

夹钢球钢纤维砼的抗侵彻试验研究^{*}

陆渝生 王明洋 严少华 钱七虎

(工程兵工程学院 南京 210007)

摘要 夹钢球钢纤维砼是一种新型的遮弹防护材料。抗侵彻模拟试验表明,与常规的钢筋砼比较,夹钢球钢纤维砼抗侵彻能力有了很大的提高。

关键词 夹钢球钢纤维砼 遮弹防护 侵彻破坏 模拟试验

中图法分类号 O 348

1 引 言

在高新技术条件下,航、炮弹的命中率和侵彻破坏能力,均有了很大的提高。因此,研制抗侵彻破坏能力强,且便于运输、构筑的新型遮弹防护层,已是当务之急^[1]。我们提出的夹钢球钢纤维砼遮弹防护层,正是适应这一要求而研制的。

夹钢球钢纤维砼遮弹防护层,以常规砂浆为基底,掺入适当体积含量的钢纤维,以增强遮弹层的韧性与弹性,并起到阻止裂纹的生成和扩展的作用。同时,在遮弹层的弹丸侵彻表层里,按一定间距以体心排列方式嵌入了上下错开的四层钢球,使得弹丸侵入遮弹层后,总能与牢固地嵌在钢纤维砼中的多颗钢球发生碰撞,从而使弹丸的运动受到阻滞和发生偏转,起到增强遮弹层防护能力的作用。

由于理论分析上的实际困难,为了检验该新型遮弹层抗侵彻能力的增强情况,必须进行实弹侵彻试验。但由于进行原型试验规模太大,耗费巨大。而且作为初步比较试验,也无进行原型试验的必要。因此,按照抗侵彻动态模拟的试验条件^[2],对新型的夹钢球钢纤维砼靶和常规的钢筋砼靶,进行了小口径炮弹的实弹模拟试验。试验结果表明,夹钢球钢纤维砼遮弹层与常规钢筋砼的遮弹层比较,其抗侵彻能力有了很大的提高;同时,实验结果也为对遮弹层进行理论分析与抗侵彻机理的探索,提供了有益的依据和参数。

2 靶体、侵彻体及试验器材

按照试验的模拟条件,靶体和侵彻体按与原型 1:3.5 的缩尺制造。共制造了 10 块靶体,其中 5 块为钢筋砼靶,编号为 RC-1~RC-5,5 块为夹钢球钢纤维靶,编号为 BX-1~BX-5。

钢筋砼靶按相应规范设计。钢筋采用 $\phi 6$ 高锰低碳钢,面积配筋率为 0.38%。砼按 C60 细石砼配比设计,实际标准抗压强度为 57.4 MPa。靶的尺寸为 500mm \times 500mm \times 300mm,如图 1~2 所示。

夹钢球钢纤维砼靶中,采用了平直形钢纤维,纤维尺寸为 35mm \times 0.8mm \times 0.4mm,抗拉

* 国家自然科学基金资助(批准号 59708012)。

陆渝生:男,1945年4月生,硕士,教授。

1997-12-25收到原稿,1998-06-03收到修改稿。

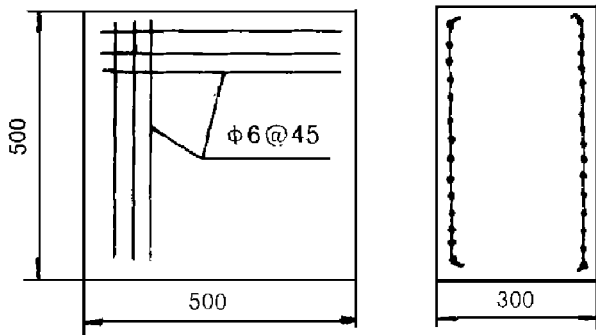


图 1 钢筋砼靶结构图

Fig 1 Structural drawing of RC targets

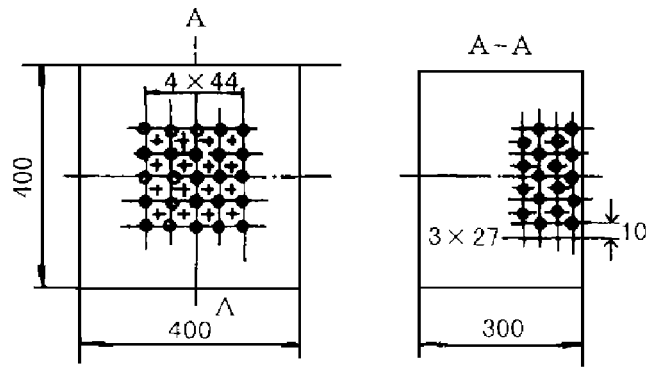


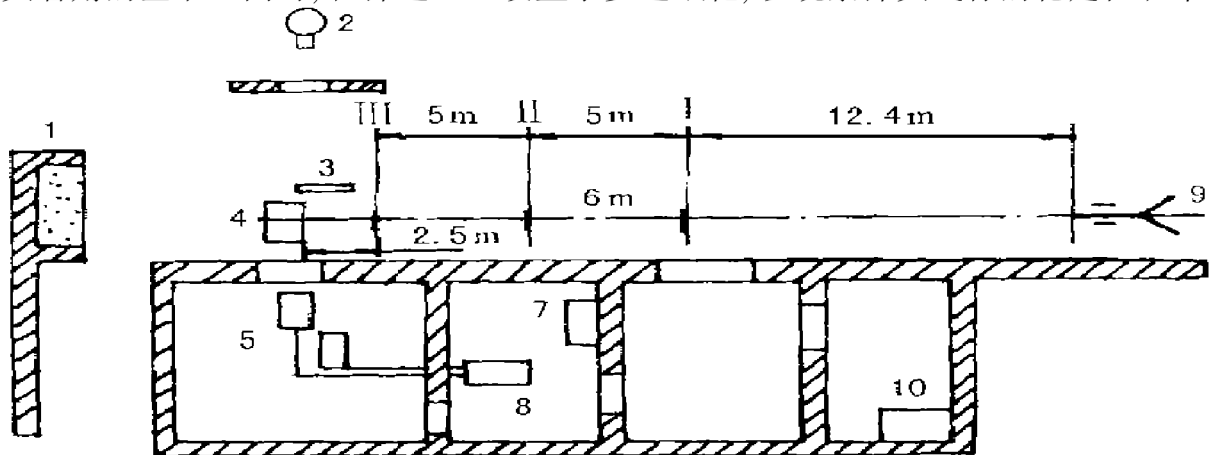
图 2 夹钢球钢纤维砼靶结构图

Fig 2 Structural drawing of SFRC targets

强度为 500~ 70MPa 靶的钢纤维体积含量为 6%，基底按 C60 砂浆砼配比设计，添加高效减水剂。实际抗压强度为 65MPa。在靶的承弹面表层下，按体心排列配置 4 层钢球。每层钢球横向间距均为 44mm，第一层钢球离承弹面 10mm，钢球层间成等距分布，每二层钢球的层间距为 27mm。从承弹面看，钢球均匀分布在靶中心 176mm× 176mm 的矩形内 (见图 2)。钢球这样配置，可以保证弹丸侵入后，总能与钢球相撞。钢球直径为 15mm (相当于原型 $\phi 52.5$ mm 的钢球)，钢球材料为 GCr15 (铬锰高碳钢)，并经淬火处理，HRC 不低于 60~ 65。钢纤维砼靶的外围尺寸为 400mm× 400mm× 300mm，考虑到新型靶材有较强的抗侵彻能力，故横向尺寸略小于钢筋砼靶。

侵彻体为改制 37mm 口径硬芯穿甲弹。弹头为钝头锥形，弹顶角 25°。弹丸材料为炮弹专用合金钢。弹头长径比为 1: 4.2。弹头长 152mm，重 0.9kg。相当于原型口径 130mm，重 40kg 的穿甲弹。

侵彻体的发射装置为 76 式海 37 火炮身管。试验现场的布置见图 3 为可靠测定弹头的着靶速度，用网靶与电子测时仪测量，记时精度为 10^{-6} s。弹头着靶前的飞行姿态用狭缝式弹道同步摄影机记录。弹头着靶与侵彻的姿态，用闪光 X 射线系统拍摄。在靶前悬垂一铅丝，作为测量弹头着角的基准。同时，在弹道上还设置了多道纸靶，以观察弹头飞行的稳定性和章动情



1 Collecting projectile wall 2 Streak camera 3 Film cassette 4 Target 5 X-ray camera
6 Web target 7 Detecting box 8 Control power 9 Gun 10 Filling powder

图 3 试验现场布置图

Fig 3 Plane of testing ground

况。采用水平射击姿态, 射击距离 24 9m。试验靶体垂直固定在靶架上, 承弹面迎向侵彻体飞行方向。

按别列赞公式估算钢筋砼靶的弹头着速^[3]

$$H_d = K K_d W v_0 / d^2$$

式中: H_d 为侵彻深度, 本文初定为 200mm; K 为考虑弹形、弹径的修正系数; K_d 为抗侵彻屈服系数; W 为弹重; d 为弹径; v_0 为弹头的着速, 可通过调整发射药的装药量调整控制。

初步计算得到钢筋砼靶的弹头着速为 300m/s。由于对夹钢球钢纤维砼靶无估算公式, 只能进行实弹试射。经试射, 确定夹钢球钢纤维砼靶的弹头着速为 370m/s 左右, 侵彻深度约为 150mm。

3 试验结果

现场试验数据及射后状态见表 1

表 1 现场试验数据及射后状态

Table 1 Test data and results

靶号	W /g	v_0 /(m /s)	E_k /kJ	射后状态
BX-1	901.0	361.9	6.015	弹丸仅弹带前入靶, 弹孔偏斜, 弹被弹回
BX-2	901.5	369.6	6.277	弹丸仅弹带前入靶, 弹孔偏斜, 弹被弹回
BX-3	904.6	366.9	6.207	弹孔较正, 未全入靶, 弹被弹回 12m
BX-4	904.6	363.2	6.082	弹未全入靶, 弹孔斜向下, 弹被弹回
BX-5	904.2	376.6	6.536	弹未全入靶, 弹孔偏斜, 弹被弹回 14m
RC-1	909.5	300.5	4.186	靶碎裂, 上半部几乎崩落一半
RC-2	893.0	324.3	4.787	靶碎裂, 左半部崩落大部
RC-3	909.5	298.5	4.130	靶碎裂, 中部形成一漏斗坑
RC-4	903.0	332.1	5.076	靶完全粉碎
RC-5	902.5	320.8	4.734	靶碎裂, 着点偏下, 靶下部粉碎崩落

3.1 靶体的侵彻破坏情况

夹钢球钢纤维砼靶体破坏形态的测量参数见表 2。T 为弹坑中心线与承弹面法线的夹角; h 为弹丸侵彻深度; n 为承弹面上主裂纹数; c 为承弹面上主裂纹的最大宽度。

表 2 夹钢球钢纤维砼靶体承弹面破坏形态

Table 2 The damage condition in the front face of SFRC targets

参 数	BX-1	BX-2	BX-3	BX-4	BX-5
$T/(\circ)$	30	30	23	44	19
h /mm	132	147	131	94	151
n	5	7	8	5	7
c /mm	17	11	10	40	10

由表 1~2 及对靶体破坏后的实地观察可知: 夹钢球钢纤维砼靶的侵彻深度约小于一个弹长; 最大侵彻深度为 151mm, 最小侵彻深度为 94mm, 平均侵彻深度为 131mm。弹坑均有严重的偏斜, 孔形呈椭圆形。最大偏斜角度 (与承弹面法线的夹角) 为 44° (BX-4), 最小偏斜角度为 23° 。靶承弹面上漏斗坑小而浅, 呈球面状。最大的漏斗坑直径为 200mm, 深度一般在 20mm 左

右。承弹面上表面裂纹少而细,呈辐射状。主裂纹在 5~8 条之间,基本互不贯通。基底砼虽然裂开,但钢纤维未断裂,仍起到阻裂的作用。弹坑中均有钢球暴露出来,且多位于使弹头偏转的部位上(见图 4)。大部分弹坑底部存留有钢球。靶的某些侧面上,有纵横向裂纹,有的上下左右四面均有,有的仅上、右两侧面上有。侧面上除有主裂纹延伸来的裂纹外,还有垂直于弹头前进方向的横向裂纹,产生明显的层裂现象。层裂裂纹比承弹面主裂纹更小,且多为单层层裂,裂纹宽度一般小于 10mm。侧面上裂纹扩展深度较浅,一般限于离承弹面 100mm 左右的厚度内,即层裂发生在三分之一厚度上。靶背面完好无损,无震塌现象。

钢筋砼靶弹头着速,均低于钢纤维砼靶。最高着速为 332 m/s(RC-4),最低为 298.5 m/s(RC-3)。虽然靶的横向尺寸大于钢纤维砼靶,但所有靶均整体严重碎裂,裂纹沿靶厚前后贯穿。着速最高的靶 RC-4 则整体破碎,一些破坏形态数据已无法测量,且也有层裂破坏。着速最低的靶 RC-3 虽整体破裂,厚度中部产生层裂,但尚未整体散开(见图 5)。由该靶测得的漏斗坑最大直径为 390mm,最小直径为 292mm,坑深 186mm。未形成明显的弹坑。漏斗坑内有一道弹丸端部与靶体的擦痕,钢筋外露,且被弹丸撞击弯曲和局部挤扁。



图 4 平直形钢纤维砼靶的破坏照片 (BX-2)

Fig 4 Destroyed target of BX-2



图 5 钢筋砼靶的破坏照片 (RC-3)

Fig 5 Destroyed target of RC-3

所有钢筋砼靶虽然均严重破碎,但弹丸仍未穿透。值得注意的现象是,几乎所有的钢筋砼靶,主裂缝均呈米字形分布,即以弹着点为中心,沿承弹面的垂直、水平及对角线方向裂开。

3.2 弹头的破坏情况

射击夹钢球钢纤维砼靶的弹头,一般发生弯曲变形,且弹头均有与钢球撞击挤压所产生的凹痕。这些凹痕有的是弹丸旋转前进时与钢球相撞,形成螺旋形凹槽,见图 4 右下角。最多的在一个弹丸上留有不同位置的三条螺旋凹槽(BX-2 BX-4 靶的弹丸),有的是弹丸端部与钢球相撞,在端部形成撞击凹坑(BX-3 靶)。因此,弹丸与钢球的撞击,是非常明显的。从弹丸产生的变形看,钢球对弹丸的作用相当大。

射击钢筋砼靶的弹头,整体有弯曲变形,但变形均不大,端部也无明显的撞击痕迹。

3.3 弹头的飞行及着靶姿态

由纸靶、高速摄影及脉冲 X 光拍摄的照片可知,弹头弹道飞行稳定,呈水平飞行,俯仰角接近于零。弹头着角小于 3° ,即弹头垂直于承弹面着靶。入靶后,弹头在夹钢球钢纤维砼靶内发生偏转;而在钢筋砼靶内,弹头基本上无偏转现象,仍沿射击方向前进。

4 结 论

从以上试验结果可以看出,夹钢球平直形钢纤维砼靶的抗侵彻能力,明显地比常规钢筋砼靶有很大的提高。这主要表现在以下几点。

(1) 夹钢球钢纤维砼靶的侵彻深度远小于钢筋砼靶。夹钢球钢纤维砼靶(以下简称钢纤维靶)的最大侵彻深度小于一个弹长(151mm),而钢筋砼靶漏斗坑深达186mm,且是整体粉碎性的破裂,裂纹贯穿整个靶厚和横向。

(2) 夹钢球钢纤维砼靶的漏斗坑远小于钢筋砼靶。夹钢球钢纤维砼靶漏斗坑最大直径为200mm,深度小于20mm,而钢筋砼靶大部分严重破碎塌落。可以测得漏斗坑的RC-3靶,其漏斗坑最大直径达390mm,深达186mm。

(3) 夹钢球钢纤维砼靶的层裂深度小于钢筋砼靶。夹钢球钢纤维砼靶层裂发生在1/3靶厚处,且裂纹一般未贯穿,整个靶仍是基本完好。而钢筋砼靶发生在1/2~2/3的靶厚处,且裂纹贯穿,靶整体已破碎。

(4) 夹钢球钢纤维砼靶的弹坑均有较大偏转角,坑口呈椭圆形,但试验表明弹头为垂直着靶。这说明,靶有明显的偏转弹头的作用,减小了侵彻深度。而钢筋砼靶在弹头撞击时即碎裂,因此弹丸仍然保持原来方向前进。

(5) 必须注意的是,以上破坏结果,是在靶的横向尺寸和着速不同的情况下得到的,夹钢球钢纤维砼靶横向尺寸为400mm×400mm,着速是370m/s左右,着靶动能 E_k 平均为6183kJ,钢筋砼的横向尺寸为500mm×500mm,着靶速度为300m/s左右,平均着靶动能 E_k 为4866kJ。因此,从着速与横向尺寸看,夹钢球钢纤维砼靶比钢筋砼靶处于更不利的条件。但实际上前者的破坏要小得多。

(6) 夹钢球钢纤维砼靶具有对弹丸的反弹作用。

综上所述,以夹钢球钢纤维砼代替钢筋砼作抗常规武器的遮弹层,其抗侵彻能力将有很大的提高,其防护性能将显著地改善。由于侵彻深度小,裂缝少而浅,且背面无震塌,这不仅可以有效地保障工事结构的安全,而且还能起到防水、防毒的作用。初步的试验已足以说明,研制的夹钢球钢纤维砼是一种应用前景十分广阔的新型材料。它不仅在军事上,而且在重要的民用建筑上也可以得到应用。

参加试验的还有金丰年、周早生、尹放林、赵跃堂等同志。

参 考 文 献

- 1 尹放林,陆渝生,王明洋,等.抗常规武器侵彻试验研究.工程兵工程学院学报,1996 11(4): 11~ 14
- 2 陆渝生,严少华,王明洋.抗侵彻模型试验的模拟条件.工程兵工程学院学报,1996 11(1): 31~ 33
- 3 王儒策,赵国志.弹丸终点效应.北京:北京理工大学出版社,1993 8~ 9

STUDIES ON ANTI-PENETRATION OF STEEL-FIBER RC WITH STEEL INCLUSIONS BY TEST

Lu Yusheng Wang Mingyang Yan Shaohua Qian Qihu

(*Nanjing Engineering Institute, Nanjing, 210007*)

ABSTRACT Steel-fiber reinforced concrete with steel inclusions (SFRC SI) is a new kind of material for protective structures. This paper presents a general idea of anti-penetration simulation of SFRC SI. It is proved that the anti-penetration performance of this new material is much better than that of normal RC.

KEYWORDS steel-fiber reinforced concrete, defensive structure, penetration damage, simulated test