

水利水电工程 爆破技术新进展

中国水利学会工程爆破专业委员会 编

SHUILI SHUIDIAN
GONGCHENG
BAOPO JISHU
XINJINZHAN



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利水电工程 爆破技术新进展

中国水利学会工程爆破专业委员会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

前 言

随着我国水电开发进程的加快，特别是西部大开发号角吹响，三峡、南水北调、龙滩、小湾、锦屏、糯扎渡、溪洛渡、向家坝、构皮滩、彭水、银盘、瀑布沟、拉西瓦、亭子口等大型水利、水电枢纽工程的相继开工建设，为爆破大展身手提供了难得的机会，为爆破技术的发展提供了很好的科研和实践平台，爆破新技术、新工艺、新方法不断涌现。

在小湾电站的成功经验基础上，目前在建的锦屏、溪洛渡、向家坝等大型水电站工程，采用新的爆破设计理念、精细化管理方法，使溪洛渡、锦屏的拱肩槽、边坡的开挖质量又上了一个新的台阶；向家坝、溪洛渡的地下厂房特别是岩锚梁的开挖质量又提高到了一个新的水平。

高精度导爆管雷管起爆网路已成为围堰拆除爆破设计起爆网路的首选，并已在常规深孔台阶爆破中得到了推广应用；电磁雷管已成为锦屏水电站开挖起爆必须采用的起爆器材；数码电子雷管在三峡工程三期 RCC 围堰拆除爆破中的首次应用，标志着围堰拆除起爆网路数字化、精确化的发展方向。现场混装车技术以其安全性高、装药速度快、性价比好等优势，已在水利水电行业得到广泛应用。

双聚能线性药柱的研制成功，将进一步提高预裂、光面爆破效果；应用离心模型试验研究爆炸荷载效应，进一步拓展了爆破理论研究的思路；堰塞湖应急抢险爆破技术的研究，为爆破在类似应急抢险工程中的应用提供了范例。

随着爆破安全控制标准研究的深入、爆破有害效应监测技术的发展，爆破技术得到了进一步提升。危险源辨识及控制措施的研究，将在风险预警与控制等方面发挥更大的作用，避免或减少事故的发生，确保人民生命财产的安全。

为总结和交流我国水利水电工程爆破设计、施工、科研、管理等方面的

经验，推动爆破技术的发展，促进科研成果转化为生产力，中国水利学会工程爆破专业委员会于2009年11月在海南省三亚市组织召开了中国水利电力第七届工程爆破学术交流会议。本书基于该会议收录的论文39篇，经审查、修编而成。

本书的出版得到了中国葛洲坝集团公司的大力支持，在此表示感谢！

中国水利学会工程爆破专业委员会

2010年5月8日

目 录

前 言

应用离心模型试验研究爆炸荷载效应	梁向前 王秋生 陈祖煜 霍永基 张永哲 (1)
南水北调中线京石段渠道工程 (S34 标) 控制爆破技术	刘治峰 史胜利 (12)
溪洛渡水电站岩锚梁开挖施工质量控制技术	李 峰 樊义林 (17)
导流洞即时过流围堰拆除爆破关键技术研究	赵 根 (24)
危险源辨识中炸药露天爆炸事故后果模型探讨	吴新霞 (32)
银盘水电站二期开挖爆破试验成果分析及应用	黄 宁 谢建林 熊新宇 张春燕 吴 俊 (36)
水利水电工程爆破危险源辨识及控制浅析	谌林云 (40)
深孔爆破振动测试分析与降震措施	刘治峰 张戈平 迟利梅 王炳恒 (45)
水库排沙洞爆破开挖技术研究	吕兴波 高恩波 (52)
西大洋水库溢洪道闸室整体爆破拆除	刘治峰 张戈平 高恩波 (58)
机电设备的爆破振动安全控制标准研究	刘晓军 程 黎 苏利军 (65)
三峡地下电站厂房系统开挖爆破振动安全监测	陈 卓 张春燕 黄 宁 (70)
采石场周边民房爆破振动破坏范围的鉴定方法	吴新霞 任贤斌 王文辉 (75)
锦屏辅助洞岩爆应力解除爆破及影响因素研究	严 鹏 徐 伟 周垂一 (79)
新奥法在向家坝水电站地下厂房洞群开挖施工中的应用	徐成光 (88)
复杂条件下的岩坎拆除爆破	徐成光 (94)
精细化管理在向家坝水电站地下厂房岩壁梁开挖施工中的应用	徐成光 (99)
向家坝电站地下厂房开挖爆破振动控制关键技术	徐成光 (104)
双聚能槽药柱的研究及应用	秦健飞 秦如霞 李必红 (110)
高耸水工建筑物的无损定向爆破拆除	秦健飞 秦如霞 (118)
溪洛渡水电站右岸泄洪洞爆破开挖施工技术	覃壮恩 周 焱 张卫华 (124)
钢支撑灌注桩复合船坞围堰的爆破拆除技术	蒋跃飞 张正忠 王宗国 宋志伟 (135)
船坞围堰拆除爆破地震效应初探	王恒富 张正忠 唐小再 蒋跃飞 王宗国 宋志伟 (141)
锦屏一级水电站右岸导流洞围堰拆除爆破方案	崔文雄 徐海祥 段汝健 (150)
电爆网路设计施工中爆破安全技术浅谈	姚天波 (156)

溪洛渡水电站导流洞超大型复杂围堰群精细爆破拆除

.....	程祖刚 朱海燕 刘美山 刘亚进	(161)
预裂爆破技术在大岗山水电站左岸高边坡开挖中的应用 ...	金连军 吴 涛 宋 洋	(170)
木里土电站隧洞爆破试验	邓 刚	(175)
普光天然气净化厂场平石方爆破试验	贺宝桥	(179)
下车亭隧洞洞挖爆破振动控制设计	韩冬杰	(185)
精细爆破控制技术在溪洛渡工程中的实践	周绍武 周友新	(190)
龙滩水电站地下厂房开挖技术总结	杨天吉	(199)
东江水电站扩建工程进水口爆破对东江薄拱坝影响分析	刘佳良 卢文波	(207)
锦屏一级水电站拱坝左岸坝基预裂爆破施工技术	朱忠华 胡书红 谢军兵	(212)
围堰拆除爆破拦污栅墩根部的振动特性与安全控制	张晓平 佟锦嶽	(219)
溪洛渡水电站左岸泄洪洞龙落尾段开挖施工技术	刘太平 韩进奇 龙 盎	(226)
堰塞湖应急排险中的爆破技术	杨享衢	(236)
现场混装车技术爆破开采水电站面板堆石坝料的研究	周桂松 王清华 仲 峰 李名松	(242)
132m 渡槽爆破拆除	李建强	(250)

应用离心模型试验研究爆炸荷载效应

梁向前 王秋生 陈祖煜 霍永基 张永哲

(中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 离心模型试验在爆炸问题的研究中具有独特的优势, 当离心加速度达到 $100g$ 时, $1g$ 炸药就可以模拟原型中 $1t$ 炸药的效果。应用离心模型试验研究建筑物的抗爆问题在国外已经有很长的历史, 国内却处于空白。本文从相似关系入手, 综合介绍了离心爆炸试验的相似理论, 试验误差和误差控制, 最后通过 3 个实例介绍了离心爆炸模型试验的应用情况。

关键词: 离心机; 模型试验; 爆炸; 相似率

1 引言

战争期间, 重大民用和军事工程是敌方攻击的主要目标。第二次世界大战中, 英国空军就曾对德国 Ruhr 河支流上的 Mohne 大坝及 Weser 河支流上的 Eder 大坝进行空袭, 将 5 枚 $6t$ 的炸弹投入坝前库区实施水中爆炸, 造成大坝溃坝, 下游广大地区被淹, 大量基础设施被毁。朝鲜战争中 (1953 年) 美军也曾炸毁朝鲜的石岩坝和慈山坝等几座土石坝, 造成大片农田淹没, 交通中断。民用建筑抗爆及安全防护问题的研究备受世界各国的重视。

传统的模型试验受相似律限制, 难以模拟爆炸荷载效应。土工离心试验提供了一种研究爆炸冲击波效应的有效工具。土工离心机通过高速旋转增加模型重力的方法, 使模型土体产生与原型相近的自重应力, 模型的变形及破坏机制与原型相似, 从而可以直接模拟复杂的岩土工程及动力学问题。假定爆炸过程中化学能转化为其他类型能量的比例在原型和模型中一致, 可以得出炸药的质量、能量相似关系为 $1/N^3$ (Ng 为离心模型中的加速度, g 为重力加速度)。采用极少量的炸药, 即可以模拟原型巨量炸药的爆炸效果。例如, 在离心机中进行爆炸试验, 当离心加速度达到 $100g$ 时, $1g$ 炸药的效果就相当于原型中 $1t$ 炸药的效果。在国防建设研究领域, 采用离心模型试验研究各种掩体爆炸载荷下的稳定性, 具有无可比拟的优越性。

前苏联从 1930 年就开始应用离心机进行爆炸方面的研究^[1], 公开可见的、较早的文章是 Pokrovsky^[2] 在第一届国际土力学大会上发表的论文。从 1970 年到现在, 美国波音公司应用离心机进行了大量的冲击、爆炸方面的实验。并且, 前苏联^[1] 和美国^[3] 都应用离心机进行了原子弹爆炸方面的研究。随着离心模型试验在岩土工程界的推广, 我国陆续建造了一批

大、中、小型离心机,国内在土工离心模型试验的基础理论、试验方法以及工程技术应用等方面开展了较为深入的研究,但是在离心爆炸试验方面尚处空白。本文拟从离心模型试验的相似理论、误差分析、误差控制入手,综合介绍国外离心爆炸试验的发展概况。

2 离心爆炸试验的相似理论

岩土材料的力学行为与所处的应力状态和应力历史有关,离心模型试验应用离心力模拟重力,从而使土工建筑物的自重提高到原型状态。图 1 所示为一土石坝原型与 $1/N$ 缩尺的离心试验模型分别在 $1g$ 重力场和 Ng 离心力场下覆土应力的示意图,图 2 所示为 $1/N$ 缩尺的离心坐标系,图 3 所示为模型中 A 点在局部坐标系下的加速度分量示意图。当离心机加速至预定转速并保持此恒定旋转速度时,角加速度 $d^2\theta/dt^2 = 0$, A 点的径向速度也近似为零 ($dR/dt \approx 0$),此时,模型所承受的离心加速度为 $R(d\theta/dt)^2$,从而对模型形成了一个人造的离心力场。

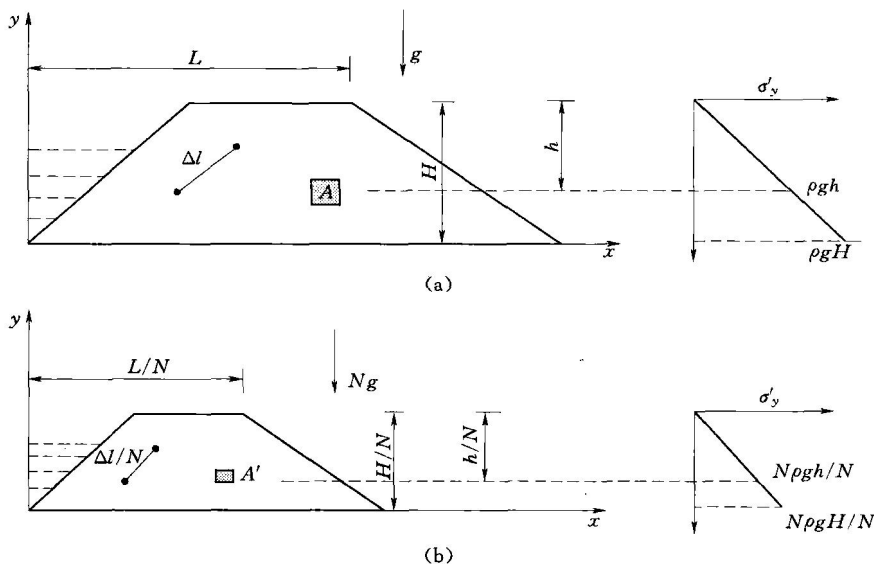


图 1 原型与 $1/N$ 缩尺的离心试验模型分别在 $1g$ 重力场和 Ng 离心力场下覆土应力
(a) 原型; (b) $1/N$ 缩尺模型

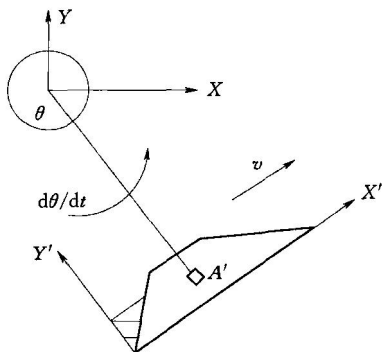


图 2 $1/N$ 缩尺的离心坐标系

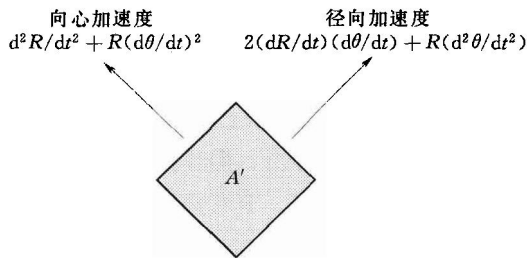


图 3 模型中 A 点在局部坐标系下的加速度分量

在离心应力场中,模型长度缩小了 N 倍,而模型所受的加速度增大了 N 倍,各物理量的相似关系可以很容易的得出,在此不再赘述。值得一提的是,离心模型试验中如果不计土体固结的影响,渗流时间比尺为 $1/N^2$,而惯性时间比尺为 $1/N$,在土动力学研究中,渗流问题和惯性效应常常同等重要,因此在试验过程中需要进行特别处理。

通过量纲分析可以得到离心爆炸试验中弹坑体积的表达式,弹坑体积 V 可以表示为重力加速度 g 、土体密度 ρ 、土体强度 Y 、炸药包埋深 d 、炸药包比能 Q 、炸药包半径 a 、炸药密度 δ 的函数,即:

$$V = F(g, d, \delta, Y, \rho, a, Q) \quad (1)$$

假设炸药包为球形,炸药包质量可表示为:

$$W = \frac{4}{3} \pi \delta a^3 \quad (2)$$

Schmidt^[4]选取 ρ 、 a 、 Q 为主要变量,应用 Π 定理,得到:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (3)$$

其中

$$\pi_1 = V\rho/W \quad (4)$$

$$\pi_2 = \frac{g}{Q} \left(\frac{W}{\delta} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$\pi_3 = d \left(\frac{\delta}{W} \right)^{1/3} \quad (6)$$

$$\pi_4 = \rho/\delta \quad (7)$$

$$\pi_5 = \frac{Y}{\delta Q} \quad (8)$$

弹坑体积和上述无量纲组的关系可以通过试验确定,比如在不改变炸药和土体的性质时,如果在地表埋设炸药,可以得到弹坑体积和离心加速度的关系:

$$\pi_1 = \bar{f}(\pi_2) \quad (9)$$

Schmidt 等^[4,5]的试验数据表明,两者呈幂函数关系,即:

$$\pi_1 \pi_2^x = \text{const} \quad (10)$$

图 4 所示为 Schmidt 等^[4]、Pieku-towski 等^[6,7]引用的试验结果,可以清楚地反映出上式所示的规律。

通过量纲分析可以得到弹坑形成时间与弹坑体积的关系:

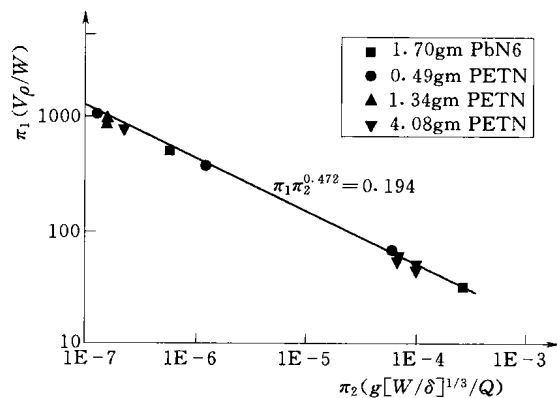


图 4 地表爆炸时表观弹坑体积和离心加速度的关系

$$T \propto \sqrt{\frac{V^{1/3}}{g}} \quad (11)$$

3 离心爆炸试验的误差分析和误差控制

原型中的重力场是均匀分布的,而离心模型的重力场与转动半径有关,在离心试验过

程中, 模型各个点的离心加速度并不相同。比如, 以模型底部为基准点, 即模型底部与转动中心的距离为 R , 设模型高度为 h , 则模型底部的竖向应力为:

$$\sigma_{v, \text{bottom}} = \int_{R-h}^R \gamma r \omega^2 dr = \frac{\gamma \omega^2}{2} h(2R-h) \quad (12)$$

以模型顶部为基准点, 即模型顶部与转动中心的距离为 R , 则模型底部的竖向应力:

$$\sigma_{v, \text{bottom}} = \int_R^{R+h} \gamma r \omega^2 dr = \frac{\gamma \omega^2}{2} h(2R+h) \quad (13)$$

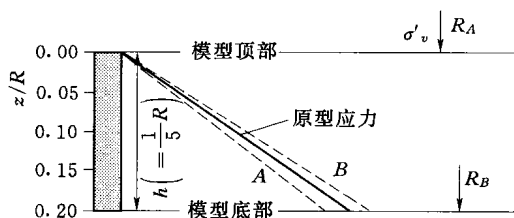


图5 离心模型中的竖向应力误差

原型中对应点的实际应力为 $\sigma_{v, \text{bottom}} = \gamma \omega^2 R h$, 其中 $\omega^2 R$ 表示离心加速度。式 (12)、式 (13) 表示的竖向应力分布如图 5 虚线 A、虚线 B 所示, 如果以模型底部为基准, 则离心模型中模拟的竖向应力将小于对应原型中竖向应力, 反之, 如果以模型顶部为基准点, 则离心模型中模拟的竖向应力将大于对应原型中竖向应力。如果模型高度是离心半径的

1/5, 则以模型底部或顶部为基准时, 竖向应力的误差为 10%, 如果基准点选在模型 2/3 深度处, 竖向应力误差大约为 5%。

在动力学问题的研究中需要考虑 Coriolis 效应, Coriolis 效应是由离心力场和重力场方向误差引起的一个很重要的因素。现在以图 6 为例来说明离心机运行过程中模型的加速度分量, 借以说明 Coriolis 效应。

图 6 中模型中心距离离心机转轴的距离为 R , 在极坐标下:

$$x = R \cos \theta \quad (14)$$

$$y = R \sin \theta \quad (15)$$

模型中质点的速度:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dR}{dt} \cos \theta - R \frac{d\theta}{dt} \sin \theta \quad (16)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dR}{dt} \sin \theta + R \frac{d\theta}{dt} \cos \theta \quad (17)$$

模型加速度:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 R}{dt^2} \cos \theta - 2 \frac{dR}{dt} \frac{d\theta}{dt} \sin \theta - R \frac{d^2 \theta}{dt^2} \sin \theta - R \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \cos \theta \quad (18)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{d^2 R}{dt^2} \sin \theta + 2 \frac{dR}{dt} \frac{d\theta}{dt} \cos \theta + R \frac{d^2 \theta}{dt^2} \cos \theta - R \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \sin \theta \quad (19)$$

模型局部坐标和整体坐标之间满足:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (20)$$

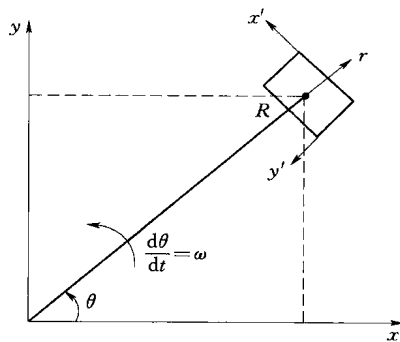


图6 模型的整体坐标和局部坐标

即：

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 x'}{dt^2} \\ \frac{d^2 y'}{dt^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta \\ -\cos\theta & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2 x}{dt^2} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

结合上面各式可以得到切向和径向加速度的表达式：

$$\frac{d^2 x'}{dt^2} = 2 \left(\frac{dR}{dt} \right) \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + R \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (22)$$

$$\frac{d^2 y'}{dt^2} = -\frac{d^2 R}{dt^2} + R \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (23)$$

式(22)右边第一项表征了径向速度对切向加速度的影响,即所谓的 Coriolis 效应。Schofield^[2]建议 $(dR)/(dt) \leq 0.05\omega R$, 此时 Coriolis 效应引起的附加切向加速度小于 10%。

在爆炸问题中, Coriolis 效应直观的表现是弹坑形状在平面内的对称性, Pokrovsky 等^[8]、Schmidt 等^[4]的试验结果表明, Coriolis 效应并不明显,这个结论还需要通过不同土工建筑物的离心爆炸试验进行验证。

除去离心加速度方向引起的误差外,粒径效应、边界效应也是需要特别关注的问题, Schofield^[9]提出应用模拟模型试验(modeling of models)进行误差控制,即对照几组不同离心加速度条件下的试验结果,通过各组结果的一致性来判定试验结果的可信程度。

Kutter 等^[10]在研究土与结构的相互作用时,分别作了 $l^* = 1/48.5, g^* = 1$; $l^* = 1/97, g^* = 97$; $l^* = 1/48.5, g^* = 48.5$ 的试验,其中 l^* 表示模型尺寸和原型尺寸的比值, g^* 表示离心加速度和重力加速度的比值。试验模型布置如图 7 所示,实验结果如图 8 所示。

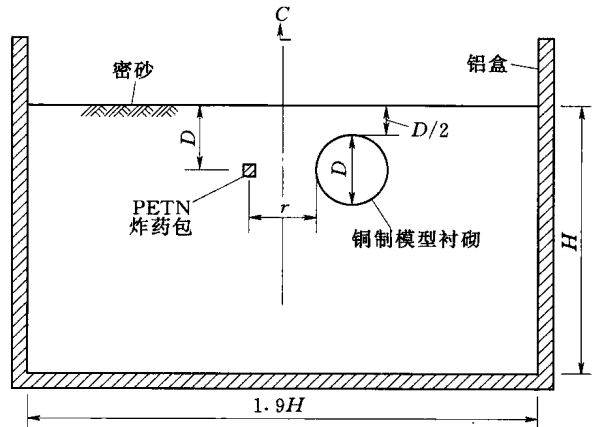


图 7 试验模型布置 (铜片隧洞模型)

图 8 中点线分别表示 $l^* = 1/97, g^* = 97$; $l^* = 1/48.5, g^* = 48.5$ 的试验结果,短虚线表示原型试验结果,长虚线表示 $l^* = 1/48.5, g^* = 1$ 的试验结果。从图 8 中可以看出,模拟模型试验结果与原型试验结果非常接近,这说明了本试验结果的可靠性和模拟模型试

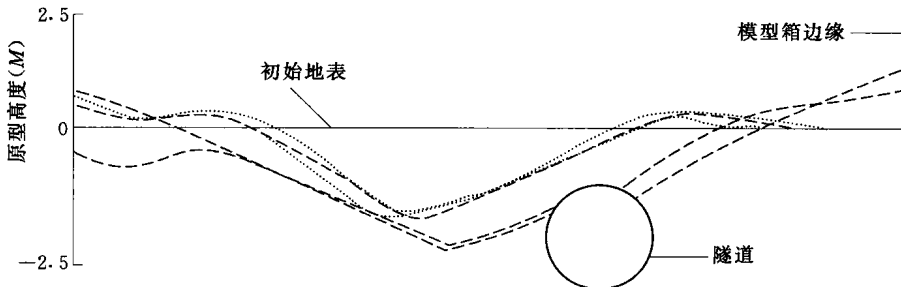


图 8 不同比尺下试验结果与原型试验结果的对照

验方法的可行性；在 $l^* = 1/48.5$, $g^* = 1$ 时弹坑尺寸比原型试验结果大得多，这说明了重力加速度在弹坑形成过程中所起的重要作用。由于一般情况下现场情况非常复杂，离心模型试验结果很难与原型试验结果对照，所以模拟模型试验是验证离心试验结果可靠性的有力手段。

4 离心爆炸试验的应用举例

近年来，国外一些研究机构利用离心机试验对爆炸与冲击荷载作用下的岩土工程问题进行了多方面的研究工作，但其中一些课题隶属军方保密范畴，相关资料无法获得。以下所述是一些公开的研究成果，本节通过这些例子对应用离心机进行爆炸荷载效应的研究作简要介绍。

4.1 由爆炸荷载引起的土与结构的动力相互作用研究

英国 Wales 大学的 Davies MCR^[11] 通过一系列离心模型试验研究了地下爆炸对地下结构的影响，其中包括了两方面的内容。第一个方面是对弹坑的基本研究，影响因素包括爆源、应力波通过土体时的衰减，以及应力波传播过程中土与结构的相互作用。第二个方面研究使用屏障保护地下结构免受地下爆炸的可行性，将无屏障结构对荷载的反应与各种屏障下的反应比较，评估了各种屏障的有效性。

试验使用英国曼彻斯特大学的土工离心机。该离心机直径为 6.4m，可以携带一个 2.0m×1.0m×0.6m 的吊篮。在本次试验中，模型直径为 0.75m，高 0.46m。所有试验都使用 20g 的离心加速度。

模型的总体设计如图 9 所示。在每个试验中均考虑两个受到爆炸荷载的结构。其中之一置于防护板之后，为“有防护”的结构，另一个“无防护”的结构作为对照，两种结构与爆源的距离相等。试验箱的各边与底部覆盖

一层 12mm 厚的聚苯乙烯板，以减少应力波到达模型边界时的反射。在模型箱底部铺设一层 40mm 厚豌豆粒大小的砾石作为排水层。

在本次模型试验中考虑 4 种防护形式，它们是：

(1) 低声波阻抗屏障——厚度为 12mm 的聚苯乙烯层（等于原型尺寸 0.24m）。

(2) 刚性屏障——15mm 厚的加强混凝土墙（等于原型尺寸 0.3m）。纤维物使用“微混凝土”，强度 $f_{cu} = 30\text{N/mm}^2$ ，在垂直与水平方向布网，间隔 5mm（原型尺寸为 0.1m），纤维直径 1mm（原型尺寸 0.02m）。

(3) 复合屏障——聚苯乙烯与加强混凝土屏障 [各自都与 (1)、(2) 中所描述的尺寸相同] 置于一一起，聚苯乙烯朝向爆炸源。

(4) 空障——在结构物的底部挖一道 15mm

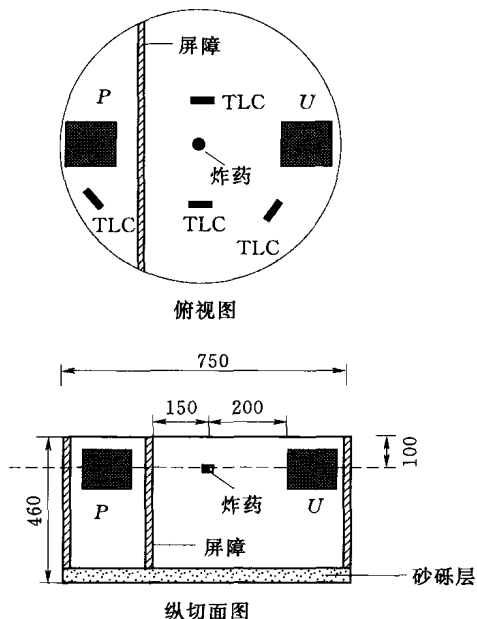


图 9 离心机模型箱 (单位: mm)

宽的槽。在砂模型中用支撑片隔开,在黏土模型中不做支撑。

在砂模型试验中,爆源为 0.0015kg 的炸药与 0.0005kg 当量的雷管,这相当于原型中 16kg 炸药。在黏土模型中,用 0.001kg 的塑料炸药与雷管,相当于原型中 12kg 炸药。爆源位于土表层 100mm 以下的钻孔中,即结构的中线位置,放置炸药后封孔。

在结构上安置应变计与加速度计。在模型的无防护区与防护区内分别放置土压力盒(图 9 中的 TLC)。加速度计(GS—500 型,2500g)长 23mm,直径 12.7mm。采用应变式土压力盒,直径 4mm,厚 12mm。信号采集系统为 32 道采集器,500kHz。

试验结果如图 10~图 13 所示,结果表明,虽然聚苯乙烯屏障能最有效地减弱结构的应力波,但这种屏障对于惯性荷载的阻隔作用是有限的,原因在于屏障设置于弹坑与结构之间,弹坑与结构间土体的加速度产生了显著的惯性力。由于聚苯乙烯板的高度可塑性,荷载并不会立即传递到屏障后的土体。虽然加强混凝土屏障对应力波荷载的减弱有限,但在惯性力加载阶段,与未防护结构相比,有混凝土屏障的结构应变显著变小,原因在于这种屏障具有比聚苯乙烯材料高得多的抗弯刚度。聚苯乙烯与混凝土材料组成的复合屏障具有聚苯乙烯材料的低声波阻抗与加强混凝土材料的刚度的优点。

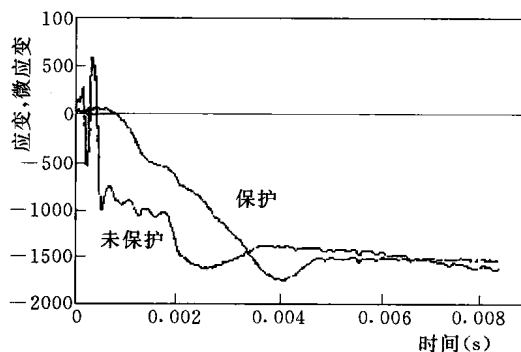


图 10 结构中部应变计的反应——聚苯乙烯屏障

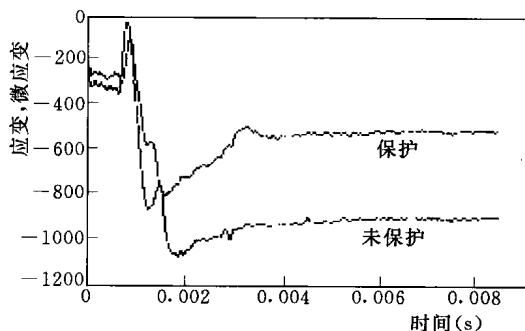


图 11 结构中部应变计的反应——混凝土屏障

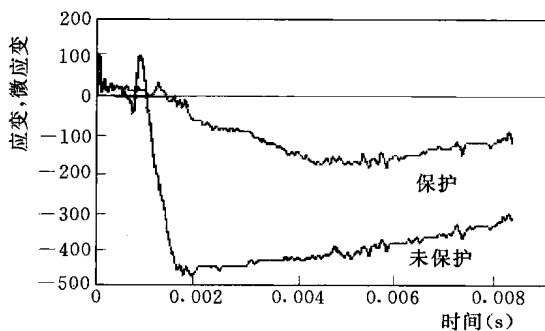


图 12 结构中部应变计的反应——复合屏障

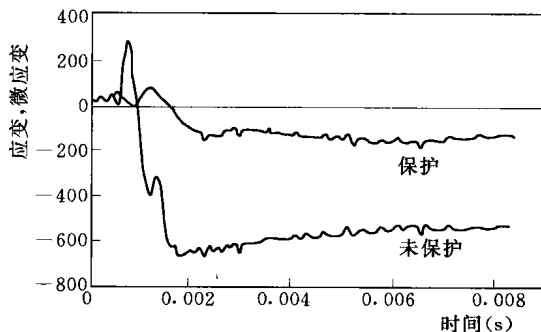


图 13 结构中部应变计的反应——开槽

4.2 爆炸对柔性浅埋隧道的影晌试验

美国加州大学戴维斯分校的 Kutter 等人^[10]对埋于干砂中受临近高能爆炸影响的柔性浅埋隧洞进行了离心模拟试验。试验在不同的模拟加速度下进行(铜片和铝片制作的半径为 2.5~5cm 的隧洞,加速度范围为 1g~97g)。在离心模拟过程中,埋设的 1/2g 和 1/16g 硝

酸甘油炸药在距隧洞 0~2 隧洞半径范围内引爆。试验表明,对于暴露于或几乎暴露于弹坑的柔性隧洞来说,主要破坏发生在弹坑的形成的过程中。靠近弹坑土体的剧烈流动是隧洞扭曲的主要原因,而冲击波的作用是次要的。研究表明,在柔性隧洞破坏时,与隧洞到炸药的距离相比,隧洞到弹坑的距离是一个较为重要的因素。弹坑区域分布如图 14 所示。

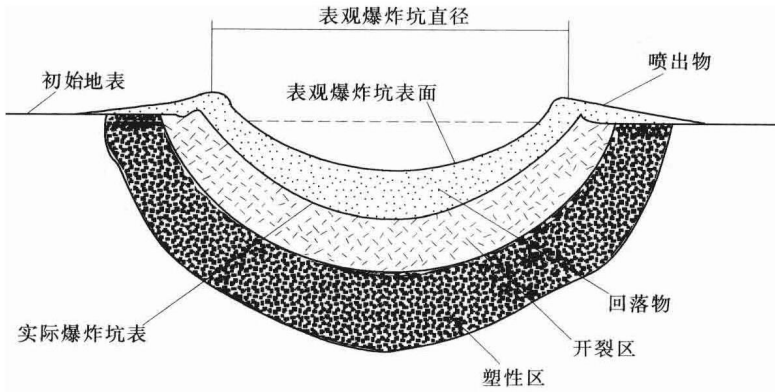


图 14 弹坑区域的分布

试验在 Davis 加利福尼亚大学的半径为 1m、功率为 10000g—lb 的离心机上进行。模型试验在两个大小不同的铝盒中进行,设计了 3 种不同的隧洞模型,其中两种用铜片制作,较大隧洞铜片厚度 0.15mm,隧洞长度 15.2cm,半径 5cm,均为较小隧洞的两倍。第三种隧洞模型用铝合金制成,体积 470cm³,壁厚 0.13mm,长 16.3cm,外直径 6.5cm。采用了 2 种炸药管,半径分别为 7.6cm 和 3.9cm,分别容纳 512mg 和 64mg 的硝酸甘油炸药。试验模型布置如图 15 所示。

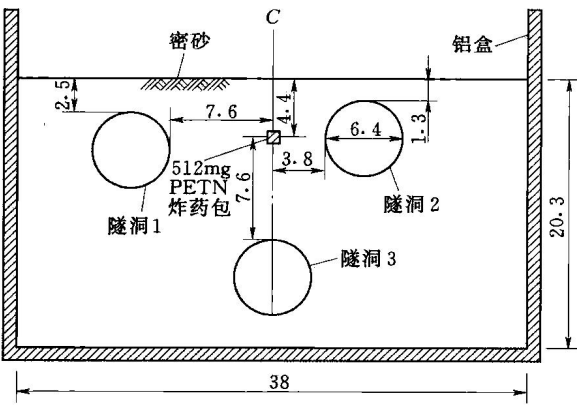


图 15 试验模型布置 (铝合金模型) (单位: cm)

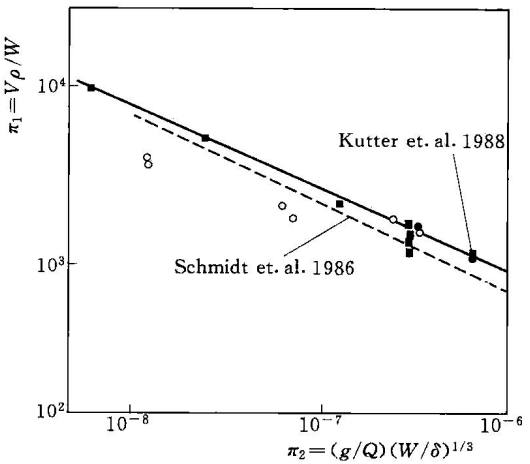


图 16 归一化后的弹坑体积和重力加速度的关系

图 16 是归一化后的弹坑体积和重力加速度的关系,从图 16 中可以看出,该文结果和 Schmidt 等^[4]试验结果很接近,只是由于所用砂土密度的不同两者略有差别, Schmidt 等^[4]所用砂土的密度为 $\rho = 1.8\text{g/cm}^3$, Kutter 等^[10]所用砂土的密度为 $\rho = 1.7\text{g/cm}^3$ 。

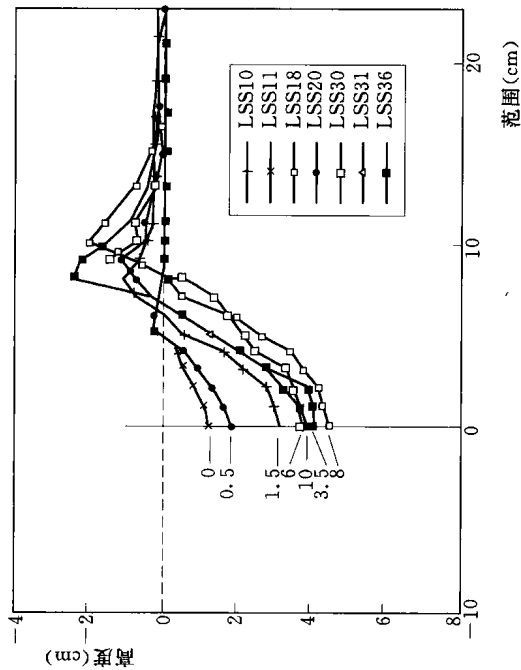


图 18 1gPETN 炸药、10g 重力加速度下的弹坑形状

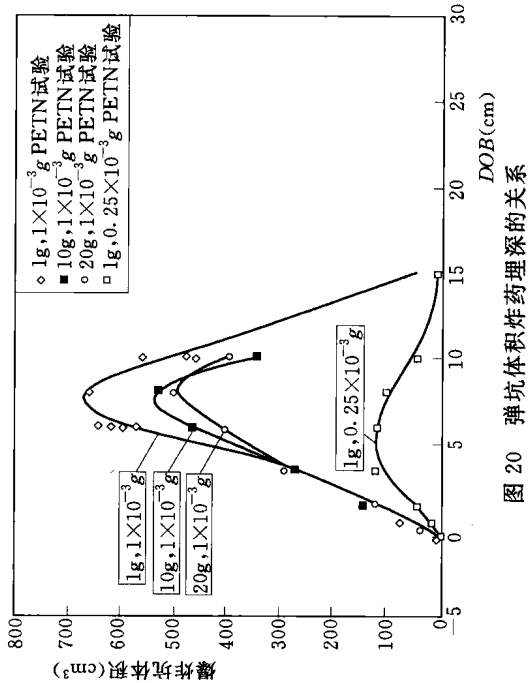


图 20 弹坑体积药埋深的关系

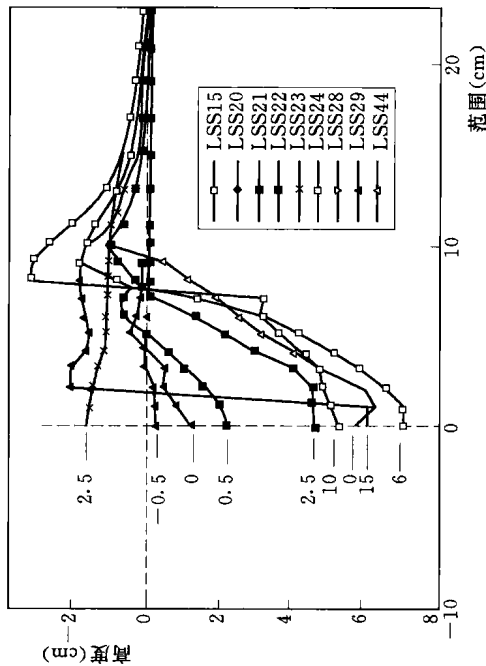


图 17 1gPETN 炸药、1g 重力加速度下的弹坑形状

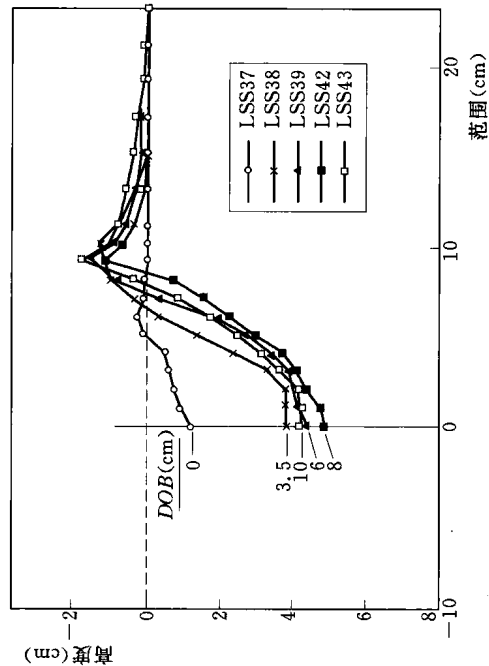


图 19 1gPETN 炸药、20g 重力加速度下的弹坑形状

4.3 爆炸对月球土壤影响的离心模型试验研究

Chaun - Ping Lin 等^[12]根据阿波罗登月取得的月球土壤数据,应用玄武岩为材料制备试样,利用离心机研究了爆炸对月球土壤的影响,其中包括炸药埋深和弹坑尺寸的关系,以及爆炸对月球土壤的松动效应,研究结果显示炸药埋深在 8 倍炸药包直径时弹坑体积最大,研究结果可以为应用爆炸荷载在月球上构筑防护设施提供借鉴。

试验使用 PETE 炸药,重量分别为 1g 和 0.25g,位于模型不同的深度 (DOB),从表面接触爆炸到 25cm 的埋深不等。为了验证模型比例关系的正确性和自重变化、药量变化对实验结果的影响,应用离心机进行了部分模型试验。离心加速度分别为 10g、20g、31.5g 和 50g。

每次模型起爆后,用仪器测量爆炸漏斗的尺寸,计算其体积。测量泥土松散度的方法有 2 种:一是使用小的锥形贯入仪,比较同一位置、同一高度、同一速度爆炸前后贯入的深度;二是使用反铲机,比较爆炸前后单位挖掘消耗能 (SEEC)。

试验结果表明,从接触爆炸开始,随着炸药埋深的增加,爆炸漏斗的表观深度也迅速增加,当埋深达到某一值时,漏斗的深度达到最大,随后随着埋深的增加,爆炸漏斗的表观深度减少,漏斗的形状从碗形变为烟囱形,直到不形成漏斗 (如图 17~图 19 所示)。

弹坑体积随炸药埋深的变化规律如图 20 所示。通过图 20 可以看出,在炸药埋深为 8cm 左右,即 8 倍炸药包直径时弹坑体积最大,该研究成果对在月球上通过爆炸松散土体建立防护设施具有重要的意义,文中还研究了爆炸荷载对月球土壤的松散效果,在此不再赘述。月球环境和地球上的试验环境有很大差异,因此针对月球土壤的离心试验方法还有很多问题需要改进,但是由于月球与地球重力加速度的不同,应用离心模型试验研究月球土壤以及建筑结构的力学特性是重要的试验手段。

5 结语

本文在介绍离心模型试验相似理论和误差分析的基础上,重点探讨了离心爆炸试验的相似理论和误差控制方法,通过实例说明了如何通过模拟模型试验控制试验误差。通过爆炸荷载下屏障的隔振效果、隧洞的抗爆能力以及月球土壤的动力响应三个实例说明了离心爆炸试验的试验装置、试样制备以及数据采集等问题,同时说明了离心爆炸试验的可行性。

在国家财政的大力支持下,中国水利水电科学研究院已经完成了土工离心机中爆炸模拟装置和量测设备的研发采购工作。为了更清楚的认识爆炸荷载下民用和军事工程的破坏机理,填补国内这方面的研究空白,缩短与先进国家研究水平的差距,笔者建议国内更多的土工离心实验室开展这方面的研究工作。

参考文献

- [1] Schofield A N (1998). Geotechnical centrifuge development corrects Terzaghi' s errors. Presented at the Tokyo Conference of TC2.
- [2] Pokrovsky G I, Fedorov I S (1936). Studies of soil pressures and soil deformations by means

- of a centrifuge. 1th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: 70.
- [3] Schmidt R M (1978). Centrifuge simulation of JOHNNIE BOY 500 - ton cratering event. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th: 3877 - 3889.
- [4] Schmidt R. M. and Holsapple K. A. (1980) Theory and experiments on centrifuge cratering. J. Geophys. Res. 85 (B1), 235 - 252.
- [5] Schmidt RM, Housen KR. (1987). Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering. Int. J. Impact Eng. , 5: 543 - 560.
- [6] Piekutowski A J (1974). Laboratory - scale high - explosive cratering and ejecta phenomenology studies. AFWL - TR - 72 - 155, Air force Weapons Lab. , Albuquerque, N. Mex. .
- [7] Piekutowski A J (1975). A comparison of cratering effects for lead azide and PETN explosive charges. AFWL - TR - 74 - 182, Air force Weapons Lab. , Albuquerque, N. Mex. .
- [8] Pokrovsky G. I. and Fyodorov I. S (1969). Centrifugal Model Testing in the Construction industry. Vol. I, II, Nedra. Publishing House, Moscow. (English translation by Building Research Establishment Library Translation Service, Great Britain, August 1975.).
- [9] Schofield A N (1980). Cambridge geotechnical centrifuge operations. Geotechnique. 30 (3): 227 - 268.
- [10] Kutter B L, O'Leary L M, Thompson P Y , Lather R, (1988). Gravity Scaled Tests on Blast - Induced Soil - Structure Interaction. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 114 (4): 431 - 447.
- [11] Davies M. C. R. (1994), Dynamic Soil Structure Interaction Resulting from Blasting Loading, Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds.), Rotterdam, Bakema, 319 - 324.
- [12] Lin C P, Goodings D J, Bernold L E, Dick R D (1994). Modeling studies of effects on lunar soil of chemical explosions, ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 120, (10). 1684 - 1703.