DOI: 10.11883/bzycj-2016-0298
文章编号: 1001-1455(2018)01-0233-08

条形药包爆炸挤密黄土路堤横向影响规律*

魏连雨[1,2],李海超[1,3],刘艳竹[4]
(1.河北工业大学土木与交通学院,天津 300401; 2.河北省土木工程技术研究中心,天津 300401;
3.陆军军事交通学院国防交通系,天津 300161; 4.天津市天津大道养护管理中心,天津 300350)

摘要: 为了合理设计既有公路路堤爆炸挤密钻孔的平面布置方案,以爆炸挤密加固某高速公路黄土路堤为例,研究了条形药包爆炸挤密黄土路堤的横向影响规律。先根据该高速公路实际几何尺寸和材料参数建立有限元模型,然后用 ANSYS/LS-DYNA 分等横截面不等长和等长不等横截面两类条形药包共计 16 种工况进行数值模拟,得出爆腔水平半径、土壤密度峰值及其位置和爆炸挤密黄土路堤横向影响半径的变化规律,此外还拟合出横截面为 2 支药管组成的条形药包爆炸挤密后土壤的密度增量与该点距爆心的水平距离和药量之间的关系表达式。最后,结合工程实例,说明了上述规律在施工方案设计中的应用。

关键词: 道路工程;爆炸挤密;条形药包;黄土路堤;横向影响
中图分类号: O389;U416.1 **国标学科代码**: 13035;58010 **文献标志码**: A

近年来,黄土广泛应用于公路建设,以山西省为例,其已建高速公路里程的 40%均为湿陷性黄土路基。黄土在天然含水量时,往往具有较高的强度和较小的压缩性,致使在路基施工中不易被压实[1];未被压实黄土在自重和外部荷载共同作用下,结构易发生较大变形;湿陷性黄土含水量增大后,其强度会随之降低,从而造成路堤沉降。换填虽然能根本性解决黄土路堤沉降问题,但对道路破坏性大,工期长,一般慎用。注浆法显然不适合湿陷性黄土。挤密桩法切实可行,但除生石灰桩和干拌水泥碎石桩的孔径较小外,其他桩的孔径都为 30~70 cm,且桩距都需控制在 0.6~2.0 m,非常密[2-4]。桩多,工期长,路面破损严重,施工后,需加铺新路面,这将进一步增加施工成本,延长交通阻断时间。与其他路堤处理方法相比,爆炸挤密法具有经济和处理深度大的优势[5]。它是利用炸药爆炸瞬间产生的强大冲击波以及高温、高压的爆生气体来挤密周围土体,形成爆炸空腔[6],再向空腔内逐层填筑加固材料(如碎石、灰土等),从而达到加固路堤的目的。需要的孔径一般不大于 15 cm,便于放置条形药包即可;孔距的大小,即钻孔的平面布置方案,应综合考虑条形药包爆炸后形成的爆腔直径、对土壤的挤密效果和挤密范围等。如果孔距过小,除延长施工周期和增加施工成本外,还易造成塌孔以及路面沉降等进一步的破坏;反之,如果孔距过大,就达不到加固效果。既有规范[7-8]对此没有明确说明;以往的施工一般根据经验确定孔距,缺少科学依据[9-12];文献中也罕见对这方面的研究。且以往的研究多集中在用爆炸挤密法加固饱和或含水量高的砂土或淤泥等软土地基[13-24],很少研究该技术在黄土尤其是既有高速公路黄土路堤中的应用。爆炸挤密施工中,钻孔间距、药包半径、长度等参数应通过爆破试验确定[25]。但很难在既有公路待加固场地进行大规模现场试验,因为一旦失败,很可能影响路面及边坡安全,造成更严重的破坏。以因压实度不足而发生多路段路堤沉陷的某高速公路为工程背景,魏连雨等[26]在该高速公路原取土场进行了一系列小规模室外试验,研究了土壤参数对爆炸挤密效果的影响;魏连雨等[27]建立了与试验[26]相匹配的有限元模型,用大型软件 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟,将模拟结果与试验结果进行比较,验证了数值模拟的可行性和可靠性。

本文中,在文献[26-27]的基础上,以该高速公路黄土路堤的爆炸挤密加固为工程背景,炸药用 2 号岩石乳化炸药(该炸药既适用于岩石,也适用于土体)。先按照该公路路堤的实际几何尺寸及材料参数

* **收稿日期**: 2016-09-28; **修回日期**: 2016-12-19
基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目(20140629)
第一作者: 魏连雨(1957—),男,博士,教授; **通信作者**: 李海超,chang-0117@163.com。

建模,再用 ANSYS/LS-DYNA 仿真分析横截面相同但长度不同(即药量不同)的条形药包在黄土路堤中的爆炸挤密横向影响,再分析长度相同但横截面不同的条形药包爆炸挤密横向影响,旨在为用爆炸挤密技术加固既有公路黄土路堤、制定钻孔平面布置方案提供借鉴。

1 有限元模型

有限元模型包括空气、路面结构层(含路面层、垫层和基层)、炸药和土体。考虑到整个模型的对称性,为节省计算时间只取模型的 1/4 进行分析。模型尺寸、边界条件、划分网格和生成 part 后的模型见图 1。对各部分均采用 3D-SOLID164 实体单元[28]。模型半径(即土体半径)R 与条形药包等效半径 r_e 以及炸药参数有关,应含盖药包爆炸挤密影响范围,具体将在后面的数值模拟部分说明。对路面结构层和空气按等间距划分单元,单元数量分别为 8 411 和 3 235。对药包也按等间距划分,单元数量与药包的等效半径 r_e 及药量有关,例如,横截面 $r_e=2.26$ cm 的 5 kg 药包的 1/4 共划分 1 175 个单元。对土壤在径向和垂向都按渐变网格划分,越靠近炸药网格越密集;网格数量主要与土体半径 R_s 有关,如上述 5 kg药包对应的土体半径 $R_s=250$ cm,共划分 51 232 个单元。

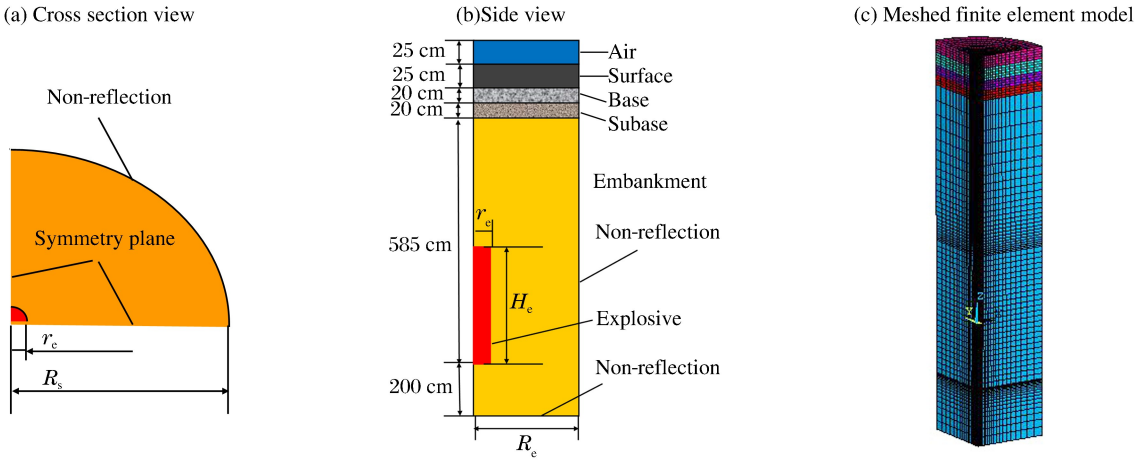


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.1 空气

为了观察路面结构层是否受到爆炸冲击,在模型的顶部设置 25 cm 厚的空气层。对空气的响应行为采用空物质材料模型(MAT_NULL)和线性多项式状态方程进行描述,其状态方程形式[27-28]为:

$$p_a=C_0+C_1\mu_a+C_2\mu_a^2+C_3\mu_a^3+(C_4+C_5\mu_a+C_6\mu_a^2)E_a \qquad \mu_a=\frac{1}{V_a}-1 \tag{1}$$

式中:p_a 为压强,Pa;C_0、C_1、C_2、C_3、C_4、C_5 和 C_6 为状态方程参数;V_a 为相对体积;E_a 为体积内能。相关的材料模型参数值为:$C_0=-1.0\times10^{-6}$,$C_1=0.0$,$C_2=0.0$,$C_3=0.0$,$C_4=0.4$,$C_5=0.4$,$C_6=0.0$,空气初始密度 $\rho_{a0}=1.293\times10^{-3}$ g/cm^3[28],初始体积内能 $E_{a0}=0.25$ J/cm^3[28]。

1.2 路面结构层

高速公路路面结构层根据设计资料及钻孔取样结果确定。该高速公路路面层厚 25 cm,基层和垫层均厚 20 cm。有限元模型中均选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 作为材料模型[28]。通常认为组成路面结构层的材料为各向同性的素混凝土,在拉应力作用下表现为脆性,在压应力作用下表现为弹塑性[29]。如果计入压应力的速度效应,路面结构层混凝土为随动硬化塑性材料。爆炸产生的压应力波速度高,因而选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。

路面结构层各部分主要材料参数见表 1。表中数据由路面钻孔取样及混凝土试验得到。其中,ρ_c 为密度;E_{cY} 为杨氏模量;μ_c 为泊松比;σ_{cy} 为屈服强度;E_{cr} 为切线模量;β_c 为硬化系数,由材料的弹塑性曲线确定,$0<\beta_c<1$。

表 1 有限元模型中路面结构层的主要参数

Table 1 Key parameters of pavement structure layers in finite element model

结构层	ρ_c/(g·cm^{-3})	E_c/MPa	μ_c	σ_{cy}/MPa	E_{cr}/MPa	β_c
路面层	2.70	350	0.20	0.8	30	0.40
基层	2.40	460	0.27	0.5	42	0.80
垫层	2.20	390	0.28	0.3	35	0.60

1.3 炸药及土壤

炸药选用 2 号岩石乳化炸药，其几何尺寸见后面的模拟部分。该高速公路待加固路段路堤的平均高度为 585 cm，把药包下端置于路堤底部，药包下方 200 cm 厚的土体是为观察药包下端爆炸挤密效果而设置的同种土壤，如图 1 所示。

对炸药采用高能炸药燃烧材料模型 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL 状态方程[27-28]：

$$p_d = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V_{de}}\right)e^{-R_1V_{de}} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2V_{de}}\right)e^{-R_2V_{de}} + \frac{\omega E_e}{V_{de}} \tag{2}$$

式中：p_d 为爆轰产物压力，E_e 为炸药体积内能，V_{de} 为爆轰产物体积与未爆炸的炸药体积之比；A、B、R_1、R_2 和 ω 为试验确定的相关参数[27]。

有限元模型所用的炸药材料参数[27-28]为：炸药密度 ρ_e=1.31 g/cm^3，炸药爆速 D_e=3.2 km/s，p_d=9.9 GPa，A=214.4 GPa，B=0.182 GPa，R_1=4.2，R_2=0.90，ω=0.150，E_e=4 192 J/cm^3，参数值均来自厂家试验。

土壤材料模型采用 MAT_SOIL_AND_FOAM，参数通过在路面钻孔取土样进行土工试验确定。为确保模拟结果的适用性，在大量试验数据中筛选出有代表性的一组，作为本次数值模拟的主要土壤参数，分别为：密度 ρ_{s0}=1.70 g/cm^3，动剪切模量 G_s=30.21 MPa，体积卸载模量 K_s=65.46 MPa，动力屈服函数常数 a_0、a_1、a_2 分别为：1.23×10^8 Pa^2、3.71×10^3 Pa、0.028。

2 等横截面不等长条形药包爆炸挤密横向影响规律

2.1 研究工况

2 号岩石乳化炸药通常以药管形式存在。常用的一种药管单支半径为 1.6 cm，质量为 200 g，见图 2。为避免路面钻孔过于密集，这里药包横截面暂时取 2 支药管并排使用，在有限元模型中按横截面相等的原则将其等效成半径为 2.26 cm 的圆柱形药包。药包长度即图 1(b)中的 H_e，由炸药质量、密度 ρ_e 和等效半径 r_e 共同确定。共考虑药包质量为 1～8 kg 的 8 种工况，ρ_e 为 1.31 g/cm^3，计算得到 H_e 分别为47.60、95.19、142.79、190.39、237.99、285.58、333.18 和 380.78 cm。当药包质量为 1～5 kg 时，土壤半径 R_s 取 250 cm；当药包质量为 6～8 kg 时，R_s 取 300 cm。



图 2 2 号岩石乳化炸药

Fig. 2 No. 2 rock emulsion explosive

2.2 横向影响规律

当药包质量为 1～8 kg 时，模拟得到的 1/4 爆腔形状如图 3 所示。其中靠近爆心的蓝色区域为爆腔，爆腔外侧的红色区域为土壤密度提高幅度大的区域。通过后处理器看到，爆腔中间圆柱体的半径 r_c 皆为 36.68 cm。这是因为条形药包半径不变，单位长度的药量相同。但这个结论的前提是药包的长细比必须满足条形药包的要求，即长度与直径之比大于等于 6[20,30]。

模拟得到各工况距爆心不同距离处的土壤密度 ρ_s 见图 4，显然都比爆炸挤密前的 1.70 g/cm^3 提高了；由于靠近爆腔处土壤应力被部分释放，其密度峰值点都发生在距爆心约 50 cm 处；土壤密度峰值介于 1.85～1.91 g/cm^3 之间，虽然随着药量的增加而有所增大，但变化幅度不大。

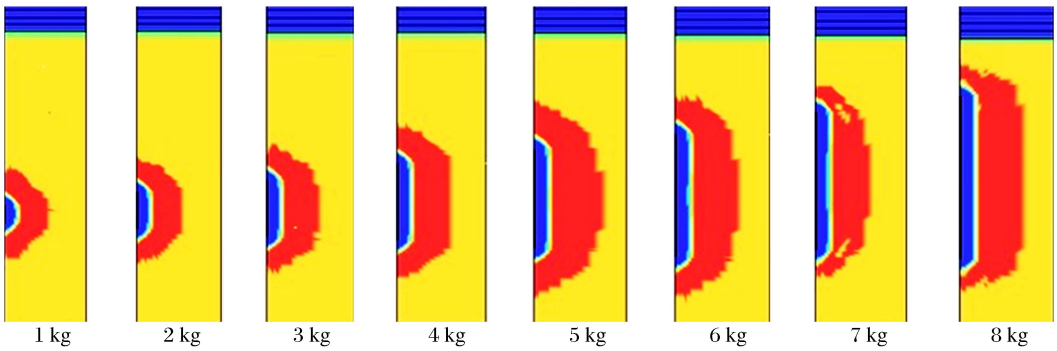


图 3 模拟得到的爆腔

Fig. 3 Simulated explosion cavities

如果把爆心所在的水平面内大于初始土壤密度的最远点至爆心的距离称为爆炸挤密横向影响范围 r_{ha}，从图 4 可以看出，各工况产生的 r_{ha} 介于 177.83～222.14 cm 之间，且与药量成正比。但鉴于 r_{ha} 的变化幅度仅为 44.31 cm，因此取其平均值 202.34 cm近似作为横截面为 2 支药管组成的条形药包产生的横向影响范围。

对图 4 中的密度增量用 MATLAB 进行了曲面拟合，曲面方程为：

$$\rho_s-\rho_{s0}=3.518\times10^{-8}r_{sd}^3+4.946\times10^{-7}r_{sd}^2W_e-1.803\times10^{-5}r_{sd}^2-2.021\times10^{-4}r_{sd}W_e+2.184\times10^{-3}r_{sd}+2.354\times10^{-2}W_e+9.527\times10^{-3}\quad(3)$$

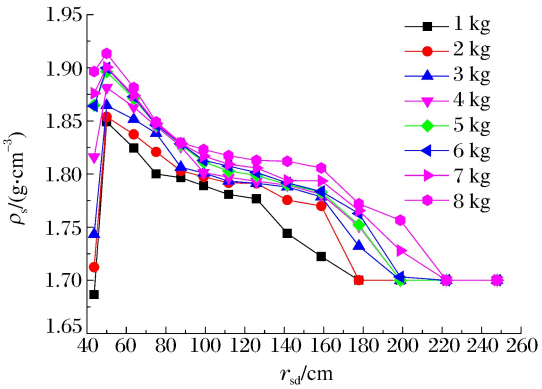


图 4 爆炸挤密后土壤密度横向分布

Fig. 4 Horizontal distribution of soil density after explosion compaction

式中：ρ_s 为爆炸挤密后土壤密度，g/cm^3；ρ_{s0} 为初始土壤密度，g/cm^3；r_{sd} 为至爆心水平距离，cm；W_e 为药包质量，kg。决定系数 $R^2=0.848\ 3$。

3 等长不等横截面条形药包爆炸挤密横向影响规律

3.1 研究工况

不等横截面指的是条形药包横截面由不同支数的药管组成，因此横截面等效半径不同。由于横截面由 2 支药管组成的质量为 5 kg 的 2 号岩石乳化炸药爆炸挤密的横向影响范围以及土壤的密度峰值都较有代表性，所以将其长度作为各工况的药包长度，即 237.99 cm。这里共研究 8 种工况，药包横截面分别由 1～8 支药管组成，相应的等效横截面半径 r_e 分别为 1.60、2.26、2.77、3.20、3.58、3.92、4.23 和 4.53 cm；对应的药包质量分别为 2.5、5.0、7.5、10.0、12.5、15.0、17.5 和 20.0 kg。显然各工况药包长细比均满足条形药包要求。由于多数药量大于第 2 部分的 8 种工况，因此图 1 中的有限元模型半径 R_s 需按药包的等效半径 r_e 增大，但结构组成、边界条件以及材料模型和参数均不变。计算时间也相应延长，使爆炸挤密效应充分发挥。

3.2 横向影响规律

各工况产生的爆腔水平半径 r_c、土壤密度峰值点到爆心的水平距离 r_{spd} 以及爆炸挤密横向影响半径 r_{ha} 的变化曲线皆见图 5。通过 Matlab 曲线拟合，得到 r_c、r_{spd} 以及 r_{ha} 与药包横截面等效半径 r_e 的关系为：

$$r_c=-2.05r_e^2+24.37r_e-7.96\quad(4)$$

$$r_{spd}=5.83r_e^2-10.937r_e+43.56\quad(5)$$

$$r_{ha}=86.41r_e+2.23 \tag{6}$$

式中：r_c、r_e、l_{sd}以及 r_{ha}的单位均为 cm。

爆腔半径与药包横截面等效半径的比值 r_c/r_e 以及爆炸挤密土壤的横向影响半径与药包横截面等效半径的比值 r_{ha}/r_e 见图 6。用 Matlab 曲线拟合发现，r_c/r_e 与 r_e 成一次函数关系：

$$r_c/r_e=-1.02r_e+18.32 \tag{7}$$

从图 6 可以看出，r_{ha}/r_e 的值介于 86.08～89.63 之间，变化幅度为 3.55，说明 r_{ha}/r_e 较稳定，几乎不随 r_e 的变化而变化，因此求得其均值$\overline{r_{ha}/r_e}$为 87.26。式(7)以及$\overline{r_{ha}/r_e}$的图形见图 6。

模拟得到，爆炸挤密后的土壤密度峰值介于 1.85～2.00 g/cm^{3}之间，且随药包横截面的增大而增大，但增大不显著。因为随着时间的延长，土壤密度峰值点的压应力会逐渐向压应力较低的区域释放，从而降低峰值，但使横向影响范围逐渐扩大，直至稳定。

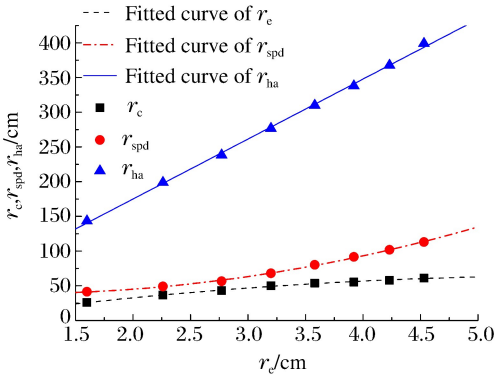


图 5　爆腔半径、土壤密度峰值位置及横向影响半径随药包横截面等效半径的变化

Fig. 5　Changes of explosion cavity radius, peak soil density position and lateral influence radius with effective radius of explosive

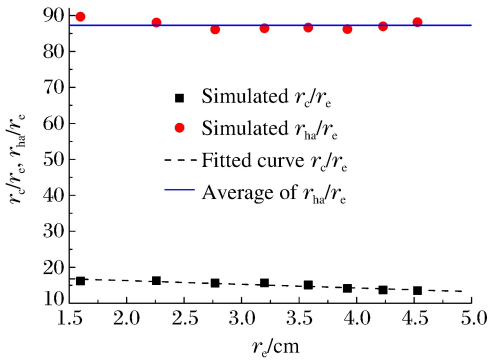


图 6　爆腔半径和爆炸挤密土壤的横向影响半径与药包横截面等效半径的比值随药包横截面等效半径的变化

Fig. 6　Ratios of explosion cavity radius and lateral influence radius to effective radius of explosive varying with effective radius of explosive

4　工程实例

某高速公路部分路段沉降达 45 cm，选择其中一段长为 12 m 的路段进行爆炸挤密加固。该路段半幅路面宽 11 m，路面结构层厚 0.65 m，路堤高 5.7 m，路堤下没有其他设施。下面以该路段为例来说明如何应用上述模拟结果，进行施工方案中钻孔的平面设计。

钻孔平面布置应根据爆炸挤密的横向影响半径 r_{ha}、爆腔半径 r_c和爆炸挤密的施工方法设计。一般来说，为避免塌孔，相邻孔的 r_{ha}不应重叠且 r_c不宜过大。但为了获得更好的爆炸挤密效果，当施工顺序可避免塌孔时，相邻孔的 r_{ha}可部分重叠。

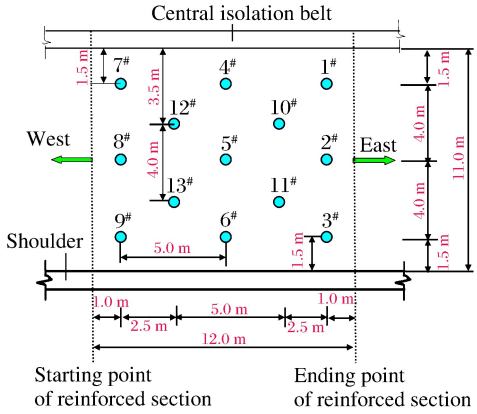


图 7　待加固路段钻孔平面布置示意图

Fig. 7　Plan layout of drilling holes on the road to be reinforced

由上述仿真结果可知，当条形药包由单支药管(r_e=1.6 cm)组成时，其 r_{ha}=143.41 cm(见图 5)，若按此间距在路面钻孔，约需 16 个孔；当条形药包由 3 支药管(r_e= 2.77 cm)组成时，其 r_{ha}=238.44 cm，约需钻 6 个孔。虽然孔的数量减少了许多，但塌孔的危险性将会大大增加，因为它的 r_c=43.12 cm(见图 5)。因此采用由 2 支药管组成的条形药包(r_e=2.26 cm，r_c=36.68 cm，r_{ha}=198.88 cm

取 200 cm),钻孔的平面布局见图 7。

考虑到爆炸挤密施工工序,图 7 中,相邻孔的最小间距为 $\sqrt{2.5^2+2^2}$ m=3.2 m,小于 2×2 m=4 m。施工中,为避免 13 个孔同时爆破造成既有路面因震动过大而破坏,分 2 次爆破。首先,钻 1#～9#孔,钻孔直径为15 cm,方便放置条形药包(见图 8),并将 9 个孔同时引爆;然后,向爆腔中填充碎石和水泥砂浆;其次,钻 10#～13#孔,放炸药,爆破,填充。因此 2 次施工中实际最小孔间距都大于等于 4 m。

整个爆炸挤密施工过程中,没有发生塌孔、路面塌陷、隆起或震裂现象;预备的碎石和水泥砂浆等爆腔填料也没有不足或过剩的情况;施工后监测,2 年中路面累积沉降不足 3 cm,这说明路堤沉降得到了有效控制。



图 8 条形药包

Fig. 8 Linear explosive ba

5 结 论

(1)爆腔水平半径。在确保药包为条形药包的前提下,横截面半径相等但长度不等的条形药包会产生水平半径相同的爆腔;长度相等但横截面半径不等的条形药包产生的爆腔水平半径与药包半径呈二次函数关系,两者的比值与药包半径呈略向下倾斜的一次函数关系。

(2)爆炸挤密后的土壤密度峰值。横截面半径相等但长度不等的条形药包产生的土壤密度峰值虽然随药包长度的增大而略有提高,但变化幅度很小;长度相等但横截面半径不等的条形药包产生的土壤密度峰值随药包半径的增大而增大。密度峰值比爆炸挤密前的初始土壤密度提高约(8.8～17.6)%。

(3)爆炸挤密后的土壤密度峰值位置。爆横截面半径相等但长度不等的条形药包会在距爆心相同距离处达到土壤密度峰值;长度相等但横截面半径不等的条形药包产生的土壤密度峰值点到爆心的水平距离会随药包半径的增大有所增大,两者呈二次函数关系;该距离与药包半径之比与药包半径呈略有上升的一次函数关系。

(4)爆炸挤密后的土壤密度提高值。根据横截面为 2 支药管组成的条形药包爆炸挤密初始密度为 1.70 g/cm^{3}的黄土的模拟结果,拟合得到了爆炸挤密后的土壤密度提高值与所研究点到爆心的水平距离以及炸药量的关系。此关系虽然是由横截面为 2 支药管的条形药包得到的,但函数形式可供参考,且可用于研究加固后路堤承载力。

(5)爆炸挤密横向影响半径。横截面半径相等但长度不等的条形药包爆炸挤密产生的横向影响半径虽然随药量的增加有所增大,但相对于药量的变化幅度来说,其横向影响半径的变化不显著;长度相等但横截面半径不等的条形药包爆炸挤密产生的横向影响半径与药包半径呈逐渐上升的线性关系,两者之比近似为常数。在设计爆炸挤密加固方案过程中,这些规律对确定药包横截面半径、钻孔平面布置以及施工顺序等都有参考价值。

参考文献:

[1] 吴银柱. 土力学与基础工程[M]. 北京:高等教育出版社,2012:270.

[2] 梁桥欣,郑明辉,张维,等. 软弱地层路基加固效果方案优化研究[J]. 国防交通工程与技术,2015(6):37-40.
LIANG Qiaoxin, ZHENG Minghui, ZHANG Wei, et al. A study of the optimization of the consolidating schemes for roadbeds in the soft stratum[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2015(6):37-40.

[3] 张铁军. 干拌水泥碎石桩路基加固技术[J]. 交通标准化,2014,42(10):62-67.
ZHANG Tiejun. Subgrade reinforcement technology of dry mixed cement gravel pile[J]. Transportation Standardization, 2014,42(10):62-67.

[4] 张小斌. 公路路基工程防护与加固浅析[J]. 长沙铁道学院学报(社会科学版),2014,15(2):311-312.

ZHANG Xiaobin. Analysis of protection and reinforcement of highway subgrade engineering[J]. Journal of Changsha Railway University (Edition of Social Sciences), 2014,15(2):311-312.

[5] CHU J, VARAKSIN S, KLOTZ U, et al. Construction processes[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, 2009:3008-3011.

[6] 陈涛，郭院成，顾强康. 爆炸法加固黄土地基数值模拟[J]. 重庆建筑大学学报，2007，29(6)：80-83.
CHEN Tao, GUO Yuancheng, GU Qiangkang. Numerical simulation of explosion method in loess ground treatment[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007,29(6):80-83.

[7] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范：JTJ 94-2008[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2008：7-9.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范：GB50007-2011[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011：120-123.

[9] SOLYMAR Z V, ILOABACHIE B C, GUPTA R C, et al. Earth foundation treatment at Jebba Dam Site[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984,110(10):1415-1430.

[10] LA FOSSE U, GELORMINO T A. Soil improvement by deep blasting: A case study[C]// Proceedings of 17th Annual Symposium on Explosives and Blasting Technique. Lasvegas: International Society of Explosive Engineers, 1991, Vol. 1:205-213.

[11] MURRAY P, SINGH N K, HUBER F, et al. Explosive compaction for the Seymour Falls Dam seismic upgrade [C]// Proceedings on the 59th Canadian Geotechnical Conference, 2006:218-237.

[12] NARSILIO G A. Spatial variability and terminal density: Impication in soil behavior[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006:247.

[13] FORDHAM C J, MCROBERTS E C, PURCELL B, et al. Practical and theoretical problems associated with blast densification of loose sands[C]// Proceedings of the 44th Canadian Geotechnical Conference of the Canadian Geotechnical Society. Richmond, Canada: Canadian Geotechnical Society, 1991:92-98.

[14] GANDHI S R, DEY A K, SELVAM S. Densification of pond ash by blasting[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999,125(10):889-899.

[15] GOHL W B, JEFFERIES M G, HOWIE J A, et al. Explosive compaction: Design, implementation and effectiveness[J]. Géotechnique, 2000,50(6):657-665.

[16] HALL C E. Compacting a dam foundation by blasting[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1962,88(3):33-51.

[17] NARSILIO G A, SANTAMARINA J C, HEBELER T, et al. Blast densification: Multi-instrumented case history[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009,135(6):723-734.

[18] RAJU V R, GUDEHUS G. Compaction of loose sand deposits using blasting[C]// Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1994:1145-1150.

[19] ROLLINS K M, ANDERSON J K S. Cone penetration resistance variation with time after blast liquefaction testing[C]// Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. Reston, VA, USA: Geotechnical Special Publication, 2008:181.

[20] SOLYMAR Z V. Compaction of alluvial sands by deep blasting[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011,21(2):305-321.

[21] WILD P A. Tower foundations compacted with explosives[J]. Electrical World, 1961(66):36-38.

[22] 董亮，叶阳升，蔡德钩，等. 爆炸荷载作用下软土地基的变形特性[J]. 爆炸与冲击，2007，27(5)：416-467.
DONG Liang, YE Yangsheng, CAI Degou, et al. Deformation behavior of soft soil ground under explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(5):416-467.

[23] ESLAMI A, PIROUZI A, OMER J R, et al. CPT-based evaluation of blast densification (BD) performance in loose deposits with settlement and resistance considerations[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015,33(5):1279-1293.

[24] FINNO R J, GALLANT A P, SABATINI P J. Evaluating ground improvement after blast densification: Performance at the Oakridge landfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016,142(1):1-13.

[25] 国家能源局. 水电水利工程爆破施工技术规范:DL/T 5135-2013[S]. 北京:中国电力出版社,2014:10-12.
[26] 魏连雨,刘艳竹,马士宾,等. 高填方路堤软弱区域爆炸挤密技术[J]. 科技导报,2014,32(15):49-52.
WEI Lianyu, LIU Yanzhu, MA Shibin, et al. EC technology of the weak area of the high-filled embankment[J]. Science & Technology Review, 2014,32(15):49-52.
[27] 魏连雨,刘艳竹,李海超,等. 高填方路堤土中爆破数值模拟[J]. 科技导报,2014,32(32):32-36.
WEI Lianyu, LIU Yanzhu, LI Haichao, et al. Numerical simulation of blasting in highly filled embankment soil [J]. Science & Technology Review, 2014,32(32):32-36.
[28] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2013:Vol. II. 2. 64-2. 66.
[29] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010:335-338.
[30] 林大能,胡伟,彭刚. 岩土介质爆炸挤压特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1767-1770.
LIN Da'neng, HU Wei, PENG Gang. Analysis on blasting extrusion characteristic of soil and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1767-1770.

Lateral influence rules on explosion-compacted loess embankment by linear explosive bars

WEI Lianyu[1,2], LI Haichao[1,3], LIU Yanzhu[4]

(1. *School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*;
2. *Civil Engineering Technology Research Center, Hebei Province, Tianjin* 300401, *China*;
3. *National Defense Transportation Department, Military Transportation University, Tianjin* 300161, *China*;
4. *Road Maintenance and Management Center, Tianjin, Tianjin* 300350, *China*)

Abstract: In order to rationally design the plane layout scheme of drilling holes for explosion compacting the loess embankment of an existing highway, this paper took the loess embankment of a highway reinforced by explosion compaction(EC) as an example and studied the lateral influence rules on EC with linear explosive bar. Firstly, a finite element model was established according to the actual geometry and material parameters of the highway. Then, based on the numerical simulation of sixteen cases carried out by ANSYS/LS-DYNA, the change rules of the horizontal radius of the explosion cavity, the peak values of soil density and their position, the lateral influence radius of explosion compacting loess embankment were obtained. These sixteen cases belong to two kinds of situations. One kind is of explosive bars with equal cross section and unequal length, while another one is of those with equal length and unequal cross section. Moreover, the relationship functions among the increment of soil density after EC with the explosive bar whose cross section was composed of two explosive tubes, the horizontal distance to the core of the explosive bar and the amount of explosive were fitted. Finally, combined with the actual EC engineering of the highway, the application of the above rules in the design of construction scheme was illustrated.

Keywords: road engineering; explosion compaction; linear explosive bar; loess embankment; lateral influence

(责任编辑 张凌云)