DOI: 10.11883/byzcj-2016-0251
文章编号:1001-1455(2018)02-0289-06

黄土中爆炸挤密实验与数值模拟*

李海超[1,2],魏连雨[1,3],常春伟[2]
(1.河北工业大学土木与交通学院,天津 300401;
2.陆军军事交通学院国防交通系,天津 300161;
3.河北省土木工程技术研究中心,天津 300401)

摘要:为研究爆炸挤密加固技术在黄土中的应用,规避在既有公路上进行大规模爆炸挤密现场实验的风险,验证借助计算机软件进行数值模拟的可行性和可靠性,先设计实施了小型爆炸挤密室外实验,再利用室外实验的材料参数和几何尺寸建立与各实验工况相对应的有限元模型,利用 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟,通过将爆腔体积、爆后土壤密度和作用于土壤的峰值压应力 3 个方面对数值模拟结果和实测结果进行对比,验证了将 ANSYS/LS-DYNA 用于数值模拟爆炸挤密技术加固黄土的可行性和可靠性,并得出上述三个方面的变化规律,可为根据现场路基状况和几何尺寸进行数值模拟提供借鉴和参考。

关键词:爆炸挤密;ANSYS/LS-DYNA;数值模拟;黄土;爆腔
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

作为路堤填料,黄土由于压实度不足或湿陷性等缺陷,常导致路基沉降。有的公路(包括高速公路)竣工后 1～2 年内的累积沉降量已超过规范规定的 15～30 年内应达到的沉降限值[1-3]。湿陷性黄土地基的常用加固方法为素土桩、灰土桩、碎石桩等各种挤密桩,桩径 10～20 cm[4-5],桩心距一般不大于 2.5 倍桩径[6]。若用挤密桩加固既有公路湿陷性黄土路堤,由于桩径小且密,使路面破损严重。加固之后,需加铺新路面,将进一步增加施工成本,延长道路封闭时间。爆炸挤密法是一种用爆炸动力挤密土体、形成爆腔、向爆腔内逐层填筑碎石等加固材料、并注浆,从而实现加固既有公路黄土路堤的方法。

用爆炸挤密技术提高软土地基强度已有多年历史,但实验测试和理论分析难度阻碍了其发展和应用[7]。以往研究多见将其用于沙土或含水量大的软基,很少研究其在黄土中的应用,且未见用其加固既有公路黄土路堤。爆破施工技术规范要求,合理的爆破参数应通过爆破实验确定[8]。然而加固既有公路路堤,很难进行现场实验,因为一旦实验失败,很可能会危及路面及边坡安全,从而加剧破坏程度和范围。若借助计算机软件进行数值模拟,寻找爆炸挤密规律,用以指导施工方案设计,则数值模拟的准确性和可靠性需予以验证。

本文中分别从小型爆炸挤密室外实验和有限元数值模拟两方面进行研究,并从爆腔体积、爆后土壤密度和作用于土壤的峰值压应力 3 个方面,验证用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟爆炸挤密技术的可行性和可靠性,为根据现场路堤情况进行数值模拟提供借鉴和参考。

1 小型室外实验

虽然不可能用与路堤填料完全相同的土进行实验,但为了使土参数尽可能接近,将实验场地确定为待加固高速公路路堤的原取土场。实验前,先在地面开挖 2 个深 40 cm、直径 160 cm 的圆形爆破槽;从取土堆取黄土回填并夯实,直至槽内填土与地面齐平;将 2 个高 130 cm、内径 150 cm 的钢制圆筒分别放置于两爆破槽上。筒内分 6 层填筑黄土并夯实,如图 1 所示。最后用于实验的土壤总高度约为170 cm。炸药和传感器置于第 3、4 层土之间,如图 2 所示。

* **收稿日期**:2016-08-19;**修回日期**:2016-11-16
基金项目:河北省交通运输厅科技计划项目(20140629)
第一作者:李海超(1969—),女,博士研究生,教授,chang-0117@163.com。



图 1 实验用黄土、圆筒和夯实土壤

Fig. 1 Tested loess, containers and tamping soil



图 2 放置传感器

Fig. 2 Placing sensors

实验中采用 2#岩石乳化炸药——一种新型防水工业炸药，在中国民用爆破领域应用广泛。为仿效炸药在无限土体中爆炸，炸药量必须予以控制，以免爆炸冲击波在容器壁上形成反射。炸药密度为 1.31 g/cm^3，单支药管药心净半径为 1.5 cm。根据炸药地下封闭爆破埋深计算经验公式[9]，按小型实验土体几何尺寸近似计算得到最大炸药量为 50 g。实验共分 4 个工况：工况 1、2 中分别使用 50 和 40 g 炸药；工况 3、4 中均使用 30 g 炸药，但土壤参数不同。

所用传感器是 MYD-8432D 型压电式压力传感器，用以收集爆炸冲击波对土体产生的压应力。在工况 1、2 中，4 个传感器分别距炸药中心 26、36、46 和 56 cm；在工况 3、4 中，分别距炸药中心 22、32、42 和 52 cm。

爆前，在第 3 层土的不同位置用环刀取土样，以获取爆前土壤参数。表 1 给出了通过土工实验得到的各工况土壤的密度 ρ、剪切模量 G、体积卸载模量 K。其中 G 用不排水三轴剪切实验确定；4 个工况的含水率 w 平均值分别为 15.6%、16.3%、15.8%和 17.1%；内摩擦角 φ 分别为 10.7°、11.2°、10.4°和 12.0°；黏聚力 C 分别为 14.1、15.2、11.8 和 18.4 kPa。

表 1 土的主要参数

Table 1 Key parameters of the soil

工况	ρ/(g·cm^{-3})	G/MPa	K/MPa	a_0/(10^8 Pa^2)	a_1/(10^3 Pa)	a_2/(10^{-2})
1	1.82	43.47	94.19	1.90	5.08	3.40
2	1.83	40.20	87.11	2.20	5.71	3.70
3	1.81	41.14	89.14	1.34	4.14	3.21
4	1.85	37.40	81.04	3.20	7.40	4.27

爆后，剖开部分土体及爆腔。观察发现各工况爆腔均接近两端稍尖的椭球体。爆腔尺寸用钢卷尺测量，包括平均水平直径 a 和垂直直径 b，计算得到爆腔体积 $V_c=4\pi(a/2)^2(b/2)/3$。各工况爆腔体积分别为 6 536、4 500、4 608 和 3 560 cm^3。显然，药量越大产生的爆腔体积越大；当药量相同时，土壤密度越大，产生的爆腔体积越小。且在距爆腔壁不同距离处，用环刀取土样，进行土工实验，得到爆后土壤参数，用于将实验结果与爆前土壤参数及数值模拟结果相比较。

2 数值模拟

2.1 有限元模型组成

用 ANSYS/LS-DYNA 建立的有限元模型包括炸药、土壤和空气，如图 3 所示。考虑到对称性，为减少计算时间，仅研究物理模型的 1/4。在模型底部和外侧施加无反射边界条件，以模拟无限土体。H 为炸药高度。当最大药量为 50 g 时，H 为 5.4 cm，模型中土壤和炸药的最大高度和为 165.4 cm，小于 170 cm。

炸药、土壤和空气均采用 3D-SOLID164 单元，EULER 网格划分，采用多物质 ALE 算法。模拟时

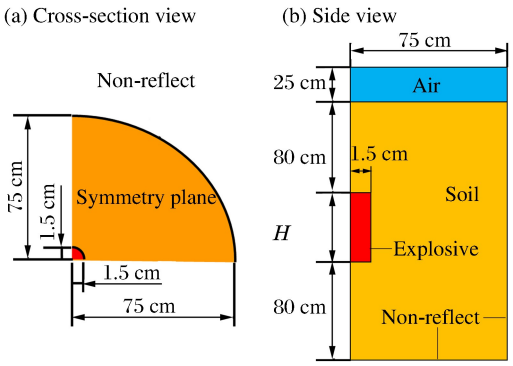


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

间均采用 9 000 μs。

2.2 材料参数

土壤采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型[10]，土介质的屈服函数为：

$$\varphi_s = s_{ij}s_{ij}/2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \tag{1}$$

式中：a_0、a_1 和 a_2 为动力屈服常数，可用内摩擦角 φ 和土壤粘聚力 C 确定[10-11]；s_{ij} 为应力偏量；p 为土壤受到的压应力。基于室外实验爆破前土壤的实测参数，得到有限元模型中土壤的主要参数，见表 1。

炸药采用高能炸药燃烧材料模型 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL 状态方程模拟：[10]

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \tag{2}$$

式中：p 为压力，E 为单位体积炸药的内能，V 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 为实验确定的相关参数[12]。有限元模型所用的炸药材料参数[13]见表 2，其中 ρ 和 D 分别为炸药的密度和爆速。参数值均来自实验所用的 2＃岩石乳化炸药的产品说明和厂家实验数据。如同样选用 2＃岩石乳化炸药，可参考表 2 的炸药参数，但考虑到厂家和产品批次差异，炸药参数最好由厂家提供。

表 2 炸药材料参数

Table 2 Parameters of the explosive

ρ/(g·cm^{-3})	D/(m·s^{-1})	p/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/(J·cm^{-3})
1.31	3 200	9.9	214.4	0.182	4.2	0.90	0.150	4 192

空气采用空物质材料模型 MAT_NULL 和线性多项式状态方程描述。其状态方程[10]为：

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \tag{3}$$

式中：C_0、C_1、C_2、C_3、C_4、C_5 和 C_6 为状态方程参数；$\mu = 1/V' - 1$，V' 为相对体积；E 为内能密度。材料模型参数见表 3，其中 ρ 为密度，E_0 为初始内能[13]。

表 3 空气参数

Table 3 Parameters of air

ρ/(10^{-3}g·cm^{-3})	$C_0/10^{-6}$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/(J·cm^{-3})
1.293	−1.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.25

3 数值模拟与实验结果对比

3.1 1/4 爆腔体积

数值模拟得到 4 个工况的爆腔形状都近似为两端稍尖的椭球体，以工况 1 生成的爆腔为例进行说明。为方便观察，将其镜像成 1/2 爆腔，如图 4 所示。4 个工况的 1/4 爆腔体积-时间历程曲线如图 5 所示。可以看出，爆腔体积先是迅速增加，达到一定值后保持基本不变。炸药越多，爆腔体积越大，达到稳定状态所需时间越长。若使用相同药量，如工况 3 和 4，爆腔体积与土壤密度成反比，且爆腔在密度高的土壤中比在密度低的土壤中要花费更长时间才能达到稳定状态。

数值模拟得到的爆腔体积与爆炸挤密实验得到的爆腔(EC)体积对比如图 6 所示。可以看出，除工况 3 外，其余 3 个工况数值模拟的爆腔体积均大于实验值，这主要是由于爆腔在被剖开的过程中，因受到扰动而有不同程度地减小。对于工况 1～4，模拟和实验得到的爆腔体积分别相差 3.2%、10.7%、−6.5%和 9.5%。除工况 2 外，误差均在 10%以内，因此模拟得到的爆腔体积具有一定的参考性。

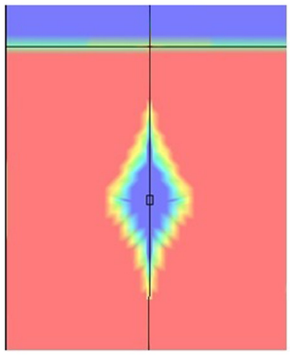


图 4 工况 1 的爆腔

Fig. 4 Explosion cavities of Case 1

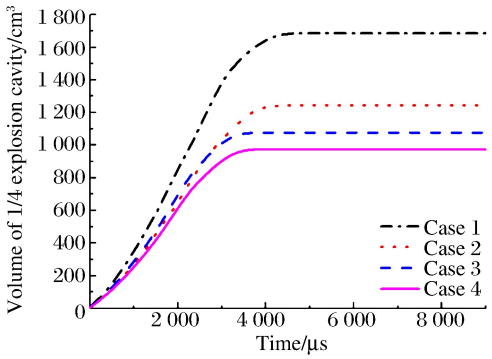


图 5 1/4 爆腔体积-时间历程曲线

Fig. 5 Volume-time curves of 1/4 explosion cavity

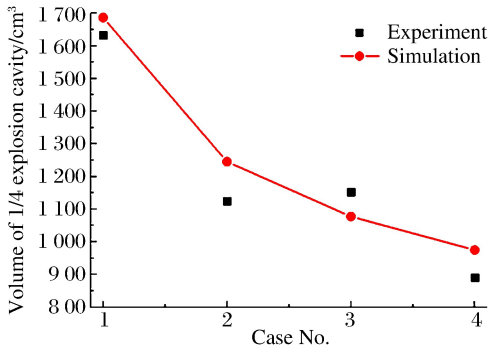


图 6 数值模拟和实测爆腔体积

Fig. 6 Simulated and experimental volumes of EC

3.2 土壤密度

因为用于实验的钢筒直径有限，每个工况爆后只能取 2～3 个土样。4 个工况爆炸挤密前后土壤密度实测值以及数值模拟结果如图 7 所示。可以看出，经过爆炸挤密，4 个工况的土壤密度较原来均有明显提高；对大多数土样来说，数值模拟值与实测值相差不大；4 个工况的土壤密度变化趋势一致，都先逐渐提高，直至峰值点，随后随着应力波在土中传播强度逐渐降低，土壤密度也逐渐降低；靠近爆腔处的土壤密度并非最大，因该处土体应力有一定程度的释放；此外还可以看出，土壤挤密范围随炸药量的增加而增加；50 g 炸药(工况 1)的爆炸挤密范围刚好扩展到土

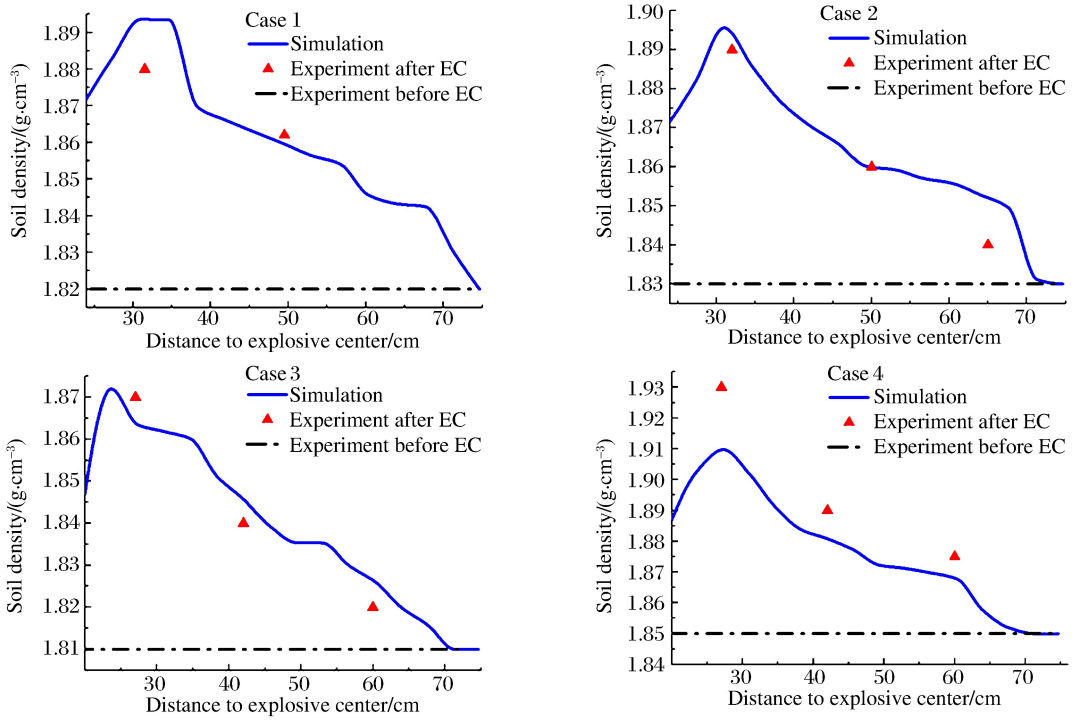


图 7 土壤密度比较

Fig. 7 Comparison of soil density

壤外层，且模拟和实验均未发现土壤顶部有隆起或裂缝出现，因此近似确定的最大药量合理。

3.3　作用于土壤的峰值压应力

爆炸挤密土壤过程中，爆炸波产生的作用于土壤的压应力大小是决定爆炸挤密效果的关键因素。小型实验中，预埋的 MYD-8432D 型压电式压力传感器采集到作用于土壤的爆炸波压应力，并将信号传递给 TST5910 动态信号测试分析系统。该系统收集和记录这些信号，向用户显示。据此可以得到传感器布置处的峰值压应力，其实测值和数值模拟值见图 8。但是由于系统的通道 6 出了故障，利用 5～8 通道的工况 2 和 4 只有 3 个实测值，利用通道 1～4 的工况 1 和 3 有 4 个实测值。显然，工况 1、2 的数值模拟结果与实测值吻合较好；工况 3、4 的大多数值吻合较好。此外，炸药量越大，在土壤相同位置处产生的压应力越大；当炸药量相同时，应力波在高密度土壤中的衰减速度要高于低密度土壤。

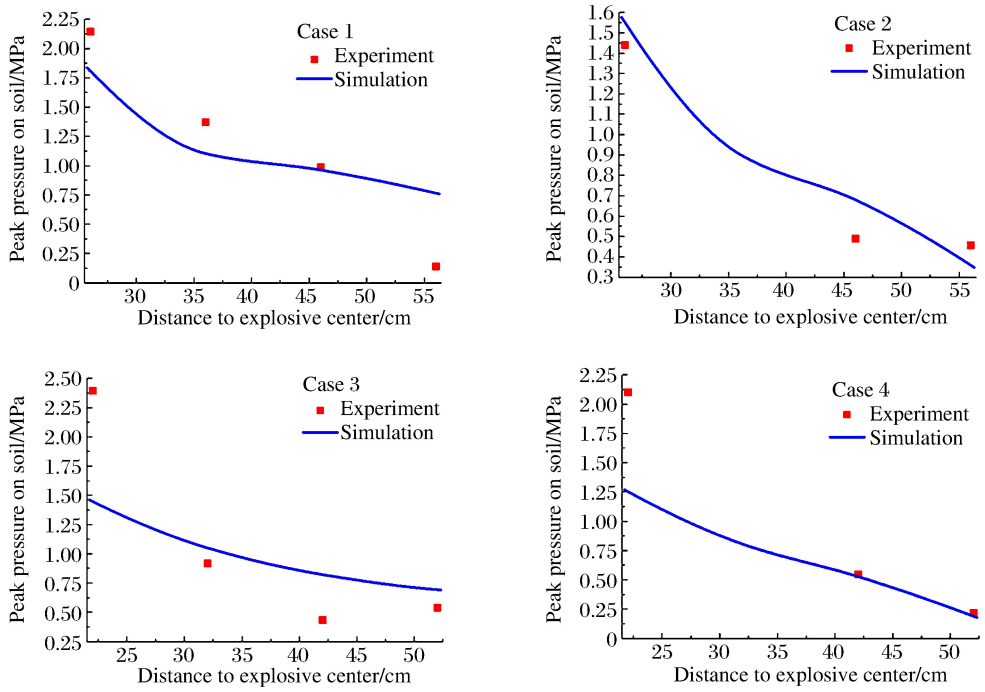


图 8　土壤峰值压应力比较

Fig. 8　Comparison of peak pressure on soil

4　结　论

(1)数值模拟结果与室外实验结果在爆腔体积、爆后土壤密度、作用于土壤的峰值压应力 3 个方面都吻合较好，说明用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟爆炸挤密黄土可行、可靠；且本文对单元类型、材料类型及其状态方程的选用、材料参数的取用以及边界条件的设定都是合理的。(2)爆腔体积最初增长迅速，在达到一定值后趋于稳定；爆腔体积与炸药量成正比，且炸药越多，爆腔达到稳定状态所需时间越长；在药量相同时，爆腔体积与土壤密度成反比，且在密度高的土壤中爆腔达到稳定状态所需时间比在密度低的土壤中长。(3)爆炸挤密法可以有效提高爆腔周围的土壤密度；由于靠近爆腔处的土体会释放部分压应力，故爆炸挤密后的土壤密度先逐渐提高，直至峰值点，随后随着应力波的衰减，土壤密度逐渐降低；土壤的爆炸挤密范围与所用药量成正比。(4)在至爆心相同距离处，作用于土壤的峰值压应力与药量成正比；当药量相同时，应力波在高密度土壤中的衰减速度要高于低密度土壤。

参考文献：

[1]　王玉娜，陈敏，李清杰. 浅谈湿陷性黄土路基设计与处理措施[J]. 城市道桥与防洪，2015(4)：26-28.
WANG Yuna, CHEN Min, LI Qingjie. Simple discussion on the design and treatment measures of collapsible loess

subgrade[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(4):26-28.
[2] 黄春丽.承朝高速公路路基沉陷机理分析及处理技术探讨[J].黑龙江交通科技,2012,35(12):58-60.
HUANG Chunli. Mechanism analysis and treatment technology discussion on the subgrade settlement of Chengchao Highway[J]. Heilongjiang Traffic Science and Technology, 2012,35(12):58-60.
[3] 中华人民共和国交通部.《公路路基设计规范》:JTGD30-2015[S].北京:人民交通出版社,2015:7-10.
[4] 曲元梅.公路路基缺陷加固技术的应用研究[D].济南:山东大学,2006.
[5] 赵发章.黄土与湿陷性黄土地区路基加固实验研究[D].兰州:兰州理工大学,2003.
[6] 米海珍,杨鹏.挤密桩处理湿陷性黄土地基的现场实验研究[J].岩土力学,2012,33(7):1954-1956.
MI Haizhen, YANG Peng. A field experimental study of compaction piles in collapsible loess foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(7):1954-1956.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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,2010:52-54.
[10] HALLQUIST J O. LS-DYNA theory manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006:19.21-19.22.
[11] 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.
[12] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives handbook-properties of chemical explosives and explosive simulants[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 1985:8.21-8.23.
[13] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2013,2:2.64-2.66.

Experiment and numerical simulation of explosion compaction in loess

LI Haichao[1,2], WEI Lianyu[1,3], CHANG Chunwei[2]
(1. *School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*;
2. *National Defense Transportation Department, Army Military Transportation University, Tianjin* 300161, *China*;
3. *Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin* 300401, *China*)

Abstract: In this work we at first designed and performed some small-scale explosion compaction (EC) outdoor experiments to study the application of EC technology in loess and to verify the feasibility and reliability of numerical simulation by computer software so that the risk of field experiments of EC on existing highways can be avoided. Then, we established the finite element models using the material parameters and the geometric dimensions of the outdoor experiments. Numerical simulations were carried out using ANSYS/LS-DYNA in combination with the above finite element models. By comparing the numerical simulation results with the measured ones in three aspects: the volume of the explosion cavities, the soil density after EC and the peak compressive stress acting on the soil, the feasibility and reliability of using ANSYS/LS-DYNA to simulate the EC of loess were verified. Moreover, the variation laws in the above three aspects were obtained. Our work can provide reference for numerical simulation of EC according to the conditions and the geometrical dimensions of actual loess subgrade.

Keywords: explosion compaction; ANSYS/LS-DYNA; numerical simulation; loess; explosion cavity

(责任编辑 王小飞)