第4卷 第2期
1998年6月

工程爆破
ENGINEERING BLASTING

Vol. 4, No. 2
June 1998

爆炸排水固结实验研究的加速度测量

田兰桥 杨振声 王 峰 张袁备
(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (连云港建港指挥部, 江苏连云港 222042)

摘 要 软土地基加固技术是地基工程中一个重要问题, 在大量工程实践的基础上, 作者采用爆炸法研究了淤泥的排水固结。由于爆炸引起地基的振动加速度与排水关系密切, 因此通过实验测量了离爆源近区的加速度, 得到加速度随爆炸距离的变化规律; 观测分析了爆炸振动过程的加速度波形; 通过测定爆炸前后淤泥的土工指标, 表明爆炸后短时期内淤泥含水量有所变化。

关键词 软土地基加固 爆炸排水 加速度测量

SYSTEMATIC MEASUREMENT ON ACCELERATION IN BLASTING FOR SQUEEZING OUT WATER FROM MUD

Tian Lanqiao Yang Zhensheng Wang Feng
(*Institute of Mechanics Chinese Academy Sciences, Beijing* 100080)
Zhang Yuanbei
(*Lianyuangang Harbour Construction Command Post, Jiangsu* 222042)

ABSTRACT The consolidation of soft foundation is very important in engineering construction. A new method for squeezing out water from silt and consolidating the soft foundation by blasting was proposed in this paper. Systematic measurements on acceleration of silt in blasting were carried out. The tests indicate that the mechanical indexes of the mud are raised after blasting and the relationship between the acceleration of silt in blasting and the distance of blasting was obtained. Based on the experimental results, the mechanism of consolidation of soft foundation of blasting was analyzed.

KEY WORDS Consolidation of soft foundation Squeezing water by blasting
Acceleration measuring

1 前 言

近年来随着我国经济迅速发展, 沿海港口的建设也进入了一个新阶段。需要新建大量的码头、港口及相应的设施, 因此许多港区采用吹填法扩展原有的陆域, 以适应港区不断发展的需要。如连云港墟沟港区一期工程吹填淤泥54万 m^2; 深圳滨海大道围海造地约达十多平方公里。新吹填的区域具有淤泥含水量大、承载力差需要较长的时间才能稳定沉积等特点, 必须对该地基先行加固, 才能在其上构筑任何建筑。软土地基的加固技术多年来国内外已有多种较成

田兰桥: 高级工程师。 张袁备: 高级工程师。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

熟的技术, 如早在1925年由Moran D E 首创的竖向排水矿井系统起初用于道路软土地基的加固工程, 50年代引入我国, 经几十年的不断发展与完善, 现已成为软基加固的一种成熟方法; 堆载预压法, 即由预压荷载和排水通道组成, 通常是在欲加固的地基上堆土石方或充水, 利用压差达到排水固结的目的; 1952年瑞典人Kelman W 提出通过真空预压法进行加固软土地基, 该方法经多年的研究和实践已逐渐形成完善的施工工艺, 也被广泛地应用于吹填淤泥的加固工程中; 此外, 由法国人Menard L 于1969年首创的强夯法已广泛地应用于各类软土地基的加固工程[1]。

以上各种方法用于不同的地基介质及不同的土工条件下均已取得了良好的效果, 但同时也存在一些不足: 如堆载预压法需要大量的土石方, 施工操作繁重, 真空预压要求密封条件较高, 且两种方法均施工周期通常需要6～8个月, 难以满足当前建设的需要。

为了进一步发展吹填淤泥软土地基排水固结技术, 在长期的工程实践及对软土地基研究的基础上, 中国科学院力学研究所和连云港建港指挥部共同提出用爆炸法进行吹填淤泥地基排水固结的研究。

地震后地面会出现裂纹、喷水、冒砂等现象。30年前人们对这一现象的机理了解甚少, 1964年日本新舄地震使工程界对这一现象很重视, 研究证实这些现象是由地震振动使土壤液化引起孔隙水压力的上升和消散所致[2]。同样, 1995年1月17日日本神户发生的7.2级大地震造成了巨大的损失, 其中液化灾害随处可见, 如大量的喷水冒砂、地面大规模的龟裂及塌陷[3]。不言而喻, 土壤的液化对建筑设施具有极大的破坏力。但另一方面, 是否可以利用土壤的振动液化使软土地基加速排水, 从而达到地基加固的目的呢?

前几年已成功地研究了粗砂、粉细砂的爆炸法排水固结[4,5], 同时在工程实践中发现: 淤泥在爆炸载荷作用下也会产生快速排水, 并在爆坑壁及泥面产生排水通道及孔洞。能否将爆炸排水法用于淤泥软基的排水固结是提出来的新课题。

我们于1995年6～12月在连云港墟沟港区淤泥吹填区开展了爆炸排水固结的研究, 同时进行了大量的测试及观测工作。由于振动效应引起的加速度对排水起着重要的作用, 因此试验中安排了大量的传感器对爆炸引起的加速度进行了测量。本文主要介绍了爆炸振动引起的加速度在不同条件下的变化情况。

2 实 验

试验区选在连云港墟沟港区, 总面积为10000m^2, 全部土介质为吹填淤泥, 试验区南边靠近大港路, 实验吹填区底部由南向北逐步加深, 吹填淤泥平均深度为5.5m, 下面是0.5m 的铁板砂层, 再向下又是约3m 厚的淤泥层。至1995年5月止, 该区已吹填完毕3年。有关的土工指标示于表1。实验区内安置了用于观测的沉降板和水位管, 水位管埋深分别为4.5、3.0、1.5m。加速度传感器置于配重盒中, 使其整体容重与介质的容重相等。盒子埋于淤泥中, 深度分别为3、2、1m。每个盒中安放两个加速度传感器, 分别测量垂直与水平方向的加速度。

爆炸排水实验用2# 岩石炸药, 其爆速约4000m/s。实验用药分单药包和群药包两种, 单药包实验用药分别为37.5、75.0、150.0、300.0g。群药包实验在第Ⅱ实验区进行, 共有16个药包, 每个药包重450g, 总药量为7.2kg。单药包埋入淤泥深度 d = 3m。由于单药包药量较小, 引起振动的频率较高, 因此选用北京测震仪器厂生产的YD-12型晶体加速度传感器, 其所测

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

表1　实验区淤泥原始土工指标

Table 1　Original mechanical indexes of the mud at experiment site

取样深度 m	含水量 %	相对密度 G	孔隙比 e	压缩系数 MPa^{-1}	内聚力 kPa	内摩擦角 φ, (°)
1.50～2.35	49.6	2.74	1.44	0.67		
4.70～5.10	60.0	2.76	1.77	1.23	5	2.5
5.65～6.45	60.0	2.76	1.72	1.13	7	5.1

取样日期为1995年10月20日；试样天然密度均为1.68g/cm³。

频率范围为1～1000Hz，最大加速度为5000m/s²。

YD-12型加速度传感器具有频带宽、灵敏度高、稳定性好等特点。记录仪器为日本产TCL-1000六线A/D变换器，频率响应为1M。

3　实验结果及讨论

炸药在土介质中爆炸，其中一部分能量使介质产生振动，并以地震波的形式由爆源向外迅速传播。通常地震波有体波和面波，其只本波分为纵波（P波）和横波（S波），体波在遇到地面、岩层或节理时均会发生反射和折射；而面波是沿介质表面或分界面传播的波，面波又分为勒夫波（L波）和瑞雷波（R波）。爆破引起的强烈振动必然对周围介质造成影响，这种影响除了受爆炸载荷本身特征的制约外，也和周围介质的性质、地形条件有关。

3.1　加速度随爆心距的增加而减小

经过几十次单药包爆炸测得爆炸时在不同深度、距离爆源不同距离处淤泥中垂直和水平方向的加速度，具体数据见表2。以埋深2m的传感器测得的数据为例：当传感器置放于距爆心只有3m时测得垂直向加速度为246.6g、水平向加速度为122.0g；当爆心距为21m时，测得垂直向加速度为37.9g、水平向加速度为40.0g。

表2　加速度随爆心距的变化

Table 2　Change of acceleration followed by distance

传感器埋深，m	加速度方向	爆心距，m									
		3	5	7	8	10	13	15	16	20	21
3	垂直	175.5	170.4		61.8	56.5	25.6	45.8	55.4	42.6	41.5
	水平	226.9	179.7		168.5					24.5	70.7
2	垂直	236.5	137.3	87.4	73.3	77.8			53.9	23.5	37.9
	水平	122.0			89.9	56.6			40.5		40.0
1	垂直	120.1	87.3	59.9	61.1	47.4	15.7	11.0	13.5	5.3	4.7
	水平	68.2	61.6	23.2	19.6	12.3	4.3	3.9	2.6	5.5	2.1

加速度单位为 g；药量为300g，埋深3m。

现场实验受到炸药、雷管性能及介质变化的影响，测量数据较分散，但总的变化趋势为垂直和水平方向的加速度均随爆心距的增加而减小。图1给出了传感器埋深1m时测得的垂直和水平方向加速度随爆心距变化的曲线，该结果与普拉卡什[5]在1969年通过爆炸测得的加速度曲线趋势一致（见图2）。

在这种情况下，可以借助量纲分析来讨论其规律。炸药介质的自变量为：炸药密度 ρ_B、炸药爆速 D、炸药量 Q、爆乍气体的多方指数 n、埋深 d。吹填淤泥介持贩强度很低，可以忽略弹性，其自变量为：淤泥密度 ρ_s、液泥深度 H、内摩擦角 φ 和凝聚力 C。因此，加速度 a 是上述自变量的函数。一般对加速度最大值 a_{max} 和加速度的特征时间如周期 T 有兴趣，那么 $f(a_{max}, \rho_B, D, Q, n, d, \rho_s, H, \varphi, C, R) = 0$（其中 R 是爆心距）。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

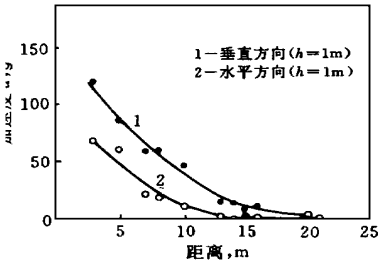

图1 加速度随爆心距变化曲线

Fig. 1 Change of acceleration follwed by distance

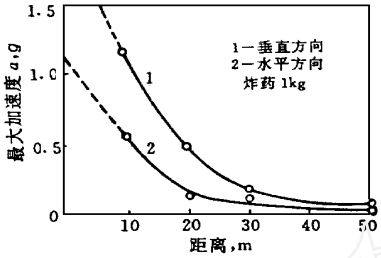

图2 奥布拉坝址加速度与爆心距的关系

Fig. 2 Relationship between acceleration and distance at Obra Dam site

自变量中除了 n 和 φ 是无量纲量外, 还有9个有量纲量。根据 π 定理可以组成6个无量纲量。因此

$$f\left(\frac{a_{max}}{D^2/R}, \frac{Q^{1/3}}{H}, \frac{H}{d}, \frac{\rho_s}{\rho_B}, \frac{C}{\rho_B D^2}, \frac{C}{\rho_s D^2}\right) = 0$$

式中: $\frac{a_{max}}{D^2/R}$ 实际上是地震惯性力和爆压的比值; $\frac{\rho_s}{\rho_B}$ 为淤泥与炸药惯性的比值; $\frac{C}{\rho_B D^2}$ 为淤泥凝聚力与爆压的比值; $\frac{C}{\rho_s D^2}$ 实际上是淤泥凝聚力与冲击波压力的比值。

还有两个几何相似量: $Q^{\frac{1}{3}}/H$ 为炸药包的尺寸和淤泥深度之比。

如果炸药品种不变、密度不变、淤泥性质不变, 则有:

$$\frac{a_{max}}{D^2/R} = f\left(\frac{d}{H}\right) \qquad a_{max} = \frac{D^R}{R} f\left(\frac{d}{H}\right)$$

从量纲分析可以得到: a_{max} 与 D^2 成正比, 与 R 成反比。

由于 d/H 只做了3个深度, 很难整理出比较完整的曲线, 仅能看出随淤泥埋深增加, 在相同 R 的位置 a_{max} 越大。而对于 T 有:

$$\frac{T}{R/D} = g\left(\frac{d}{H}\right) \qquad T = \frac{R}{D} g\left(\frac{d}{H}\right)$$

T 随 R 增大而增大, 随 D 增大而减小。

根据上述原则, 整理出 a_{max} 与 $1/R$ 的关系曲线见图3。线性拟合后整理为: $d = 3m$, $a_{max} = 560/R$; $d = 2m$, $a_{max} = 720/R$; $d = 1m$, $a_{max} = 432/R$。

可以看出, $d = 1m$、$d = 2m$ 加速度测量误差较小, $d = 3m$ 误差较大。

3.2 加速度随深度的不同而变化

由表2可知, 当爆心距一定时, 3m 深处的加速度大于1m 处的加速度。如爆心距 $R = 5m$ 时, 深度为3m 处垂直向的加度为170.4g, 而1m 处的加速度为87.3g; 深度3m、$R = 3m$ 处的水平向加速度为226.9g, 而1m 处的加速度为68.2g。

3.3 爆炸振动波形分析

爆炸振动的波形千变万化, 不同测点记录的波形不同, 同一测点两次爆破记录的波形也很难相同。爆破振动图中测得的每一波形的最大幅值即表示测点介质沿某一方向运动的最大

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

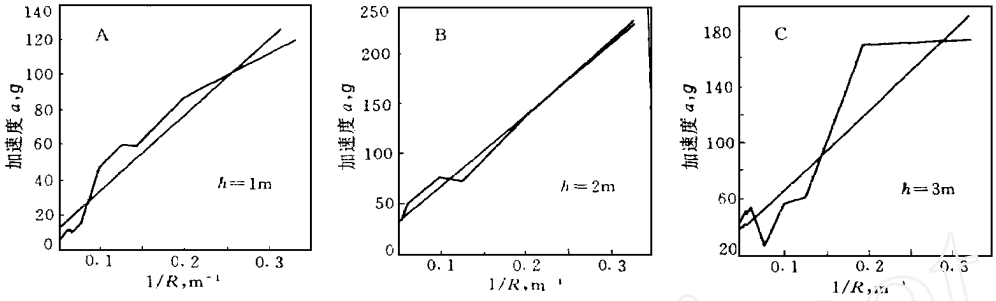

图3　数据处理后的曲线

Fig. 3　Curves of the retreated data

振幅，而实际测点运动的最大幅值应该是该测点在同一瞬间3个运动分量的矢量和中的最大值。然而在实际测量中测点的最大振幅并不是在同一瞬间发生，而且在实际计算中也存在一定困难，因此确定振动强度有不同的方法，许多国家采用以测点各运动分量的最大振幅表示[7]。在本实验中由于受传感器数量的限制只测量了垂直向和水平向两个分量，最大振幅的计算方为正向和负向的最大幅值叠加后取其半。

当药量 Q = 300g、R = 21m、传感器埋深3m、2m、1m 时测得的一组典型的加速度波形见图4。波形具有以下特点:

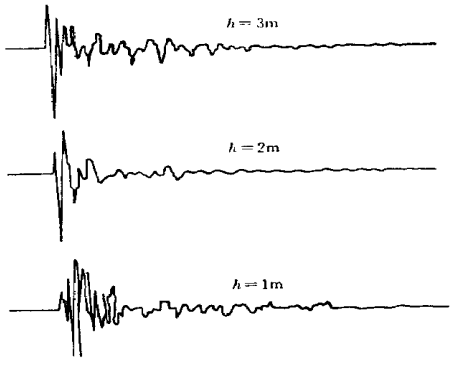

表4　典型的加速度波形

Fig. 4　Typical waveforms of acceleration

(1) 振动波形呈规律性衰减，通常初始时刻峰值较高，随之减小且波形衰减较快。

(2) 整个波形不同时间的频率是变化的，初始阶段频率约800Hz，几次震荡后即减少到200Hz左右，最后可到几十至几赫兹。

(3) 整个波形震荡约100ms 即可衰减到零，但由于实验选用的仪器不同，因此对持续时间的规定也不同，可参见文献 [7]。

(4) 当药量在37～300g 时，爆炸后200ms 之内可观察到第二组波形(见图5)。第二波波形的幅值、频率及持续的时间与第一组皮性相比较都有明显的减小。由表3可见：两组波形的时间间隔与药量有明显的关系，即药量大、间隔时间长、药量小、间隔时间短；而与介质的深度关系不大。由表3还可看到，在不同的药量下振动波形的频率范围和持续时间也不同。

在许多地震效应的研究中，对波形进行了细致的频谱分析，以斯对振动的机理及规律得到更深刻的认识[8,9]。本研究将开展这方面工作。

3.4　单药包爆炸实验对孔隙水压力的影响

地震引起的振动导致土壤的液化，使孔隙水压力增加。爆炸振动同样会引起土介质孔隙水压力的变化，实验中观察了这一现象。

(2) 当药量300g、药包埋深3m、且为集中药包时，在距爆心约30m 处理有3只测量孔隙水压力的水位管，其中埋深4.5m 的水位管在爆炸后水位上升约2cm。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 振动波形有关参数

Table 3 Related parameters of the vibration waveforms

药量, g	两组波时间间隔, ms	持续时间, ms	频率范围, Hz
300.0	144	100	833～294
150.0	120	40	526
75.0	103		
37.5	80		

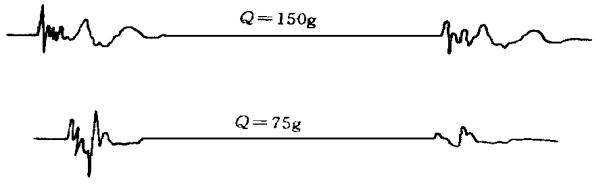

图5 两组波形间隔的变化

Fig.5 Varieties of intervals of the two groups waveforms

(2) 当总药量300g 分成两个150g 的药包、药包间隔1m、下面的药包埋深3m 时, 距爆心30m 处埋深4.5m 的水位管在爆炸瞬间水位上升4cm, 测得的振动波形总的持续时间约150ms。

由上可见, 爆炸引起的振动和天然地震有较大不同, 爆炸振动具有频率高、沿地表衰减快、持续时间短等特点。而天然地震的频率一般约2～5Hz, 持续的时间约1～2s。

3.5 爆炸后土工指标的变化

第Ⅲ实验区进行两次群药包实验, 间隔约1个月。每次爆炸20余天后取土样检测, 见表4。可看到淤泥含水量有一定的变化, 其他指标变化不明显。

表4 爆炸后实验区淤泥土工指标的变化

Table 4 Varieties of mechanical indexes of the mud after blasting

取样深度 m	含水量 %	天然密度 g/cm³	相对密度 G	孔隙比 e	压缩系数 MPa⁻¹	内聚力 kPa	内摩擦角 φ, (°)
4.70～5.10	60.0	1.60	2.76	1.77	1.23	5	2.5
4.10～4.95	50.8	1.63	2.76	1.55	3.06	9	0
4.20～5.00	52.5	1.70	2.74	1.46	1.17	9	0

取样日期依次为1995年10月20日、1995年11月21日、1996年1月22日。

以上几点只是初步实验观察到的一些现象, 进一步的分析和讨论还需进行大量的工作, 才能得出一些结论性的意见。

本项研究是在郑哲敏院士指导下进行的; 连云港建港指挥部金教授在工作中给予了极大的支持并提出了许多宝贵的意见, 同时连云港建港指挥部提供了本实验的经费; 此外, 对赵双禄、陶峻、张加华等同志对本工作的帮助作者深表谢意, 并感谢国家自然科学基金委员会对本项目的支持。

参 考 文 献

1 高大钊. 软土地基理论与实践. 北京: 中国建筑出版社, 1987.
2 美国工程科学院全国研究会地震工程研究委员会编. 论地震工程研究. 北京: 地震出版社, 1988.
3 黄灿辉. 日本板神淡路大震灾之探讨 (Ⅱ). 科学月刊, 1995, 26 (8): 681.
4 金骥良等. 柱状药包爆炸加密松散厚砂基的试验研究. 工程爆破文集 (第五集). 1993.
5 张加华等. 爆炸法加固饱和粉细砂的试验和机理研究. 工程爆破文集 (第五集). 1993.
6 普拉卡什. 土动力学. 北京: 水利电力出版社, 1984.
7 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
8 张雪亮, 黄树棠. 爆炸振动分析. 北京: 地震出版社, 1981.
9 刘建亮. 工程爆破测试技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.

(收稿日期: 1996-09-05)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net