

# 碾压混凝土围堰拆除倾倒翻转 方案现场试验研究

刘以钢 李世海

中国科学院力学研究所(北京, 100080)

**[摘要]** 本现场试验为三峡三期碾压混凝土(RCC)围堰爆破拆除研究中倾倒翻转方案的模拟试验,文中描述了现场试验条件和试验方案。通过观察到的试验现象及其原因分析,探讨了RCC材料在爆破载荷作用下的破坏特性,指出了特定装药条件下爆破漏斗特征,并指出了堰体在经受局部爆破载荷作用而失稳的初期时刻,具有刚体运动特性,这些特征和现象丰富了关于RCC材料爆破性能的认识。该文还描述了未倒堰体的处理方案,检验出与碾压层面平行的水平条形装药结构,可以较好地形成所需的爆破漏斗开口,说明水平条形药包具有较好的爆破效率,既经济节省,又安全度高。

**[关键词]** 现场试验 碾压混凝土 爆破拆除

**[分类号]** TD235.3 TD235.4

## 1 引言

本现场试验为三峡三期RCC围堰爆破拆除中倾倒方案的模拟试验。三峡三期RCC围堰要求一次爆破拆除至设计高程,拆除总长度686m,最大拆除高度25m,拆除方量近18万方,在极其复杂的水利枢纽竣工工程中进行如此大规模爆破,安全问题引起了工程界的广泛关注。目前中科院力学所已完成了相关的主要研究任务。本现场试验方案就是建立于小型现场试验<sup>[1]</sup>及实验室试验的基础上<sup>[2]</sup>,主要目的是探索最佳的拆除技术路线,为三峡三期围堰的顺利拆除提出安全度高、技术创新的可靠方案。

本文主要目的是分析讨论现场模拟试验中出现的问题及相应的处理措施,着重讨论模拟试验时堰体药包的布设特点,并借助在承受局部爆炸载荷作用后堰体基本未发生大的变位及破损的特点,细致地分析了第一次爆破后爆破漏斗的形态。文中还重点描述、讨论了二次爆破的方案及爆后效果。

## 2 现场试验环境

现场试验选址在湖北清江高坝洲水利枢纽二期下游纵向碾压混凝土(RCC)围堰上,围堰上游端通过分缝紧接纵向钢筋混凝土导墙段,其平面位置如图1所示。围堰顶宽5

m,堰顶高程 $\nabla 57$ ,高程 $\nabla 52$ 以上直立,以下两侧各按1:0.35的坡度逐步变宽至 $\nabla 41$ 。重要水工建筑设施如机电设备及闸门等距离试验爆区较远,约在200m之外,故试验爆破对主体水工建筑设施的安全影响较小。但导墙段紧邻爆区,并且在其下游端头上有临时施工高压线路,爆破试验必须保护导墙钢筋混凝土不受损害,必须尽量保护施工高压线路的安全。否则高压线路受损会影响整个施工现场的正常运行。

由于试验堰体左侧为已竣工的深孔泄洪道及电站厂房,目前正在过水且处于运行之中,业主要求爆破后的堆碴不得向左侧消能池中坍塌。右侧为正在施工的表孔泄洪道及船闸,场地宽阔,适宜堆放清运碴块,故倾倒方向选定为右侧。本现场试验堰体段长约16m,左右侧临空,下游侧因已分层拆除一

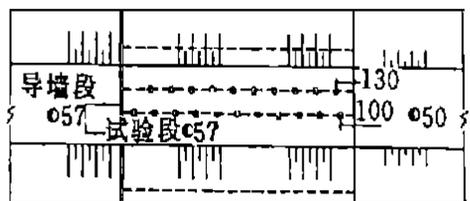


图1 试验段堰体平面及布孔

层,故留下 7 m 高的第三临空面,这样阻止堰体倾倒的约束主要在宽厚的堰体根部

### 3 试验方案

本现场试验根据堰体结构特征及现场环境,布置了三排主爆药包,炮孔孔径均为 $\varnothing 89$ 。如图 2 所示,第一排主爆孔从堰顶向下钻孔,孔深 11.5 m,药包中心最小抵抗线为 1.6 m,炮孔孔距 150 cm,共布置 11 孔;第二排主爆孔也从堰顶向下钻孔,孔深 10.5 m,药包中心最小抵抗线为 1.4 m,炮孔孔距 150 cm,共布置 10 孔;第三排主爆孔从堰体右侧倾斜向上钻孔在左侧贯穿堰体,孔深 10.0 m,药包中心最小抵抗线为 1.2 m,炮孔孔距 150 cm,共 11 孔。

为了消除堰体底部的约束,保证堰体顺利倾倒,在第三排主爆孔以下还布置了一排预裂孔,孔径 $\varnothing 89$ ,孔距 60 cm,从堰体右侧倾斜向上钻孔,共 26 孔。各孔均贯穿堰体,长约 10.0 m。为了防护导墙段钢筋混凝土及临时高压输电线,上游端首先布设了二排密集的隔震孔,然后在隔震孔下游设置了两排预裂孔,以减小爆炸波及地震波的危害。这四排

孔的排间距 20 cm,孔间距 30 cm,孔径 $\varnothing 89$ ,孔深随堰底预裂面的倾斜而变化,在 9.5 m ~ 12.5 m 之间,共计 42 孔。

为了消除堰体下游段侧面的约束,在 $\nabla 50$ 顶面上布设了二排预裂孔,其布孔参数与上游端预裂孔相同,只是孔深较上游端浅 7 m,即第一层的拆除高度。

### 4 试验装药结构及起爆网络

因受现场爆破材料的限制及地形条件的影 响,试验中实际装药结构及起爆网络均比试验方案有较大的变化。试验中主爆孔选用了 $\varnothing 70$ 药卷,药卷长 40 cm,重 1.6 kg;预裂孔选用了 $\varnothing 35$ 药卷,药卷长 20 cm,重 0.2 kg。导爆管雷管管线长 10 m,各节点依靠雷管传爆。各排的实际装药特征参数如表 1 所示。

判断柱形装药特征主要由长抗比 $L/W$ 及长径比 $L/D$ 两个参数确定。当 $L/W > 1.0$ ,并且 $L/D > 20$ 时,可将柱形装药视为条形药包<sup>[3]</sup>。由表 1 看出,主爆孔三排柱形装药均是条形药包。假定药包爆破漏斗相互贯通,在标准抛掷爆破作用下,得出装药结构的炸药单耗为 $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

现场试验的实际起爆网络如图 3 所示,网络布设的主要目的在于检验系统传爆的可靠性,检验依靠雷管延时误差降低地震的效应。

图 3 所示接力传爆网络准爆,必须是每一节点都准爆,这样任一支路的准爆率在各节点雷管数相同时,为各节点均准爆的积的概率,按公式(1)计算<sup>[4]</sup>:

$$P = [1 - (1 - R)^i]^{\max(m+n)} \quad (1)$$

式中  $P$  —— 网络支路准爆率;

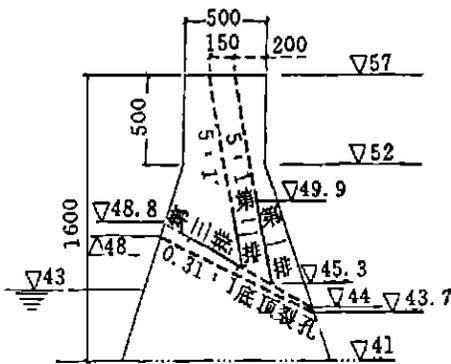


图 2 堰体断面及布孔装药结构

表 1 主 爆 孔 装 药 特 征 参 数

药包位置	抵抗线 $W/m$	抗径比 $W/D$	线装药密度 $q_l/\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	装药量 $Q/\text{kg}$	装药长 $L/m$	长抗比 $L/W$	长径比 $L/D$
第一排	1.6	18.0	3.1	14.4	4.7	2.94	52.8
第二排	1.4	15.7	2.9	9.6	3.3	2.36	37.1
第三排	1.2	13.5	3.2	9.6	3.4	2.33	31.5

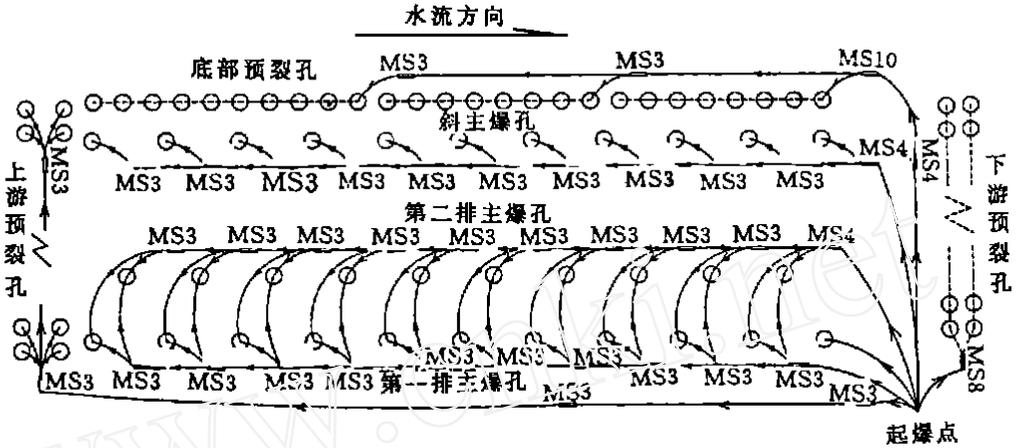


图3 现场试验实际起爆网络

- R —— 单发雷管准爆率;
- i —— 节点雷管数;
- max{m + n} —— 最大节点数。

一般情况下, 单发雷管的准爆率为95%, 本网络每节点2发传爆雷管, 而第一排及第三排最大节点数为11, 该二支路网络准爆率均为97.28%, 第二排最大节点数为10, 该支路网络准爆率为97.53%。

图3中第一排及第二排每孔均有二支路传爆, 这使网络准爆率相应提高。两排均准爆事件和的概率按式(2)计算<sup>[5]</sup>:

$$P = P_1 + P_2 - P_1P_2 \quad (2)$$

- 式中 P —— 二支路和的概率;
- P<sub>1</sub> —— 第一支路准爆率;
- P<sub>2</sub> —— 第二支路准爆率。

将 P<sub>1</sub> = 97.28%, P<sub>2</sub> = 97.53% 代入式(2)得现场试验二排竖主爆孔的准爆率为99.93%。

### 5 试验效果

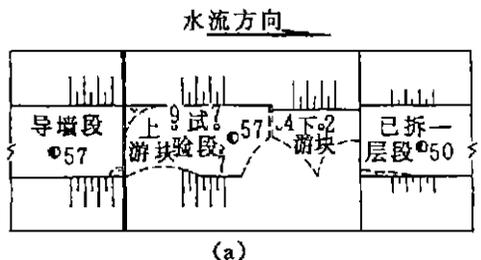
正常情况下, 药包起爆形成爆破漏斗后, 堰体整体将在重力作用下向右侧倾倒并翻转坠落在地面上解体。第三排斜爆破孔的作用主要为确保破碎块体不向左侧泄洪道堆积而设计, 穿凿时由下向上贯穿了堰体, 从左侧由上向下装药, 两端堵塞, 其中右侧端由下向上堵塞5m, 左侧端按常规爆破设计, 堵长1.8m。由于该斜孔装药和堵塞较为困难, 实际操作中两端堵塞长度很难达到设计要求, 从而

导致冲炮发生, 降低了药包的爆破效率, 使第一次爆破未达到理想效果, 不得不进行第二次爆破。在进行第二次爆破前, 细致全面地观察, 记录了堰体爆后的状态, 这有助于提高对RCC的爆破特性认识, 为进一步的模拟试验提供有益的经验, 以利于为三峡三期围堰拆除提供最佳的技术路线。

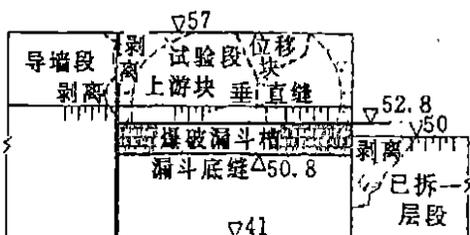
### 5.1 第一次爆破现象及堰体破坏形态

爆破过程中堰体右侧有块石飞出, 为第一及第二排主炮孔对药包周围介质抛掷的结果, 爆破结束后堰体基本保持在原位, 从不同视角观察, 总体情况是局部有破坏或损伤, 但整体结构较为完整, 堰体保持稳定。图4是从堰顶及右侧和下游侧所观察到的爆后堰体状态示意图。

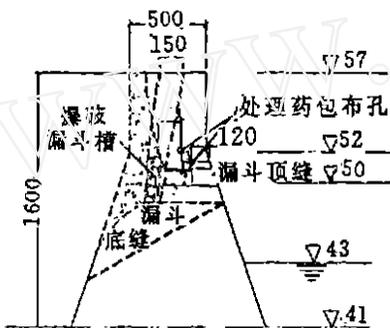
图4(a)为从堰顶观察的结果: 堰顶表面被一条与堰轴线垂直的细小裂缝分割成两块, 下游块长约6m, 向右侧略有10cm位移, 上游块长约9m, 座落于原处; 堰体右侧表面发生了部分剥离, 这是由于爆炸波在表面反



(a)



(b)



(c)

图 4 试验炮后堰体结构破坏及处理炮孔布置示意图

(a) 堰顶顶面视图; (b) 堰体侧面视图;

(c) 堰体下游端视图

射的结果。从堰顶观察还可发现, 第一排药包的第 7 爆破孔(位于上游块)及第二排药包的第 2、4 爆破孔(位于下游块)和 7、9 爆破孔(位于上游块)贯穿至堰体底部漏斗, 各孔孔壁光滑完整。

从右侧地面上(∇41)及已拆除部分的堰顶上(∇50)观察, 可清楚地看到药包附近所形成的爆破漏斗形状, 堰体右侧表面的破损情况。如图 4(b)、(c)所示, 在堰体药包区附近有明显上下两条相距约 2.0 m 的水平缝, 两缝之间有一内陷的凹槽, 深约 3 m, 为各孔爆破漏斗连通后形成的漏斗槽。这说明 RCC 在层面内各向均匀, 属可爆性好而易于贯通类介质。但在层面上, 介质力学特性发生变化, 爆炸波通过层面时发生反射, 由于反射和条形药包端部效应减落的共同影响, RCC 在药包附近某个层面发生层间分离, 此分离缝就是凹槽状爆破漏斗的顶面和底面。分离缝

将爆炸载荷局限在有限的空间内, 使其中 RCC 充分破碎而形成漏斗。

爆炸波表面反射作用及条形药包轴向效应, 还可从凹槽状爆破漏斗顶面以上堰体表明有轻微的剥离反应出来, 如图 4 所示。表面剥离最多的地方在分割缝周围, 从右侧地面上看到图 4(b), 堰顶表面的细小分缝在右侧逐渐变得较为宽大, 明显将试验堰体分割成两块, 上游块较为完整, 表面有较少的剥离发生, 下游块较为破碎, 尤其在垂直分缝附近, 不但表面剥离较多, 而且堰体在顶部有破碎大块产生。总体而言, 在药包爆破漏斗外, 除因反射发生表面剥离外, 堰体余下部分较为完整, 呈现出较好的整体性能。

### 5.2 垂直分割缝成因浅析

试验堰体上所产生的唯一一条垂直分割缝的生成机理与爆破漏斗凹槽的顶缝及底缝并不相同, 它不在条形布药孔上, 也不位于任何结构面上, 所以它不是由药包爆炸载荷直接作用的结果, 而是试验堰体发生相对运动剪切破坏的结果。从图 3 起爆网络传播方向可以看出, 试验堰体在有轴向临空面的下游端先爆, 然后按前排每二孔、后排一孔的起爆顺序向上游接力传爆。这一起爆网络使得堰体下游端部部分的装药效率最高, 其表面剥离较多及产生破碎大块的事实部分说明了这一问题。在药包爆破形成漏斗过程中, 由于重力和爆炸动载荷的共同作用以及各作用力在时间上的差异, 导致了堰体上、下游端产生相对倾倒运动。由于下游端堰体多一个轴向临空面, 所以它破损较多并产生了向右侧的倾倒运动, 这直接导致了垂直分割缝和堰体顶部破碎大块的形成。

### 6 处理措施及效果

为了减少现场试验对纵堰拆除施工工期的影响, 必须尽快使未倾倒的堰体解体以进行清运。根据施工安全及现场地形条件, 采用了在下游端已拆一层的堰顶面上(∇50)钻水平孔布置条形药包的技术方案。目的是进一步扩深漏斗槽, 使上部堰体残留体在重力作

用下向右侧倾倒翻转,另外还可检验水平条形布药结构的爆破效果。

### 6.1 布孔结果

为了扩深漏斗槽,使堰体整体倾倒,理想的布孔方案是水平孔贯穿约16m长的堰体,但由于漏斗槽顶面和底面二条水平缝及垂直分割缝的影响,试钻了三孔均未达到预想的目的,孔位布置如图4(c)所示。第一孔孔口位于漏斗槽后方块体上,钻孔方向微倾斜向下,当钻至9.8m深时,贯穿了漏斗槽块体的底水平缝而终止。第二孔孔口位于第一孔上部下游块体上,钻孔方向微倾斜向下,当钻至5.6m深时,贯穿了垂直分割缝而终止。第三孔布置在后排,孔口位于距前排约50cm处的下游块体中间处,钻孔方向微倾斜向下,但仅钻至3.0m时,贯穿了漏斗槽块体的顶水平缝而终止。

### 6.2 装药结构

因爆破孔水平布置于堰体残留体底部,且经第一次爆破试验堰体已与导墙段产生了较好的分离,爆破对环境的危害大为减小。为增强炮孔效率,提高爆破效果,各孔均满孔装药,相关参数如表2所示。

### 6.3 爆破效果

由于试验堰体总长约16m,而处理水平炮孔因受裂缝的影响未能在底部贯穿堰体,所以爆前认为靠近导墙段的堰体不会倾倒坍塌,须作二次处理。但是,起爆后残留堰体却全部倾倒,在起爆过程中观察到,上游未装药6m长的堰体晚于装药段倾倒。靠近导墙段堰体底部未装药发生倾倒的原因是第一孔端部装药效应及爆破引起地震震动共同影响的结果。全部堰体较为理想的倾倒翻转现象说

明,沿堰体纵向布置的条形药包具有较好的爆破漏斗开口效果,而有一定层面强度的RCC堰体有较好的整体性,即只要所受扰动足够大使之偏离平衡位置,它就会象失去平衡的刚体一样,发生倾倒翻转运动。这一试验现象说明在拆除RCC的爆破施工中,可以象烟囱及房屋一样,将RCC块体的运动初期视为刚体运动。

爆破完毕后的爆堆明显分为二部分:第一部分在纵堰根部,宽约10m,主要由可以直接清运的小块RCC组成,系药包爆炸后直接破碎RCC的产物,其坡角在 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ;第二部分在堆积点远端,宽约8m,主要由大块RCC组成,系上部堰体倾倒翻转触地后解体形成,这部分大块RCC没有重叠,极易钻孔解炮,实际施工正是这样,整个后续清运工作非常顺利。

### 7 结论

本文主要描述了高坝洲水利枢纽RCC纵向堰体倾倒翻转拆除现场试验出现的问题及处理经验,分析总结试验过程,可得出如下结论:

(1) 倾倒翻转拆除围堰方案在技术上具有很大的创新性,任何技术上的疏忽或不合理尝试,都易引起试验失败。具体分析第一次爆破设计方案不难看出,第三排爆破斜孔不尽合理,因为从爆破后所产生的漏斗的形状看,它未能起到继续扩大前二排爆破孔所产生的漏斗的作用,从而使堰体根部产生了较宽的残留支承平台,这样使表面剥离后的待拆除堰体的重心未能外移至平台支承点外。由于有较宽平台的充分支承,堰体上部结构未按预定方案向右侧倾倒翻转,而是稳定地座

表2 处理炮孔装药特征参数

炮孔位置	抵抗线 $W/m$	孔径 $D/mm$	孔深 $H/m$	线装药密度 $q_l/kg \cdot m^{-1}$	装药长 $L/m$	装药量 $Q/kg$	堵塞长 $/m$	起爆 顺序
第1孔	1.2	89	9.8	4.0	7.2	28.8	1.7	瞬发
第2孔	1.3	89	5.6	4.0	2.0	8.0	1.6	瞬发
第3孔	0.5	89	3.0	4.0	1.2	4.8	1.6	MS4

落于原处。布药方案未形成足够宽、深的漏斗开口槽,这是第一次三排主炮孔倾倒试验失败的主要原因。

(2) 因受碾压层面的影响,RCC 材料的爆破漏斗很难形成锥形状。本试验中药包布置为条形,各孔爆破漏斗在纵向贯穿后,整体上形成了凹槽状漏斗,漏斗槽顶和槽底正好是分离的碾压层面,夹于两层面之间的漏斗槽块完全支撑着上部堰体,显然扩深漏斗槽和缩小后方的块体是保证堰体倾倒翻转的关键因素。

(3) 堰体轴向较长,由于分段起爆延时的影响,堰体所受动载的时间不同,这就使堰体沿轴向破坏和解体的时间不同,导致不同部位产生相对运动,其结果是产生垂直贯穿缝,从而有助于堰体分段倾倒翻转。试验中观察到的垂直贯穿缝及处理爆破中未装药段稍后倾倒的现象说明了这一问题,由此可以认为,在三峡三期围堰爆破拆除的整体倾倒翻转方案及整体推移方案中,无须特意布置分段预裂孔预先将堰体在轴向切割使之分段解体。

(4) 试验方案较好地解决了爆破安全问题,通过孔外延时及孔内分段装药,避免了地

震波的叠加,确保了导墙段及其端部高压输电线的安全。

(5) 水平条形布药结构具有较好的爆破漏斗开挖效果,因为此装药结构与碾压层面一致,有利于凹槽状漏斗的形成,能为上部堰体的倾倒创造良好的临空面。由于与层面平行,水平布药的端部效应得到增强,这有利于扩大装药间距,减小爆破装药量,使爆破拆除施工更加趋于安全。

### 参 考 文 献

- 1 徐以鸿,李世海,常玉华,刘月心,方正 三期围堰爆炸拆除室内模型实验研究 中国科学院力学研究所 1999
- 2 李世海,丁汉坤,刘月心,方正,常玉华 三峡三期围堰碾压混凝土拆除翻转方案 1/5 模型试验研究 中国科学院力学研究所 1999
- 3 张志毅,戈鹤川 关于条形药包定义判据的研讨. 工程爆破文集(第六辑). 深圳:海天出版社, 1997. 345~ 348
- 4 吴新霞,赵根,张正宇 城镇大规模土岩控制爆破设计. 中国民用爆破器材学会第五届年会论文集 2000 246~ 252
- 5 沈恒范 概率论讲义 北京:人民教育出版社, 1981. 4

## The Field Test Research on the Overturning Program of Demolishing the Roller Compacted Concrete Cofferdam

Liu Yigang, Li Shihai

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences(Beijing, 100080)

[ABSTRACT] The field test is a model test of the overturning program of demolishing the third stage roller compacted concrete(RCC) cofferdam in the Three Gorge Project. In the paper, the condition and program of the field test are described. Through the observation and analysis of the test program & its cause, the failure character of the RCC subjecting to blasting loading is investigated, the performance of the blasting crater formed under specific charging construction is indicated, and the rigid property of the RCC in the early time of the movement immediately after blasting is explained. The phenomena and characters displaying in the test enrich the understanding of the blasting property of the RCC. This paper also describes the solving program of the unturned cofferdam. It is verified that the horizontal cylindrical charge is able to form the needed blasting crater easily. This proves that the horizontal cylindrical charge is high in blasting efficiency, therefore it can be deemed as both economical and safe method in demolishing the RCC cofferdam.

[KEY WORDS] field test, roller compacted concrete, demolishing by blasting

