

文章编号: 1001-1455 (2001) 01-0067-05

# 三峡工程岩石基础开挖爆破震动控制安全标准

卢文波, 赖世骧, 朱传云, 舒大强

(武汉水利电力大学施工科学研究所, 湖北 武汉 430072)

摘要: 主要介绍了三峡工程岩石基础开挖过程中爆破震动控制安全标准及爆破震动监测的主要成果, 并针对采用的爆破震动控制安全标准在实践中遇到的一些重要问题作了进一步讨论。

关键词: 三峡工程; 开挖; 爆破震动; 安全标准

中图分类号: O384; TD235 文献标识码: A

\*

## 1 引言

爆破震动是岩石钻爆开挖中无法避免的公害。当爆破震动达到一定量级时, 由于爆破震动惯性的作用, 可能引起具有潜在滑动面的边坡或地下洞室围岩等结构的动力失稳; 同时, 在爆破震动荷载的反复作用下, 会引起岩体、混凝土等材料的力学参数劣化, 如材料力学强度指标的降低、材料中原有裂隙的扩张或新增裂隙的产生以及渗透系数的增大等。因此, 在进行钻爆施工完成岩体开挖的同时, 必须使爆破震动效应控制在安全范围内。

在三峡水利枢纽主体工程 and 导流工程施工中, 要完成的土石方开挖总量为 10259 万立方米, 其中高峰年 (1995 年) 的开挖强度为 2300 万立方米。工程从 1993 年开始施工准备, 至 1999 年 11 月, 已顺利完成一期和二期工程超大规模的土石方开挖。在此过程中, 我们参加了临时船闸与升船机、通航建筑物下游航道、永久船闸、左非溢流坝段、下岸溪人工砂石料采石场、茅坪防护大坝等部位的岩石开挖爆破震动监测工作, 其监测的保护对象包括岩石高边坡、新浇混凝土、土石围堰 (坝)、锚固结构、地下洞室、沥青混凝土、塑性和刚性混凝土心墙以及民房等, 在长达四年的跟踪监测中, 积累了大量的爆破震动成果数据。对获得的爆破震动成果资料进行进一步分析和总结, 并就现行采用的爆破震动安全控制标准在实施过程中发现的一些问题作进一步讨论, 相信对类似工程具有一定的参考价值。

## 2 三峡工程施工过程中采用的安全震动速度标准

在水利水电部门, 对地下洞室、边坡或大坝等较重要的建筑物或构筑物, 当其附近有大规模的爆破作业时, 一般需要对其进行爆破震动的跟踪监测, 并依据设计中给定的安全震动速度控制标准, 进行爆破开挖的施工和反馈施工, 以达到控制爆破震动这一目的<sup>[1,2]</sup>。三峡工程在岩石基础爆破开挖过程中采用的爆破震动控制安全标准如下。

### (1) 岩石高边坡

对临时船闸和升船机南北两侧山体的岩质高边坡, 根据边坡岩体的完整性及裂隙发育程度不同, 在其基础部位采用的爆破震动控制安全标准为: 在爆心距为 10 ~ 15 m 范围内, 质点峰值震动速度为 10 ~ 15 cm/s。

\* 收稿日期: 2000-04-03; 修回日期: 2000-06-13

基金项目: 国家电力公司学科建设资助项目 (SPKJ016-02)

作者简介: 卢文波 (1968 — ), 男, 博士, 副教授。

对临时船闸和升船机中隔墩直立墙, 通过现场观测试验, 确定的爆破震动控制安全标准为: 当在升船机部位进行岩石爆破时, 临时船闸侧中隔墩直立墙顶部边缘的质点峰值震动速度为  $6 \sim 8 \text{ cm/s}$ 。

对永久船闸岩石高边坡及其中隔墩直立墙, 在其基础部位采用的爆破震动控制安全标准为: 在爆心距为  $10 \sim 15 \text{ m}$  范围内, 质点峰值震动速度控制在  $10 \text{ cm/s}$  以内。

#### (2) 地下洞室及井壁围岩

输、排水洞及竖井基础或壁面上的爆破震动控制安全标准为: 质点峰值震动速度控制在  $10 \text{ cm/s}$  以内。

#### (3) 新浇混凝土

考虑到三峡工程混凝土建筑物的重要性, 对邻近新浇混凝土部位进行岩石爆破时, 其在大体积混凝土基础面上诱发的爆破震动值按《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》<sup>[2]</sup>规定的基础上又作了进一步的细化和严格的控制: 混凝土龄期分别为  $0 \sim 3 \text{ d}$ 、 $3 \sim 7 \text{ d}$ 、 $7 \sim 28 \text{ d}$ 、 $> 28 \text{ d}$  时, 安全震动速度分别为  $1.5 \sim 2.0 \text{ cm/s}$ 、 $2.0 \sim 3.0 \text{ cm/s}$ 、 $3.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ 、 $5.0 \sim 8.0 \text{ cm/s}$ 。

#### (4) 帷幕及固结灌浆等隐蔽工程

已灌浆部位的岩石基础面上的爆破震动安全质点峰值震动速度控制在  $1.5 \text{ cm/s}$  以内。

#### (5) 土石围堰堰体及其防渗结构

对一期和二期土石围堰及通航建筑物下游航道隔流堤等土石堰体边坡, 在其基础处采用的爆破震动安全质点峰值震动速度小于  $7 \text{ cm/s}$ 。

而对围堰或隔流堤的防渗结构体, 采用的基础部位爆破震动安全质点峰值震动速度为: 塑性混凝土心墙小于  $5 \text{ cm/s}$ ; 刚性混凝土心墙小于  $3 \text{ cm/s}$ 。

邻近超径块石爆破所诱发的震动对沥青混凝土心墙的影响震动安全标准, 从安全方面考虑, 采用新浇混凝土的标准。

#### (6) 锚喷支护结构

在锚索灌浆、锚杆灌浆、喷混凝土的强度达到设计强度的  $70\%$  以前, 其  $20 \text{ m}$  范围内不允许爆破。若附近存在爆破作业, 则其爆破震动安全标准采用新浇筑混凝土的标准。

#### (7) 民房

在下岸溪人工砂石料采石场的爆破采石过程中, 存在爆破震动对周围民房的影响问题。爆破震动对民房的影响安全控制标准参考《爆破安全规程》<sup>[1]</sup>的相关规定执行。

### 3 爆破震动监测测试系统、成果及其分析

在三峡工程岩石基础开挖过程中, 为严格控制爆破震动对边坡、洞室围岩、新浇混凝土等的影响, 对开挖全过程进行了爆破震动跟踪监测; 并且严格遵循了爆破开挖初步设计—爆破震动安全校核(修改爆破设计)—按照爆破设计的施工—爆破震动监测—监测成果的信息反馈并用来指导下一次设计施工这样一套程序。在业主和设计、监理、施工及监测实施单位的共同努力下, 三峡工程的基础开挖过程所诱发的爆破震动总体上得到了有效的控制: 按照上述严格的爆破震动控制标准, 爆破震动控制的有效率达到了  $95\%$  以上; 并且从测试部位岩体或其他保护对象爆前爆后的宏观对比调查表明: 偶尔的数次峰值震动速度超标的爆破作业, 也未对保留承载岩体或新浇筑混凝土等保护对象产生严重影响, 给边坡或混凝土结构的正常运行留下安全隐患。

爆破震动监测工作所采用的仪器系统由 MCS-2b 型瞬态波形数字存储仪、CD-1 和 CDF-28 型速度传感器、YD-1 型加速度传感器、微机处理软件系统组成。爆破震动测点的布置主要考虑保护对象和爆源条件两方面因素, 采取以跟踪监测为主、以钻孔内传感器埋设后固定监测为辅的原则。在具体的爆破震动监测过程中, 同一测点一般分竖直向(用 CDF-28 型)和水平径向(用 CD-1 型)布置传感器。传感器用石膏固定在所需监测的部位, 然后与自记仪相联。爆破震动传递到测点时, 自记仪自动记录信号。爆破后利用专门编制的爆破震动分析软件(PCC 波形采集及处理软件)将自记仪采集到的震动信号输入电脑中, 进行分析和存储处理。

近 400 场次的爆破震动监测成果表明, 爆破地震波的能量分布主要由爆破规模(单响药量、总药

量)、爆心距范围、爆破方式(梯段爆破与预裂爆破)、地震波类型(面波或经由岩体内部传播而直接到达测点的直达波)、装药结构、钻孔直径、与爆源相对位置(爆破抵抗线后冲向、侧向还是正前方)以及爆区及测试区域的地形、地质、岩性、岩土介质中的含水量等因素所决定。并且由于现场监测对象和条件的限制,爆破震动跟踪监测的测点往往布置在基岩表面,这样导致实测爆破地震波的波形还受到测点处的局部地形地貌及爆破震动传感器与基岩间的粘结耦合等条件的严重影响。

从整体上看,爆破地震波有随爆心距的增大而衰减的趋势;但由于爆破与监测条件等方面的复杂性,对这400场次的爆破震动监测成果数据,无法简单地用一个峰值震动速度或震动主频衰减回归公式来表达其传播与衰减规律。尽管如此,对各种爆破方式和监测条件下的震动测试成果作一个统计分布分析,还是能获得一些定性的认识:

在同一比例距离( $Q^{1/3}/R$ )条件下,预裂爆破产生的质点峰值震动速度远大于具有良好临空面条件的梯段爆破的相应值,并且各测点处的震速大小和测点与爆源相对位置间有密切关系:抵抗线后冲向测点的震速最大,测向次之,而抵抗线前冲向最小。

在爆源的近区,其震动量的大小主要与单孔药量有关,而与总药量或单响药量的关系不密切;在爆源中、远区,测点的震速主要由单响药量决定。

对爆破地震波的主频分布<sup>[3]</sup>,发现在相同的爆心距范围内,预裂爆破诱发的地震波的主频明显高于梯段爆破情况;而在爆破方式相同的条件下,直达波的爆破地震波主频明显高于面波情况;爆破时采用的钻孔直径越小,其激发的爆破地震波的主频越高。

#### 4 值得进一步讨论的问题

在三峡工程岩石基础开挖过程中的爆破震动监测实践中,我们发现现行的安全震动速度标准在实际应用中尚存在不少问题,现就这些问题作进一步的讨论。

##### 4.1 爆破地震波中的频率对安全震动速度标准的影响

在建筑物的爆破震动控制问题上,我国现有的规范或由类似工程确定的安全震动速度标准并未考虑爆破地震波中的频率对建筑物动力响应的影响<sup>[1,2]</sup>。

然而对给定的结构,其振动响应由输入震动荷载的幅值、频谱构成、震动历时以及结构的自身振动特性参数共同决定。

工程经验告诉我们,地震烈度为8度的天然地震(对应的加速度约为0.25g,而该地震波的主频约为零点几至几赫兹),对建筑物或构筑物的破坏性是灾难性的。而对水工建筑物基础开挖中采用的常规梯段爆破条件,在离爆源约5~10m处,测得的爆破地震峰值加速度可达200m/s<sup>2</sup>、对应爆破地震波的主频约为几十至几百赫兹,只要控制得当,这种规模的爆破地震波一般不会对所需保护的边坡岩体或地下洞室围岩的动力稳定性产生破坏性影响。这种不同的地震效应表明,地震波中的频谱构成以及地震波中的组份对建筑物或构筑物的震动破坏有非常重要的影响。

现场爆破震动监测的成果显示,爆破地震波在岩体表面与内部、爆源的近区与中、远区有不同的衰减规律和频谱构成,并且爆破地震波中面波和体波的成份也可能存在显著差异<sup>[3]</sup>。在爆破震动控制标准制定过程中,体现频率、幅值及组份等综合因素是把握爆破震动影响的重要方面。这方面,国外的一些做法值得借鉴:如美国、德国等国家在制定爆破震动质点峰值速度安全标准时,考虑了爆破震动频率和建筑物自振频率的共同影响<sup>[4]</sup>。

由于目前国内外广泛采用质点峰值震速作为爆破震动控制的安全标准<sup>[1,2]</sup>,使得以往对爆破地震波传播规律的研究,往往只注重质点峰值震动速度的衰减,而对爆破地震波中频率的分布及衰减规律的研究很不充分<sup>[5]</sup>。事实上,在注重总结质点峰值震动速度的衰减规律的同时,对爆破地震波中频率的分布特征及衰减规律方面进行更深入的研究,对爆破震动控制的理论研究及工程应用都具有重要的意义。

##### 4.2 爆破震动监测控制点的爆心距确定

在爆破震动控制的生产实践中,给定的爆破震动安全标准往往只是对质点峰值震动速度作了规定,但爆破地震波的峰值震动速度会随爆心距的增大而衰减。因此,确定爆破震动的监测控制点显得

尤为重要：给定的安全震动速度只有针对一定的爆心距才有意义。

另外，爆破地震波的震动主频随爆心距的增大而降低。从此意义上说，考虑爆破震动控制中的爆心距事实上就是考虑爆破震动峰值速度和震动主频率的综合影响。

因此，合理确定爆破震动监测控制点的爆心距是有效控制爆破震动的又一重要方面。

爆源近区岩体的爆破破碎以及爆炸应力波对保留承载岩体的动力损伤影响与爆源中、远区的爆破地震效应间具有不同的力学机制。在爆源近区，应强调岩体的爆破损伤影响；而在爆源中、远区，则需控制爆破地震效应，这已为广大爆破工作者所认同。然而，对同时具有爆破损伤影响和爆破震动影响的近、中区过渡区域，目前尚很难找到衡量爆破破坏效应的有效方法。这种爆源近、中区划分中的不确定性，给安全震动速度标准的有效实施带来了很大的困难。

#### 4.3 爆源近区岩体爆破损伤影响

爆源近区岩体的爆破损伤影响是爆破有害效应的另一重要内容。

实际工作中，确定岩石爆破动力损伤影响范围的最常用方法是爆前爆后的岩体声波速度对比测试。由于岩体的开挖意味着卸荷，故用声波对比测试法所确定的岩体损伤范围中，实际上包含了岩体因卸荷而引起的松弛影响；另外，声波测试中，声波换能器与声波孔孔壁间用水耦合，使得测试用水渗透至钻孔周围的岩体裂隙中，这样就改变了岩体的原始声学力学参数。对准确而又快速、经济地确定真实的爆破损伤影响范围的方法还需要进一步研究。

#### 4.4 爆破震动对新浇筑混凝土结构影响的安全震动速度标准

国内使用的一些行业标准<sup>[2]</sup>及三峡工程施工中实际采用的对新浇筑混凝土影响的安全震动速度标准，充分考虑了新浇筑混凝土体的早期强度增长情况，这应给予充分肯定。

然而，在工程实践中我们发现，对新浇筑混凝土体这种特殊结构，其震动破坏不单是由混凝土的早期强度所决定，还与混凝土内的应力状态密切联系。新浇筑混凝土体内的应力状态受到混凝土内温度应力、混凝土的徐变及自缩变形特性等方面的严重影响。比如对岩体预应力锚索中的灌注混凝土体，由于水泥水化热的作用，在灌注后的1~3天内，其内的应力状态为压应力；而在3天以后，由于热传导及混凝土自缩变形的综合作用，灌注混凝土体的应力状态则可能变为拉应力状态。此时，若仍只是一味地强调混凝土的龄期（强度）而按照第2节中的规定来确定安全震动速度，而无视其真实的应力状态，很可能会带来严重的后果。

因此，对新浇筑混凝土的安全震动速度标准，应综合考虑混凝土的早期强度增长及其内实际应力状态的综合影响。

#### 4.5 爆破震动速度与加速度安全控制标准间的等效性原则

近年来，随着计算机数值模拟方法的普及，对重要的建筑物，要求进行爆破震动荷载作用下结构的动力响应计算及动力稳定性验算，进而提出爆破震动控制安全标准与措施成为一种发展趋势。如三峡水利枢纽工程施工后期，其爆破持续时间长达数秒的三期碾压混凝土围堰拆除爆破震动对已建三峡大坝的动力稳定性影响问题，就是一个典型的例子。由于结构动力响应计算中输入的震动荷载信息通常是基础面上的震动加速度，而规范中给定的安全震动控制标准是质点震动速度，因此理论分析得到的加速度控制标准与实际使用的质点震动速度控制标准间如何统一或等效急待研究与解决。

由于爆破震动位移、速度和加速度三个物理量之间以频率作为中间变量相联系，如果考虑输入荷载的频率影响，爆破震动位移、速度和加速度三者间应该是等效的。对单自由度系统，若输入荷载为谐波，则速度和加速度安全标准间可以简单地通过考虑频率因素的影响而进行等效。而对实际房屋、大坝、边坡和洞室围岩等复杂结构，情况相对复杂。一方面，该振动系统为多自由度系统，另一方面，输入的爆破地震波为含有多种频率构成的复合波，因此导致振动响应中的峰值速度对应的频率和峰值加速度对应的频率并不完全一致。

## 5 结论与结语

通过以上分析和讨论，我们可获得以下基本结论：

- (1) 三峡工程的基础开挖过程所诱发的爆破震动总体上得到了有效的控制。

(2) 爆破地震波整体上随爆心距的增大而衰减。爆破规模、爆破方式、测点与爆源相对位置等因素对爆破地震波的峰值震速有重要影响：在爆源的近区，其震动量的大小主要与单孔药量有关，在爆源的中、远区，测点的震速主要由单响药量决定；在同一比例距离 ( $Q^{1/3}/R$ ) 条件下，预裂爆破产生的质点峰值震动速度远大于具有良好临空面条件的梯段爆破的相应值；抵抗线后冲向测点的震速最大，测向次之，而抵抗线前冲向最小。

(3) 在相同的爆心距范围内，预裂爆破诱发的地震波的主频明显高于梯段爆破情况；而在爆破方式相同的条件下，直达波的爆破地震波主频明显高于面波情况；爆破时采用的钻孔直径越小，其激发的爆破地震波的主频越高。

通过参加三峡工程岩石基础开挖过程中爆破震动监测与控制的实路，我们认为对现行采用的安全震动速度标准在下述方面需进一步研究与完善：爆破地震波中的频率对安全震动速度标准的影响；合理确定爆破震动监测控制点的爆心距；确定爆破损伤影响范围的快速、准确方法；考虑混凝土的早期强度增长及其内实际应力状态对新浇筑混凝土的安全震动速度标准的综合影响；对爆破震动速度与加速度安全控制标准间的等效性原则进行研究，以使理论计算分析成果与实际控制标准间能协调统一。

#### 参考文献：

- [1] GB6722-86, 爆破安全规程 [S].
- [2] 水利部建设司. 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范 [R]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 卢文波, 赖世骧, 朱传云, 等. 三峡工程通航建筑物基础开挖爆破震动频率分布特征分析 [J]. 爆破, 1999, 16 增刊: 58-61.
- [4] 吴德伦, 叶晓明. 工程爆破安全振动速度综合研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16 (3): 266-273.
- [5] 林俊德. 爆炸地震波的频率特性分析, 岩石力学与工程学报, 1996, 15 增刊: 476-480.

## Safety Standards of Blast Vibrations Adopted in Rock Base Excavation of Three Gorge Project

LU Weir bo, LAI Shi-xiang, ZHU Chuan-yun, SHU Da-qiang

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** The safety standards of blast vibrations and results of blast vibration measurements during rock base excavations in Three Gorge Project are introduced in this paper. Several important problems related to the standards are discussed also.

**Key words:** Three Gorge Project; excavation; blasting vibration; safety standard