗透性属于间透水，剪力强度与工作性属于一般，压缩性属于中等；而在滚压的均质坝中，材料适合性排序第六位，在运河断面的侵蚀抵抗中为无法抵抗侵

蚀。

因此对于水库滚压的均质坝而言，既有的分类为ML的粉土属于较不适合的材料，且在库水晃动下，分类为ML的粉土无法抵抗侵蚀，且因为剪力强度不高。

四种不同土壤的耐震性，当中砾石与砂的混合料最耐震，其次为级配优良的砂，再次为粉质砂，最低为粉土。由此可知滚压的均质坝耐震性最高为黏质砾石（GC）因，此在本次HT水库坝体修复中即将既有的分类为ML的不耐震的粉土替换为耐震性最高的黏质砾石（GC）。

表1 不同性质土壤的各种工程重要因素及相对适合性的比较

分组	各种工程重要因素				相对适合性（1最适合、14最不适合）	
	符号	渗透性	剪力强度	压缩性	工作性	滚压的均质坝
GW	透水	优	微小	优	---	1
GP	非常透水	良	微小	良		2
GM	间透水	良	微小	良	2	4
GC	不透水	良~一般	非常低	良	1	3
SW	透水	优	微小	优	---	6
SP	透水	良	非常低	一般		7
SM	间透水	良	低	一般	4	8
SC	不透水	良~一般	低	良	3	5
ML	间透水	一般	中	一般	6	---
CL	不透水	一般	中	良~一般	5	9
OL	间透水	差	中	一般	8	---
MH	间透水	一般~差	高	差	9	---
CH	不透水	差	高	差	7	10
OH	不透水	差	高	差	10	---

六、卫星影像图的辨识结果

HT水库坝体邻近地区的卫星影像图中辨识得到五群不同走向的剪裂构造；这五群剪裂构造包含：（1）主变形剪力D，走向为N56° W；（2）推进剪力P，走向为N26° W；（3）Riedel剪力R，走向为N85° W；（4）共轭Riedel剪力R'，走向为N54° E；（5）压缩构造S，走向为N34° E。

表2 水库邻近地区的剪裂带及剪裂构造辨识结果

资料名称	剪裂带或剪裂构造走向	备注
卫星影像图	N56° W（主变形剪力D）	HT水库邻近地区的剪裂构造
	N26° W（推进剪力P）	
	N85° W（Riedel剪力R）	
	N54° E（共轭Riedel剪力R'）	
	N34° E（压缩构造S）	
位移速度矢量分布图	N26° W、N54° E	twinning型（互为共轭）
	N56° W、N34° E	slip型（互为共轭）
现地影像图	N56° W（主变形剪力D）	地震后修复区开挖的剪裂构造
	N26° W（推进剪力P）	
	N85° W（Riedel剪力R）	
	N54° E（共轭Riedel剪力R'）	
	N34° E（压缩构造S）	

七、结论

地震后，主管机关基于目视及透地雷达检视HT水库坝体在转弯处出现的龟裂，的后进行龟裂有关的坝体修复。在坝体局部开挖后，虽然现地影像图直接显示局部开挖区及两侧明显存在剪裂带相关的剪裂构造，然而因为传统分析方法中均忽略构造地震中剪裂带或剪裂构造错动所产生的影响，因而在现地已经明显存在成群交错的剪裂带或剪裂构造的情况下，仅修复坝体存在裂缝的区域。

在地震后的坝体修复工作中，主管单位并未针对虎头埤水库坝体转弯处的剪裂带或剪裂构造进行处理，而这些剪裂带或剪裂构造又在后续有感地震中持续发育，这使得坝体转弯处的下游坡面在地震后2年出现局部湿润现象。坝体下游坡面局部出现湿润现象，除证明坝体内存在剪裂带或剪裂构造，并证明剪裂带或剪裂构造交会的轴线已延伸至库水位面以下的坝体上游；如果坝体破裂程度持续恶化，走向不同的剪裂带或剪裂构造交会的轴线恐将发展成为库水向下游流动的管状出水道，进而诱发管涌破坏。

传统的水库安全评估的坝体动力分析，虽然包含强震动衰减公式的研选、地震目录的整理与分析、及活动断层及强震动纪录的搜集，但在坝体动力分析中仅输入与场址设计PGA及频率内涵有关的加速度历时曲线，因而不适用于构造断层错动中各种剪裂构造错动诱发的结构物破坏。

坝体管涌破坏后的调查报告显示该坝座落在十数条断层或剪裂带上方，而在大地震后亦发现坝体座落在几条断层、剪裂带或剪裂构造上方，这些现地状况证明与坝体安全有关的关键因素为断层、剪裂带或剪裂构造的错动，其次才是传统坝体动力分析中的振动。

八、建议

HT水库转弯处位于剪裂带或剪裂构造交会区，而剪裂带或剪裂构造交会区坝体的剪力抵抗强度会随剪裂带或剪裂构造累积错动量的增加而大幅降低，因此对于构造地震发生频繁的地区而言，建议在坝体安全评估中应将剪裂带或剪裂构造累积错动量的影响纳入最优先考量，借以避免在忽略剪裂带或剪裂构造错动的情况下，出现坝体破坏一再发生的窘境。

参考文献：

- [1]董伟军.深覆盖层面板堆石坝在长周期地震作用下的响应关系[D].华北水利水电大学:2023年第02期
- [2]姚倩茹.随机地震作用下混凝土重力坝抗震安全概率评价研究[D].西安理工大学:2021-06-30
- [3]周华.基于随机动力分析的高面板堆石坝地震变形评价研究[D].大连理工大学:2021-05-01
- [4]石强;李艳玲;吴震宇;钟为.考虑震损指标相关性的重力坝地震易损性分析[J].人民黄河:2017-12-21
- [5]何蕴龙;张劭华;石熙冉.胶凝砂砾石坝抗震特性及其地震作用计算方法[J].水利学报:2016-04-14