

爆炸荷载作用下地下结构抗层裂钢板机理分析

李秀地¹, 徐干成², 郑颖人¹

(1. 后勤工程学院军事建筑工程系, 重庆 400041; 2. 空军工程设计研究局, 北京 100077)

摘要: 为了对某飞机洞库的抗层裂钢板进行有效地设计, 基于层状介质中一维应力波的传播理论, 给出了脉冲荷载作用下地下结构混凝土中的应力历史计算方法。通过算例研究了混凝土中应力波的传播规律, 揭示了混凝土—钢板层状结构抗层裂的相互作用机理, 可为地下结构的抗层裂设计、施工提供参考。

关键词: 爆炸荷载; 层裂; 拉伸波; 地下结构

中图分类号: O383+. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)05-0076-03

具有重要军事价值的地下结构, 如指挥通讯坑道、导弹洞库、飞机洞库、油料洞库等, 历来是战争中敌方重点打击的对象之一。现代高技术战争条件下, 精确制导武器能够侵彻一定深度并在地下结构附近爆炸时, 会在防护结构中产生峰值较高、持续时间较短的压缩脉冲荷载。这种压缩脉冲遇到结构的内表面反射产生的拉伸波, 能够造成广泛的剥落、震塌, 这种破坏叫层裂(spalling)^[1]。层裂产生的飞块(主要是混凝土、岩石等的碎块)能够携带较大的动能, 以较高的速度飞离结构内表面, 对地下结构中的人员、飞机及其它武器装备构成了潜在的威胁, 并降低了地下结构抗重复打击的能力。

层裂是材料经受强脉冲动载荷作用时产生的最重要的破坏现象之一。为此, 人们提出了许多抗层裂剥落的防护措施^[2~4]。从工程实践上来看, 在混凝土结构内表面粘贴或用螺栓锚上钢板组合为混凝土—钢板系统, 是一种行之有效的措施^[5~8]。但由于问题的复杂性, 人们对混凝土—钢板系统抗层裂的作用机理尚未完全弄清。

1 层状介质中的波动理论

一般情况下, 当应力波遇到两种不同介质的界面时, 界面处会有五种波^[1]: 入射波、反射纵波、反射横波、透射纵波及透射横波。在混凝土的层裂分析中, 一般主要关心纵波的作用。为此, 本文就一维纵波垂直入射的情况进行研究。这样, 在界面处只有入射纵波、反射纵波和透射纵波。界面处波的传播距离—时间图, 见图1。

设介质1的密度和波速分别为 ρ_1 、 C_1 , 波阻抗为 $A_1 = \rho_1 C_1$; 介质2的密度和波速分别为 ρ_2 、 C_2 , 波阻抗为 $A_2 = \rho_2 C_2$ 。由边界连续条件可知, 界面两侧质点的应力和速度相等

$$V_I + V_R = V_T, \sigma_I + \sigma_R = \sigma_T \quad (1)$$

式中: V 表示速度, $V = \sigma/\rho c$; σ 表示应力; 下标 I 、 R 、 T 分别表示入射、反射和透射。

由此可得反射波、透射波与入射波的关系

$$\sigma_R = F\sigma_I, \sigma_T = T\sigma_I \quad (2)$$

式中: T 为透射系数, $T = 2/(1+n)$; F 为反射系数, $F = (1-n)/(1+n)$, $n = A_1/A_2$ 。

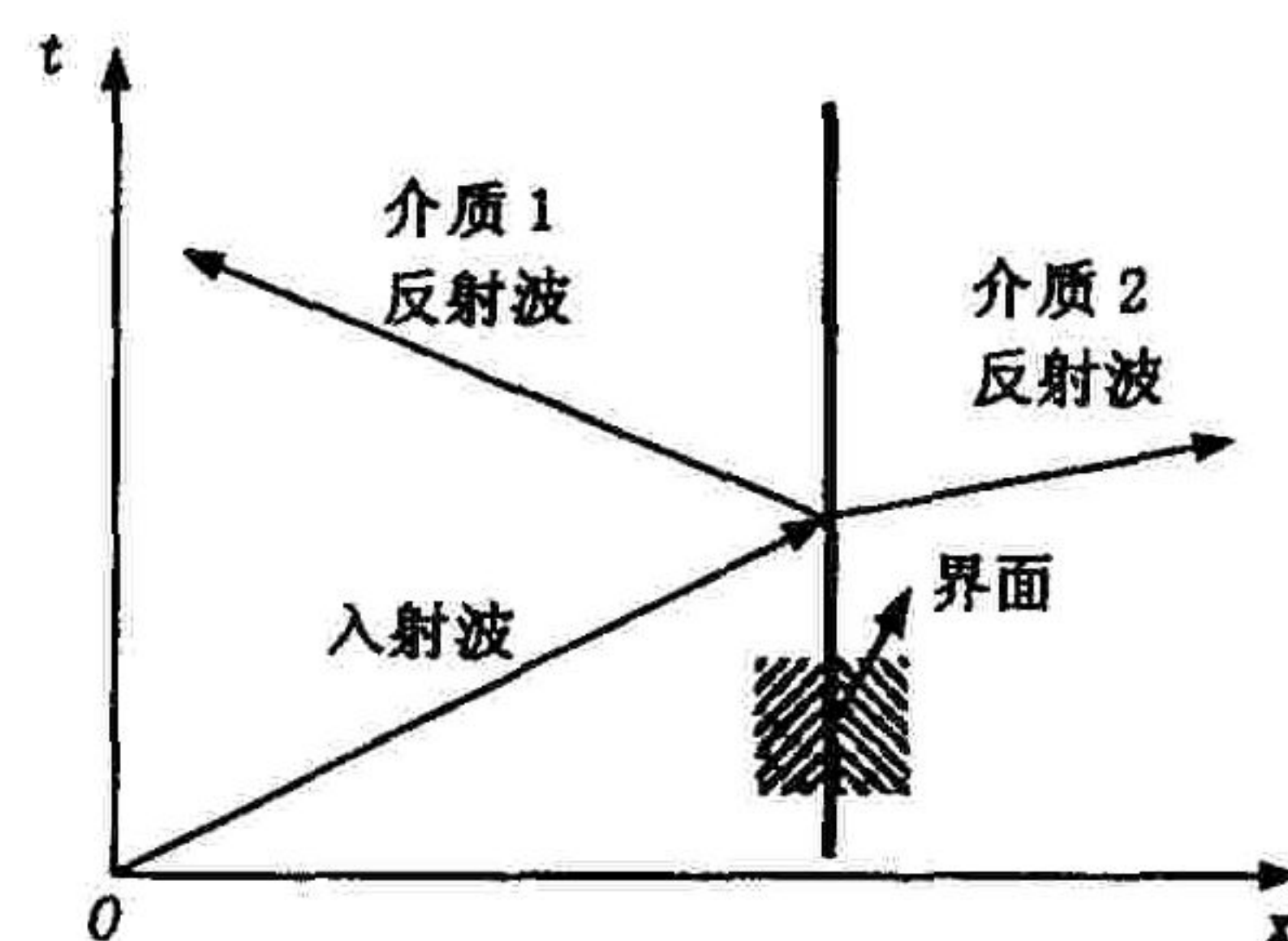


图1 界面处波的传播距离—时间图

收稿日期: 2004-12-27

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 李秀地(1970-), 男, 安徽宿县人, 讲师, 博士生, 主要从事常规武器爆炸效应及其防护技术研究;

郑颖人(1933-), 男, 浙江镇海人, 工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程、岩土工程等研究。

对入射波为压缩波的情况,当 $n > 1$,即波由“硬”介质向“软”介质入射时,有 $T > 0$ 及 $F < 0$,表明透射波为压缩波,而反射波为拉伸波;当 $n > 1$,即波由“软”介质向“硬”介质入射时,有 $T > 0$ 及 $F < 0$,表明透射波、反射波均为压缩波。特殊情况下,当 $n \rightarrow \infty$,即界面为介质1的自由面时,有 $T = 0$ 及 $F = -1$,表明这时不发生波的透射现象,而反射波与入射波幅值相同、但符号相反。

2 混凝土中应力历史的确定

为简化计算,近似将混凝土看成半无限厚^[6-8],从而可以大大简化问题的分析。设入射波为一维平面三角形脉冲 $\sigma_0(t)$,幅值为 σ_0 ,作用时间为 t_+ ;混凝土、钢板均为均质、各向同性弹性材料,混凝土的密度为 ρ_c ,波速为 c_c ,波长为 $\lambda = c_c t_+$,动态抗拉强度为 σ_c ;钢板的密度为 ρ_s ,波速为 c_s ,波长为 $\lambda_s = t_+ c_s$;钢板厚度为 H_s ,则波在钢板中单程传播的时间为 $T_s = H_s / c_s$ 。

设入射应力波 $\sigma_0(t)$ 到达 P 点记为0时刻。混凝土中任一点 P 距混凝土-钢板界面的距离为 H ,波从 P 点传到交界面所需时间为 $T_1 = H / c_c$ 。由层状介质中波的传播理论,得混凝土-钢板中波的传播距离-时间图,见图2。

由图2可见,从混凝土透射入钢板中的应力波,将在钢板的两个界面之间来回反射。由反射波、透射波与入射波的关系以及材料的性质不难看出,钢板中不断透射回混凝土中的波是拉伸波。混凝土中任一点 P 的应力历史,就是先后到达该点的所有这些拉应力与入射波叠加的结果。由层状介质中波的传播理论,可得到混凝土中任一点 P 的应力历史为

$$\sigma_p(t) = \sigma_0(t) + F_{cs}\sigma_0(t-2T_1) + T_{cs}T_{sc}\sum_{j=1}^n F_{sa}^j F_{sc}^{j-1} \sigma_0(t-2T_1-2iT_s) \quad (3)$$

式中: F_{cs} 、 F_{sc} 、 F_{sa} 是混凝土-钢板界面分别向混凝土、向钢板中的反射系数及钢板自由面的反射系数, T_{cs} 、 T_{sc} 分别是界面处混凝土向钢板中、钢板向混凝土中的透射系数。

3 应用实例分析

某飞机洞库混凝土-钢板抗层裂加固改造工程,混凝土、钢板的参数,见表1。入射波简化为无升压时间的三角形波形,应力取为无量纲形式 σ/σ_0 ,脉冲持续时间 $t_+ = 500 \mu s$ 。

表1 混凝土、钢板介质参数

	密度/(kg/m ³)	波速/(m/s)	厚度/m
混凝土	2 400	3 300	-
钢板	7 800	6 162	0.003

3.1 应力波传播规律研究

首先分析钢板中的初始应力峰值随着反射次数 n 的衰减。由图3可见,钢板中的应力波在钢板的两个界面来回反射时衰减较快,如反射10次时,峰值应力已降为6% σ_0 。所以,钢板中的波动过程主要表现在早期阶段(约122~131 μs)。钢板中的初始应力先后透射入混凝土中的拉应力峰值见图4。由图4可见,由于钢板薄、波速快,从钢板中相继透射入混凝土中的拉伸波峰值相差很小。因此,仅考虑一次或少数几次从钢板中透射入混凝土中的拉应力进行抗层裂设计,是偏于不安全的。

3.2 钢板抗层裂机理分析

由式(3)可算得距混凝土-钢板界面0.2 m处混凝土中的应力历史,见图5。图5也给出了无钢板时的相应计算结果,以便于进行比较。

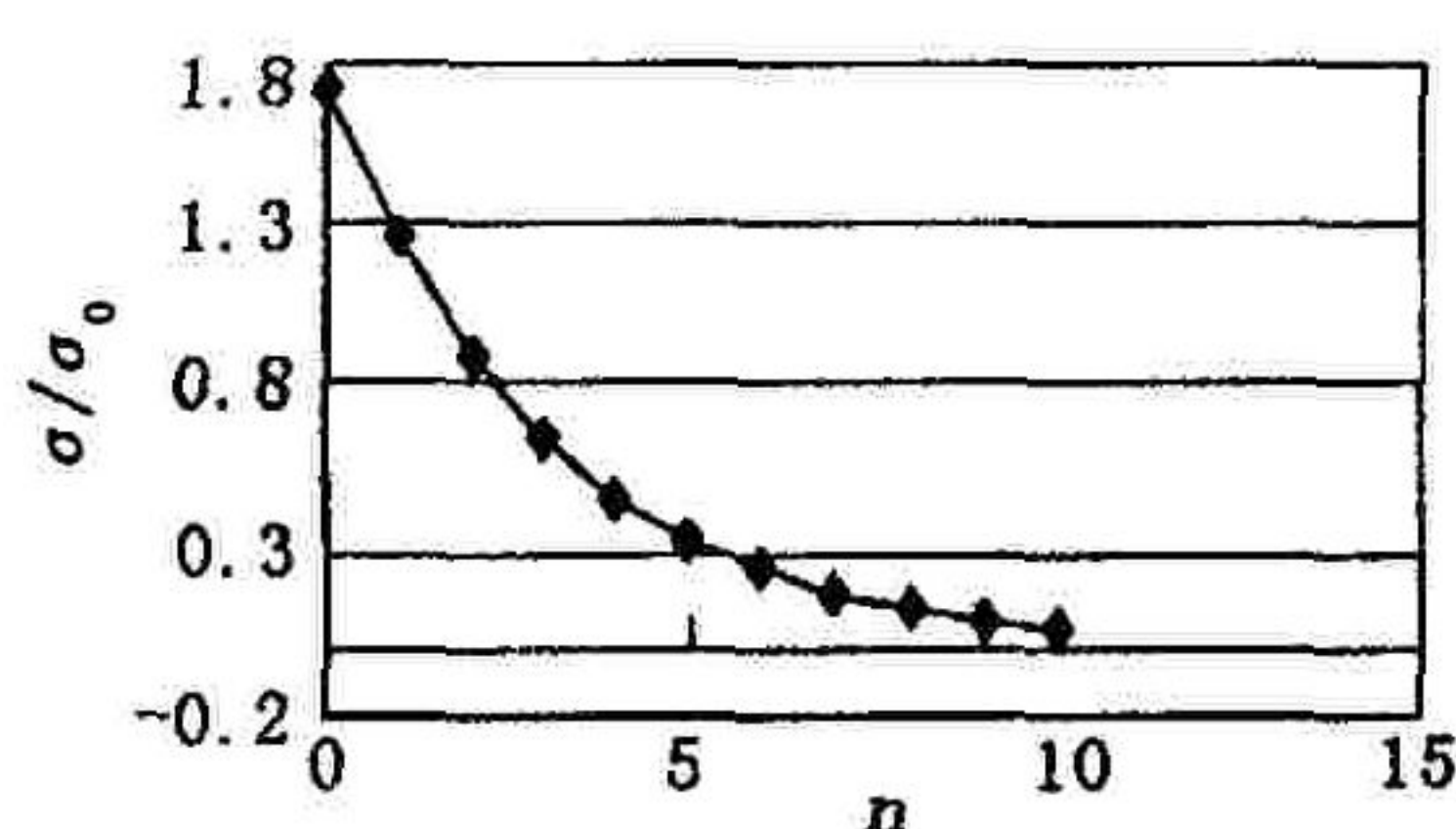


图3 初始应力峰值随反射次数衰减

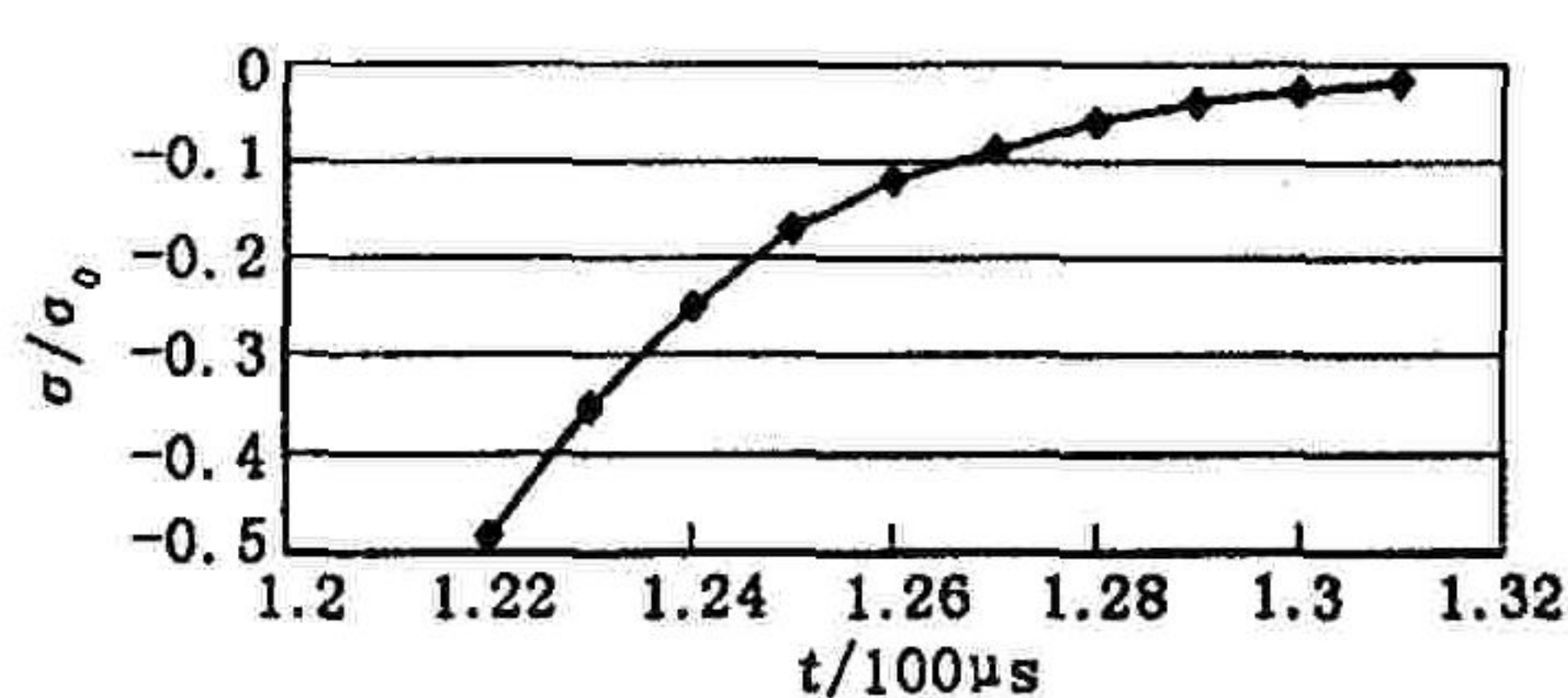


图4 初始应力透射的应力峰值

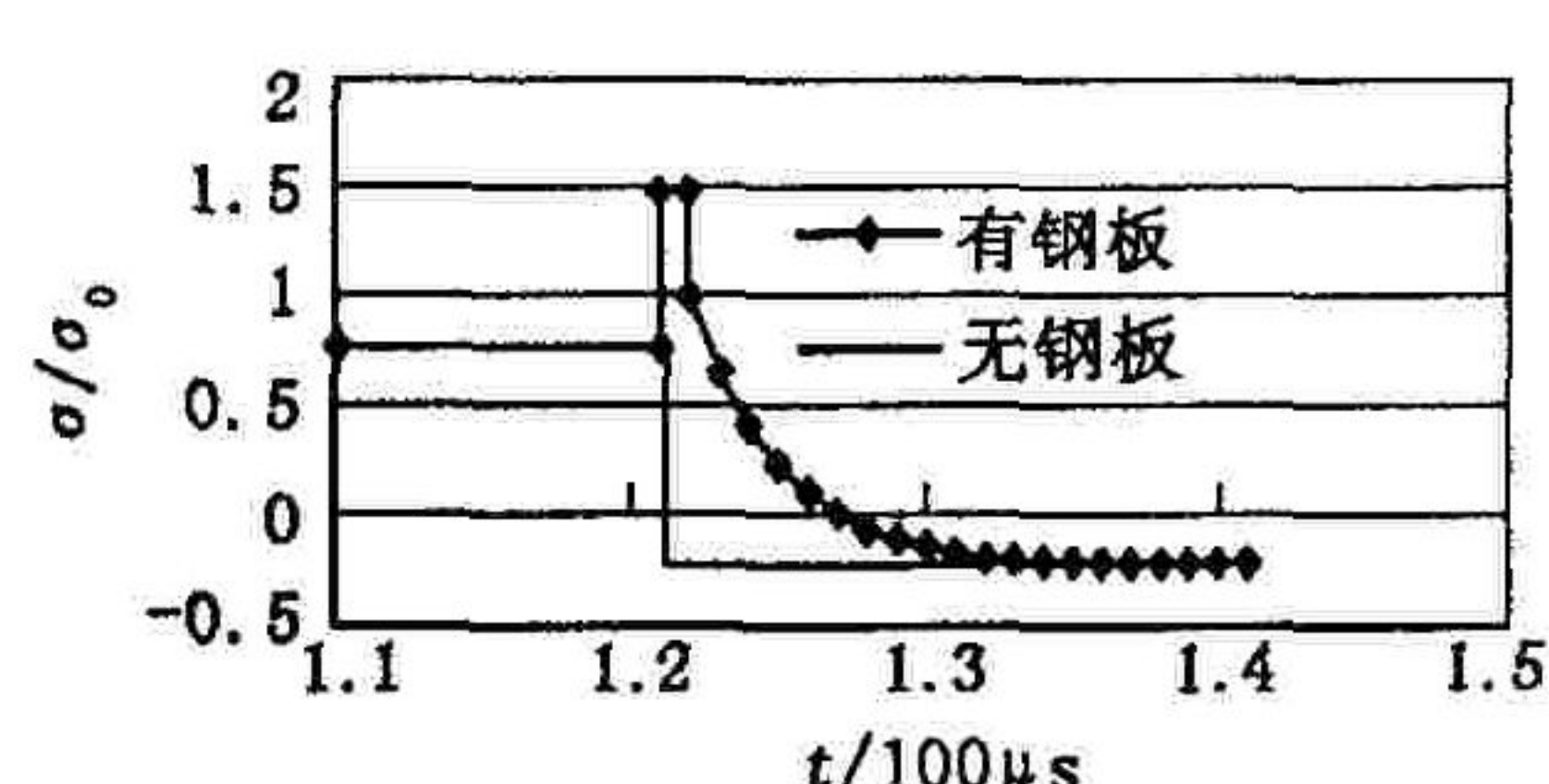


图5 有无钢板应力历史比较

可以看出,在从混凝土-钢板界面传来的反射波到达以前,二者都只有压缩波的作用。对无钢板混凝土,当从界面传来的反射拉伸波到达后,该处的应力由压缩突然达到最大拉应力状态。而对有钢板混凝土,混凝土-钢板界面传来的反射压缩波到达后,使该处的压应力突然增大。随着从钢板中透射来的拉伸波的陆续到达,该处的应力不断降低并最终出现拉应力。对有钢板混凝土的这种加载方式,使混凝土的层裂厚度变大,并降低了发生多次层裂的可能性。

可以看出,不论有无钢板,二者的拉应力最终会趋于一致。因此,用钢板加固混凝土,并不能确保混凝土内部不被破坏。钢板主要是起到阻滞混凝土层裂碎块飞离的作用。

4 结论

通过本文对混凝土-钢板系统抗层裂应用的研究,可以得到以下结论:

- 1) 仅仅考虑一次或少数几次从钢板透射入混凝土中的拉应力,分析结果偏于不安全。
- 2) 钢板的抗层裂机理主要在于改变了混凝土中的应力状态和加载方式。钢板加固的混凝土,不容易发生层裂,还能降低发生多次层裂的可能性。
- 3) 用钢板加固混凝土,并不能确保混凝土内部不破坏。但抗层裂钢板可以起到阻滞混凝土碎块飞离的作用。

参考文献:

- [1] Tarabay Antoun, Donald R Curran. Spall Fracture[M]. New York:Springer-Verlag Inc, 2003.
- [2] Joseph W T, David W L. Wave Propagation Through Layered Systems[J]. Computers and Structures, 1989,32(3/4):625-628.
- [3] Lan S, Heng L. Composite structural components under blast loading[J]. Structures under shock and impact,2001;13-21.
- [4] Mir M Ali. Protective design of concrete buildings under blast loading[J]. Structures under shock and impact,2002;23-33.
- [5] 林润德,刘泽圻. 钢筋混凝土结构内粘钢板加固技术可行性分析[J]. 爆炸与冲击, 1997,17,(3):276-280.
- [6] 柳锦春,方 秦. 爆炸荷载作用下钢板混凝土组合结构的波动分析[J],防护工程,1997,(3):45-50.
- [7] 卢国强. 钢筋混凝土-钢板组合结构抗爆炸作用的试验研究与动力分析[D]. 上海:同济大学,1997.
- [8] 范宇洁. 粘钢加固抗爆地下结构的研究[D]. 上海:同济大学,2000.

(编辑:姚树峰)

A Study of Mechanism of Spall -Resistant Steel Panel for Underground

Structures under Blast Loading

LI Xiu - di¹, XU Gan - cheng², ZHENG Yin - ten¹

(1. Department of Architecture & Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Air Force Engineering Design and Research Bureau, Beijing 100077, China)

Abstract: In order to design effectively spall - resistant steel panels for a certain airplane underground structure, a stress historical algorithm is presented for concrete within underground structures under blast loading based on one-dimensional theorem of stress waves within layered structure. The numerical example shows the stress histories within the concrete and steel, and brings to light the mechanism of spall - resistant steel panel.

Key words: blast loading ; spall; tensile wave ; underground structure