

文章编号: 1001-1455(2005)01-0041-06

刚性弹丸撞击下混凝土板侵彻极限深度与 疤痕极限厚度经验公式的验算*

赵振东, 钟江荣, 余世舟

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了估算混凝土板在外来飞射体撞击下的侵彻极限深度与疤痕极限厚度,总结了以往试验与理论研究成果,评价了几种有代表性的经验公式,对4种具有不同特征参数的导弹撞击混凝土板时的侵彻极限深度与疤痕极限厚度进行了对比。结果表明,现有的经验公式估算侵彻极限深度的差异不大,而估算疤痕极限厚度有时差异较大。

关键词: 固体力学;经验公式验算;刚性撞击;侵彻极限深度;疤痕极限厚度

中图分类号: O385

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

工程防护中,某些重要工程结构需考虑受外来飞射体撞击时的安全问题。特别是美国世贸大楼被恐怖分子驾机撞毁的“9.11”事件以来,这方面的研究又引起了工程界的广泛关注。作为工程防护设计的基本问题,外来飞射体与混凝土平板的撞击是研究的重要内容之一。鉴于钢结构的世贸中心大楼轻易地被恐怖分子驾机撞毁的深刻教训,不少学者经研究后建议,未来的超高层建筑应尽可能采用钢筋混凝土结构,这就给本文中的研究提供了广阔的需求空间。可以考虑的外来飞射体的种类很多,其中导弹对混凝土板的撞击是其重要研究内容。当然,对于带有战斗部装药的导弹,在其命中结构物时,除了刚性撞击效应外,还将有战斗部装药爆炸产生的破坏效应。本文中仅限于分析将导弹假定为不变形体时对混凝土板撞击的局部破坏效应经验公式的验算问题。

总结国际上通过多次试验研究得到的几个有价值的经验公式,选择已公开解密的原苏联和美国的4种导弹的基本参数,对侵彻极限深度与疤痕极限厚度的计算公式进行比较,给出混凝土板侵彻极限深度及疤痕极限厚度与导弹撞击速度间的数值结果。

2 侵彻极限深度与疤痕极限厚度

在飞射体撞击下,混凝土板的局部破坏效应一般用侵彻极限深度与疤痕极限厚度进行安全评定。所谓侵彻极限深度是指飞射体撞击到某一厚度的混凝土板上,刚好穿透板、出口速度为零时被撞击板的厚度;疤痕极限厚度是指恰好使被撞击板的背面刚刚出现混凝土的剥离坑时被撞击板的厚度。

很显然,混凝土板受撞击的侵彻极限深度与疤痕极限厚度受多种因素影响,其决定因素是撞击速度。就是说,所谓极限厚度应是在一定撞击速度下的厚度。另外,与飞射体的其它特征,如形状(对于导弹,主要指其直径及头部形状等)、撞击位置、撞击方位等有关,还与被撞击混凝土板的构造特征,如混凝土性能(拉压强度及骨料组成等),配筋情况(含钢率、钢筋分布、钢筋强度)等有关。

对于混凝土结构的基本构成单元(混凝土板)在外来飞射体撞击下的侵彻极限深度与疤痕极限厚度的研究与确定是工程结构防护设计的基本问题,通常解决这类复杂问题的有效方法是进行现场试验或

* 收稿日期: 2004-04-14; 修回日期: 2004-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278091)

作者简介: 赵振东(1946—),男,研究员,博士生导师。

模型试验。然而,这类撞击问题是罕见的人为事故,发生概率极低,可供经验总结的资料有限;进行实际的飞射体撞击结构物的现场试验或在实验室内进行模型试验都有代价大、风险高的问题。因此,对以往国际上通过多次试验或数值分析得到的经验公式进行验算与分析,确定这些公式在一定条件下的可取性,给出相应的应用建议,可取得事半功倍的效果。

3 经验公式

在第二次世界大战期间,一些学者进行了多次试验研究。美国国家防护研究委员会总结了这些试验成果,于1946年提出了估计侵彻深度的计算公式(一般称为NDRC公式)。随后,由于试验资料的积累,不少学者对该公式进行了修正,例如以下是估计痂斑极限厚度和侵彻极限深度的修正的NDRC公式^[1]

$$\frac{s}{d} = \begin{cases} 2.12 + 1.36 \frac{x}{d} & 0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.75 \\ 7.91 \frac{x}{d} - 5.06 \left(\frac{x}{d}\right)^2 & \frac{x}{d} < 0.65 \end{cases} \quad (1)$$

和

$$\frac{e}{d} = \begin{cases} 1.32 + 1.24 \frac{x}{d} & 1.35 \leq \frac{x}{d} \leq 13.5 \\ 3.19 \frac{x}{d} - 0.718 \left(\frac{x}{d}\right)^2 & \frac{x}{d} < 1.35 \end{cases} \quad (2)$$

式中: s 为痂斑极限厚度,cm; e 为侵彻极限深度,cm; x 为侵彻深度,cm; d 为飞射体直径,cm。

P. O. Degen^[2]在分析了他人试验资料的基础上,提出如下计算侵彻极限深度的建议

$$\frac{e}{d} = \begin{cases} 0.69 + 1.29 \frac{x}{d} & 1.52 \leq \frac{x}{d} \leq 18 \\ 2.2 \frac{x}{d} - 0.3 \left(\frac{x}{d}\right)^2 & \frac{x}{d} < 1.52 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中各符号的物理意义及量纲与式(2)同,所依据的试验资料的适用范围是:飞射体撞击速度 $v=25\sim 310$ m/s,飞射体的重量 $W=150\sim 3\,400$ N, $d=10\sim 30$ cm,混凝土板厚 $H=15\sim 60$ cm,含钢量 $r=160\sim 350$ kg/m³。

A. Haldar等^[3~4]认为,预测侵彻深度的NDRC公式所依据的试验资料没有考虑含钢量,这样对于小直径飞射体的撞击,公式给出的侵彻深度的计算值是基本满意的,但对于大直径飞射体,特别是当 $x/d < 0.6$ (飞机发动机类飞射体都在此范围)时给出的侵彻深度要超估很多。

A. Haldar等^[3~4]根据资料的整理与分析,提出侵彻深度估算的表达式为

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} -0.0308 + 0.2251I & 0.3 \leq I \leq 4 \\ 0.6740 + 0.0567I & 4 < I \leq 21 \\ 1.1875 + 0.0299I & 21 < I \leq 455 \end{cases} \quad (4)$$

痂斑极限厚度公式为

$$\frac{s}{d} = 3.3437 + 0.0342I \quad 21 < I \leq 385 \quad (5)$$

式中: I 是无量纲冲击因子,且 $I=12NMv^2/(32.2d^3f_c)$, N 为导弹形状因数,扁平头部 N 取0.72,钝头部 N 取0.84,正常头部 N 取1.00; M 为飞射体质量,kg; v 为飞射体撞击速度,m/s; f_c 为砼抗压强度,MPa。其他符号与式(1),式(2)同。

需要说明的是,对于痂斑极限厚度公式(5),由于试验资料的限制,A. Haldar给出的表达式应用范围不宽,对于飞机发动机一类飞射体、冲击因子低于式(5)的应用范围的下限,在这种情况下,A. Haldar建议利用公式(4)计算侵彻深度,然后用修正的NDRC式(1)计算痂斑极限厚度。A. Haldar认为他提出的计算侵彻深度的公式(4)对于所有形式的飞射体的撞击问题都是适用的。

C. Berriand 等^[5]总结了法国完成的 124 次试验,提出了 CEA-EDF 公式

$$v_{\min}^2 = 1.7 f_c \rho^{\frac{1}{3}} \left(\frac{de^2}{M} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (6)$$

式中: v_{\min} 为使混凝土板贯穿时飞射体的最小撞击速度, m/s; ρ 为混凝土的密度, kg/m³; M 为飞射体的质量, kg。其他符号与前述同, 单位为国际单位制。

式(6)可改写得到痂斑极限厚度

$$e = 0.82 (f_c)^{-\frac{3}{8}} \rho^{-\frac{1}{8}} \left(\frac{M}{d} \right)^{\frac{1}{2}} v^{\frac{3}{4}} \quad (7)$$

式(7)的有效范围: 20 m/s < v < 200 m/s, 0.3 < e/d < 4 和 30 MPa < f_c < 45 MPa。所依据的试验资料范围: 混凝土平板厚 $H = 15.6 \sim 26$ cm, 飞射体质量 $M = 7 \sim 250$ kg, 飞射体直径 $d = 5 \sim 25$ cm。

W. S. Chang^[1]利用简化撞击模型, 应用力学原理及对试验资料的贝叶斯统计分析, 提出了圆柱形钢质飞射撞击混凝土平板的平均痂斑厚度(s_0)

$$s_0 = 1.84 \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0.13} \frac{(Mv^2)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}} \quad (8)$$

与侵彻深度(e_0)公式

$$e_0 = \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0.25} \left(\frac{Mv^2}{df_c} \right)^{0.5} \quad (9)$$

式(8)和式(9)中: v_0 为飞射体基准速度, 且 $v_0 = 60.69$ m/s, 其他符号与前文相同。试验资料参数的范围: $M = 0.11 \sim 343.64$ kg, $d = 2.1 \sim 30.48$ cm, $v = 16.73 \sim 311.81$ m/s, $f_c = 23.2 \sim 44.6$ MPa, $H = 5.08 \sim 60.96$ cm, 含钢率 $\gamma = 0.3\% \sim 1.5\%$ (每向)。对于高含钢量, 上式的结果将是保守的。

一些学者进行的撞击试验表明, 混凝土板厚 $H = 20$ cm 时, W. S. Chang 公式给出的侵彻极限深度和痂斑极限厚度与试验结果很接近, 但对于 $H = 10, 30$ cm 时, 该公式较保守。

4 计算结果分析

前述几种有代表性的分析与估算混凝土板侵彻极限深度和痂斑极限厚度的经验公式都是在一定年代, 受一定试验条件限制总结得到的, 在他们各自的适用范围内分别对国外几种早早已解密的导弹进行了验算, 大体上可以给出混凝土板在接受不同飞射体撞击时的侵彻极限深度和痂斑极限厚度的估计。

4.1 基本假定

假定导弹撞击在混凝土板上时其战斗部的装药不发生爆炸, 仅考虑撞击作用; 尽管导弹的撞击可能有各种各样的角度, 但法向撞击是一种最不利的情况, 因此假定导弹垂直撞击在混凝土板上。

4.2 混凝土板及导弹的基本参数

考虑现浇预应力钢筋混凝土平板, 密度为 2.35 t/m³, 标定抗压强度为 40 MPa, 弯曲抗压强度为 29 MPa, 抗拉强度为 2.15 MPa, 弹性模量为 33 GPa, 泊松比为 1/6。I、II 级钢筋设计强度分别为 240 MPa (I 级), 340 MPa (II 级)。参照文献[6]给出的 4 种空对地导弹, 他们的主要特征参数见表 1。

表 1 四种导弹的主要特征参数移

Table 1 Main parameters of four types of missiles

| 代号 | 国别 | 尺寸/mm | | | 发射质量/kg | 射程/km | 速度 | 弹头形状 |
|--------|-----|-----------|---------|-------|---------|-------|------|------|
| | | 长度 | 翼展 | 直径 | | | | |
| AS-5 | 前苏联 | 940~1 000 | 455~495 | 100.0 | 3 893 | 320 | M0.9 | 正常 |
| AS-6 | 前苏联 | 900 | 320 | 90.0 | 4 800 | 400 | M3.0 | 正常 |
| AGM12B | 美国 | 320 | 95 | 30.5 | 260 | 10~11 | M2.4 | 正常 |
| AGM12C | 美国 | 407 | 118 | 44.0 | 810 | 14~16 | | 正常 |

4.3 侵彻极限深度和痂斑极限厚度的估计

对表1给出的4种导弹,利用前述相关公式进行了混凝土板的侵彻极限深度和痂斑极限厚度的计算与估计。计算中取撞击时导弹质量等于发射时质量的3/4,在公式适用的范围内改变撞击速度,求得相应速度下的侵彻极限深度和痂斑极限厚度。另外,在计算中,对于混凝土抗压极限强度 f_c ,取其等于标准抗压强度乘以在冲击状态下的提高因数(1.25),计算结果见图1~图4。

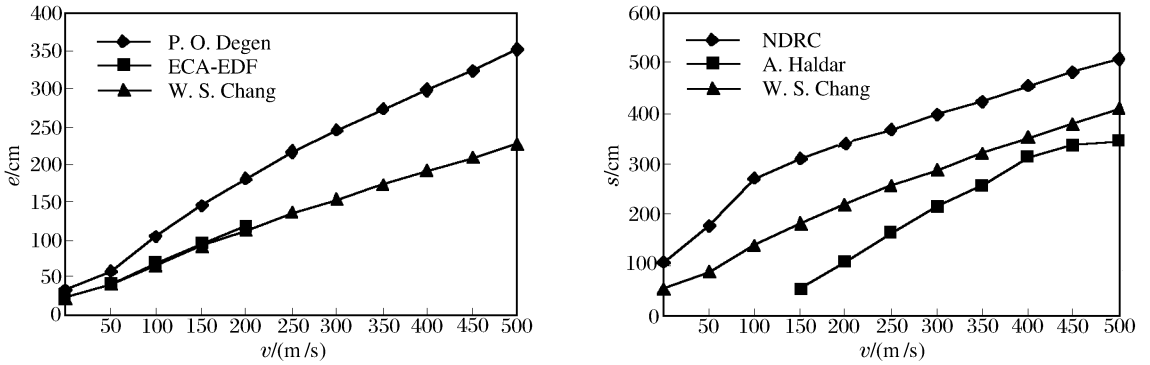


图1 AS-5导弹撞击的侵彻极限深度和痂斑极限厚度

Fig. 1 Penetration and scabbing limit thicknesses of AS-5 missile

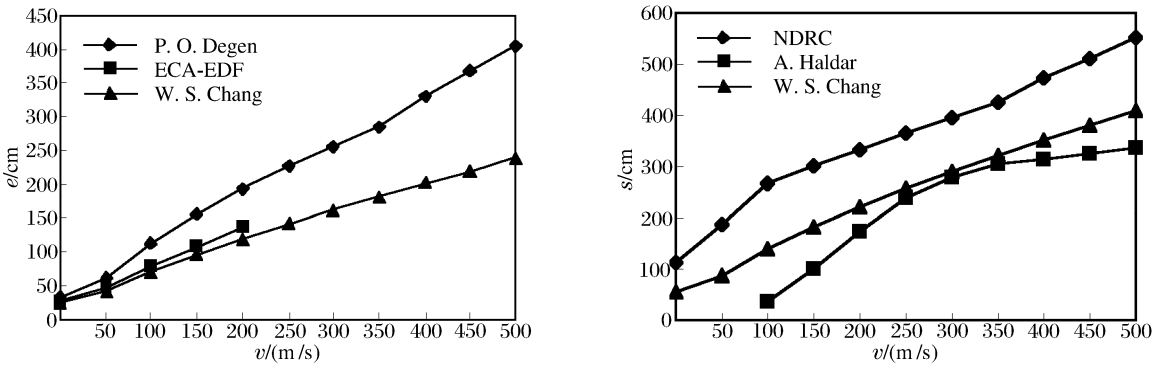


图2 AS-6导弹撞击的侵彻极限深度和痂斑极限厚度

Fig. 2 Penetration and scabbing limit thicknesses of AS-6 missile

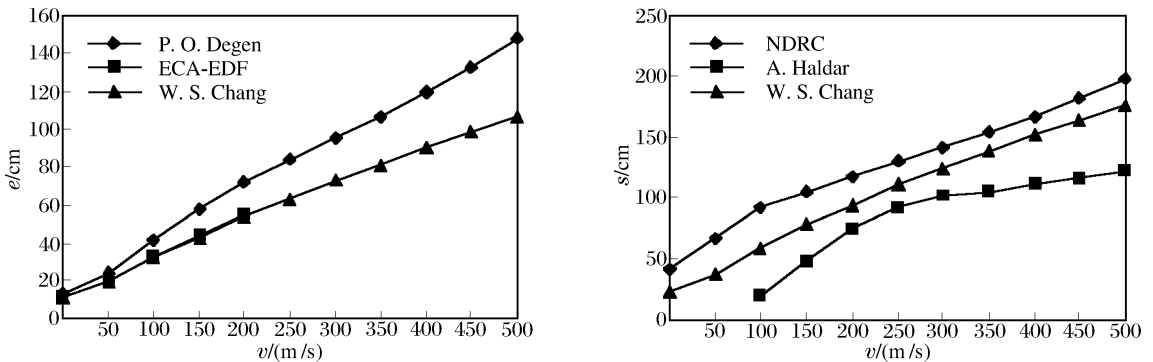


图3 AGM12B导弹撞击的侵彻极限深度和痂斑极限厚度

Fig. 3 Penetration and scabbing limit thicknesses of AGM12B missile

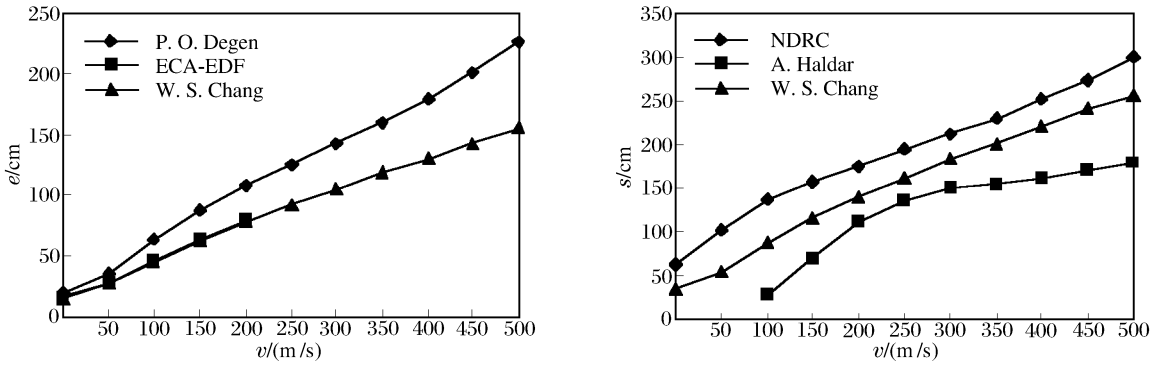


图 4 AGM12C 导弹撞击的侵彻极限深度和剥落极限厚度

Fig. 4 Penetration and scabbing limit thicknesses of AGM12C missile

从计算结果可以看出:

(1)就侵彻极限深度来说,W. S. Chang 公式与法国 CEA-EDF 公式在计算范围内几乎给出相同的结果,P. O. Degen 公式比 W. S. Chang 公式较保守。

(2)就剥落极限厚度而言,在所用的 3 种公式中,W. S. Chang 公式给出了居中的结果;对于 NDRC 公式,当导弹直径较小、速度较大时,与 W. S. Chang 公式十分接近,其他情况都比 W. S. Chang 的公式高;A. Haldar 公式的剥落极限厚度始终给出偏低的结果。

(3)不同公式所计算的侵彻深度结果的差异在 10%~30% 范围内;在计算剥落极限厚度时,对于直径小、重量轻的导弹,低速时相差 50%~100%,对于直径大、重量大的导弹,低速时相差在 300% 以上。

5 结 论

在总结外来飞射体对混凝土板撞击的侵彻极限深度和震塌极限厚度的试验与理论成果的基础上,对几种具有不同特征参数的导弹撞击混凝土平板进行了验算分析,可得出如下结论:

(1)现有的估计侵彻极限深度的计算公式给出的结果差异不超过 30%,但剥落极限厚度的计算结果有时相差较大。

(2)从前人试验和本次验算结果的对比看,W. S. Chang 公式无论是确定侵彻极限深度,还是剥落极限厚度,都较可取。

参考文献:

- [1] Chang W S. Impact of solid missiles on concrete barriers[J]. Journal of Structural Engineering, 1981,107(2):257-280.
- [2] Degen P O. Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles[J]. Journal of Structural Engineering, 1980, 106(7),1623-1642.
- [3] Haldar A, Miller F J. Local effects of concrete structures[A]. Proceedings of Concrete Structure under Impact and Impulsive Loading[C]. West Berlin, West Germany, 1982;345-357.
- [4] Haldar A, Hussein A H. Load effect of solid missiles on concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1984,110(5):948-960.
- [5] Brandar K. Assessment of the response of R C structural member to air-craft crash impact loading[J]. Nuclear Engineering and Design, 1988,110:177-183.
- [6] 武陵斯. 有翼导弹引论[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
- [7] 赵振东,钟江荣,余世舟. 钢混结构物受外来飞射体撞击的破坏效应研究[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(5):137-142.

pacting of an aircraft[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,23(5):137-142.

Verifying calculations on experiential formulas of penetration and scabbing limit thickness of concrete target under rigid missiles impact

ZHAO Zhen-dong*, ZHONG Jiang-rong, YU Shi-zhou
(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Academy,
Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: This paper summarizes some test and theoretical results and evaluates several experimental formulas for estimating the penetration and scabbing limit thickness of concrete targets under projectile impact. The parameters of four types of missiles with different characteristics and concrete targets are given. The corresponding penetration and scabbing limit thicknesses are calculated under different velocities. The results indicate that there are minor difference in estimating penetration but significant difference in estimating scabbing limit thicknesses using existing experiential formulas.

Key words: solid mechanics; verifying calculations on experiential formulas; rigid impact; penetration limit thickness; scabbing limit thickness

* Corresponding author: ZHAO Zhen-dong
E-mail address: iemzhao@iem.net.cn
Telephone: 0451-86652642

第五届全国工程结构安全防护学术会议通知

中国力学学会爆炸力学专委会、中国岩石力学与工程学会动力学专委会和中国土木工程学会防护工程学会拟定于2005年10月18~20日在解放军理工大学工程兵工程学院召开第五届全国工程结构安全防护学术会议(全国强动载作用下介质及结构相互作用学术会议),会议将紧扣当今国际发展动态,围绕介质和结构在强动载作用下的热点和难点问题展开讨论,将邀请国内知名的院士、专家学者作专题报告。会议将安排充分的时间进行实质意义上的讨论和交流,真正办成高效和务实的学术会议。会议由解放军理工大学工程兵工程学院承办。

欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃参加会议。

会议主题

1. 强动载下介质与结构相互作用发展与展望
2. 介质(岩、土、混凝土)的变形与破坏
3. 强动载下结构的局部与整体作用
4. 强动载下材料动力学性能及测试技术
5. 强动载下的隔震理论与技术
6. 钻地武器(常规及小型核钻地弹)破坏效应及防护问题
7. 反恐防爆结构安全对策和技术

会议论文与出版

会议论文征稿截止日:摘要,2005年3月30日;全文,2005年6月30日;防护工程录用通知,2005年7月30日。
论文格式与要求见《防护工程》征稿启示,论文经评审合格将分批刊登在《防护工程学报》2005年第5、6期上。

会议秘书处

负责人:任辉启,王明洋

联系人:赵跃堂,王德荣

通讯地址:210007 南京白下区海福巷1号全军重点实验室结构爆炸实验研究室

电 话:025-80821695(地),0501-821695(军)

传 真:025-80821045(地),0501-821045(军)

手 机:13951941638

E-mail:yuetangzh@163.com;wmyrf@163.com