

半无限厚混凝土靶侵彻损伤的实验与仿真*

郭锦炎, 阮文俊, 张丁山, 王浩

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要:为研究某钻地弹侵彻时对混凝土产生的损伤,设计缩比实验,制作了多层彩色混凝土靶体,并用 LS-DYNA 软件对实验进行仿真。侵彻后将靶体切开,依据混凝土不同的颜色观察到弹孔周边 3 倍以上弹径的混凝土区域发生了位移,根据切割断面的干湿分界线判断出混凝土隧道区的损伤情况。软件仿真得到与实验结果相近的数据,表明可以将此种仿真方法扩展到真实弹的侵彻研究上,满足工程研究的需要。

关键词:钻地弹;侵彻;实验研究;数值模拟;多层彩色混凝土;等损伤线

中图分类号: O385 **文献标志码:** A

Experimental and Simulation Study on Damage of Penetrating Half-infinite Concrete Target

GUO Jinyan, RUAN Wenjun, ZHANG Dingshan, WANG Hao

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the concrete's damage caused by the EPW's penetration, the subscale test was designed and multilayer colored concrete target was made, the experiment was simulated with LS-DYNA3D. After being penetrated by the kinetic energy projectile, the target was cut. Since the concrete had different color in different part, it was found that the concrete surrounding the bullet-hole had displacement and the region was more than triple projectile diameter. Based on dry and wet dividing line on the concrete cut surface, the damage of transit tunnel was obtained. Through comparing the experimental data with the simulation result, it shows that the numerical analysis tallied closely the experiment. The simulation study method can be used in the penetrating study of the real projectile and it can satisfy the demand of engineering study.

Keywords: EPW; penetration; experimental study; numerical simulation; multilayer colored concrete; equivalent damage lines

0 引言

在研究某钻地弹时,需要了解在此种弹形和着靶条件下混凝土被侵彻时隧道区受影响的区域大小及其受损伤的具体情况,根据已往的研究经验,选择实验研究与数值模拟相结合的研究方法。某钻地弹的攻击目标主要为半无限靶体,弹丸真实尺寸太大,为了研究的方便,文中进行缩比实验研究,然后利用有限元软件进行仿真研究,从而可以扩展到原型弹,满足工程研究的要求。

1 实验设计

参考王浩等人^[1]研究经验,综合各方面因素后,动能弹的直径选为 30mm,弹丸侵彻主体段以某钻地弹进行缩比,弹丸头部长 36mm,侵彻部分总长 147mm,质量为 0.57kg,弹丸着靶速度控制在 600m/s

附近,实验采用 57mm 滑膛火炮作为发射平台,混凝土靶体选择 C30 标号,侵彻后动能弹留在靶体内。

本实验中制作了彩色分层混凝土靶体,层和层过渡时不存在明显的强度差异,不同层混凝土颜色是不一样的,由此来标记混凝土靶体各个部位在弹丸侵彻前的位置。动能弹侵彻后,将混凝土靶体沿侵彻通道轴向切割开,依据切割面的状况分析隧道区受影响混凝土的区域大小及其受损伤的情况。

1.1 弹丸设计

根据量纲分析法和侵彻弹丸侵彻性能与模拟实验相似律的要求,参考陈小伟等人^[2]给出的缩比实验建议,设计了动能弹的结构。本实验中动能弹的材料选择 35CrMnSiA,弹丸实物如图 1 所示。

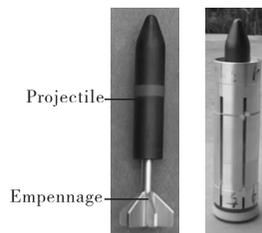


图 1 弹丸的实物照片

* 收稿日期:2011-06-29

作者简介:郭锦炎(1985-),男,江苏南通人,博士研究生,研究方向:兵器发射理论与技术。

在用于侵彻实验前还对弹丸进行了弹道实验,其各项弹道性能能够满足本次侵彻实验的要求。



图 2 高速摄像机记录的弹丸与弹托分离照片

1.2 彩色分层混凝土靶体的设计及制作

1.2.1 靶体的设计

靶体的设计主要包括平面尺寸选择以及靶体厚度选择两个方面,实验中是彩色分层混凝土,故还要加上分层设计。

1) 靶体平面尺寸选择。本实验中参考前人的薄金属桶箍紧设计,在减少混凝土靶体尺寸的同时又能实现实验目的,综合本身的实验条件等,最后将平面尺寸定为 500mm,并选择 5mm 厚钢桶来箍紧。

2) 靶体厚度选择。靶体厚度的设计主要是考虑其侵彻深度。本实验中参考经过 Li 和 Chen 完善过的 Forrestal 阻力模型,结合美国 young 经验公式,考虑到侵彻过程中的贯穿效应,最后将靶体的厚度定为 750mm。

3) 靶体彩色分层设计。彩色混凝土分层设计时考虑了动能弹侵彻的一般规律,对于很可能处于开坑阶段的混凝土和不太可能侵彻到的部位采用普通混凝土,让彩色混凝土主要分布在主要侵彻段。

从弹丸入射的靶面向后排,依次是 100mm 普通混凝土、100mm 红色混凝土、100mm 普通混凝土、100mm 黄色混凝土、350mm 普通混凝土,如图 3 所示。

1.2.2 靶体的制作

混凝土制作时选用 P·042.5 普通硅酸盐水泥、石粒径范围 5~10mm 的石灰岩碎石、天然河砂。配合比(单位:kg/m³)为:石子:砂:水泥:水 = 1134:760:434:214。保养期后对混凝土正方体试块进行了检测,达到实验要求的强度标准。

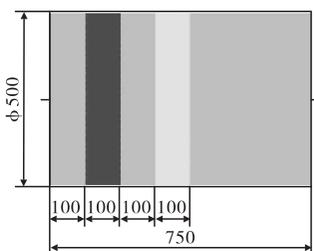


图 3 靶体结构示意图

1.3 实验方案

采用 57mm 滑膛炮,进行着靶速度 600m/s 左右的动能弹侵彻彩色分层混凝土靶体实验。实验场在布设时参考前人^[1-3]的经验,并根据具体情况,在距炮口约 30m 处放置混凝土靶,并将靶体中心调至与火炮火线高等高,在弹道线上距炮口约 20m 和约 25m 处布置网靶,通过网靶测量动能弹着靶速度,同时使用 2 台高速摄像机对动能弹撞击混凝土靶进行拍摄。随后将混凝土靶体沿侵彻通道轴向切割开,依据混凝土不同的颜色,观察分析隧道区受影响混凝土的区域大小及其受损伤的情况。

2 实验结果与分析

取其中两发侵彻实验进行分析,第一发着靶速度为 597m/s,第二发为 602m/s,考虑测试误差的影响,可以认为着靶条件一样。两个混凝土靶体的技术指标也几乎完全一致,第一发侵彻深度为 496mm,第二发为 499mm,故本次 2 发实验可以认为是同样状态下的实验。将实验结果进行如下归类分析:

1) 观察弹孔周边混凝土的变化。在第一发中,弹孔上各层混凝土分界面处,100mm 普通混凝土向黄色混凝土移动了 15mm,红色混凝土向中间 100mm 普通混凝土移动了 33mm。在第二发中,普通混凝土向黄色混凝土移动了 22mm,且测量得到以弹孔为轴线,直径约 87mm 的混凝土都发生了移动,红色混凝土向普通混凝土移动了 28mm,同样直径约 89mm 的混凝土发生了移动。如图 4 所示。

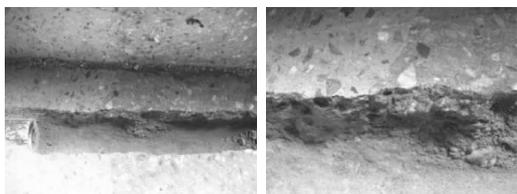


图 4 弹孔周边的混凝土

总结一下可知,以弹孔为轴线,周边至少约 3 倍弹径的混凝土在弹丸侵彻过程中朝弹丸前进的方向移动了,这种现象在前人的实验研究中并没有描述过,但这 3 倍之数与陈小伟的实验研究^[2]中关于粉碎区的观察与判断相符。

2) 弹孔周围形成了一个含水能力较强的区域。将混凝土靶切割面均匀的喷上水,自然阴干,当大部分切割面已经干透时,在弹孔周围有一部分仍然没有干,大致为以弹孔为中心的直径为 120mm 的圆柱区域加上以开坑区为中心的圆台,圆柱区域超出弹头端

面 25mm,距离靶面约 200mm 处与圆台相连,圆台高 200mm,上端面直径 120mm,下端直径 430mm。其区域如图 5 所示。



图 5 弹孔周边的潮湿区

这潮湿区就是研究者^[2]所形容的粉碎区,混凝土的微裂纹使得混凝土的含水能力增强,在切割断面充分含水后这部分碎裂区自然就不易干了。在阴干的过程中,发现越靠近侵彻隧道的部分越难干,可见越靠近隧道的混凝土部分含有的微裂纹越多,从而也表明其受损伤程度越高。理论上讲,干湿分界线上混凝土的含水能力是相同的,间接表明它们的受损伤程度也是相同的,因此可以将干湿分界线称为等损伤线。在阴干的过程中,按某一时间间隔,将等损伤线的变化过程描绘记录,从而可以得到隧道周边混凝土损伤程度的量化数据。在半开放实验室内,无风无阳光直射的情况下,描绘了以半小时为时间间隔的等损伤线变化过程,如图 6 所示。

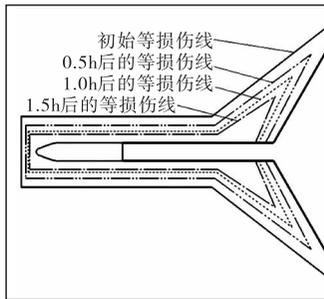


图 6 等损伤线变化过程

3 仿真建模

3.1 材料模型

3.1.1 侵彻弹丸

文中计算主要考察混凝土被侵彻时隧道区受影响混凝土的区域大小及其受损伤的具体情况,实验中弹丸材料都为高强度合金钢,在侵彻过程中几乎不存在质量的侵蚀和变形,因此采用线弹塑性硬化模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC)。模型的详细描述见文献[4],相关材料参数见表 1。

3.1.2 混凝土靶体

混凝土被侵彻时会产生大应变、高应变率、高压效应,前人在研究这类问题时往往都采用 J-H-C 模型^[5],文中彩色混凝土也采用 J-H-C 模型(*MAT_

表 1 弹丸材料模型参数

密度 ρ / (kg/cm ³)	杨氏模量 E /GPa	泊松比 γ	屈服应力 σ_s /MPa	硬化模量/GPa
7.91	210	0.28	1720	2
硬化参数 β	应变率相关参数 C/s^{-1}	应变率相 关参数 P	失效应变 f_s	
1	1670	8.45	0.8	

JOHNSON_HOLNQUIST_CONCRETE)。该模型的屈服函数、状态方程以及损伤定义和相关参数的选取方法见文献[4],参数的确定采用张凤国^[6]提出的参数的确定方法,相关材料参数见表 2。

表 2 混凝土模型参数

密度 ρ / (kg/cm ³)	剪切模量 G /GPa	内聚强度 A	硬化系数 B	应变率系数 C
2.36	11.25	0.79	1.60	0.007
硬化指数 N	无侧限抗压强度 f_c /MPa	抗拉强度 T /MPa	最小断裂应变 $\epsilon_{t,min}$	断裂强度 S_{max}
0.61	30	3.396	0.01	7
压垮点压力 P_c /MPa	压垮点体积应变 μ_c	锁定点压力 P_l /MPa	锁定点体积应变 μ_l	损伤系数 D_1
10	0.001	800	0.1	0.0357
损伤指数 D_2	压实后系数 K_1 /GPa	压实后系数 K_2 /GPa	压实后系数 K_3 /GPa	失效应变 f_s
1	85	-171	208	-1

3.2 有限元建模

建立弹丸模型时保持弹丸的外形尺寸不变,将弹丸掏空进行配重,使模型的质量与实验弹相同。

弹丸尾翼是为了保持弹丸飞行的稳定性,在弹丸开坑阶段成为了额外的侵彻质量,但而后又与弹丸分离并给侵彻带来了额外的阻力。鉴于文中研究的对象是混凝土被侵彻时隧道区受影响混凝土的区域大小及其受损伤的具体情况,而尾翼在开坑阶段结束后便与弹丸主体分离了,对研究的内容几乎没有影响,综合各方面因素,建模时不考虑尾翼。

考虑到垂直侵彻为轴对称问题,进行有限元分析时只建立 1/4 模型。对称面上施加对称边界条件,约束住靶体周边节点在靶体径向上的运动,将靶体底面的节点采用固定约束。划分网格时对关心的区域进行加密,其余的相对稀疏。为了能够与实验结果有更好的比较分析,将靶体按照彩色混凝土的分层结构分成 5 个 Part,相邻 Part 之间共节点。弹、靶有限元模型见图 7。网格全部为 8 节点六面体单元,其中弹丸单元 8195 个,靶体单元 196875 个。

计算中采用单点积分和沙漏控制,弹靶之间的接

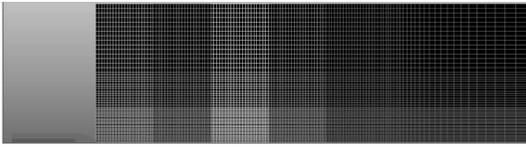


图 7 动能弹和靶体有限元模型

触面采用侵彻滑移算法。弹丸侵彻速度为 600m/s, 设定计算终止时间为 2ms。

4 仿真结果与分析

4.1 弹孔周边混凝土位移的分析

通过测量得到以下有关弹孔周边混凝土位移的数据:黄色混凝土单元(对应实验中普通混凝土)向棕色单元(对应黄色混凝土)移动了 16.4mm,且以弹孔为轴线直径约 105mm 的混凝土都发生了移动,绿色单元(对应红色混凝土)同样也向黄色混凝土单元移动了,弹孔上的移动了 14.3mm,直径约 69mm 的混凝土发生了移动。如图 8 所示。

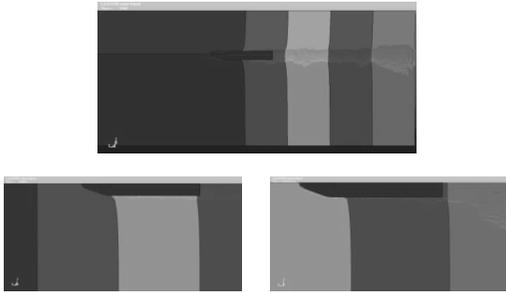


图 8 弹孔周边的混凝土单元

黄色单元的数据与实验数据相近,绿色单元的数据与实验数据有些出入。首先可能是实验的测量误差带来的,其次文中使用的是 J-H-C 模型,对于隧道区损伤的模拟是合适的,但是开坑阶段的破坏却不是以压缩损伤为主,绿色单元较接近开坑区域,因此模拟得到绿色单元的数据与实验有些许出入。

4.2 隧道区混凝土情况及其损伤情况分析

侵彻结束时的混凝土损伤云图见图 9。

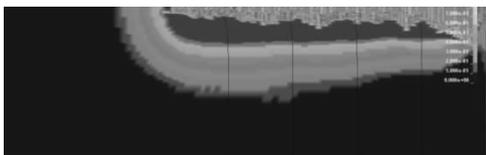


图 9 靶体损伤云图

隧道区损伤最为显著,从损伤云图清晰可见自上而下依次为破碎区、裂纹区、塑性区及未扰动区的分布。注意到开坑阶段的损伤仿真结果与实验相出入,这是由于 J-H-C 模型为压缩损伤模型,开坑阶段以拉伸断裂破坏为主,因此仿真出的损伤值过小。对于文

中的研究对象隧道区,通过测量可以得到损伤度超过 0.3 的区域形成了以弹孔为中心的圆柱体,圆柱体的直径在 96 ~ 116mm 之间,超出弹头约 42mm,仿真得到的等损伤线与实验中观察的等损伤线的走势很相近。

此外,数值模拟得到的钻地弹侵彻混凝土的侵彻深度为 484mm,与试验结果的侵彻深度基本一致,综合以上数据,数值模拟时建立的模型是合理的,所选取的相关计算参数是合适的,虽然模拟的结果存在些许误差,但能够吻合实验中的主要数据,并能够得到研究关心的内容。因此这样的数值模拟方法可以扩展到原型弹,对关心的研究内容进行仿真研究,并能够满足项目的研究需要。

5 结束语

文中用切割被侵彻的彩色分层混凝土靶体研究被侵彻时混凝土隧道区受影响区域大小及其受损伤的具体情况实验方法是可行的。实验中依据混凝土层不同的颜色,观察到弹孔周边的混凝土在侵彻过程中朝弹丸前进的方向移动了,利用等损伤线得到了隧道区混凝土的受损伤情况。数值仿真的结果与实验数据相近,仿真还给出了更为具体的损伤情况。通过以上研究得到了某钻地弹侵彻半无限大靶时隧道区受影响混凝土的区域大小及其受损伤的具体情况,为此钻地弹的研究提供相关指导。

参考文献:

- [1] 王浩,陶如意. 截卵形弹头对混凝土靶侵彻性能的试验研究[J]. 爆炸与冲击,2005,25(2):171 - 175.
- [2] 陈小伟,张方举,杨世全,等. 动能深侵彻弹的力学设计(Ⅲ):缩比实验分析[J]. 爆炸与冲击,2006,26(2):105 - 114.
- [3] 孙传杰,卢永刚,张方举,等. 一种新型头形弹体侵彻混凝土的试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(6):118 - 122.
- [4] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual, Volume II, Material Models, Version 971[M]. California: LSTC, May 2007.
- [5] 郑振华,余文力,王涛. 钻地弹侵彻高强度混凝土靶的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(3):143 - 146.
- [6] 张凤国,李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法[J]. 弹道学报,2001,13(4):12 - 16.