

综合

爆炸排水加固淤泥地基的 实验、判断与展望*

中国科学院力学研究所 杨振声
连云港建港指挥部 金 镠

摘要

针对郑哲敏院士提出的《淤泥中实施适当药量的爆炸会出现基于非线性和不稳定性的“通道排水”现象》这一思想, 1995年5~12月在连云港墟沟东吹填淤泥区进行了第一阶段(以观察现象及主要影响因素测量为主)爆炸排水加固淤泥地基的试验研究, 其结果表明: ①爆炸可以使淤泥发生排水, 导致固结, 提高强度, 由此发展新的软土加固工艺是有可能的; ②通过观测, 判断淤泥的爆炸排水与通常的达西定律描述的渗流有不同机理, 前者称之为“通道排水”; 下步还需通过进一步数据分析及工程地质取样以掌握排水规律。

关键词

爆炸 排水 加固 淤泥 实验 判断

ABSTRACT

In view of the the idea put forward by academician Zheng Zhemin that the non-linear and unstable “passage drainage” phenomenon will occur when executing explosion of a proper amount of explosive in silt, during May ~ Dec. 1995, at Xugou east filled silt area of Lianyungang Port, the 1st-stage test and study concerning consolidating silt foundation by explosion-drainage (with stress on observation of phenomenon and principal influencing factors) was carried out. The result shows that: a. Explosion will result in drainage of silt and lead to consolidation, so as to raise the strength; thus, it is possible to develop a new technology for soft soil consolidation; b. Through observation and test, it is judged that the principle of explosion drainage of silt is different to that of seepage flow described in Darcy's Law; it needs further data analysis and engineering geological sampling so as to grasp the drainage law.

* 由连云港建港指挥部、中科院力学所、交通部三航院组成的攻关组实施。
本文为阶段成果的一个小结。

1985 ~ 1989年期间,连云港爆炸处理水下软基教研组研制成功了爆夯及爆炸排淤填石法处理水下软基新工艺。稍晚,中科院力学所对饱和中粗砂及饱和粉细砂爆炸排水新工艺进行了实验研究,并完成了工程性试验,证明应用于工程是可行的^[1];国内港工界完成了强夯法加固水冲粉煤灰地基的试验研究并在工程中成功应用。1992年,我们进行了吹填淤泥爆炸排水的观察性试验,表明可以引起明显的排水。郑哲敏院士提出,淤泥中实施适当药量的爆炸,会出现基于非线性和不稳定性的“通道排水”现象,根据这一思想,我们又于1994年11月报请交通部立项,先后进行了室内试验、现场试验及理论分析,得到了一批有价值的成果,表明建立基于爆炸排水现象的加固淤泥地基的新工艺是可能的,深入研究“通道排水”的机理,也有重要的理论意义。

1 试验观测

1.1 试验设计

1.1.1 试验阶段

整个研究工作原则上划分为两个阶段,第一阶段以现象观测及主要影响因素的测量为主。主要观测不同药量及装药、起爆方式下的爆炸作用力参数、土壤物理、力学指标及排水效果,具体参数包括:淤泥中爆炸冲击波压力、爆炸振动加速度、孔隙水压力、水位管水位、爆炸前后土的含水量、渗透系数及抗剪强度、场地沉降量、排水量等。第二阶段为筛选独立变量,进行相似性分析,通过试验,确定无量纲爆炸参数和排水效果参数间的定量关系,从而得到可用于工程设计的药量公式。整个阶段,都贯穿机理分析和建立力学模型的工作。本次完成的工作,属于第一阶段。

1.1.2 试验区布置

在墟沟港区东吹填泥场,用小围堰隔出

10 000m²作为试验区,区内平均吹填淤泥厚5.5m,以下依次为天然粉砂层(0.5m)和淤泥层,试验区内布置5个区块,II~V均为20×20m,并插设塑料排水板(间距分别为1×1m、1.5×1.5m、1.8×1.8m、2.2×2.2m)(图1),表面铺0.8m取自墟沟海滩的粉细砂,II、III区块设置水位管,埋深分别在地面以下1.5、3.0、4.5m(图2),吹填土表面预置沉降板25块。试验前,测定吹填土物理力学指标(表1),试验区外建有混凝土小池(2.5m×1.5m×0.9m)作模拟试验用。

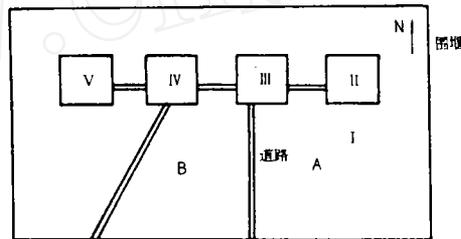


图1 爆炸试验现场平面图

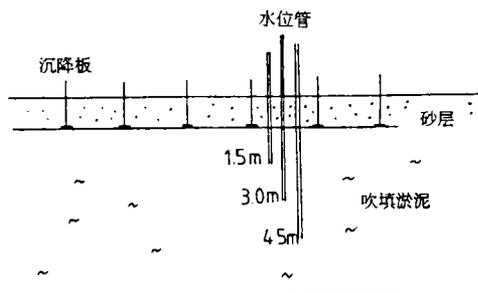


图2 III区沉降板与水位管位置示意图

1.2 传感器的选用及改进

1.2.1 加速度传感器

选用北京测震仪器厂生产的YD-12型晶体加速度传感器,其频率范围为1~10 000 Hz,最大加速度5 000m/s²(500g);又选用能考核低频效应的FM-2型加速度传感器,其频率范围为5~120Hz,加速度量程20g。

1.2.2 孔隙水压力传感器

选用航天工业总公司的电阻应变式压力传感器并加以改进,使得在动载情况下传感器受到的压力远小于激波压力。传感器量程选用 2、5、10、20kg/cm² 四种,精度为 ± 0.5%,对每个传感器均进行液压标定。

1.3 试验组次

本阶段现场试验从 1995 年 5 月 16 日开始,至 12 月 20 日结束,共施爆 94 次,其中单炮试验 86 次,药包药量从 3.5 ~ 300g,大部分为 150g 和 300g 两种;糖葫芦状药包 (150g × 3) 1 次,群炮 7 次 (450g × 8; 450g × (8 ~ 16); (600g × 8)。葫芦炮及群炮在 III 区施爆,单炮在 I 区 (82 次) 及小池 (4 次) 施爆。药包在淤泥中埋深从 0.5 ~ 4.0m 不等。

记录项目包括爆炸振动加速度、冲击波压力、孔隙水压力、水位管水位及地面沉降。出水量的计量只作大致估计。

1.4 主要测试结果

1.4.1 爆炸振动加速度

将加速度传感器置于配重盒中,使其整体容重与介质容重相等。每个盒中置放 2 个传感器,分别记录垂直及水平加速度,盒子在淤泥中埋深为 3m、2m 及 1m。采用 2 号岩石炸药,爆速约 4 000m/s。

图 3、4、5 分别为记录到的淤泥中冲击波典型压力波形、冲击波峰值压力沿距离的衰减曲线、垂直及水平加速度沿距离的衰减曲线。

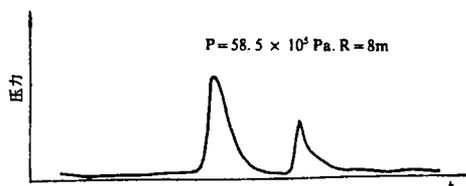


图 3 冲击波典型压力波形图

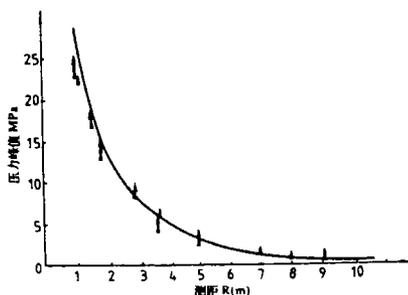


图 4 冲击波衰减曲线

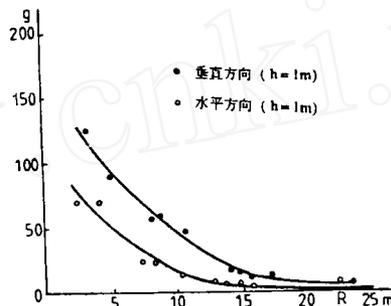


图 5 振动加速度衰减曲线

上述振动波形,初始阶段频率约为 800Hz,几次震荡后减少到 200Hz,最后直至几 Hz;整个波形震荡时间在 100ms 左右。试验发现,药量若超过数十克,爆炸后 200ms 之内会出现第二组波形,其幅值、频率及持续时间均小于第一组。

波形曲线的衰减呈指数形;加速度幅值很大,可达 100g 量级,但作用时间为 ms 量级,与此相比,饱和中粗砂中实施爆炸,加速度幅值及冲击波波速要小得多〔2〕。

1.4.2 孔隙水压力

超静孔隙水压力的消散,在静态土力学中是排水过程的依据;在动态,尤其是在爆炸情况下,水和土颗粒都接受冲击波的压力。图 6 为本次试验得到的几组典型波形,表明初始孔隙水压力的超压可以是负的,经过数十分钟后,逐渐转为正值。几小时后超静孔隙水压力可达 20 ~ 30kPa,然后经历长时间的耗散过程。初始孔隙水压力可以是正

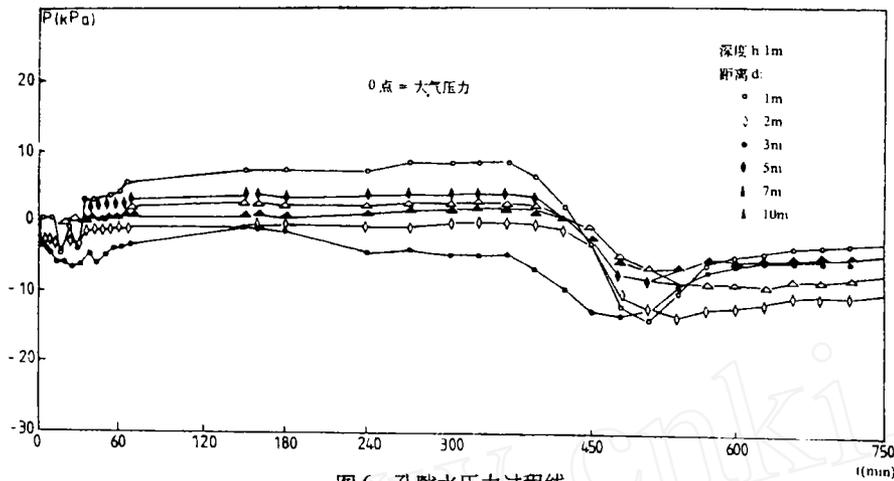


图6 孔隙水压力过程线

的超压、或维持、或转为负压后再上升为正。总之、淤泥中爆炸，孔隙水压力的变化呈现出复杂的形态，而无论哪种形态，都伴随明显的排水。从实测地面沉降过程可得到排水量过程。由达西定律反算渗透系数 K_i （“虚拟渗透系数”），得如图7所示之过程线， K_i 值比连云港淤泥渗透系数 ($10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$) 高出1~2个量级。

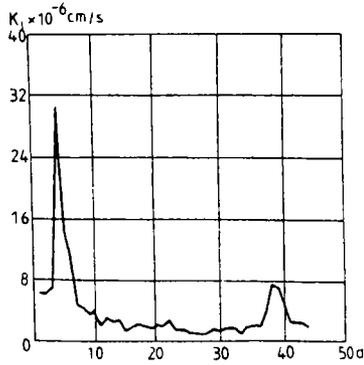


图7 III区 K_i 的时间变化曲线

1.4.3 爆炸排水固结沉降与水位管水位

地面沉降由预置在吹填淤泥表面的沉降板读得。水位管读数通过校核，可排除海洋潮汐的影响。实测结果见图8、9。

上述记录表明，爆后几小时~2d、沉降

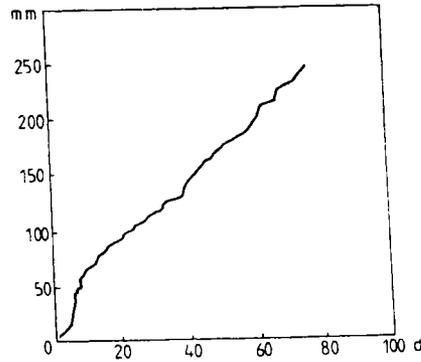


图8 地面沉降过程线

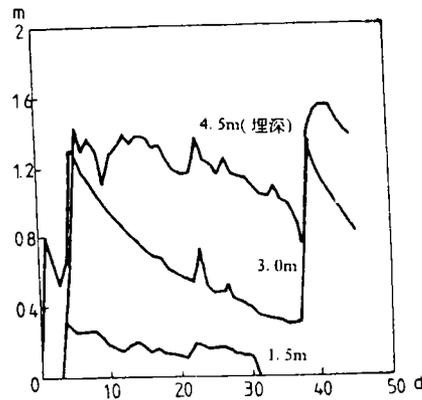


图9 水位管水位过程线

量迅速增加，2~3d后转为缓慢沉降。与此相应，水位管水位在爆后迅速上升，之后逐渐下降；30d后因又施爆一次（群炮），水位再次跃升，但相对沉降量低于第一次爆炸。

1.4.4 爆前与爆后工程地质采样对比

见表1、2可知爆后淤泥含水量有所下降，强度有所增长。

2 机理分析

根据测试结果，对淤泥的爆炸排水现象的机理作如下分析判断。

(1) 淤泥在爆炸荷载下的性状，根据过去的研究^[3]，最主要的是，运动方程中粘性和重力可以忽略，因此，可以将淤泥运动看成是仅受爆炸作用驱动的水、土颗粒的两相流；水土颗粒间的摩擦，造成运动阻

尼。由于水、土颗粒质量不同，加速度也不同，时间积分的结果，水质点获得较高的速度，从而出现水和土的分离和从爆坑排水的现象，构造爆炸作用下两相流一维运动方程并数值求解，得到水和土颗粒的阻尼振荡曲线如图10所示，显然，水的运动速度幅值较高。

(2) 爆炸产生很高的冲击波压力和介质的加速度，必然对爆心周围土体造成振动、压缩和拉伸，可以推想，这些作用使得相当范围的土体内产生裂缝，裂缝提供了爆炸作用驱动下水体运动的重要通道。在爆炸条件下，某些区域聚集较多孔隙水，形成超压，如果消散缓慢，超压现象就会维持，这与一般渗流排水情况相仿；如果在它附近出现某些通道，使孔隙水很快流失，超压就会明显下降，甚至出现负压。如果通道一开始

取样时间 95.4.7 III区爆前土工指标 表1

土样编号	取样深度 m-m	含水量 %	天然密度 g/cm ³	干密度 g/cm ³	土粒比重	孔隙比	饱和度 %	液限 %	塑限 %	塑指 %	液指 %	压缩系数 1/MPa	压缩模量 MPa	快剪	
														C _q kPa	φ _q (°)
A1-1	1.00~1.70	111.7	1.43	0.68	2.76	3.08	100	52.6	25.4	27.2	3.17				
A1-2	3.88~4.58	72.1	1.56	0.91	2.74	2.02	98	44.7	23.2	21.5	2.27	1.76	1.27	4	0
A1-3*	6.32~6.92	65.4	1.61	0.97	2.76	1.84	98	52.8	27.3	25.5	1.49	2.16	1.14	10	0

*A1-3,已属下伏天然淤泥

III区爆后土工指标 表2

土样编号	取样日期	取样深度 m-m	含水量 %	天然密度 g/cm ³	比重	孔隙比e	压缩系数 1/MPa	快剪	
								C _q (kPa)	φ _q (°)
C-2	95.10.20	4.70~5.10	60.0	1.60	2.76	1.77	1.23	5	2.5
C2-2	95.11.21	4.10~4.95	50.8	1.63	2.76	1.55	3.06	9	0
E-2*	96.1.22	4.20~5.00	52.5	1.70	2.74	1.46	1.17	9	0

*E-2 为薄壁取土器取样

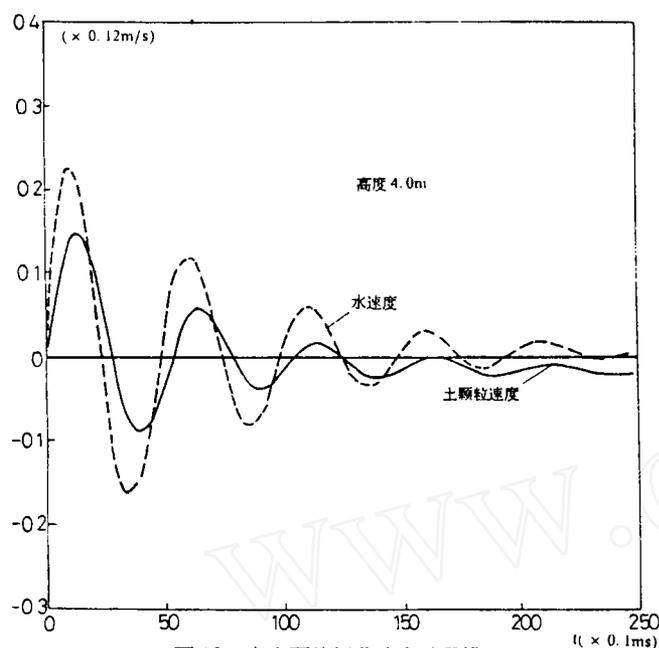


图10 水土颗粒振荡速度过程线

(2) 通过对爆炸冲击波压力、加速度、孔隙水压力、水位管水位及沉降过程等的观测,判断淤泥的爆炸排水与通常由达西定律描述的渗流有不同的机理,表现在:爆炸作用初期土体的不同区域,其孔隙水压力有可能出现超压或者负压;负压有可能维持,也可能逐渐转为超压。不论何种情况,都伴随着孔隙水的流动;二是在爆炸冲击波作用下,水和土颗粒两相都受到压力,因重度不同,获得的惯性不同,从而造成水、土的分。我们把这种新的排水机制称之为“通道排水。”

就形成并使孔隙水流失,则一开始就会出现负压;如得不到水的补充,负压就会维持,反之,压力就会上升甚至出现超压。因此,在爆炸作用下的淤泥,比之静态排水(渗流),可能存在“通道排水”这种新的排水机理。一定时段内,通道排水将取代土颗粒间由超静孔隙水压力引起的渗流而成为主要的排水方式。

(3) 爆后相当长时段内排水继续发生,表明吹填淤泥在欠压密状态下同样存在自重荷载下土壤中超静水压力梯度引起的渗流,伴随着排水,超静孔隙水压力逐步消散,与通常情况不同的是,爆炸产生的通道仍可能部分存在,宏观上仍有较高的渗透系数。

3 结语

(1) 试验结果表明,爆炸可以使淤泥发生排水从而导致固结,强度得到增加,由此发展一种新的软土加固工艺是有可能的。

(3) 对新的排水机理的进一步研究需要建立能反映排水机理的数学——力学模型。作为尝试,我们建立了爆炸作用下淤泥介质水、土颗粒两相流一维运动方程,结合淤泥的本构关系,求解该方程组,得到了水、土颗粒速度、土层不同深度的孔隙水压力、孔隙比及有效应力的时间过程。

(4) 1995年5~12月的7个月内,试验组共进行了94炮试验,测得了大量数据,需通过进一步的数据分析及继续进行工程地质取样以掌握排水规律。

参考文献

- [1] 张加华等 爆炸法加固饱和粉细砂基础的试验和机理研究 工程爆破文集第五辑,中国地质大学出版社,1993.
- [2] 普拉卡什 《土动力学》 水利电力出版社 1984.12.
- [3] 郑哲敏等 爆炸处理水下海淤软基 工程爆破文集第四辑 冶金工业出版社 1990.