

文章编号: 1001-1455(2004)04-0376-06

武器侵彻钢纤维混凝土深度的实用计算方法^{*}

王 斌, 金丰年, 徐汉中

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 武器对材料的侵彻过程同时也是材料损伤与能量耗散的过程, 因而靶体材料韧性对武器侵彻深度有很大的影响, 但是, 现有经验公式均不能反映钢纤维混凝土材料韧性对侵彻深度的影响。对此, 引入了钢纤维混凝土材料韧度 η , 并对计算效果较好的 ACE 公式进行了修正。修正后的公式不仅能反映材料韧性作用, 而且在一定程度上也反映了武器侵彻过程中的材料损伤与能量耗散。同时, 该公式适用于武器侵彻钢纤维混凝土深度的计算, 并保持了原公式简单实用的特点, 对相关工程与科研有一定的参考作用。

关键词: 固体力学; 经验计算公式; 修正; 钢纤维混凝土; 侵彻深度; 韧度

中图分类号: O383 国标学科代码: 130°1515 文献标志码: A

1 引 言

常规深钻地武器的迅猛发展及其在当代战场上的应用, 使抗钻地武器深侵彻的新材料研究也相应快速开展起来。钢筋混凝土材料被认为是抗侵彻性能好、施工可行、效费比高、在国防建设中具有广泛应用前景的抗钻地武器新型材料^[1~2]。目前, 世界各主要军事强国的国防工程设计规范中计算武器侵彻深度使用的均为经验公式或半理论半经验公式, 到目前为止, 虽然已公布的武器侵彻岩石、土及混凝土层深度的经验公式不下 40 多种, 其中, 可以用于计算武器侵彻混凝土层的经验公式也已超过了 20 多种^[3], 但是, 却没有能用于计算武器侵彻钢纤维混凝土材料的计算公式。

本文中引入钢纤维混凝土材料韧度 η , 通过对几种常用的计算武器侵彻混凝土深度经验公式与试验数据的对比分析和对试验数据的回归分析, 分析和研究了武器侵彻钢纤维混凝土深度的计算方法。

2 钢纤维混凝土抗侵彻吸能机理及现有经验公式在计算该材料时的局限性

2.1 钢纤维混凝土抗侵彻吸能机理^[1~2, 4~5]

由于钢纤维的断裂韧性远大于界面的断裂韧性, 因此裂缝遇到钢纤维时, 裂缝沿界面扩展的可能性增大, 因而能大大增大混凝土的断裂面积, 提高钢纤维混凝土的抗冲击性能。另外, 由于钢纤维的存在, 改变了混凝土的破坏性质, 即由脆性破坏转变为延性破坏。即使混凝土已经开裂, 钢纤维仍然能够传递应力, 并使混凝土不发生整体破坏, 而是依靠钢纤维连接在一起, 只有当钢纤维被拉断或被拔出到一定程度(理想长度为临界纤维长度的 1/4)时, 钢纤维混凝土才会发生整体破坏。正是混凝土的首次开裂, 使纤维能够传递应力给混凝土基体。当混凝土中的拉应力超过其抗拉强度时, 混凝土会再次开裂, 从而消耗更多的能量, 使钢纤维混凝土呈延性破坏(也称之为假塑性)的方式。另外在纤维拔出的过程中, 能够吸收大量的能量, 从而提高混凝土的抗冲击性能。在基体混凝土开裂之前, 混凝土与钢纤维共同受力, 但当混凝土开裂之后, 原来由混凝土所承受的荷载将由钢纤维承受, 此时, 如果断面上的钢纤维足够多, 则材料不会继续开裂, 因为钢纤维能够承受原来由混凝土所承受的应力而不拉断, 但继续加载可使用钢纤维被拉断, 此时钢纤维混凝土呈延性破坏, 也称复合破坏或假塑性破坏。能够反映钢纤维混凝土材料在抗武器侵彻过程中吸能及破坏机理的物理量是其韧度。

* 收稿日期: 2003-06-04; 修回日期: 2004-05-10

作者简介: 王 斌(1968—), 男, 博士, 讲师。

2.2 现有经验公式计算武器侵彻钢纤维混凝土深度时的局限性

本文中用几种常用的计算武器侵彻混凝土材料的经验公式对钢纤维混凝土材料进行了计算,并对其计算结果与试验结果进行了对比分析。图1(a)、(b)分别为BLZ(别列赞)公式、Bernard公式^[6]、Young公式^[7]及ACE(Army Corps of Engineers)公式^[8]计算结果与B2、B3组钢纤维混凝土材料抗侵彻试验结果对比图,图中 L 为射弹侵彻深度, v 射弹速度。图1(a)对比结果显示:BLZ公式、Bernard公式及Young公式计算结果偏高,其最大偏差分别为81.5%、143.3%、46.5%;ACE公式计算值比试验结果低,其最大偏差为-34.7%。图1(b)对比结果显示:BLZ公式、Bernard公式及Young公式计算结果也偏高,其最大偏差分别为104.65%、141.5%和47.4%;ACE公式计算值比试验结果低,其最大偏差为-25.4%。

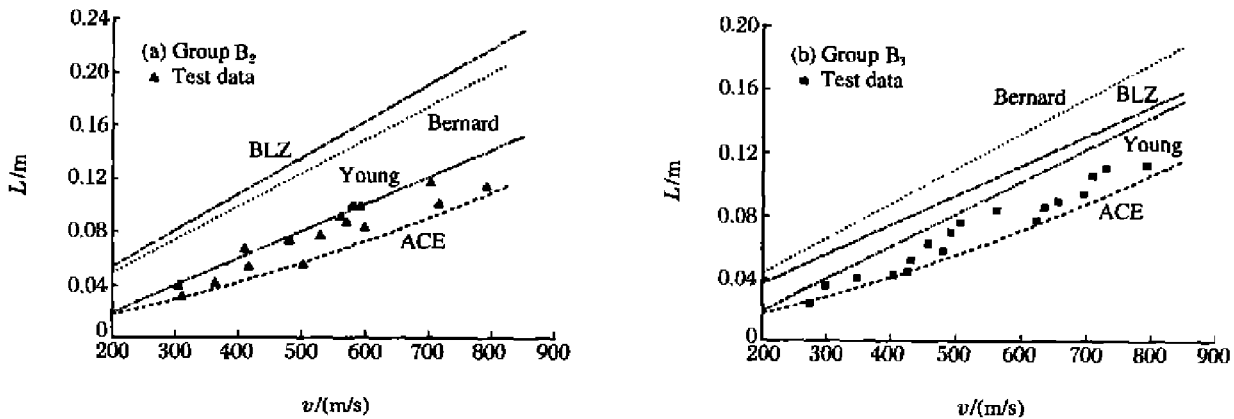


图1 经验公式计算结果与B2、B3组试验数据比较

Fig.1 Comparison between the value calculated by the empirical formulas and the experiment data of Group B2, B3

分析其原因可能是:BLZ公式、Bernard公式及Young公式等经验公式在材料抗侵彻特性上,主要是以混凝土材料的抗压或抗拉强度为主,不能考虑钢纤维混凝土材料韧性高的特点,因而这类经验公式用于计算钢纤维混凝土抗侵彻时,计算结果往往偏高。而ACE公式是从钢筋混凝土材料抗侵彻试验中归纳出的,由于钢筋混凝土材料中钢筋的存在,材料由脆性变为具有一定的韧性,因而计算结果与钢纤维混凝土抗侵彻试验结果接近。

但是,当钢纤维混凝土材料与一般混凝土材料抗压或抗拉强度差别不大,而材料的韧性相差较大时,包括ACE公式在内的所有经验公式就明显不能反应出材料韧度与抗侵彻性能之间的关系来。事实上,韧度在材料抗侵彻中起着非常重要的作用。比如:陶瓷材料的刚度大,但韧性却不足,其抗侵彻性能远不如混凝土;而钢纤维混凝土,由于其韧性好,单位厚度的该种材料抗武器侵彻破坏时所耗散的能量较一般混凝土大,故其抗侵彻性能更优。因而,计算钢纤维混凝土抗侵彻深度时,应考虑材料的韧性。

3 钢纤维混凝土韧度 η

3.1 钢纤维混凝土韧度 η 的计算

在混凝土、钢纤维混凝土材料韧度的计算方面,严少华博士^[2]做过大量的研究工作。现将文献[2]的相关内容简要归纳并评价如下:

钢纤维混凝土韧度 η 可以定义为钢纤维混凝土材料单轴抗压应力-应变全曲线图中,曲线与 x 轴围成的面积。钢纤维混凝土单轴抗压应力-应变全曲线的测试方法主要借鉴普通混凝土的测试方法,其试块按直径150mm、高300mm的标准圆柱体制作,按普通混凝土养护条件进行养护,经过不断完善而得到的普通混凝土全曲线的测试方法,主要是增设刚性元件以克服卸载时实验机回弹对试件的冲击。混凝土及钢纤维混凝土的圆柱体试件受压变形和破坏过程决定了其应力-应变曲线的形状,其典型的单轴抗压应力-应变全曲线如图2^[2]所示。图中坐标采用量纲一形式: $x = \epsilon / \epsilon_0$, $y = \sigma / \sigma_0$, 其中 σ_0 为圆柱体强度, ϵ_0 为对应圆柱体强度的峰值应变。

因此,钢纤维混凝土韧度

$$\eta = \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中: ϵ_p 为钢纤维混凝土试块破坏的最大应变值。

为了便于混凝土及钢纤维混凝土材料韧度 η 的计算,需要对材料的应力-应变曲线进行拟合。经过比较,认为

$$y = \begin{cases} \frac{x}{a_1(x-1)^2 + x} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{a_2(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

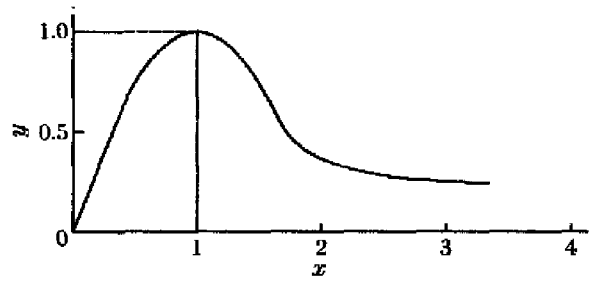


图2 典型的全应力-应变曲线

Fig.2 Typical full stress-strain curve

能较好地拟合试验曲线,且形式简单,特别是它能够拟合出孔隙压缩闭合段曲线。式中 a_1 、 a_2 为拟合系数。

为便于计算比较,积分区域统一为 $0 \sim 6\epsilon_0$, 定义韧度指数

$$A = \int_0^6 y dx = \int_0^1 y dx + \int_1^6 y dx \quad (3)$$

则韧度

$$\eta = A \sigma_0 \epsilon_0 \quad (4)$$

可以证明, a (即 a_1 、 a_2) 越小, 应力-应变曲线越平缓, 韧度指数 A 越大。显然, a 的大小表征了应力-应变曲线的形状, 具有明确的物理意义: a 越大, 材料脆性越大, 韧性越小。实际上, η 是材料全应力-应变曲线中的应变能, 即: 积蓄在试块单位体积中的应变能。 η 的大小决定着单位体积材料抗侵彻时吸收能量能力的大小。 η 越大, 破坏时单位体积材料吸能越多; η 越小, 破坏时单位体积材料的吸能就减少。这正可以解释为什么高强混凝土材料抗侵彻性能远不如钢纤维混凝土材料。

3.2 钢纤维混凝土韧度 η 在材料抗侵彻中的物理意义

η 是一个联系实验室试块破坏试验与钢纤维混凝土材料抗侵彻试验的重要物理量。在实验室试验中, η 是一个与试块破坏时所需能量有关的物理量; 在钢纤维混凝土材料抗侵彻计算中, η 可以理解为既与武器侵彻过程中影响范围有关, 又与材料的损伤程度有关的物理量——这实际上也就是与武器侵彻过程中能量的耗散有关。因为材料的损伤越严重, 能量耗散就越多; 武器在侵彻单位厚度的材料过程中, 影响范围越大, 能量的耗散也越多。而“影响范围”主要与两个因素有关: (1) 武器侵彻厚度 Δd 材料所需时间不仅与材料的刚度有关, 更主要地是与材料的韧度有关; (2) 武器在时间 Δt 内侵彻厚度 Δd 材料的影响范围主要与材料的完整性有关, 而材料的完整性能反映在其韧度 $\eta = A \sigma_0 \epsilon_0$ 中。另外, 由于实战或抗侵彻试验中, 材料都是在高温高压状态下破坏的, 因此, 在武器侵彻钢纤维混凝土的计算中, 选 η 作为其抗侵彻时的韧度更合适。

4 修正 ACE 公式

通过上述分析可知, 与 BLZ 公式、Bernard 公式和 Young 公式相比较, ACE 公式计算武器侵彻钢纤维混凝土深度的偏差最小, 其形状也与试验结果最接近。因而, 将钢纤维混凝土韧度 η 引入 ACE 公式, 修正后的 ACE 公式是可以用于计算武器侵彻钢纤维混凝土深度的。本文中采用了严少华博士等^[2] 的钢纤维混凝土抗侵彻试验的部分结果, 并利用回归分析方法确定了修正 ACE 公式中的各个系数。因此, 首先应将钢纤维混凝土抗侵彻试验结果简要介绍如下。

4.1 钢纤维混凝土抗侵彻试验结果介绍^[2]

对两种材料共 40 个靶体进行侵彻试验。其中 B3(长纤维 HSFC) 系列 20 个, 含长度 24mm 的钢纤维 3%, 其韧度 $\eta = 1.12 \text{ MPa}$; B2(短纤维 HSFC) 系列靶体 20 个, 含长度 9mm 的钢纤维 3%, 其韧度 $\eta =$

0.81MPa。弹丸垂直入射靶体。弹丸直径 14.5mm、长 65mm、平均质量 63.9g，卵形头部；弹丸内部有硬质钢芯，钢芯直径 12.5mm，质量 43g。试验测得各靶体的侵彻速度 v 和侵彻深度 L 如表 1^[2] 所示。

表 1 侵彻试验结果

Table 1 Results of the penetration experiments

试验序号	B3		B2		试验序号	B3		B2	
	$v/(m/s)$	L/cm	$v/(m/s)$	L/cm		$v/(m/s)$	L/cm	$v/(m/s)$	L/cm
1	856.9	贯穿	1012.0	贯穿	11	273.0	2.5	791.0	11.5
2	730.4	11.1	880.0	贯穿	12	455.8	6.3	597.7	8.4
3	710.0	10.6	716.0	10.2	13	401.8	4.3	527.2	7.8
4	635.0	8.6	582.0	10.0	14	424.3	4.5	501.0	5.6
5	506.0	7.6	568.8	8.8	15	480.5	5.8	414.9	5.4
6	490.4	7.0	479.3	7.4	16	656.0	9.0	577.4	10.0
7	562.5	8.4	408.7	6.8	17	793.0	11.3	560.0	9.2
8	429.4	5.2	362.6	4.2	18	696.1	9.5	590.6	10.0
9	297.4	3.6	340.4	4.0	19	624.2	7.8	813.5	15.9
10	345.8	4.1	310.0	3.2	20	709.7	10.6	702.7	11.8

4.2 钢纤维混凝土抗侵彻试验结果的回归分析

1946 年，美国陆军工程兵根据 1943 年 Beth 和 Stipe 报告的用 37、76、155mm 炮弹进行的高速弹道试验数据进行回归分析，提出了美国陆军工程兵公式 (ACE 公式)。1986 年，美国工程兵水道实验站编写的《常规武器防护设计原理》(TM-855-1) 是美国陆军部颁发的规范性技术手册，该书采用了 ACE 公式。ACE 公式是量纲不符的经验公式，其国际单位制形式为

$$L = 0.00035 \frac{Mv^{1.5}}{d^{1.785} f_c^{0.5}} + 0.5d \tag{5}$$

式中： L 为射弹侵彻深度， M 为射弹质量， v 为射弹速度， d 为射弹弹径； $f_c^{0.5}$ 为圆柱体强度。

美、日等国、欧洲国家混凝土委员会 (CEB) 和国际预应力协会 (FIP) 规定混凝土抗压强度的标准试件为圆柱体 (直径 150mm、高度 300mm)。这种试件所测定的强度称为圆柱体强度 f'_c ，其值小于立方体试件 (边长 150mm) 的强度 f_{cu} ，两者的比值随混凝土强度的提高而加大，一般范围^[2] 为 $f'_c = (0.80 \sim 0.89) f_{cu}$ 。由于 f'_c 仅仅反映了钢纤维混凝土材料的强度，而不能反映材料韧性，因而，用钢纤维混凝土韧度 η 代替其圆柱体强度 f'_c 将能更好地反映钢纤维混凝土材料的抗侵彻特性。为了保持与原 ACE 公式形式一致，可以假定修正 ACE 公式形式为

$$L = k_1 \frac{Mv^{1.5}}{d^{1.785} \eta^2} + k_3 d \tag{6}$$

式中： k_1 、 k_2 、 k_3 为待定系数；其余符号的含义同前。

利用 B2、B3 两组试验数据，对式 (6) 进行二元回归分析，得 $k_1 = 1.61 \times 10^{-5}$ ， $k_2 = 0.42$ ， $k_3 = 0.71$ 。

利用 B2 组试验数据对式 (6) 进行回归分析的精度为 93.9%，其侵彻深度 L 与射弹速度 v 的关系如图 3(a) 所示。

利用 B3 组试验数据对式 (6) 进行回归分析的精度为 97.7%，其侵彻深度 L 与射弹速度 v 的关系如图 3(b) 所示。

由图 3 可知，回归分析效果很好。因而，对于钢纤维混凝土材料，抗侵彻公式为

$$L = 1.61 \times 10^{-5} \frac{Mv^{1.5}}{d^{1.785} \eta^{0.42}} + 0.71d \tag{7}$$

从式 (7) 可以看出，弹体的侵彻深度 L 与射弹质量 M 、速度 $v^{1.5}$ 及钢纤维混凝土材料韧度 $\eta^{-0.42}$ 成线性关系。也就是说，质量越大、速度越快、弹径越小的弹体侵彻靶体越深；而韧性越好的材料，其抗侵彻性能也越好。另外，该公式能够反映 2 种趋势：(1) 为了提高攻击深埋地下坚固目标的武器的侵彻能

力, 钻地武器向大截面压力(质量除以最大截面积)和高命中速度方向发展; (2) 为了提高材料的抗侵彻能力, 抗侵彻材料向高强、高韧性方向发展。

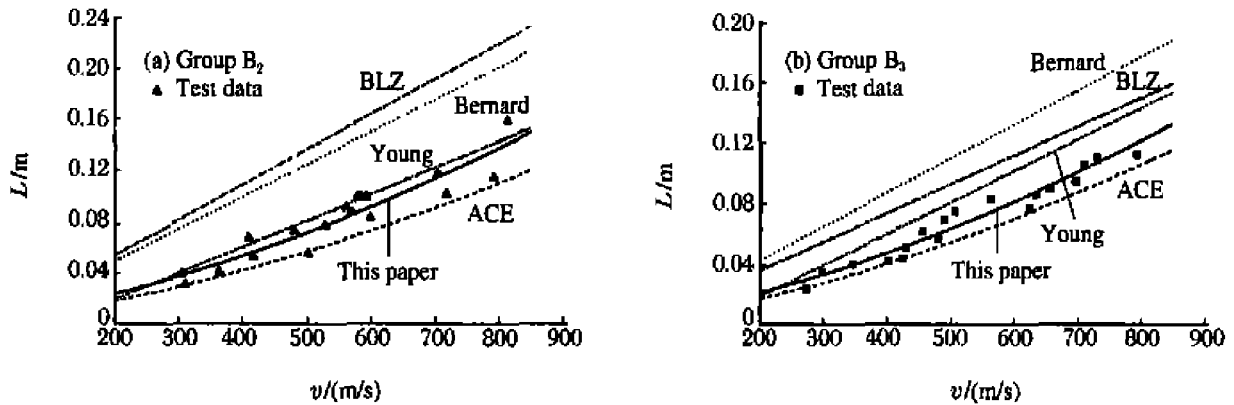


图 3 本文公式、经验公式与 B2、B3 组试验数据比较

Fig. 3 Comparison on the empirical formulae the modified formula and the experiment data of Group B2, B3

5 用 GBU (Guide Bomb Unit)-28 钻地武器实战侵彻数据进一步修订 ACE 公式

5.1 GBU-28 计算参数的选取

GBU-28 曾在海湾战争中使用过, 弹重 2132kg, 装药重 295 ~ 305kg, 弹体长 5.715m, 外径 36.83cm, 内径 25.4cm, 长径比 15.52, 质量与弹体横截面积之比 $M/A = 20037.8\text{kg/m}^2$, 钻土 30m 以上, 钻混凝土 6m (此时撞地速度为 400m/s), 在地下工事内爆炸, 能摧毁埋深 30m 的地下工事, 因此拥有了“地下掩体粉碎机”这样一个凶猛绰号。按中等强度混凝土计算得 $\eta = 0.119\text{MPa}$ 。

5.2 以 GBU-28 实战侵彻数值进一步修订公式

由于 GBU-28 钻地武器侵彻钢纤维混凝土的试验目前根本不可能做, 因此, 考虑到混凝土与钢纤维混凝土材料韧性具有可比性, 将 GBU-28 实战中侵彻混凝土为 6m 的结果, 类比于钢纤维混凝土是当前较为合适的选择。

有趣的是, 在许多经验公式 (如 ACE 公式、NDRC 公式、Haldar-Miller 公式、Bergman 公式、TBAA 公式、FFI 公式、Bernard 公式等) 中均存在 L (或 L_c) $\propto f_c'^{-b}$ (或 f_c^{-b}), 其中 c 为常数, $b = 0.5$, 与式 (7) 中 $b = 0.42$ 接近。分析其原因可能是: 混凝土材料为脆性材料, 材料的韧度系数 A 与 ϵ_0 变化很小, 材料韧度的大小主要取决于 σ_0 , 而 σ_0 与 f_c' 或 f_c 是密切相关的物理量, 所以, L (或 L_c) $\propto \eta^{-b}$ (其中 $b \approx 0.42 \sim 0.5$) 可由 L (或 L_c) $\propto f_c'^{-0.5}$ (或 $f_c^{-0.5}$) 来代替。因而, 可以近似地认为钻地武器侵彻钢纤维混凝土与混凝土的深度均符合

$$L = k_0 (1.61 \times 10^{-5} \frac{Mv^{1.5}}{d^{1.785} \eta^{0.42}} + 0.71d) \tag{8}$$

式中: k_0 为待定系数。将混凝土材料参数及 GBU-28 武器参数代入式 (8), 并令 $L = 6$, 可得 $k_0 = 0.486$ 。

所以, 计算钻地武器侵彻钢纤维混凝土与混凝土深度的修正 ACE 公式可为

$$L = 7.83 \times 10^{-6} \frac{Mv^{1.5}}{d^{1.785} \eta^{0.42}} + 0.345d \tag{9}$$

6 讨 论

分别以上文中提到的混凝土材料和钢纤维混凝土材料为侵彻对象, 用式 (9) 计算 GBU-28 钻地武器侵彻两种材料的深度如表 2 所示。

由于本文中引用的侵彻试验是在射弹速度 $v = 273 \sim 880\text{m/s}$ 之间进行的, 且式 (9) 是量纲不符的经

验公式, 当武器速度在 $v = 273 \sim 880\text{m/s}$ 之间时, 其计算结果较为准确; 当武器速度超出 $v = 273 \sim 880\text{m/s}$ 时, 其计算结果准确性未经验证。所以, 式(9)的适用范围应定在 $v = 273 \sim 880\text{m/s}$ 之间。

因此, 可以得出如下结论:

(1) 侵彻深度 L 与混凝土、钢纤维混凝土材料韧度的 η^{-b} ($b=0.42 \sim 05$) 之间存在线性关系; (2) 从修正 ACE 公式中可看出, 提高钢纤维混凝土抗侵彻能力关键在于提高其材料韧度, 而提高 ϵ_0 与提高 σ_0 对提高材料韧度同样重要; (3) 修正 ACE 公式可用于弹体速度 $273 \sim 880\text{m/s}$ 之间的钻地武器侵彻钢纤维混凝土深度的计算分析及工程参考。

参考文献:

- [1] 段吉祥. 改善内部结构提高高强混凝土抗冲击性能的研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2000.
- [2] 严少华. 高强钢纤维混凝土抗侵彻理论与试验研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2001.
- [3] 施鹏. 常规弹体对混凝土侵彻的试验研究和数值模拟[D]. 南京: 解放军理工大学, 2002.
- [4] Krenchel H. Fiber spacing and specific fiber surface[A]. Neville A. RILEM Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete[C]. USA: The Construction Press Ltd, 1976, 2: 511—513.
- [5] SUN Wei, Mandel J A. Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites[J]. ACI Materials Journal, 1986, 84: 597—605.
- [6] Vrethblad B. Penetration of projectiles in concrete according to fort II 1[R]. Norwegian: Norwegian Defense Research Establishment, 1988.
- [7] Young C W. Penetration Mechanics—An Experimental Perspective[R]. ISIEMS 8th, 1997.
- [8] ACE. Fundamental of Protective Design[R]. Report AT1207821, 1946.

The engineering method for calculating the depth of penetrating steel fiber concrete

WANG Bin^{*}, JIN Feng-nian, XU Han-zhong

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The material is damaged and the energy is dissipated while a projectile penetrates its target. Therefore, the toughness of target has profound influence on penetration depth. However, the toughness of steel fiber concrete was not considered in the available empirical formulae at present. In this paper, the ACE formula that has better result in calculating penetrating depth is modified by introducing the toughness index η . Not only the material toughness but also the material damage and energy dissipation are reflected by the new method. The new formula is simple as the ACE formula for practical use in penetration calculation, and can be used to determine the depth of penetrating Steel Fiber Concrete. It will have further application to related scientific research and engineering.

Key words: solid mechanics; empirical calculating formula; modified; steel fiber concrete; penetration depth; toughness index

* Corresponding author: WANG Bin

E-mail address: freewangbin0001@sina.com

Telephone: 025-84876512

表 2 GBU-28 侵彻混凝土材料和钢纤维混凝土材料的计算值
Table 2 The calculation results of the GBU-28 penetration depth into concrete and the steel concrete m

						m
400m/s			800m/s			
混凝土	B2	B3	混凝土	B2	B3	
6.00	2.74	2.41	16.73	7.53	6.60	