

DOI: 10.11779/CJGE201505024

# 爆破挤淤堤坝工后沉降特性离心模拟试验研究

徐学勇<sup>1</sup>, 胡 波<sup>2, 3</sup>, 李 波<sup>2, 3</sup>, 李 炜<sup>1</sup>, 龚壁卫<sup>2, 3</sup>, 狄圣杰<sup>1</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010;

3. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 爆破挤淤技术在海洋围垦工程建设中发挥着重要作用, 但其理论研究落后于工程实践。通过离心机点火装置的研制实现离心场中的起爆控制, 进而建立概化模型, 模拟堆石堤坝存在时爆破挤淤的作用效果, 研究爆炸荷载作用下地基土体的孔压消散特性及形成堆石堤坝的工后沉降特性。通过多次尝试性试验, 最终取得两组合理有效的爆破试验测试成果。研究表明: 地基土含水率越高、强度越低, 爆破后堤坝瞬时沉降越大, 爆破挤淤置换效果也更显著; 在地基土较软弱的条件下, 爆破挤淤堤坝工后沉降明显较大; 在堤坝上覆压力存在的条件下, 爆破瞬间地基土中产生显著的超孔隙水压力, 超孔隙的产生使得地基土瞬时有效抗剪强度弱化, 甚至会丧失结构强度和承载能力, 从而为爆破挤淤“泥-石”置换过程创造了有利条件。

**关键词:** 爆破挤淤; 离心模拟试验; 沉降分析; 超孔隙水压力

中图分类号: TU472.9

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)05 - 0958 - 07

**作者简介:** 徐学勇(1980 - ), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋、水利岩土工程方面的研究。E-mail: xu\_xy@ecidi.com。

## Centrifugal model tests on settlement characteristics of embankment using blasting compaction technology

XU Xue-yong<sup>1</sup>, HU Bo<sup>2, 3</sup>, LI Bo<sup>2, 3</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, GONG Bi-wei<sup>2, 3</sup>, DI Sheng-jie<sup>1</sup>

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan

430010, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The blasting compaction technology plays an important role in the construction of marine reclamation projects, however, its mechanism studies are behind the engineering practice. An ignition device is developed in the centrifuge to initiate and control blasting effect, and two centrifugal model tests on the blasting compaction technology of silt with different water contents are carried out. Furthermore, the settlement of embankment with blasting compaction and the characteristics of the excess pore water pressure of silt foundation are analyzed. The results show that the immediate settlement of embankment is larger after blasting when the silt has higher water content, and the blasting displacement effect is more pronounced. However, the post-construction settlement of embankment is larger when the silt foundation has lower intensity. In addition, the excess pore water pressure is produced after blasting in the silt foundation with overburden pressure, and it will weaken the effective shear strength of silt foundation or even the structural strength and load-bearing capacity will lose, so that favorable conditions will be created for replacement of "mud - stone" in the process of blasting compaction.

**Key words:** blasting compaction; centrifuge model test; settlement analysis; excess pore water pressure

## 0 引 言

近年来, 随着国家经济和社会飞速发展, 综合国力不断提高, 中国港口、能源、交通、水利等工程蓬勃发展。沿海地区人口密集、人均耕地面积少, 随着建设规模迅速扩大, 建设用地日趋紧张。合理利用丰富的滩涂资源、围垦造陆成为缓解沿海地区土地紧张的重要途径<sup>[1-2]</sup>。中国沿海如渤海湾、长三角、珠三角及浙、闽等地区地质情况复杂多变, 广泛分布着海相沉积的软土, 其分布厚度由数米至数十米不等。软土

地基具有高含水率、高压缩性、低强度、低渗透性、结构灵敏等特点, 物理力学性质较差。

爆破挤淤技术作为目前淤泥质海岸工程建设中最有效的地基处理方法之一, 已广泛应用于如江苏连云港、深圳盐田港围堰工程等大型工程中<sup>[3-5]</sup>。爆破挤淤作用受到的影响因素众多, 其理论研究落后于工程实

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41101519, 51008035); 浙江省自然科学基金项目 (LY14D020001)

**收稿日期:** 2014 - 08 - 20

践,在试验手段和研究方法上需要改进,工程应用更多的是依赖于工程经验<sup>[6]</sup>。关于淤泥质软土本身的物理力学性质及爆炸作用下软土动力响应特性等方面的研究成为深厚淤泥爆破挤淤作用机理研究的关键。

离心试验技术通过离心力来模拟重力,实现与原型条件相同的应力状态,使得模型与原型应力相等、变形相似,模拟变形及破坏过程,达到现场原型试验的效果<sup>[7-8]</sup>。离心模拟场中爆炸能量与原型存在 $1:n^3$ 的比尺关系,在离心场中用较小的爆炸能量即可模拟很大能量的原型爆炸效果<sup>[9]</sup>。因此,离心机试验模拟爆破作用有着显著优势。

爆炸离心模拟技术最早研究的是爆炸成坑问题,随着离心机设备以及数据采集技术不断改进,逐步拓展到建筑物与土相互作用等更为复杂的问题。从20世纪30年代开始,前苏联波克罗夫斯基和费德罗夫等进行了一系列离心机弹坑研究,确定爆炸离心模型比尺,验证爆炸弹坑经验公式,利用爆炸模型试验模拟原子弹爆炸等<sup>[10]</sup>。Brownell等<sup>[11]</sup>进行了饱和度对砂土中爆炸产生弹坑影响的离心模型试验,研究表明饱和度对弹坑面率(半径与深度之比)的影响较明显。Lee等<sup>[12]</sup>进行了饱和砂土中的地下结构物爆炸离心模型试验,探讨了爆炸条件饱和砂的离心模型比尺,表明强剪胀性土在不排水剪切作用下发生应力转移而使得结构承载能力提高。在国内,爆炸土工离心模拟技术的研究起步较晚,但也取得了一定的研究成果。侯瑜京等<sup>[13]</sup>总结了爆炸离心模型试验的原理及国外部分学者的研究方法和成果认为:采用离心模型试验研究爆炸与冲击荷载作用下的岩土工程问题具有独特的优越性,不仅可以模拟原型重力条件,而且利用能量的比尺关系可以模拟原型较大的爆炸效果。范一锴等<sup>[14]</sup>开展了初步探索性试验,分析砂中爆炸成坑的离心模型试验规律及离心设备的安全性。张雪东等<sup>[15]</sup>采用离心模型模拟原型应力条件下开展爆破对大坝的影响研究,主要考虑不同重力加速度、不同水深、距坝面不同距离的情况下雷管爆破对于大坝的影响。马立秋等<sup>[9]</sup>归纳了爆炸离心模型试验的几个关键问题,包括模型箱、爆炸源、离心模型比尺、数据采集、科氏加速度等;开发了离心模型爆炸试验系统,进行浅埋圆形结构物在地表爆炸条件下的试验研究<sup>[16]</sup>及黏性土爆炸成坑和地冲击传播规律的离心模型试验<sup>[17]</sup>。

目前,在离心机中开展深厚淤泥爆破挤淤筑堤技术的模拟试验尚未见报道,本文通过离心机点火装置研制实现了离心场中的爆破加载起爆控制,并完成了多组尝试性试验,最终取得两组合理有效的爆破试验

测试成果。本文通过建立概化模型,模拟堆石堤坝存在时爆破挤淤的作用效果,进一步通过不同含水率淤泥质土的爆破挤淤离心控制加载试验,研究爆炸荷载作用下地基土体的孔压消散特性及形成堆石堤坝的工后沉降特性。

## 1 试验概况

### 1.1 试验方案

本次试验中采用的模型箱尺寸为(长×宽×高) $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ ,进行爆破挤淤模型试验的三维模拟,离心机运行加速度为 $80g$ 。目前爆破挤淤筑堤工法中挤淤置换深度一般在十几米到几十米之间,本次试验中采用的离心机制备模型地基的深度为 $50\text{ cm}$ ,相当于原型条件的 $40\text{ m}$ 深度地层。

本次试验采用8号瞬发电雷管为爆炸源,单个雷管换算成约 $1.0\text{ gTNT}$ 当量(原型条件相当于 $512\text{ kg}$ )。为实现离心机运行条件下起爆的场外控制,本次试验对离心机系统进行了爆炸点火装置的设计安装。点火装置原理示意图如图1所示,通过控制器控制继电器通断,从而实现电流源的导通关断,实现点火起爆的目的。该方案的优点在于:结构简单,成本低,容易与离心机现有的高速测量系统同步。

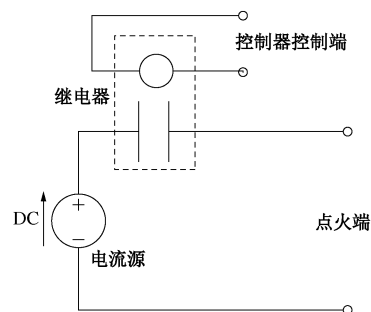


图1 爆炸点火装置原理示意图

Fig. 1 Sketch of blasting ignition device

试验中为减少应力波反射对试验结果的影响,在模型箱四周内壁设置 $2\text{ cm}$ 厚的多层泡沫板。针对爆破挤淤筑堤工法进行了相同埋深条件( $5\text{ cm}$ )条件下不同含水率( $w=29\%$ ,  $33\%$ )地基土的爆破挤淤置换试验(MDB1和MDB2),在MDB1和MDB2试验中采用粒径为 $5\sim 10\text{ mm}$ 的均匀碎石填筑形成堤坝。离心模型试验方案如表1所示。

### 1.2 试验设备及量测设备

本次试验在长江科学院CKY-200土工离心机中完成。其主要参数为:有效容量 $200\text{ g}\cdot\text{t}$ ,最大加速度 $200g$ ;有效半径 $3.7\text{ m}$ ;模型箱尺寸为(长×宽×高) $100\text{ cm}\times 100\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ (三维模型箱);同时配置机

械手系统和抛填设备。本次试验中主要采用激光位移传感器和孔隙水压力探头进行堤坝表面沉降变形和地基土孔压监测。

表 1 离心模型试验方案

Table 1 Test programs of centrifuge model

试验 编号	加速度 /g	雷管 /个	雷管埋 深/cm	描述
MDB-1	80	1×3	5	$w=29\%$ , $\rho_d=1.50\text{ g/cm}^3$ , 3 发雷管同时起爆
MDB-2	80	1×3	5	$w=33\%$ , $\rho_d=1.40\text{ g/cm}^3$ , 3 发雷管同时起爆

1.3 模型材料

表 2 为本试验采用的模型土样的基本物理特性参数。由表 2 可知, 该土样的塑性指数  $I_P=16.9\%$ , 该土样为粉质黏土。由表 2 可知其最优含水率  $w_{op}=20.5\%$ , 最大干密度为  $\rho_{max}=1.67\text{ g/cm}^3$ 。

表 2 模型用土样的基本物理特性参数

Table 2 Basic physical properties of model soils

$w_p$ /%	$w_L$ /%	$w_{op}$ /%	$\rho_{max}$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒级配/%		
				0.075~0.5 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
16.2	33.1	20.5	1.67	14.1	54.5	31.4

1.4 模型测量及传感器布置

图 2 为模型制备及观测设备布置示意图。设置埋深为 5 cm 的三发雷管。在堤坝顶部中轴线上坡顶和坡面共设置 3 个激光位移传感器 (L1, L2, L3) 测量试验过程中堤坝的沉降变形, 同时在距离雷管 10 cm 和 20 cm 处设置 P1~P4 四个孔隙水压力传感器以监测试验过程中的孔隙水压力变化。堤坝采用 5~10 mm 均匀碎

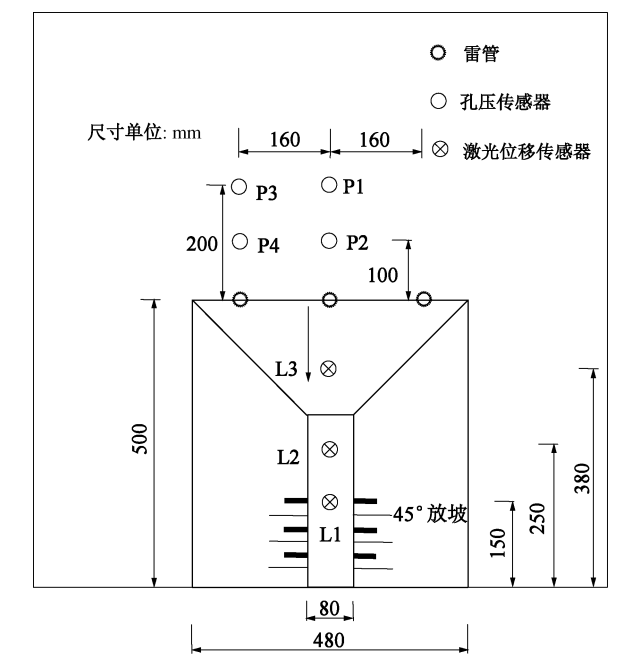


图 2 模型制备及观测设备布置示意图

Fig. 2 Model preparation and layout of observation equipment

石填筑成型, 高 200 mm, 顶部宽 80 mm, 底部宽 480 mm, 除靠近模型箱一侧外的三面均采用 45° 放坡。

1.5 试验步骤

- (1) 根据选定的含水率进行制备模型土料。
- (2) 泡沫板敷设及模型箱准备, 根据模型尺寸进行地基土填筑, 埋设雷管及监测设备 (孔隙水压力传感器、土压力传感器和表面沉降标), 需进行碎石堤坝的填筑。
- (3) 吊装模型箱至离心机吊篮内, 布置观测探头, 连接采集信号线, 测试采集系统。
- (4) 根据设计加速度大小, 逐级逐渐提升加速度 (如图 3 所示), 共 4 级, 每级稳定运行时间约 10 min; 观测相应加速度过程中的模型变化及采集数据变化。
- (5) 提高加速度至设计加速度, 稳定运行, 并在运行过程中观测模型的变化及采集数据变化。
- (6) 雷管起爆, 观测并记录雷管起爆瞬时的传感器变化。
- (7) 起爆后维持设计加速度不变, 运行至堤坝变形趋于稳定为止后停机, 在停机后, 详细观察模型各部位的变化情况, 并做好记录分析。
- (8) 拆除模型, 进行试验后地基土的强度及含水率测试, 试验结束。

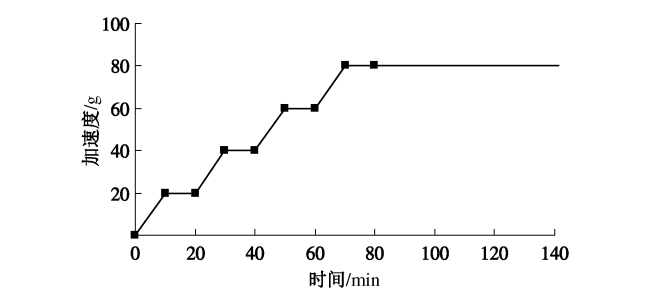


图 3 离心加速度与时间的关系曲线

Fig. 3 Relationship between centrifugal acceleration and time

2 试验成果

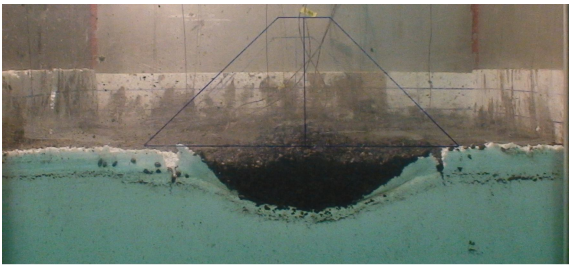
2.1 宏观试验现象

以试验 MDB2 为例, 图 4 为 MDB2 试验前后照片对比。图 4 (a) 为试验后正视照片, 对比可知, 试验过程中堤坝出现了大幅度的沉降, 停机后, 堤顶最大沉降量 (停机过程中堤顶会出现回弹变形) 达到 136.87 mm (对应的 MDB1 试验为 92.5 mm)。图 4 (b) 为试验后俯视照片, 由图中观测可知, 爆炸抛出物在堤坝两侧分布具有不对称性, 左侧抛出物很少, 右侧抛出物较多, 这表明爆炸抛出物的飞散过程受科氏加速度的影响。

2.2 孔压消散

图 5 为 MDB1 试验过程中地基土的孔压变化与时

间关系曲线。由图 5 可知,地基土的孔隙水压力随加速度的逐级升高而增大,以 P1 为例,加速度的四级加载过程中其孔隙水压力增量分别为 10.6, 18.3, 16.9 和 20.5 kPa。加速度达到 80g 时, P1~P4 的孔隙水压力分别为 84.0, 70.8, 83.7 和 91.0 kPa。三发雷管同时起爆时,距离较近的 P1 和 P3 两个孔隙水压力传感器发生破坏,故未测出相应的起爆后试验曲线。P2 和 P4 均产生显著的瞬时超孔隙水压力,其孔隙水压力的增加值分别为 45.0 和 25.7 kPa。起爆后超孔隙水压力迅速消散,但稳定后的孔隙水压力为 90.5 kPa 和 104.7 kPa,均高于起爆前的孔隙水压力。



(a) MDB2试验后图片1



(b) MDB2试验后图片2

图 4 MDB2 试验后照片

Fig. 4 Photos after test MDB2

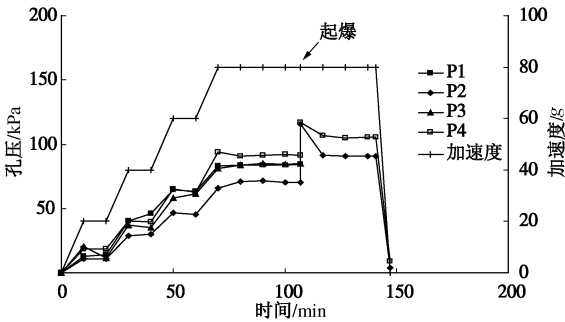


图 5 MDB1 试验孔压变化与时间关系曲线

Fig. 5 Relationship between pore pressure and time of MDB1

图 6 为孔压传感器 P2 起爆后孔压消散曲线。由图 6 可知,起爆时, P2 孔隙水压力由 70.4 kPa 急剧上升至 114.4 kPa, 产生了 45.0 kPa 的超孔隙水压力, 起

爆后超孔隙水压力迅速消散, 在 1 min 内消散殆尽。图 7 为 MDB2 试验过程中地基土的孔压变化与时间关系曲线。由图 7 可知,地基土的孔隙水压力随加速度的逐级升高而增大,以 P2 为例,加速度的四级加载过程中其孔隙水压力增量分别为 12.0, 12.5, 19.5, 28.6 kPa。加速度达到 80g 时, P1~P4 的孔隙水压力分别为 20.5, 68.3, 59.9, 44.8 kPa。三发雷管同时起爆时, P1~P4 均产生瞬时超孔隙水压力,其孔隙水压力的增加值分别为 8.6, 11.3, 15.1, 18.8 kPa。起爆后超孔隙水压力迅速消散,但稳定后的孔隙水压力为 24.8, 68.6, 63.3, 54.3 kPa,均高于起爆前的孔隙水压力。

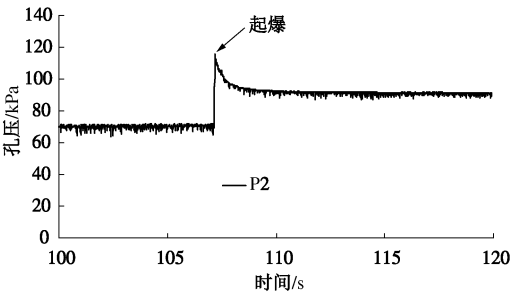


图 6 MDB1 试验 P2 起爆后孔压消散曲线

Fig. 6 Pore pressure dissipation of P2 in MDB1

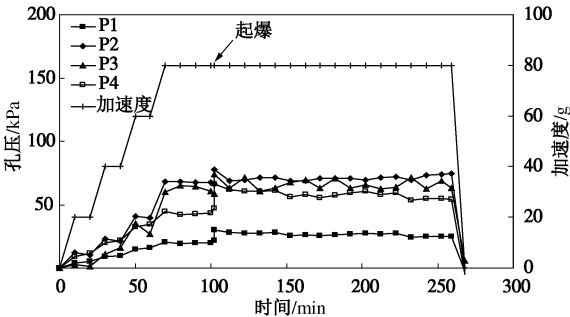


图 7 MDB2 试验孔压变化与时间关系曲线

Fig. 7 Relationship between pore pressure and time of MDB2

2.3 沉降特性

图 8 所示为 MDB1 试验过程中碎石填筑堤坝的沉降变形与时间关系曲线。由图 8 可知,堤坝沉降量随着加速度的逐级升高而增大,且单级加载沉降量呈现衰减趋势,以激光位移传感器 L1 为例,加速度的四级加载过程中其沉降量分别为 39.91, 27.33, 10.98, 6.08 mm。加速度达到 80g 时, L1~L3 的总沉降量分别为 90.69, 94.20, 89.35 mm。三发雷管同时起爆时,堤坝顶部及坡面处均产生显著沉降变形, L1~L3 的瞬时沉降量分别为 8.78, 15.82, 7.46 mm。雷管起爆后,地基土的沉降变形沉降在 10 min (原型时间约 45 d) 内增长较快, 10 min 后沉降变形缓慢增长, 40 min 后

变形沉降趋于稳定。爆炸后到试验结束前 L1~L3 的工后沉降分别为 0.82, 0.97, 0.95 mm, 当沉降速率<0.02 mm/min 时停止试验, 试验结束后, L1~L3 的最终总沉降量分别为 87.73, 92.52, 79.30 mm。

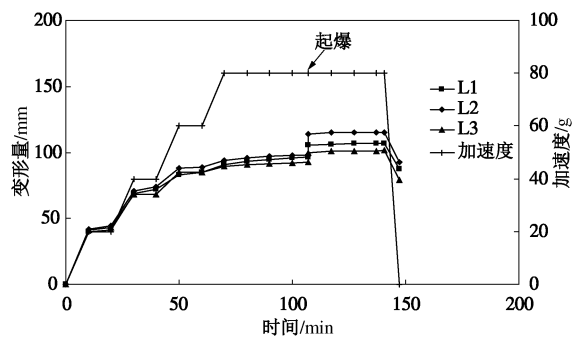


图 8 MDB1 试验堤坝的变形与时间关系曲线

Fig. 8 Relationship between levee deformation and time of MDB1

图 9 为 MDB2 试验过程中碎石填筑堤坝的沉降变形与时间关系曲线。由图 9 可知, 堤坝沉降量随着加速度的逐级升高而增大, 且单级加载沉降量呈现显著衰减趋势, 以激光位移传感器 L1 为例, 加速度的四级加载过程中其沉降量分别为 68.54, 24.46, 16.49, 5.45 mm。加速度达到 80g 时, L1~L3 的总沉降量分别为 133.44, 118.01, 97.84 mm。三发雷管同时起爆时, 堤坝顶部及坡面处均产生显著沉降变形, L1~L3 的瞬时沉降量分别为 7.81, 16.76, 15.80 mm。雷管起爆后, 地基土的沉降变形在 10 min (原型时间约 45 d) 内增长较快, 与 MDB1 试验结果类似, 但 10 min 后地基土的沉降变形随时间缓慢增长, 160 min 后沉降变形才趋于稳定。当沉降速率<0.02 mm/min 时停止试验。爆炸后到试验结束前 L1~L3 的工后沉降分别为 4.18, 5.00, 5.30 mm。说明地基土较软弱的条件下, 爆破挤淤堤坝下部地基土固结完成时间较长, 相应的工后沉降较大。停机后, L1~L3 的最终总沉降量分别为 136.87, 128.19, 100.07 mm。

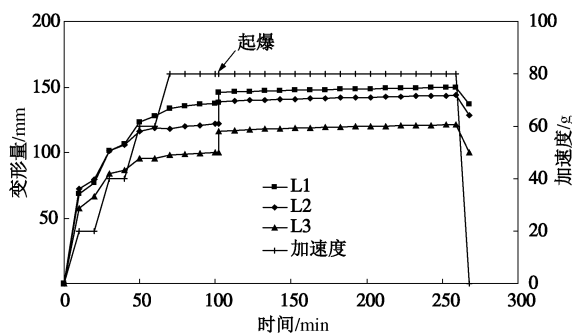


图 9 MDB2 试验堤坝的变形与时间关系曲线

Fig. 9 Relationship between levee deformation and time of MDB2

表 3 为 MDB1, MDB2 爆炸瞬时堤坝沉降及工后

沉降的统计表。由表 3 可知, MDB2 的爆炸瞬时堤坝沉降量中 L2, L3 均远大于 MDB1, 主要原因是因为 MDB2 中地基土制备干密度较小且含水率较大, 对应的土体强度也较低。爆破挤淤是通过爆破动力作用破坏淤泥的结构强度和承载能力。试验结果表明, 在相同的爆破荷载作用下, 含水率较高、不排水强度低的淤泥质地基土中可以较好的实现爆破挤淤“泥-石”置换的效果。

L2 测点的爆炸瞬时沉降均大于 L3, 可能的原因应该是 L2 位于堤坝顶端上, 该处堤坝堆填较高, 上覆压力较大。说明在爆破挤淤施工过程中, 相同爆破荷载作用下, 堆填的堤头稍高, 爆破挤淤瞬时置换的淤泥深度越深。因此, 合理的堤头堆填高度是实现爆破挤淤效果的重要因素之一。

以 L2 为基准进行统计, 以爆炸瞬时沉降和工后沉降之和为总的沉降量, MDB1, MDB2 中爆炸瞬时沉降占总沉降量 94.2%和 77.0%。说明采用爆破挤淤技术修筑堤坝的沉降主要在爆炸置换过程中完成, 工后沉降一般较小。这是因为爆炸“泥-石”置换作用形成的堆石坝可以成为地基的一部分, 从而大大减小施工后的地基沉降, 在深厚淤泥地质区域应用爆破挤淤技术可以达到快速的软基处理效果。

表 3 MDB1, MDB2 堤坝爆炸瞬时沉降及工后沉降的统计表

Table 3 Instantaneous and post-construction settlements of embankment in MDB1~2					
传感器 编号	爆心距 /cm	爆炸瞬时沉降 /mm		爆炸工后沉降 /mm	
		MDB1	MDB2	MDB1	MDB2
L3	12	7.46	15.80	0.95	5.30
L2	25	15.82	16.76	0.97	5.00
L1	35	8.78	7.81	0.82	4.18

### 3 结 论

(1)离心模拟试验爆炸冲击荷载作用下的孔压测试表明, 在堤坝上覆压力存在的条件下, 爆炸作用瞬间地基土中产生显著的超孔隙水压力。超孔压的产生, 使得地基土瞬时有效抗剪强度弱化, 甚至会丧失结构强度和承载能力, 从而为爆破挤淤“泥-石”过程置换创造了有利条件。

(2)堤坝沉降变形监测表明, 在堤坝上覆荷载相同的条件下, 地基土含水率高, 相应的土体强度越低, 爆炸瞬时堤坝沉降越大, 爆破挤淤瞬时置换的效果越显著。但是地基土较软弱的条件下, 爆破挤淤堤坝下部地基土固结完成时间较长, 相应的工后沉降较大。

(3)当前围垦工程中采用爆破挤淤处理深厚淤泥, 除了施工速度快的优点外, 爆破置换作用形成的

堆石坝可以成为地基的一部分, 从而大大减小施工后的地基沉降, 同时, 有利于增强在深厚淤泥地区修筑堤坝、围堰等水工构筑物的整体稳定性。

(4) 本文首次在离心机中实现了爆破挤淤筑堤技术的模型试验研究, 这对于该项软基处理技术的机理研究和工法完善是非常有益的尝试和探索。由于成功的试验组数较少, 本研究中关于爆破挤淤模拟的结论需要进一步的研究工作进行验证。

(5) 相对于其他模型试验方法, 离心机试验模拟爆破作用效应有着明显优势, 下一步的研究中有如下问题需要继续开展: ①系统研究上覆荷载、装药量、药包埋深、布药方式等因素对爆破挤淤效果的影响; ②利用离心机自动抛填装置, 实现多个施工循环进尺和起爆过程的连续试验, 模拟现场多次爆破和振动作用实现堤坝落底的过程; ③淤泥质软土中爆破无法形成理论上的爆炸空腔或爆坑, 这种介质中爆炸能量(应力波)传播、耗散特征及其作用效应等离心模型相似关系需进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] 王灵敏, 曾金年. 浙江省滩涂围垦与区域经济的可持续发展[J]. 海洋学研究, 2006, 24(B07): 13 - 19. (WANG Ling-min, ZENG Jin-nian. Relations between the tidal flat innning and the regional economy sustainable development in Zhejiang Province[J]. Journal of Marine Science, 2006, 24(B07): 13 - 19. (in Chinese))
- [2] 张长宽, 陈 君, 林 康, 等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 206 - 212. (ZHANG Chang-kuan, CHEN Jun, LIN Kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(2): 206 - 212. (in Chinese))
- [3] 张翠兵. 厚层淤泥中采用爆炸定向滑移法修筑防波堤机理研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2001. (ZHANG Cui-bing. The research on building breakwater by blasting directional slippage method in thick silt[D]. Beijing: Chinese Academy of Railway Sciences, 2001. (in Chinese))
- [4] 赵简英, 王 健, 吴京平. 控制加载爆炸挤淤置换法在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 332 - 335. (ZHAO Jian-ying, WANG Jian, WU Jing-ping. An application of blast method to squeeze mud and replacement with controlled loading[J]. Chinese Rock and Mechanics. 2006, 27(2): 332 - 335. (in Chinese))
- [5] 徐学勇, 武金贵, 程 康. 深厚淤泥爆破挤淤软基处理技术[J]. 爆破, 2011, 28(2): 93 - 96. (XU Xue-yong, WU Jin-gui, CHENG Kang. Treatment technology of thick silt foundation by blasting compaction[J]. Blasting, 2011, 28(2): 93 - 96. (in Chinese))
- [6] 王文杰, 赵微人, 郭加根. 海涂围垦工程中悬挂式爆破挤淤基础处理技术探讨[J]. 海岸工程, 2010, 29(3): 51 - 56. (WANG Wen-jie, ZHAO Wei-ren, GUO Jia-gen. Discussion on hanging explosion technology for base compaction treatment in reclamation engineering on tidal flat[J]. Coastal Engineering, 2010, 29(3): 51 - 56. (in Chinese))
- [7] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(6): 92 - 97. (BAO Cheng-gang. The stste and prospect of centrifuge model test of china[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(6): 92 - 97. (in Chinese))
- [8] 《岩土离心模拟技术的原理和工程应用》编委会. 岩土离心模拟技术的原理和工程应用[M]. 武汉: 长江出版社, 2011. (Editorial Committee of Principle and Engineering Application of Geotechnical Centrifuge Modeling Technology. The principle and engineering application of geotechnical centrifuge modeling technology[M]. Wuhan: China Yangtze River Press, 2011. (in Chinese))
- [9] 马立秋, 张建民, 张 武. 爆炸离心模型试验研究进展与展望[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2827 - 2833. (MA Li-qiu, ZHANG Jian-min, ZHANG Wu. Development and prospect for centrifugal blasting modeling[J]. Chinese Rock and Mechanics, 2011, 32(9): 2827 - 2833. (in Chinese))
- [10] 刘清荣, 黄文彬. 在变形介质中冲击与爆炸作用[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965. (LIU Qing-rong, HUANG Wen-bin. Impact and explosion effect in distortional medium[M]. Beijing: China Industry Press, 1965. (in Chinese))
- [11] BROWNELL K C. Centrifuge modeling of explosion-induced craters in unsaturated sand[D]. Fort Collins, Master Thesis Civil Engineering, Colorado State University, 1993.
- [12] LEE F H, GOH S H, TAN T S. Blast tests on underground structures in saturated sand[M]// Centrifuge 98', Balkema Rotterdam, 1998: 421 - 426.
- [13] 侯瑜京, 陈祖煜. 简述土工离心机中模拟爆炸和冲击荷载试验[C]//中国水利学会 2007 学术年会论文集. 苏州, 2007: 106 - 112. (HOU Yu-jing, CHEN Zu-yu. Model test of blasting and impact loading in centrifugal model[C]// Proceedings of Chinese Hydraulic Engineering Society. Suzhou, 2007: 116 - 112. (in Chinese))



- [14] 范一锴, 梁向前, 陈祖煜, 等. 土工离心机用于爆炸模拟的试验研究[C]//2011 全国爆破理论研讨会. 武汉, 2011: 29 - 34. (FAN Yi-kai, LIANG Xiang-qian, CHEN Zu-yu, et al. Experiments on the blasting modeling in centrifuge[C]// Proceedings of Chinese Blasting Theory Seminar. Wuhan, 2011: 29 - 34. (in Chinese))
- [15] 张雪东, 侯瑜京, 梁向前, 等. 水下爆破对大坝影响的离心模拟试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, **33**(增刊): 234 - 236. (ZHANG Xue-dong, HOU Yu-jing, LIANG Xiang-qian. Centrifuge modeling research on the influence of underwater blasting on a dam[J]. Northwest Seismological Journal, 2011, **33**(S0): 234 - 236. (in Chinese))
- [16] 马立秋, 张建民, 胡 耘, 等. 地表爆炸下浅埋地下结构物的离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增 2): 3672 - 3678. (MA Li-qiu, ZHANG Jian-min, HU Yun, et al. Centrifugal model tests for responses of shallow-buried underground structures under surface blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3672 - 3678. (in Chinese))
- [17] 马立秋, 张建民. 黏土爆炸成坑和地冲击传播的离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 1): 3172 - 3178. (MA Li-qiu, ZHANG Jian-min. Centrifugal model testing study of explosion induced craters and propagation of ground shock in clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 3172 - 3178. (in Chinese))

---

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 南瑞集团水利水电技术分公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 庆祝南京水利科学研究院成立 80 周年  
后插 2 台州建元勘察仪器有限公司  
后插 3 北京理正软件股份有限公司  
后插 4 西安力创材料检测技术有限公司