文章编号:1000-5773(2007)04-0419-06

土介质对低速弹丸的抗侵彻性能实验研究*

董永香[1],冯顺山[1],李砚东[1],李学林[2]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.山东机器(集团)有限公司,山东淄博 255201)

摘要:通过低速条件下弹丸对硬土、中硬土和中软土不同土介质侵彻性能的实验研究,得到了弹丸对土介质垂直侵彻的弹道特点和不同弹丸速度对不同性能参数土介质的侵彻深度,拟合得到了不同土介质中侵彻深度随弹丸动压增加呈线性增加的无量纲关系式;基于低速弹丸对不同土介质具有不同侵彻性能的实验研究方法,可有效标定不同土介质抗侵彻性能和弹丸侵彻不同土介质性能;通过实验数据与 Young 侵彻公式计算结果的比较分析,验证了 Young 公式在侵彻深度小于弹丸直径 3 倍时的有效性。

关键词:弹丸;土介质;侵彻;实验研究
中图分类号:O385;TJ414 **文献标识码**:A

1 引 言

与其它金属和脆性材料靶相比,土介质的动态抗侵彻性能自美国桑迪亚实验室 1960 年开始研究以来,进行了大量实验[1-2]、理论[3-4]和数值[5]等方面的研究,但由于土介质的多样性和各向异性,特别是在实验研究方面,这些结果仍然不足以对该类问题的研究提供足够的数据支撑。尤其是目前速度小于 100 m/s 的低速弹丸对土介质的侵彻成为人们关注的问题。本工作所开展的低速弹丸侵彻不同软硬土介质的实验及分析结果,为土介质的抗侵彻及土的动态性能等相关研究提供有益的参考,也对经典的 Young 侵彻公式在土介质方面的正确使用,以及军事上日益重视发展的钻地武器对土介质等目标靶作用的研究领域,均具有重要的参考意义。

2 土介质性能及分类

土是一种天然产物,由无数个大小不同的土粒混合而成,呈颗粒状。自然界中的土颗粒相差很大,例如,有粒径大于 200 mm 的漂石,还有粒径小于 0.005 mm 的粘粒。特别是土的组成与结构复杂,种类很多,不同的土介质的物理、力学性质千差万别,许多土壤具有较大的不均匀性和各相异性。众所周知,土体的抗压性能远比抗拉、抗剪的能力大得多。在动力作用下,土的动力响应与加载速度、土的湿度、成份等密切相关[6-7]。因此研究土在动载荷作用下的动力响应问题十分复杂,需要解决出现的各种特殊的理论和工程实际问题。

土质材料为不均匀低阻抗材料,在土介质性能测试中,不同取样,有不同的夹杂物,而且夹杂物的尺寸也很不一致。为了表示不同土介质的软硬程度,本研究采用土介质测试仪进行测量。

土介质测试仪(如图 1)是一种轻便快捷的原位测试仪器,在国际标准中称为“便携贯入仪”,主要用于检验基础承载力、压缩模量、液性指数。其特点为不需要取土,可现场原位测试,无扰动。其测试原理是用标准重锤锤击探杆顶部的活塞,通过钻杆将锥形探头压入土内,根据活塞内部传感器测得的冲击速度,电子记录器内计算器计算贯入的能量。同时,盒内另一记录器记录到锥形探头触入的深度,由此计

* **收稿日期**:2006-10-23;**修回日期**:2007-02-10
作者简介:董永香(1973—),女,博士,讲师,主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail:dongyongx@bit.edu.cn

算出锥形探头的动力阻力值,再得到土介质的承载力、压缩模量、液性指数等参数。

本工作采用沈阳市建科仪器研究所生产的 WG-V 电子智能土介质测试仪以及容积为 200 cm^3 的环刀,可以得到土的压缩模量、承载力以及土的密度,进而判断土的力学性质,为土介质抗弹丸侵彻性能研究提供相应的土性能材料参数。表 1 为根据所测的土介质性能数据(探杆直径 10 mm,贯探深度为 150 mm),并参照文献[8]将土介质的软硬度分为四类:车辆无压痕为硬土,车辆有明显压痕为中硬土,车辆通行困难为中软土,车辆通行非常困难为软土介质。



图 1 土介质测试仪现场测试情况

Fig. 1 Field test of soil device

表 1 土介质性能参考数据表

Table 1 Performance parameters of different soils

Soil medium	Penetrating power/(kPa)	Modulus of compression /(MPa)	Density /(g/cm^3)
Hard soil	>50	>11	>1.85
Mid-hard soil	30～49	8～11	1.80～2.05
Mid-soft soil	10～29	5～8	1.70～1.80
Soft soil	<15	<5	1.65～1.75

3 土介质抗弹丸侵彻性能试验方法

试验时采用∅72 mm 弹丸,弹长 220 mm、弹重 3.2 kg,采用∅72 mm 向下发射火炮,分别对上述已测得性能参数的硬土、中硬土和中软土介质垂直侵彻,采用高速摄影仪观测弹丸入侵地面时状态并获得弹丸初速。试验中采用的弹丸结构外形如图 2 所示。



图 2 试验弹丸结构外形

Fig. 2 Structure outline of test projectile

4 试验结果与分析

图 3、图 4、图 5 分别为弹丸侵彻硬土、中硬土和中软土不同土介质的弹孔及弹道剖面。从图中可以看出,土介质从硬到软,弹丸侵彻土介质的弹孔松动程度由小到大,侵彻弹道剖面显示,在垂直侵彻条件下,土介质中弹道基本呈直线。

表 2、表 3、表 4 分别为弹丸在不同侵彻速度下在硬土、中硬土、中软土介质中的垂直侵彻实验的侵深结果数据表。图 6 为对应表 2～表 4 弹丸以不同侵彻速度侵彻不同土介质的侵深度试验数据变化趋势图。由不同的试验数据点可以看出,对应相同软硬度的土介质,在同样的弹丸侵彻速度下,侵彻结果



图 3 弹丸侵彻硬土介质弹孔及弹道剖面

Fig. 3 Hole and tunnel section of penetrating hard soil

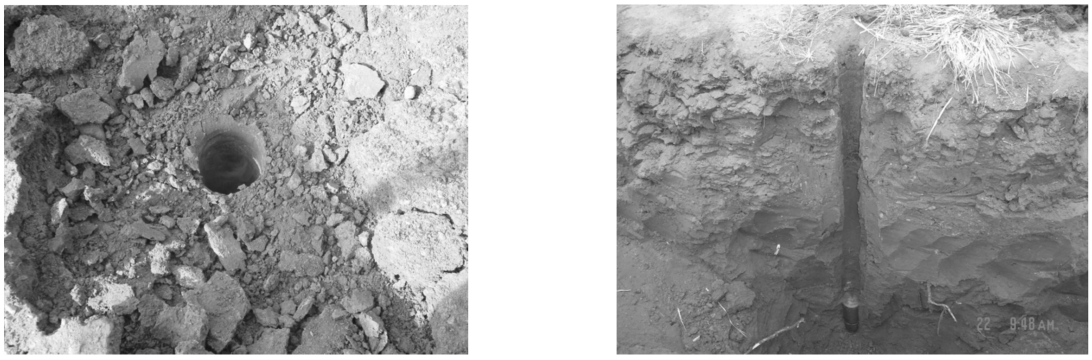


图 4　弹丸侵彻中硬土介质弹孔及弹道剖面

Fig. 4　Hole and tunnel section of penetrating mid-hard soil

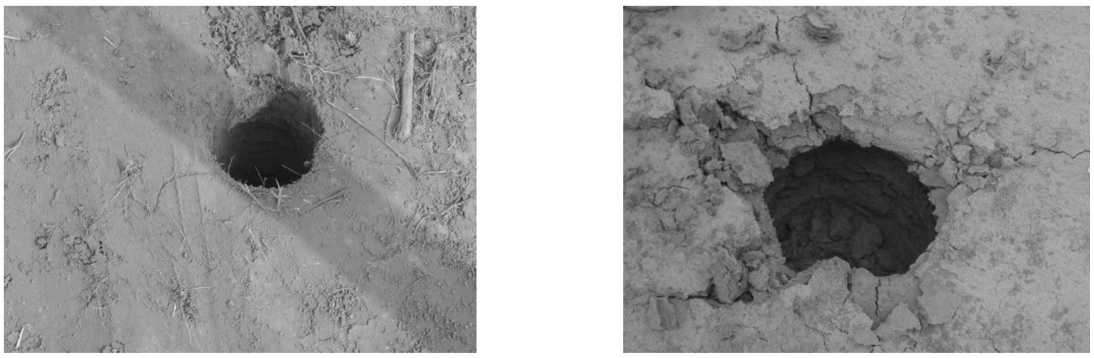


图 5　弹丸侵彻中软土介质弹孔示意图

Fig. 5　Penetrating hole of mid-soft soil

并不相同,这一方面与试验设备及测量仪器等有关,但主要是由于如前面分析所述的土介质性能本身的分散性所引起。但从数据结果总趋势而言,在不同的土介质中,随着弹丸侵彻速度的增加,侵深增加。图中同时给出了在硬土、中硬土和中软土中随弹丸侵彻速度增加侵深的变化趋势曲线 L1、L2 和 L3,曲线反映出了随着土介质硬度的增加,斜率减小,表明相同的弹丸侵彻速度条件下,随着土介质由软到硬,侵彻深度减小,即土介质的抗侵彻性能随着土硬度的增加而增加。

表 2　硬土介质中弹丸不同侵彻速度对应的侵彻深度

Table 2　Penetration depth of projectile with different initial velocity in hard soil

Serial number	Initial velocity /(m/s)	Penetration depth /(mm)	Serial number	Initial velocity /(m/s)	Penetration depth /(mm)	Serial number	Initial velocity /(m/s)	Penetration depth /(mm)
1	64	220	4	85	230	7	74	218
2	63	220	5	88	170	8	71	165
3	68	250	6	73	288	9	71	200

因此,在本工作所研究的弹丸低速侵彻土介质试验结果基础上,结合本工作的试验方法,可以采用特定的弹丸、侵彻速度和侵彻姿态,根据弹丸的侵彻深度等参量来标定土介质的抗侵彻性能,或以此来标定弹丸对不同土介质的侵彻性能。

下面选取弹丸直径 D 为基本量,对侵深 P 进行无量纲化,并选取不同土介质的压缩模量 E_s 对弹丸动压 ρv^2 进行无量纲化[9],分别取硬土、中硬土、中软土压缩模量统计平均值 12 MPa、9 MPa 和 6 MPa。图 7 为无量纲弹丸动压与侵深对应关系及其拟合曲线,相应的拟合公式为

$$P/D = 1.162(\rho v^2/E_s) - 0.175$$

由此可以得出，弹丸在不同土介质中无量纲侵彻深度(P/D)随无量纲弹丸动压($\rho v^2/E_s$)增加呈线性增加的关系式，可以看出侵深与动压的无量纲关系在本研究条件下均可通过上式来描述。

表 3 中硬土介质中弹丸不同侵彻速度对应的侵彻深度

Table 3 Penetration depth of projectile with different initial velocity in mid-hard soil

Serial number	Initial velocity /(m/s)	Penetration depth /(mm)
1	79	450
2	77	430
3	72	480
4	77	520
5	88	670
6	87.8	550
7	88	540
8	87	508
9	80	493
10	74	518
11	72	468
12	72	320
13	73	305

表 4 中软土介质中弹丸不同侵彻速度对应的侵彻深度

Table 4 Penetration depth of projectile with different initial velocity in mid-soft soil

Serial number	Initial velocity /(m/s)	Penetration depth /(mm)
1	66	500
2	80	790
3	82	680
4	85	705
5	81	670
6	87	785
7	81.7	740
8	80.8	780
9	96	1 010
10	96	980
11	109	1 220
12	74	590
13	73	590

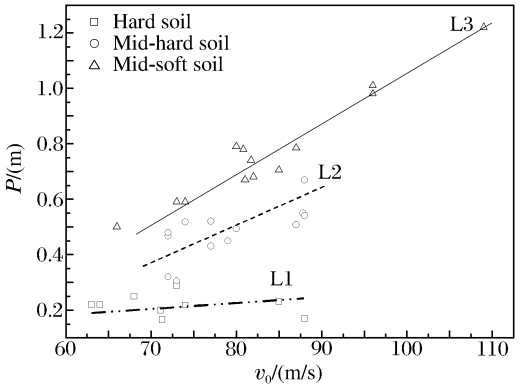


图 6 弹丸不同侵彻速度对应侵深的试验数据

Fig. 6 Experimental data of penetration depth in the different soils

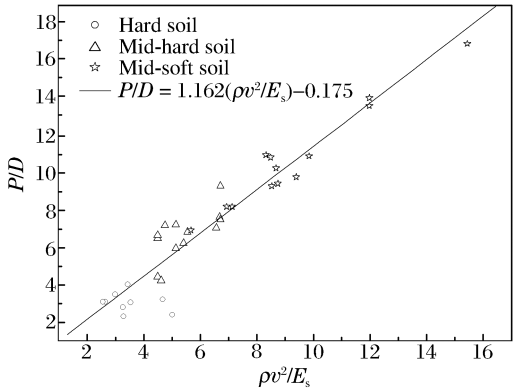


图 7 弹丸动压与侵深无量纲对应关系及其拟合曲线

Fig. 7 Nondimensional data of penetration depth versus dynamic pressure and the fit curve in the different soils

5 与 Young 侵彻公式的比较

弹丸侵彻 Young 公式[10]是用于弹丸侵彻土、岩石、混凝土计算侵深的经典公式，目前在土介质的侵彻方面仍具有广泛的应用。美国桑迪亚实验室于 1960 年开始研究土中侵彻，从 1967 年以来，陆续发表了侵彻弹在土、混凝土、岩石、冰、冻土的侵彻公式。该侵彻公式采用的假定和限制条件的第 4 条中指出：当侵彻深度小于弹丸直径的 3 倍时，侵彻公式的可靠性值得怀疑。本工作可以对硬土、中硬土和软土的试验结果与 Young 侵彻公式计算结果进行比较分析，尤其对硬土其侵彻深度大部分小于弹丸直径 3 倍的数值，因此可以验证 Young 公式在该侵深范围的有效性。下列为用于土介质 SI 单位制的 Young 侵彻公式

$$P = 0.0008SN(m/A)^{0.7}\ln(1 + 2.15\times10^{-4}v^2) \qquad v < 61\ \text{m/s}$$

$$P = 0.000018SN(m/A)^{0.7}(v - 30.5) \qquad v \geqslant 61\ \text{m/s}$$

式中：P 为侵彻深度，m 为弹丸质量，A 为弹丸截面积，v 为撞击速度，N 为弹头形状系数，S 为可侵彻性指标。对于卵形弹头形状系数为

$$N=0.18L_n/d+0.56$$

式中：L_n 为弹头部长度，d 为弹体直径。本文中 N=0.63。

由于土介质的多样性，带来了确定土介质 S 值的困难。根据实验数据，当硬土、中硬土和中软土的 S 分别取 4.2、7.9、12.2 时，由 Young 公式得到的计算结果如图 8 所示。与实验结果相比，硬土、中硬土和中软土的统计误差分别为 23.7%、12.3% 和 6.7%。因此，通过本实验结果，验证了弹丸速度在 64～109 m/s 时，Young 公式对硬土、中硬土和中软土侵彻深度的可预测性。

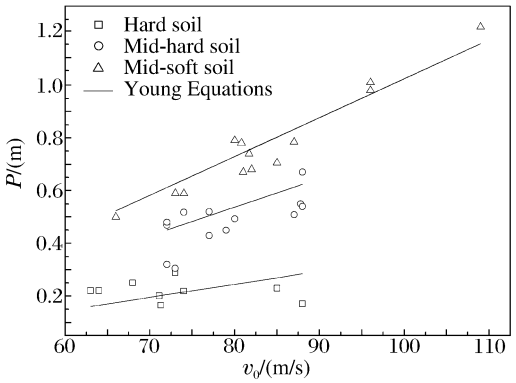


图 8　弹丸侵彻速度与侵深的试验数据及 Young 公式计算结果

Fig. 8　Experimental data of penetration depth with different impact velocity and the calculated results from Young equations

由本工作所研究不同软硬度土介质统计平均压缩模量，可得到 S 值的近似表达式

$$S=20.1-4E_s/3$$

式中：E_s 为土介质的压缩模量，单位为 MPa。通过上式可近似估算不同硬土、中硬土和中软土在低速条件下的可侵彻性指标 S 值。

6　结　论

通过低速弹丸对不同软硬度土介质的侵彻实验分析，获得了侵入土介质的弹道特点和相应的侵深实验数据，得出了侵深（P/D）随弹丸动压（$\rho v^2/E_s$）的增加而增加的无量纲函数关系式，试验结果与 Young 侵彻公式计算结果进行了分析比较，尤其在侵彻深度小于弹丸直径 3 倍时，对 Young 公式进行了验证，得出了本研究条件下低速侵彻不同软硬度土介质 S 值的近似估算式。

References：

[1] James A S, Paul W M, Glenn J R. Geotechnical Sit Characterization in the Greater Memphis Area Using Cone Penetration Tests [J]. Engineering Geology, 2001, 62: 169-184.

[2] Savvateev A F, Budin A V, Kolikov V A, et al. High-Speed Penetration into Sand [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 675-681.

[3] Richard W M, Thomas A D. Finite Cavity Expansion Method for Near-Surface Effects and Layering during Earth Penetration [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 239-258.

[4] Bazhenov V G, Kotov V L. Determination of Dynamic-Compressibility Parameters and of Shear Strength for a Ground Medium by the Striker-Penetration Method [J]. Doklady Physics, 2006, 51(5): 279-282.

[5] Dexter A R, Czyz E A, Gate O P. A Method for Prediction of Soil Penetration Resistance [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 412-419.

[6] Yang G T. Soil Dynamics [M]. Beijing: China Construction Material Industry Press, 2000. (in Chinese)
杨桂通. 土动力学 [M]. 北京：中国建材工业出版社. 2000.

[7] Ma L X. Research on Changing Law of Compressing Module of Soil [J]. Site Investigation Science and Technology, 2006. 3: 42-43. (in Chinese)
马履霞. 土压缩模量变化规律的探讨 [J]. 勘察科学技术, 2006. 3: 42-43.

[8] Qian W C. Mechanics of Perforation [M]. Beijing: Nation Defence Industry Publish, 1984: 139. (in Chinese)
钱伟长. 穿甲力学 [M]. 北京：国防工业出版社, 1984: 139.

[9] Zheng Z M, Tan Q M. Similarity Theory and Modeling [A]//Collected Works of Zheng Zhemin [C]. Beijing: Sci-

ence Press,2004:777-808. (in Chinese)
郑哲敏,谈庆明. 相似理论与模化 [A]//郑哲敏文集 [C]. 北京:科学出版社,2004:777-808.
[10] Young C W. Penetration Equations [R]. SAND-97-2426,DE-98001508,Sandia National Laboratories,Albuquerque,NM,1997.

Experimental Study on Penetration Resistance of Soil with Low-Velocity Projectile

DONG Yong-Xiang[1],FENG Shun-Shan[1],LI Yan-Dong[1],LI Xue-Lin[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Shandong Machinery (Group) Co., Ltd, Zibo* 255201, *China*)

Abstract: The ballistic characteristics and penetration depth in the different soil media with vertical attitude are obtained by experiments of the low velocity projectile penetrating into hard soil, mid-hard soil and mid-soft soil. Further, the nondimensional equation on penetration depth in different soil media with the projectile dynamic pressure is fitted by test results. Based on the different penetration features with low velocity projectile penetrating the different soils in the paper, the penetration resistance of different hard or soft soil and the penetration characteristics of projectile can be calibrated effectively. Comparing with the experimental results, it is verified that Young penetration equations can be applied to the condition of penetration depth less than three times of projectile diameter.

Key words: projectile; soil medium; penetration; experimental study