

# 地下工程抗爆防震塌设计动力学机理讨论

杨黎明, 周风华, 董新龙, 王礼立

(宁波大学机械工程与力学学院, 浙江宁波 315211)

[摘要] 在爆炸载荷下,反射拉应力波是导致混凝土防护结构震塌的主要原因。材料的动态抗拉强度是结构抗爆防震塌设计所必须考虑的主要参量,抑制或减弱拉伸冲击波的强度是防护结构设计的一个重要目标。研究了混凝土和钢纤维增强混凝土的动态力学性能以及它们结构的爆炸震塌响应。试验表明,高强混凝土 C100 的抗震塌能力还不如普通混凝土 C40;加入体积含量 2% 的钢纤维可有效提高混凝土的强度以及结构的抗震塌能力;而且加入相同含量的钢纤维后,纤维增强 C100 混凝土的抗震塌能力与增强 C40 混凝土相比并无明显不同。应用一维应力波理论近似分析,揭示了抗震塌设计的动力学机理,分析表明,“三明治”复合层结构可以有效提高结构的抗震塌能力,此分析为设计具有更好抗爆能力的防护工程提供了科学依据。

[关键词] 地下工程结构;混凝土拉伸性能;抗震塌;应力波

[中图分类号] P315.9 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)03-0029-09

## 1 前言

随着攻击性武器的发展,工程抗爆防护更显重要<sup>[1,2]</sup>。在爆炸荷载直接作用下,有限厚度的混凝土结构呈现严重的局部破坏,在迎爆面形成漏斗坑,在背爆面由于自由表面反射产生的拉伸波引起背面层裂,基于各种机制的损伤演化的综合效应最终会导致混凝土结构的震塌。对岩土震塌破坏机理及破坏过程的动力学研究国内外已经有很多报道,国内的防护专家在相关研究中取得了一系列成果,为我国的防护工程的发展作出了重要贡献<sup>[3-12]</sup>,但仍然面临一系列新的挑战。

事实上,在冲击或爆炸作用下,介质中往往产生曲面应力波,这种复杂的应力-应变状态对材料的动力破坏的影响尚无完整的研究方法,因而为了揭示震塌破坏机理,一般将问题简化为一维平面波的传播来分析处理。对于这类问题,已有相关研究报道<sup>[13,14]</sup>,但还存在不少重要的问题有待解决。破坏准则采用是制约震塌机理研究的主要因素之一,在冲击或爆炸作用下,实际的应力状态远较试验设计的复杂得多,并且材料的强度与应变率有关,一般来

说,应变率越高,其强度提高也越多,在拉伸条件下此种现象尤为显著。另外,冲击和爆炸作用是高应变率下的强动加载,必须考虑时间和惯性的影响。加载时间越短,则要使结构上的损伤(微裂缝)在量上积累,以最终造成宏观破坏,就必须施加更大的应力。反之,加载应力水平越高,则为使损伤积累到临界状态所需的延迟时间越少<sup>[15-20]</sup>。

在评定混凝土结构的抗震塌能力时,主要根据试样在爆后的总体破坏形貌来对其抗震塌能力进行分级,并确定相应的“不震塌系数” $K_i$ :

$$K_i = \frac{H_i}{m \cdot (\lambda \omega)^{1/3}} \quad (1)$$

式(1)中, $\omega$ 为装药量; $\lambda$ 为不同炸药的修正系数; $m$ 为耦合系数; $H_i$ 为临界不震塌高度。即评定混凝土结构的抗爆震塌能力的主要依据是其爆后的总体终态,而这一总体终态实际上是结构的动态响应和材料的动态响应从经历早期的局部响应到后期的总体响应之综合反映。而这些已有的震塌试验既未区分结构动态响应(包括应力波的传播和相互作用以及边界条件的影响等)与材料动态响应(包括率相关的流变过程、损伤演化过程、裂纹传播过程和断裂

[收稿日期] 2009-05-10

[作者简介] 杨黎明(1957—),男,福建长乐市人,教授,博士,研究方向为冲击动力学;E-mail: yangliming@nbu.edu.cn

等)各自的作用大小,也未区分早期局部响应和后期总体响应各自的作用大小,因此不仅未能提取出爆炸载荷作用下与时间过程相关的重要信息,而且也难以发现抗爆防震塌的机理。所以,有必要对现有的震塌试验补充必要的动态测试和发展冲击动力学分析,以便为科学设计具有更好抗爆能力的防护工程提供依据。

事实上,式(1)可以在若干基本假定的前提下,通过量纲分析来导出。由此可以了解式(1)所隐含的基本假定。

炸药对周围介质(如混凝土)的爆炸作用将涉及炸药和介质两个方面:

在炸药方面,作点源爆炸假定,即忽略装药几何形状尺寸和炸药状态方程等对介质爆炸效应的作用,则影响介质中冲击波压力的主要装物理量是:药量  $\omega$ 、炸药密度  $\rho_0$  和炸药爆速  $D$ 。

在介质方面,假设:

1) 炸药在无限介质中爆炸,则可忽略结构的几何尺寸及相应的边界条件;

2) 介质为可压缩无粘流体(流体动力学模型),则可忽略介质的一切固体力学特性。若再假定介质中的冲击波压力只依赖于波前介质初态,则只需计及介质初始压力  $p_{m0}$  和初始密度  $\rho_{m0}$ 。

在上述假定下,距离中心药包  $r$  处的介质中的冲击波压力  $p_m$  可简化为仅仅是上述  $\omega$ 、 $\rho_0$ 、 $D$ 、 $p_{m0}$ 、 $\rho_{m0}$  和  $r$  6 个物理量的函数:

$$p_m = f(\omega, \rho_0, D, p_{m0}, \rho_{m0}, r) \quad (2)$$

根据量纲分析理论的  $\pi$  定理,式(2)可化为如下 4 个无量纲物理量之间的函数关系:

$$\pi_1 = \frac{p_m}{p_{m0}}, \quad \pi_2 = \frac{\omega^{1/3}}{\rho_0^{1/3} r},$$

$$\pi_3 = \frac{D}{(p_{m0}/\rho_{m0})^{1/2}}, \quad \pi_4 = \frac{\rho_{m0}}{\rho_0}$$

即有

$$\frac{p_m}{p_{m0}} = f\left[\frac{\omega^{1/3}}{\rho_0^{1/3} r}, \frac{D}{(p_{m0}/\rho_{m0})^{1/2}}, \frac{\rho_{m0}}{\rho_0}\right] \quad (3)$$

式(3)为点源爆炸球面冲击波在满足流体动力学模型的无限介质中传播时的近似相似律。若进一步假定:

1) 炸药的种类和装药密度不变,即设  $D$  和  $\rho_0$  为恒值;

2) 流体化介质的初始压力和初始密度不变,即设  $p_{m0}$  和  $\rho_{m0}$  为恒值,则式(3)简化为:

$$\frac{p_m}{p_{m0}} = f\left[\frac{\omega^{1/3}}{\rho_0^{1/3} r}\right] \quad (4)$$

再假定介质的破坏只取决于压力,即当  $p_m/p_{m0}$  达到和超过某临界值时介质处于某种破坏状态,并且其相应的  $r$  值以  $H_f$  表之。于是由式(4)可知,表征破坏区域的特征尺度  $H_f$  正比于  $\omega^{1/3}$ , 即有

$$H_f = K \cdot \omega^{1/3} \quad \text{或} \quad K = \frac{H_f}{\omega^{1/3}} \quad (5)$$

当再引入炸药修正系数  $\lambda$  和爆炸耦合系数  $m$  后,就与式(1)完全一致。

根据以上分析讨论不难看到,通过现有震塌试验来确定“不震塌系数” $K$  的式(1)实际上是以一系列简化假定的成立为前提的。在偏离这些基本假定的情况下,原则上式(1)已难以继续适用,而必须进一步加以改进;更何况从模型律(scaling)的角度看,小尺寸混凝土试块的震塌试验本来已难以反映大尺寸混凝土结构的实际震塌情况。因此,在抗震塌研究中,以下几点是尤其值得注意的:

1) 震塌试验的实际情况既然难以满足“点源炸药爆炸”的假定和“炸药种类与装药密度不变”的假定,从而必然会引入相应的误差。

2) “无限介质”假定,这一假定完全忽略了边界效应,从而忽略了应力波在边界上的反射以及入射波与反射波的相互作用等等,也不适用于具有复合结构的防护体。然而在震塌试验中,凡裂纹的形成和发展以及最后导致整体破坏等等,往往是与来自自由边界的反射卸载波的作用分不开的;若防护体具有复合结构,在复合层界面上,冲击波也将发生反射和透射等相互作用,而改变防护体的受力状况。因此,在震塌防护设计中,应充分考虑到波的相互作用。合理的结构设计可有效提高混凝土防护体抗震塌能力,却是式(1)所未能反映的。

3) “介质的可压缩无粘流体近似”假定,对于震塌试验来说更是一种过于简化的假定,因为混凝土震塌时所呈现的各种形式的破坏几乎都与混凝土作为固体所具有的抗畸变特性和抗剪切断裂特性相关。而且,大量试验研究结果已表明混凝土的力学行为对应变率很敏感,属于粘弹性或粘弹塑性材料。因此,必须考虑到材料力学特性对结构震塌的影响,以利于对混凝土类材料抗震塌能力的分析比较,但这也是式(1)所无法反映的。

综上所述,必须研究材料的动态力学性能和应力波在防护结构中的传播特征,才能揭示工程抗爆防震塌设计动力学原理,为科学设计具有更好抗爆

能力的防护工程提供依据。

表 1 两种混凝土标称强度及钢纤维体积掺量

## 2 材料动态力学特性

混凝土构件接触爆炸局部破坏效应研究对防护工程极其重要,研究表明混凝土结构的震塌破坏是由爆炸压缩冲击波在自由面的反射卸载导致的拉伸波所造成的,而冲击波的传播和相互作用都和介质的力学性能相关。所以,要研究与混凝土结构的震塌破坏相关的问题,都需要确定介质的动态力学特性。国际上系统研究混凝土动态力学性能只是在最近十来年开始,之前的研究大多数局限于准静态条件下,或是利用落锤装置测量一下它的低加载率下的抗压强度。最早开始这方面系统研究的是美国 Florida 大学的 Malvern 教授,他先是在  $\phi 19$  的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 上研究了细粒混凝土的动态力学性能,之后又研制了一套  $\phi 76$  的大尺寸 SHPB,系统研究了混凝土材料的动态力学性能。美国空军工程和科学实验室的 Ross 教授等人先后建有  $\phi 50$  和  $\phi 100$  的 SHPB,讨论了混凝土材料强度的应变率效应,地处意大利的欧盟联合研究中心安全技术研究所建有  $60 \times 60$  的方形 SHPB 和  $200 \times 200$  束型 SHPB,部分研究成果已有报道,除此之外,荷兰、德国、日本等都开展了这方面的研究。笔者与一些国内同行在相关领域也做了一些工作,如中国科技大学和宁波大学各自建造了  $\phi 74$  压杆并开展了广泛研究,总参工程兵第三研究所也建造了  $\phi 100$  超大型压杆。

### 2.1 材料动态抗压力学特性

要在 SHPB 装置上对混凝土进行动态力学性能研究,笔者注意到:混凝土材料是具有不同细观结构的多相材料。一般地说,只有当试件尺寸比材料细观结构(如骨料)的特征尺寸大很多时,才能按宏观均匀材料处理。为此决定选用 8 mm 连续级配骨料的 C40 和 C100 两种混凝土作为试件,同时还在混凝土中加入钢纤维,研究了不同体积含量(0%~3%)和不同长度(15 mm 和 20 mm)的钢纤维对两种混凝土力学性能的影响。冲击压缩试验采用圆柱体试样,为  $\phi 70$  mm、高度 35 mm 和  $\phi 100$  mm、高度 50 mm 两类。分别在  $\phi 100$  mm 的直杆以及  $\phi 74$  mm 的直锥变截面型分离式 Hopkinson 压杆装置上进行试验。两种混凝土及钢纤维体积掺量见表 1。提出标准养护后的混凝土试样在专用的岩石磨床上磨至端面平行度 2 丝的精度要求。

Table 1 The meaning of samples named

试样类型	C40v0	C40v2	C40v3	C100v0	C100v2	C100v3
钢纤维体积掺量/%	0	2	3	0	2	3

由于篇幅所限,文章仅给出试验研究和分析结果:

1) 应变率效应十分显著。素混凝土及钢纤维强化混凝土的流动应力和破坏应力均随应变率的增加而显著增加,表现出应变率强化的特点。这种硬化效应远比金属材料显著,后者的强化效应是与应变率的对数相关,而前者的硬化效应是直接应变率相关。

2) 各种混凝土的破坏应变均随应变率的增加而有所增加。这与通常金属、高聚物等均质材料,随着应变率的增加,表现出由韧转脆破坏、应变减小的趋势不同。

3) 钢纤维对混凝土材料具有显著的增韧效果。试验结果表明,对于 C40 类和 C100 类,掺加钢纤维的混凝土破坏应力较素混凝土提高了近 30%,而且,在相近应变率下,素混凝土较含钢纤维混凝土的破坏程度严重(中应变率下,素混凝土为破碎成小块,含钢纤维的混凝土边缘破裂;高应变率下,素混凝土为粉碎,含钢纤维的混凝土仍能保留芯部)。试验结果还表明,钢纤维含量的改变对破坏应力的影响不大。

4) 长度为 20 mm 的钢纤维比长度为 15 mm 的增强效果稍好,但不明显。

5) 尺寸效应明显。即:随试验用试件尺寸增大,测试得到的抗压强度  $\sigma_b$  减小,这是由于试样尺寸增大,其损伤量也增加。

6) 由于存在混凝土材料均质性较差,破坏应变很小,试件尺寸大所造成的波形弥散和试件内应力不均匀等缺陷,使得试验结果有一定的分散性。

### 2.2 横向围压对抗压强度的影响

脆性材料的一个明显特征是围压对压缩强度的影响:我们引用美国 Sandia 试验室的研究报告<sup>[21]</sup>来说明脆性材料的围压效果。侧向无约束的陶瓷(碳化硅)试件在 4.0 GPa 的轴向静态压缩下破坏,其最早出现的是沿轴向的劈裂裂纹,紧接着轴向细长的碎片向外侧崩塌,然后局部的弯曲和拉伸效应而破坏。由于破坏之前材料承受了很高的压缩载荷,一旦破坏试件内部储存的弹性应变能得到迅速释放,整个试件爆裂开来。当试件在围压为 350 MPa 和 200 MPa 的环境下,其压缩强度则分别是 6.5 GPa

和 6.3 GPa。可见相对于无侧向约束, 200 MPa 的围压可以将试件压缩强度提高 2.0 GPa, 而进一步增加围压对提高轴向压缩强度并没有明显的效果。试验表明, 围压作用下的试件的破坏以轴向裂纹为主, 没有侧向崩塌过程。

从上述观察, 可以定性地解释这种“围压强化”原因: 由于横向压力的存在, 试件中沿轴向劈裂裂纹的发展受到有效抑制, 随轴向裂纹贯通而出现的横向崩塌现象也得到控制, 因此材料的压缩强度大大提高。类似的试验结果在动态材料试验中也被发现<sup>[22]</sup>, 而且得到数值模拟<sup>[23]</sup>的证实。由此可见, 为研究脆性材料的破坏机制, 有必要对其内部裂纹的发生发展过程, 包括从压缩载荷下从材料内部损伤引发的局部拉伸应力破坏(所谓翼形裂纹模型 wing crack<sup>[24]</sup>)到宏观裂纹出现, 以及整体破坏后的崩裂过程, 做深入细致的研究。值得注意的是, 由于脆性材料内裂纹的传播速度极高(km/s), 即便试件外部的载荷是静态的, 材料的碎裂过程本身也是一个涉及材料惯性效果的动态过程, 需要做动力学分析。

### 2.3 材料动态抗拉力学特性

脆性材料(如混凝土)的破坏强度的一个显著

特征是拉伸压缩行为不对称; 这些材料一般可以承受很高的压缩载荷, 而相应地在很低的拉伸载荷下就会破碎, 典型的脆性材料的压缩强度比其拉伸强度高约一个量级。混凝土结构的震塌是由拉压力造成的, 因此必须研究混凝土抗拉力学特性。笔者用两种试验方法研究了混凝土抗拉力学特性。

#### 2.3.1 一维应力状态的层裂抗拉特性试验

一维应力状态下的层裂抗拉特性试验装置如图 1 所示, 长杆状试样与入射杆紧密接触, 当撞击杆撞击入射杆产生入射压缩脉冲, 入射脉冲传入试样并在其另一端(自由端)反射, 导致试样中形成拉伸应力波, 拉伸应力波将引起层裂破坏。由入射杆上测得的入射波和反射波来确定传入混凝土试件的透射压缩波。透射压缩波在试样另一端(自由端)反射形成拉伸波。若假设可用最大拉应力来描述层裂强度, 根据简单的一维应力波理论分析, 则可确定此层裂强度。

#### 2.3.2 圆盘试样横向压缩试验(巴西试验)

对圆盘试样在动载荷下进行横向压缩, 实验原理如图 2 所示。

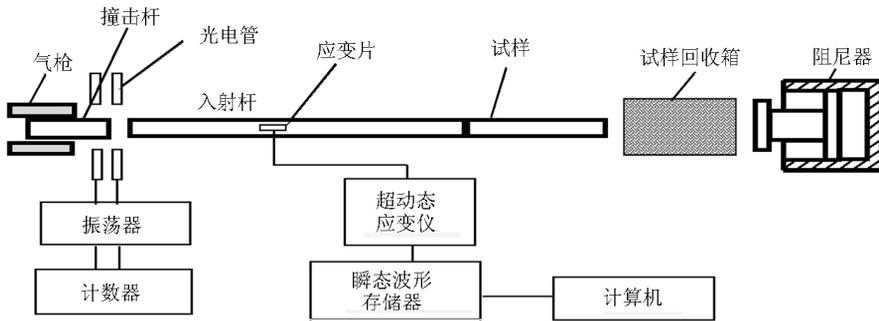


图 1 一维应力状态下的层裂抗拉特性试验装置

Fig. 1 Experimental equipment for measuring spalling behavior under one-dimensional stress wave

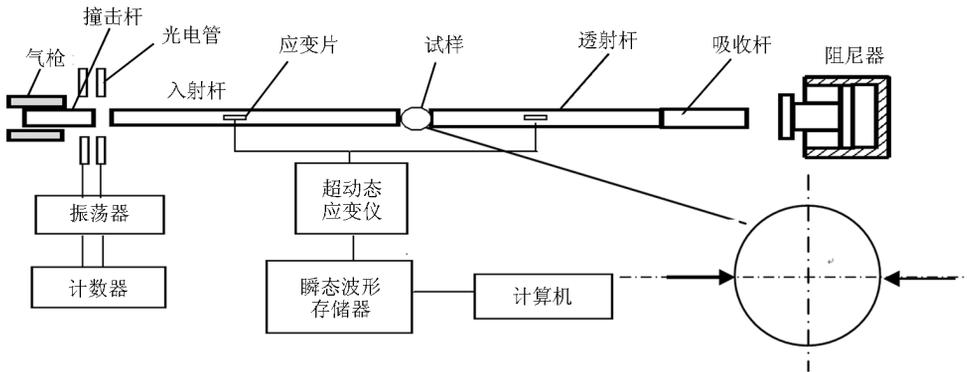


图 2 圆盘横向压缩试验

Fig. 2 Disc compressive experiment

试验时将圆盘试样横向置于输入杆和输出杆之间,如同 SHPB 常规试验一样,当应力波在试样中多次反射达到平衡时,试样中的应力波效应可以忽略,根据弹性理论,在试件中心垂直于加载轴线  $AB$  的方向上具有最大的拉伸应力分量:  $\sigma_x = 2p / \pi dh$ , 这里,  $p$  为  $A$  和  $B$  点的压力,  $d$ 、 $h$  分别为试样直径和厚度。如果认为混凝土的拉伸断裂只取决于最大拉伸应力分量,而暂时不计试样压缩应力分量的作用,则可方便得到圆盘在拉伸应力作用下断裂应力。值得注意的是:试件并非出于简单应力状态:沿加载轴线  $AB$ ,在  $A$  和  $B$  点具有最大的压应力分量,并向中心逐渐减小,而在其中心有  $\sigma_x = -3\sigma_x$  压缩应力分量。因此该试验方法得到的混凝土抗拉特性并不是在一维应力状态下的数值,而是在加载方向具有较大的压应力状态下材料具有的抗拉破坏能力。

笔者的试验结果(见表 2)表明,圆盘试验测得的动态抗拉强度比长杆试验测得的层裂强度高,这主要是由于一方面圆盘试验测得是在复杂应力状态下的抗拉特性,而层裂试验是一维应力状态下的结果,另一方面,层裂试验先经受了压缩波的加载,有可能导致损伤的演化等,而影响了混凝土的抗拉特性。试验结果表明:C100 素混凝土虽然抗压强度较 C40 高,但其动态抗拉强度并没有相应提高,而钢纤维的加入可以有效提高混凝土材料的动态拉伸强度。

表 2 抗拉特性试验结果汇总  
Table 2 Experimental results of tensile behavior of concretes

试验材料	动态抗拉强度/MPa	
	圆盘试验	层裂试验
C40	8.1	3.7
C40v2	10.9	6.0
C40v3	13	7.8
C100	9.0	3.8
C100v2	12.5	8.2
C100v3	14.4	8.4

### 3 震塌破坏的试验研究

随着现代武器装备不断改进和发展,攻击能力大幅度提高,对防护工程抗爆防震塌能力的要求越来越高。为了提高防护工程的抗震塌、侵彻能力,当今较多采用钢纤维增强混凝土。在国内外各种文献中对钢纤维增强混凝土的研制有较多的报道,但由

于各方面的原因,缺少关于钢纤维增强混凝土抗爆防震塌破坏的系统可借鉴的资料。而这些对于抗爆结构的设计、钢纤维增强混凝土的选择是极其重要的。进行震塌试验的目的是:a. 了解 C40 混凝土和两种不同配比钢纤维增强 C40 混凝土试板在接触爆炸时的动态特性,包括震塌破坏和压缩破坏的机理;b. 分析爆炸压缩波的传播特性;c. 为抗表面爆炸高强混凝土结构的设计提供参考。

笔者共计进行 25 组爆炸试验,其中 19 组的混凝土板尺寸为  $200\text{ cm} \times 200\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ,6 组的混凝土板尺寸为  $200\text{ cm} \times 200\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ ,研究混凝土基体强度级别、纤维含量配比变化、配筋情况和混凝土板尺寸等对抗震塌性能的影响。在试件制作过程中,将压力传感器置于某些特定位置,用以测量波在混凝土中不同位置处的冲击波压力,以及用于测试应力波在混凝土中的衰减特性及传播速度。

混凝土震塌试验原理如图 3 所示,炸药置于混凝土试板上表面中心,接触爆炸。每次试验时炸药数量是以实验室小模型试验结果为依据,并根据现场爆炸试验破坏情况进行调整。

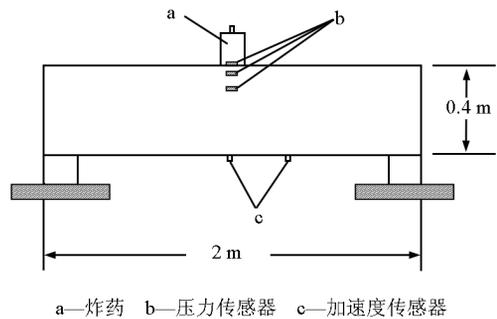


图 3 混凝土震塌试验原理示意图  
Fig. 3 Collapse experiment of concrete under explosive loading

根据试验结果可以得出如下结论:

1) 在爆炸冲击载荷作用下,C40 钢纤维增强混凝土板与普通混凝土相比,抗震塌性能提高明显,它减小了层裂区直径。随钢纤维体积含量从 2% 增加至 3%,抗震性能有提高趋势,但从破坏结果分析看,抗震塌性能提高不明显。从目前的工艺条件和经济考虑,宜采用 2% 钢纤维增强混凝土。

2) 从加速度分析看:试样外侧加速度值均随炸药量增加而变大。在小于 4 kg 的低药量下,增加钢纤维含量,试样外侧加速度值明显降低,但随着药量增加至 4 kg 以上,外侧加速度值趋于相同。

3) 试验结果还表明:配筋对震塌破坏的约束作用明显,对结构有明显的加固作用,对提高整体抗震塌破坏性能有明显作用。但试验结果显示,配筋试样的背面中心表层层裂较严重。这是由于在爆炸冲击载荷作用下,混凝土的整体震塌破坏,其实包含局部冲击、贯穿、层裂等早期波动效应的破坏形式和后期整体突出、塌落。而配筋对结构的加固作用体现在后期响应,结构早期的破坏形式主要与应力波的传播特性相关,即与材料力学性能和试件的厚度有关。对于有/无配筋的试件,早期由应力波导致的层裂破坏效应相似,但由于混凝土与配筋结合力相对较弱,使标准配筋试件表层发生层裂飞散。

4) 比较 C100 混凝土与 C40 混凝土试件试验的破坏结果,笔者发现:采用 C100 混凝土,并不能提高结构的抗震塌性能,反而材料表现出更大的脆性,比如爆坑的尺寸和深度都增大。C100 混凝土加入  $v_f 2\%、3\%$  的钢纤维后,抗爆震塌性能明显提高,但仅与 C40v2、C40v3 相仿。

5) 钢纤维能阻碍宏观裂纹的扩展,并有效地减小碎块的尺寸。

6) 从试验回收观测中注意到,试件钢纤维未能均匀分布,多为二维乱向分布,并且钢纤维大多为拔出破坏。可见如果不能有效改善纤维-基体的结合强度以及实现施工中的搅拌均匀性,不必追求过高的钢纤维含量。

7) 加入  $1.2 \text{ kg/m}^3$  PPE 增强混凝土并没能提高其抗震塌性能。

8) 材料的配比对压力峰值及其衰减的影响不大,反映在近爆炸区,对混凝土类脆性材料其爆坑破坏状况相近,改变材料配方或钢纤维增强并不能改善爆坑破坏状态。这是由于该区域内,冲击压力的幅值远大于材料所能承受的剪应力,应力偏差较小,可忽略不计。

#### 4 抗爆防震塌设计动力学机理分析

已经知道结构震塌是由拉伸冲击波造成的,所以在结构防震塌设计中应尽量抑制或减弱拉伸冲击波的强度。为了揭示抗震塌设计动力学机理,笔者应用一维冲击波分析。下列的讨论虽然是以弹性波简化为例给出的,其原理对于爆炸冲击波同样适用。

由应力波理论知(以一维弹性波为例说明),如果应力波在 A 材料中无干扰地传播,其压应力  $\sigma_0$

和质点速度  $v$  之间有如下关系(负号对应于右行波,而正号对应于左行波):

$$\sigma_0 = \mp \rho_A C_A v \quad (6)$$

式(6)中,  $\rho_A$  和  $C_A$  分别是介质的密度和波速。若由爆炸产生的应力波的波长为  $L$ ,则此应力波在自由面反射后,在距自由面  $L/2$  的位置上将产生大小与入射波幅值 ( $\sigma_0$ ) 相等的拉伸应力,而导致结构震塌。所以,需要设计合理的结构以减弱拉伸冲击波的强度。夹层复合结构是一类可有效减弱拉伸冲击波的防护结构,其原理可由研究应力波传播规律的动力学理论分析来说明。为了便于分析,设防护体为三明治复合结构(波阻抗为  $\rho_A C_A$ );第 2 层是夹层材料,其波阻抗为  $\rho_B C_B$  以及厚度为  $LC_B/C_A$ ;第 3 层是厚度为  $2L$  的混凝土。宽度为  $L$  强度为  $\sigma_0$  (如式(6)所示)的右行入射波在原先无扰动的最外层混凝土中向内传播。波传播到不同的介质界面时将发生反射和投射,下面用特征线方法分析波的相互作用。

当夹层材料的波阻抗小于混凝土的波阻抗 ( $n = \frac{\rho_B C_B}{\rho_A C_A} < 1$ ),即夹层材料比混凝土的“软”时,应力波在复合结构中的传播如图 4 所示,根据特征线理论,求得对应的应力和速度值如图 5 所示。结构中的最大压应力不会超过由式(6)给出的人射波应力,但在结构末端部(第 3 层)出现拉应力之前,结构的前部(第 1 层)就出现了拉应力,此拉应力有可能导致第 1 层结构的损伤、甚至破坏,使其不能承受二次打击。

当夹层材料的波阻抗大于混凝土的波阻抗 ( $n = \frac{\rho_B C_B}{\rho_A C_A} > 1$ ) 即夹层材料比混凝土的“硬”时,应力波在这种复合结构中的传播仍为图 4 所示,对应的应力和速度值如图 6 所示。结构中的最大压应力将超过由式(6)给出的人射波应力,在结构末端部(第 3 层)出现拉应力之前,结构的前部(第 1 层)不会出现拉应力,但在夹层中(第 2 层)将产生较大的拉应力。所以,在这类复合结构设计中,夹层材料必须具有较高的动态抗拉强度。否则,结构将承受不住二次打击。

不论是“硬”夹层还是“软”夹层,根据特征线理论,均可以求得在这种夹层材料所产生的最大拉应力(对应于图 4 中的 24 区域)与没有夹层的单纯混凝土结构的最大拉应力比为:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{4n}{(1+n)^2}, \text{ 其中 } n = \frac{\rho_B C_B}{\rho_A C_A} \quad (7)$$

式(7)表明,当  $n=1$  时,  $\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1$  是其最大值,即夹层结构设计有助于抗震塌。上述仅以单层夹心结构为例,当为多层结构时,其防护效果将会更好。

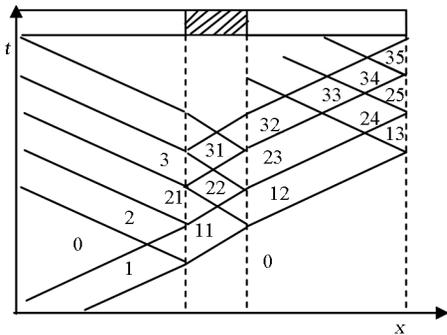


图4 波在夹层中的反射和透射  
Fig. 4 Reflection and transmission of stress waves in a sandwich structure

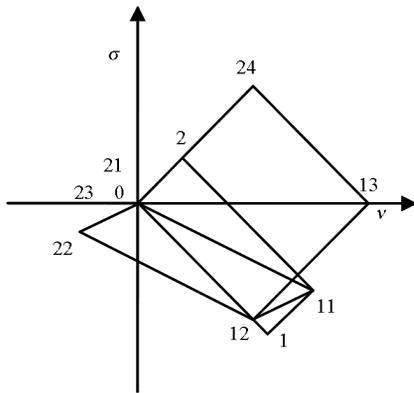


图5 结构中的不同时刻和区域所对应的应力与速度  
Fig. 5 Stress and particle velocity in the sandwich structure

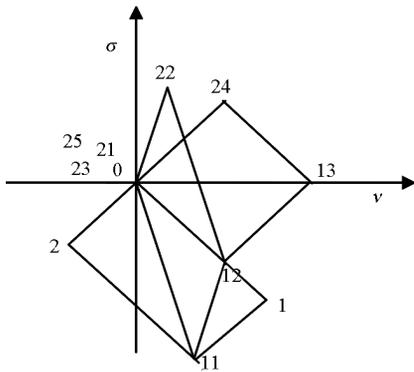


图6 结构中的不同时刻和区域所对应的应力与速度  
Fig. 6 Stress and particle velocity in the sandwich structure

例如,防护结构的外表面为一“坚硬”层,根据冲击动力学分析可知,此“坚硬”层不仅可有效减弱触地爆炸所导致的在混凝土内侧表面附近的反射拉应力波,而且还能有效阻挡钻地弹的侵入,从而减弱钻地弹的破坏力,达到防护目的。若在具有相当厚度的“坚硬”层内侧,设置一具有吸能作用的“软”层,则结构具有更好的抗爆防震塌效果。所以,合理的设计能够有效减弱拉伸冲击波的强度而达到更好的防护效果。但在设计中,必须考虑结构的抗二次打击的能力。

对于处于深层的军事工程(如 1 000 m 深),其结构的顶部具有足够强的抗爆炸能力,但入口处等薄弱环节需要防护,上述的冲击动力学分析仍然可以应用在其防护设计中。

## 5 结语

在爆炸荷载直接作用下,有限厚度的混凝土结构呈现局部破坏。在爆炸区附近引起局部的严重变形,在迎爆面形成漏斗坑;在背爆面由于自由表面反射产生的拉伸波引起背面层裂,基于各种机制的损伤演化的综合效应最终会导致混凝土结构的震塌。而反射拉应力波是导致混凝土防护结构震塌的主要原因。人们熟知的由震塌试验来确定“不震塌系数” $K$ 的式(1)实际上是以一系列简化假定的成立为前提的,并且没有考虑防护结构特征以及冲击波传播特性。在原则上说这些公式具有很大的误差,在较为精确的分析中,已难以继续适用,而必须进一步加以改进。材料的动态抗拉强度是结构抗爆防震塌设计所必须考虑的主要参量。如何抑制或减弱拉伸冲击波的强度是防护结构设计的一个重要目标。为此,笔者研究了混凝土和钢纤维混凝土的动态力学性能以及它们结构的爆炸震塌响应。试验表明,体积含量 2% 的钢纤维增强可有效提高混凝土的强度以及混凝土结构的抗震塌能力;与人们常识相反, C100 素混凝土的抗震塌能力还不如 C40 素混凝土,但如果加入相同含量的钢纤维,则增强了的 C100 混凝土的抗震塌能力与增强 C40 混凝土相比并无明显不同。文章应用一维应力波理论,揭示了抗震塌设计的动力学机理,分析表明,“三明治”复合层结构可以有效削弱反射拉伸冲击波强度,从而提高结构的抗震塌能力。当防护结构的外表面有一“坚硬”层,根据冲击动力学分析可知,此“坚硬”层不仅可有效减弱触地爆炸所导致的在混凝土内侧表面附

近的反射拉应力波,而且还能有效阻挡钻地弹的侵入,从而减弱钻地弹的破坏力,达到防护目的。若在具有相当厚度的外表面“坚硬”层内侧,设置一具有吸能作用的“软”层,则结构具有更好的抗爆防震塌效果。对于处于深层的军事工程(如1 000 m深),其结构的顶部具有足够强的抗爆炸能力,但入口处等薄弱环节需要防护,文章所述的冲击动力学分析可以应用在其防护设计中。文章的目的是为合理设计具有更好抗爆能力的防护工程提供依据。

## 参考文献

[1] 董宏晓,秦有权,周丰峻,等.国外核武器发展趋势及对防护工程的影响[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集.长春:总参工程兵科研三所,2004:44-47.

[2] 何典章.防护工程科研现状及发展趋势[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集.长春:总参工程兵科研三所,2004:19-29.

[3] 王明洋,周泽平,钱七虎.深部岩体的构造和变形与破坏问题[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):448-455.

[4] 胡金生,杨秀敏,周早生,等.接触爆炸对底部有土垫层纤维混凝土板破坏效应试验研究[J].爆炸与冲击,2005,25(2):157-162.

[5] 俞儒一.防护结构概论[J].爆炸与冲击,1987(7):89-96.

[6] 郑全平,周早生,钱七虎,等.防护结构中的震塌问题[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1393-1398.

[7] 江水德,郑全平,陈肇元.钢纤维高强混凝土板抗爆炸震塌破坏性能研究[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集.长春:总参工程兵科研三所,2004:482-487.

[8] 赵晓兵,方秦,张亚栋,等.爆炸荷载作用下地下复合结构的合理刚度匹配[J].爆炸与冲击,2001,21(2):117-120.

[9] 陈土海,王明洋,钱七虎.岩体中爆破破坏分区研究[J].爆破器材,2004,33(3):33-35.

[10] 李欢秋,吴祥云,李永池.双层介质抗爆炸震塌结构的性能研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):643-648.

[11] 王明洋,戚承志,钱七虎.岩体中爆炸与冲击下的破坏研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(4):385-389.

[12] 胡金生,杨秀敏,王安宝,等.纤维混凝土抗接触爆炸性能研究[C]//第十三届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册).北京:中国力学学会,2004:56-59.

[13] 切列帕诺夫,黄克智.脆性断裂力学[M].北京:科学出版社,1990.

[14] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M].北京:科学出版社,1987.

[15] 徐流恩.模型试验及其在防护工程侵略领域中的应用[J].防护工程,1998(3):42-49.

[16] Vladimir M Gold, George C Vradis. Analysis of penetration resistance of concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998,124(3):328-338.

[17] Li Faming, Li Zongjin. Continuum damage mechanics based modeling of fiber reinforced concrete in tension [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001,38:777-793.

[18] Pierre Rossi, Franz-Josef Ulm, Fatiha Hachi. Compressive behavior of concrete: physical mechanisms and modeling[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996,122(11):1038-1043.

[19] Jean-Francois Dubé, Gilles Pijaudier-Cabot, Associate Member, et al. Rate dependent damage model for concrete in dynamics [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(10):939-947.

[20] David Z Yankelevsky, Itzhak Avnon. Autoclaved aerated concrete behavior under explosive action [J]. Construction and Building Materials, 1998,12(6-7):359-364.

[21] Lee M Y, Brannon R M, Bronowski D R. Uniaxial and triaxial compression tests of silicon carbide ceramics under quasi-static loading condition [J/OL]. SAND2004-6005, 2005.

[22] Chen W, Ravichandran G. Dynamic compressive failure of a glass ceramic under lateral confinement [J]. J Merh Phys Solids, 1997,45(8):1303-1328.

[23] Zhou F, Molinari J F. Numerical investigation of dynamic compressive loading [J/OL]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2008,27 MAR,10.1002/9780470294802.ch60.

[24] Horii H, Nemat-Nasser S. Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition [J]. Phil Trans R Soc Lond A, 1987,319:337-374.

# Dynamic study on anti-collapse design for underground structures subjected to explosion

Yang Liming, Zhou Fenghua, Dong Xinlong, Wang Lili

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

[**Abstract**] Under explosive loading, a tensile stress wave is a main cause to induce spalling collapse of concrete protective structures. The tensile strength of material is a most important parameter to be considered in structural design against the collapse under explosion. How to reduce the strength of tensile stress wave is a key problem for underground protective structure designers to solve. Formulations, that are often used currently to describe the minimum deepness of underground protective structure against spalling collapse, were deduced based on many assumptions for simplification. The structural characteristics, the propagation of shock waves and material dynamic properties are not considered in these formulations. Thus, they are not valuable to analysis precisely the protective structures against explosion, so that they must be improved. In this paper, dynamic properties of concretes and their steel fiber reinforced concretes and the collapse behavior of underground structures subjected to explosive loading are studied. The experimental results show that the anti-collapse capability of an underground structure with high strength concrete C100 is poorer than that of normal concrete C40. And the strength of reinforced concrete by 2 % steel fiber fraction in volume obvious increases and its anti-collapse (spalling) capability is also largely enhanced. However, the difference of the anti-collapse (spalling) capability between reinforced C100 concrete and reinforced C40 concrete with same steel fiber fraction is very small. Furthermore, the dynamic mechanism of anti-collapse design of underground structures subjected to explosive loading has been investigated also in this paper by using one-dimensional stress wave theory. The analysis represents that “sandwich composite structure” can obvious increase the anti-collapse strength of underground protective structures subjected to explosive loading.

[**Key words**] underground protective structure; concrete tensile properties; anti-collapse; stress waves