

# 高填方路堤软弱区域爆破挤密技术

魏连雨, 刘艳竹, 马士宾, 王清洲

河北工业大学土木工程学院, 天津 300401

**摘要** 为了解决在传统高填方路堤加固工程投资巨大且加固效果不好的问题, 提出了爆破挤密技术对路堤进行处理。炸药在土中爆炸结束后, 形成的地下爆腔对周围土体产生挤密作用, 只需对腔体内逐层填料并压实即可实现高填方路堤的加固过程。通过对9组不同工况下的试验模型进行研究, 分析不同含水率和不同压实度下的爆破挤密效果。结果表明, 爆前压实度较低、含水率较大的土体形成的爆腔较大, 压密范围较大, 反之则小。同时, 某高速公路高填方路段的试验工程也证明该技术的效果较好, 没有造成路面及边坡的破坏, 可以缩短养护维修工期、降低成本、降低占路施工对交通的影响程度。

**关键词** 高填方路堤; 挤密; 爆破; 压实度; 含水率

**中图分类号** U416.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.15.006

## Explosive Compaction Technology Applied to Weak Areas of High-filled Embankment

WEI Lianyu, LIU Yanzhu, MA Shibin, WANG Qingzhou

School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

**Abstract** Application of the explosive compaction technology is proposed to solve the problem that conventional high-filled embankment reinforcement project is costly and has unsatisfactory effect. A cavity is formed after blasting in soil underground, with the soil around the cavity compressed under blast loading. The embankment is reinforced by filling materials into the blasting cavity and compressing them layer by layer. This paper studies the explosive experiments under nine different conditions and analyzes the compaction effect under different water content and compaction degree. The results show that soil with low compaction degree and high water content before blasting forms blasting cavities with relatively large radius. The test project carried out on a highway with high-filled embankment demonstrated that application of the technology achieved satisfactory effect with undamaged pavement and slope, shortened duration of maintenance and repair, reduced cost, and reduced impact of road construction on traffic.

**Keywords** high-filled embankment; compaction; blasting; compaction degree; water content

山区高速公路建设中, 普遍存在高填方路堤, 最高可以达到50 m左右, 有时因填筑施工或材料问题导致路堤中存在软弱区域, 造成通车后路面整体沉降。例如, 承德市某高速公路部分路段通车后, 路面出现整体沉降, 此路段路堤主要填料为山皮土和试验用黄土。目前工程上处理此类问题的方法是注浆<sup>[1-5]</sup>, 即利用压力将能固化的浆液通过钻孔注入孔隙或构筑物的裂隙中, 进而改善路堤的性能, 但是此种方法需要大量的浆液, 增加了成本且不容易控制浆液的性质, 实际应用中在路堤中的某些区域, 由于填料的特征会发生了浆

液大量流失现象, 严重时破坏路堤的整体结构性。并且对于黏性土或沙性土质路堤, 存在土体自身的密实和饱和现象, 使得浆液很难注入到土体当中去, 此种情况下不能采用注浆方法。

本文提出了爆破挤密高填方路堤软弱区域的方法(图1)。国内外有学者利用爆破法处理软土地基<sup>[6-8]</sup>, 发现此方法对土体有一定的压实效果。爆破挤密是一种动力挤密土体的方法, 爆破后, 爆腔周围土体进一步压密(爆后效果如图2<sup>[8]</sup>所示), 然后向空腔内逐层填料, 最后注浆进一步加固填筑材

收稿日期: 2014-01-20; 修回日期: 2014-04-01

基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目(20140629)

作者简介: 魏连雨, 教授, 研究方向为交通及道路, 电子信箱: wly57@126.com

引用格式: 魏连雨, 刘艳竹, 马士宾, 等. 高填方路堤软弱区域爆破挤密技术[J]. 科技导报, 2014, 32(15): 49-52.

料。在处理高填方路堤软弱区域的实际爆破工程应用中,要保障路面和边坡结构不发生破坏,必须对爆破进行严格控制,土体的压实度(土压实后的干密度与标准最大干密度之比)、含水率和炸药的性质等与此密切相关,因此,本文拟通过不同工况下的对比试验,分析土的含水率与压实度对爆破挤密效果的影响,以便为爆破挤密高填方路堤技术的应用提供参考价值。

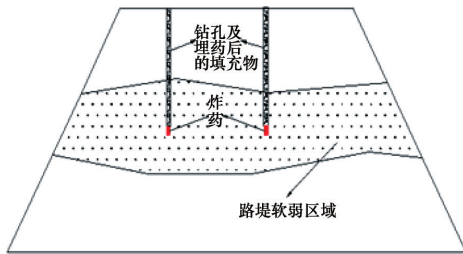


图1 爆破挤密高填路堤横断面示意

Fig. 1 Cross-section of high-filled embankment

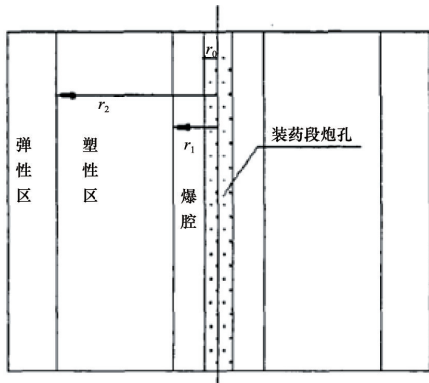


图2 挤密后效果示意

Fig. 2 Effect after compaction by blasting

## 1 土中爆破挤密机理分析

### 1.1 土中爆破挤密机理

土体是由土骨架、孔隙水和孔隙气体组成的三相物质。土体颗粒与颗粒之间通过结合物进行胶结,使土体具有一定的结构强度,抵抗一定的变形。当土体作用一定的荷载时,土体发生变形。土体的变形机理有以下两种:土体骨架的变形和土体所有相的变形。当土体受到压缩时,两种机理同时起作用。然而,在加载过程的某些阶段,其中一种机理的效应可以大到使另一种机理效应能够忽略的程度<sup>[8]</sup>。《公路路基设计规范》中规定填方路基土的含水量应接近最佳含水量,路堤土体在受到荷载时,三相物质中,水起到了润滑作用,促使颗粒移动,减小了土受压变形的阻力,土的变形主要是其他两相变形引起的。

土体介质的实际性状十分复杂,并且随着加载条件的不同,其性状有很大的变化。为了实际应用而建立起来的各种土体本构模型,曾有学者对其做了简化与假设,考虑到土体在爆炸作用下产生塑性变形,应用塑性力学中反映岩土材料

抗压强度大于抗拉强度效应以及对静水压力敏感性的 Mohr-Coulomb 屈服准则和爆炸力学中应力衰减规律理论推导塑性区范围,同时结合鲍姆方程推导塑性区压密程度及压密后土体密度值的近似计算公式<sup>[8]</sup>。

塑性区半径为

$$r_2 = r_0 \left( \frac{\sigma_m}{c \cos \varphi} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

式中,  $r_2$  为塑性区半径, m;  $r_0$  为爆孔半径, m;  $\sigma_m$  为爆孔壁处初始峰值压力, Pa;  $c$  为土体黏聚力, Pa;  $\varphi$  为土体内摩擦角, °;  $\alpha$  为衰减指数。

爆腔半径为

$$r_1 = \left[ \left( 1 - \frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \right) \left( \frac{\sigma_m}{c \cos \varphi} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + \frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \right]^{\frac{1}{2}} r_0 \quad (2)$$

式中,  $r_1$  为爆腔半径, m;  $\rho_0$  为土体初始密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\bar{\rho}$  为压密区土体平均密度, kg/m<sup>3</sup>。

不同爆心距处密度的近似公式为:

$$\rho = \left[ \left( 4 \sigma_m \rho_0^3 / D^2 \right) \left( \frac{r_0}{r} \right)^{\delta} + \rho_0^4 \right]^{0.25} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为不同爆心距处密度, kg/m<sup>3</sup>;  $D$  为冲击波波速, m/s。

以上近似公式中,需要的土和炸药的参数比较多,且部分不易获得,计算过程也比较繁琐。公式中土的黏聚力和内摩擦角与其含水率和密度相关,所以本研究将重点讨论含水率和密度两个因素。

### 1.2 炸药选择与控制

本次试验选用的是 2<sup>#</sup> 岩石乳化炸药,是工业上常用的炸药。实践证明乳化炸药不含有毒成分,不污染环境,不怕水,成本低。炸药在爆炸时,形成峰值压力很高的冲击波作用于路堤土,冲击波随着距离增大逐渐衰减为应力波和地震波。地震波的压力低,速度慢,传播能量仅是爆炸总能量的很小部分,约为 2%~6%<sup>[9]</sup>。仅能引起介质周期振动,不会导致介质破坏,因此实际工程中为了充分利用冲击力对土体的挤密作用,而不会对道路结构造成摧毁,必须控制炸药的用量,目前国内常用的经验公式<sup>[10]</sup>为:

$$h \geq 2 \sqrt[3]{Q} \quad (4)$$

式中,  $h$  为炸药的埋深, m;  $Q$  为 TNT 当量, kg。

土中爆破时,炸药的埋深在以上范围内时,地表面没有明显可见的变化,被称为封闭爆破。以上公式不具有针对性,但为此次试验模型尺寸的选定提供了参考依据。乳化炸药的 TNT 当量系数为 0.76<sup>[11]</sup>。室外试验选用 100 g 乳化炸药,通过公式计算得到最小埋深为 84.72 cm,因此建立土体模型时,炸药周边土体尺寸都要大于 84.72 cm。

## 2 试验研究

### 2.1 炸药相关参数

炸药为 100 g 乳化炸药,工业 8 号雷管引爆。炸药参数如表 1 所示。

表1 乳化炸药相关参数

Table 1 Parameters of emulsion explosive

| 药卷外径 /mm | 药卷密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | 爆速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 殉爆距离 /cm | 猛度/mm     | 做功能力/mL    |
|----------|---|--------------------------------------|----------|-----------|------------|
| 32       | 0.95~1.3                                | $\geq 3200$                          | $\geq 3$ | $\geq 12$ | $\geq 260$ |

2.2 试验土体模型

试验土体采用下挖型长方体模型,试验用土为纯黄土,几何尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 深=4 m $\times$ 3 m $\times$ 2 m,实验现场及下挖型长方体如图3所示。炸药放置在长方体中心部位,炸药量控制在其爆炸冲击力在1 m土体范围内损失殆尽为宜,既保证在长方土体边缘不受爆炸冲击力的破坏。

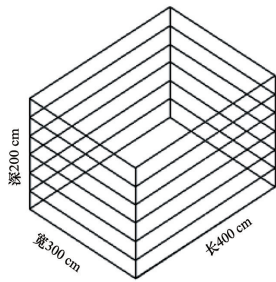


图3 下挖长方体模型(分6层填铺)

Fig. 3 Dugged cuboid model (filled by six layers)

2 m深的长方体试验土体分6层填筑,每层填土虚铺40 cm并分层碾压,碾压遍数用压实度进行控制。第3层填筑结束后,在第3层(自底向上第3层)顶面中心位置放置炸药,同时在本层面布置TS108高频动态压力传感器,采集爆炸瞬间不同半径处土中的动态应力,如图4所示。

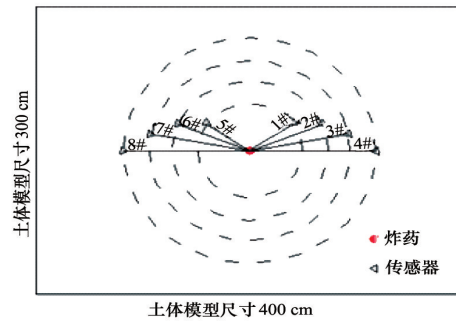


图4 传感器布置示意

Fig. 4 Schematic diagram of sensor layout

2.3 试验方案

本次试验设计了3个含水率,每个含水率下设计3个不同的压实度,因此共9组试验(表2)。

表2 试验方案

Table 2 Experiment project

| 项目  | 工况1 | 工况2 | 工况3 | 工况4 | 工况5 | 工况6 | 工况7 | 工况8 | 工况9 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 含水率 | 17% | 17% | 17% | 19% | 19% | 19% | 21% | 21% | 21% |
| 压实度 | 73% | 83% | 90% | 73% | 83% | 90% | 73% | 83% | 90% |

爆前:在第2层顶面取土,现场做环刀法试验,测试土压实后的物理参数。

爆后:将模型从一侧开挖,开挖至爆前取土样断面并保留部分爆腔,测爆腔尺寸(图5为开挖露出的爆腔),沿爆腔壁某方向不同距离分别取土样,进行环刀法试验,试验测得爆后土的物理参数。



(a) 腔外部 (b) 腔内壁

图5 开挖露出爆腔

Fig. 5 Explosion cavity

2.4 试验结果分析

本次试验分别共做了9组模型。爆炸瞬间,炸药垂直正上方水平8 cm半径范围内的地表土有约10 cm高的拱起现象,松动的土壤落回原处,没有发生塌落现象,含水量高的土壤炸药顶面拱起现象较含水量低的土壤拱起现象较明显,压实度低的拱起现象较压实度高的明显。

爆破结束后,爆腔近似呈球形,9组试验爆腔半径如图6所示。

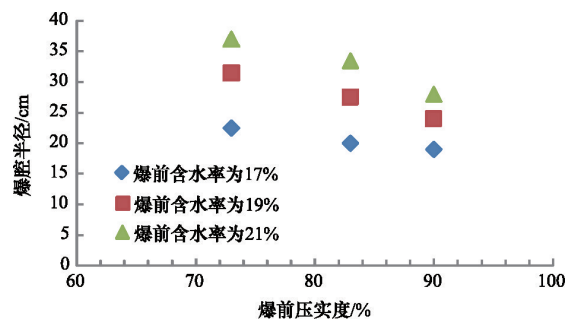


图6 爆腔半径

Fig. 6 Radius of the explosion cavity

可以看出不同含水量时,爆腔半径随爆前压实度的变化趋势是一致的,随着压实度的增大而减小;爆前压实度一定时,含水量提高,黏聚力和内摩擦角均减小,降低了土骨架和孔隙气体受压时的阻力,在试验含水量范围内,爆腔半径随含水率的增大而增大。

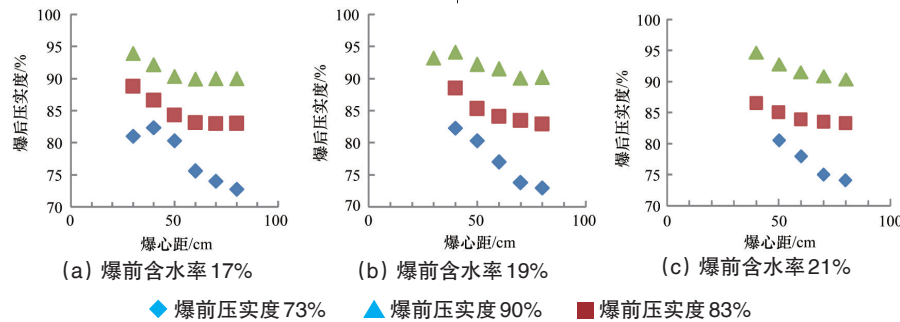


图7 爆后压实度随爆心距的变化

Fig. 7 Variation of compaction degree after explosion with different blast center distance

根据有关资料研究,土体进入硬化阶段,即此阶段土的变形主要来自于土颗粒本身材料的压缩,这时的压力界限在1~2 MPa<sup>[10]</sup>。本次研究选1 MPa为界限值,土体中所受应力值大于或等于1 MPa的半径区域即为爆炸波显著影响的半径范围(包含爆腔半径)。本次试验通过整理模型中埋设的动态传感器收集到的压强数据,得出爆炸波显著影响范围的半径如图8所示。可以看出,含水量较高时,爆炸波显著影响范围随之增大;随着爆前压实度的增大,爆炸波显著影响范围的半径随之减小。

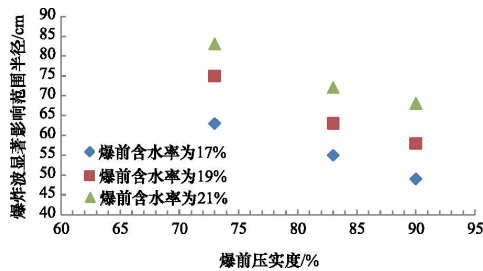


图8 爆炸波显著影响范围的半径

Fig. 8 Radius of the range significantly impacted by the blast wave

### 3 结论

通过不同工况下的试验研究,分析了含水量和压实度对爆破挤密效果的影响,并初步应用于工程。

1) 爆前土体压实度和含水量对爆破挤密效果有密切关系,在试验土体的压实度和含水量范围内,爆前压实度较低、含水量较大的土体,爆后空腔较大,压密范围较大;反之,则小。

2) 本次试验爆腔半径在19~37 cm,爆破挤密显著影响区域在49~75 cm,可为后期回填材料和布孔设计提供有价值的参考数据。

3) 本技术初步应用于某高速路段,并取得较好的效果,没有造成路面及路侧的破坏,缩短了养护维修工期、降低了成本、减小了占路施工对交通的影响程度。

图7是在3个含水量条件下,埋药层土体爆后压实度随爆心距的变化。从图7中可以看出,含水量一定时,爆后压实度随爆心距的变化趋势是一致的,并且爆前压实度较高的模型,爆后的有效压密范围较小,爆前压实度低的模型压密效果明显。

### 参考文献 (References)

- [1] 高永亮, 阴翔宇. 注浆加固法在路基沉降处治中的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(31): 203-203.  
Gao Yongliang, Yin Xiangyu. Application of grouting method in subgrade settlement treatment[J]. Technology Innovation and Application, 2013(31): 203-203.
- [2] 刘家庆, 杨楠. 百罗高速公路路基注浆加固工程实例分析[J]. 西部交通科技, 2012(12): 17-20.  
Liu Jiaqing, Yang Nan. Case analysis of bailuo expressway roadbed crouting reinforcement engineering[J]. Western China Communication Science & Technology, 2012(12): 17-20.
- [3] 杨升光. 用路基压密注浆法处治路基滑坡[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2006(6): 43-44.  
Yang Shengguang. Subgrade compaction Grouting method in treatment of subgrade landslide[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(6): 43-44.
- [4] 蔡宏庆. 路基注浆加固方案的实施[J]. 公路与汽运, 2004(3): 46-48.  
Cai Hongqing. The implementation of roadbed grouting reinforcement scheme[J]. Highways & Automotive Applications, 2004(3): 46-48.
- [5] 李治平. 压浆法加固黄土地区公路路基的应用[J]. 内蒙古公路与运输, 2000(3): 9-11.  
Li Zhiping. Application of grouting method in the reinforcement of highway subgrade in loess area[J]. Highways & Transportation in inner Mongolia, 2000(3): 9-11.
- [6] Elliott R E, Clarke L, Gohl B, et al. Explosive compaction of foundation soils for the seismic upgrade of the seymour falls dam[C]// International Society of Explosives Engineers. 35th Annual Conference, February 2009, Denver.
- [7] 蔡德钧, 叶阳升. 爆炸法处理地基技术[J]. 铁道建筑技术, 2005(1): 63-64.  
Cai degou, Yeyangsheng. Blasting method for foundation treatment technology[J]. Railway Construction Technology, 2005(1): 63-64.
- [8] 潘强. 爆炸荷载作用下土体压密效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
Pan Qiang. Study of soil compaction effect by blast loading[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [9] 哈努卡耶夫. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中译. 北京: 冶金工业出版社, 1980.  
Ханукаев А. Н. Explosive physical process of mine and rock[M]. Liu Dianzhong trans. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1980.
- [10] 钱七虎, 王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
Qian Qihu, Wang Mingyang. Shock and explosive effect in rock and soil[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [11] 李克升. 两种工业炸药[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2009.  
Li Kesheng. Two kinds of industrial explosives[J]. Kunming: Yunnan Technology Press, 2009.

(责任编辑 吴晓丽)