

文章编号: 1001-1455(2005)06-0519-09

冲击载荷下混凝土动态力学性能研究进展*

王政^{1,2},倪玉山¹,曹菊珍²,张文¹

(1. 复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 系统总结了国内外研究者在混凝土动态抗压强度、抗拉强度和平板冲击实验研究方面所取得的最新进展,在此基础上分析了适用于冲击问题的混凝土本构模型的构建要素。对有代表性的用于数值模拟冲击问题的几个混凝土本构模型,如 J-H 模型、Forrestal 模型、RHT 模型和 Malvar 模型等。从极限面、状态方程以及损伤的定义及其演化等方面进行了深入分析,据此分析总结了混凝土动态本构模型的研究状况及发展趋势。

关键词: 爆炸力学;冲击;混凝土;本构模型

中图分类号: O383.3

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

混凝土材料是一种应用广泛的传统工程材料,也是国防及重要基础设施的主要原料。近年来,钻地武器研制以及国防工程建设的需要大大推动了混凝土动态力学性能的研究。

高速碰撞或爆炸与冲击作用时冲击载荷的复杂性对混凝土动态力学性能的研究提出了挑战性的要求。在载荷作用点附近,受载介质处于大变形、高应变率和高静水压力状态。在远离载荷作用处,围压效应减弱而多轴应力效应非常明显,处于复杂的应力状态。另外,在自由边界处,压缩应力波会反射形成拉伸卸载应力波,因此介质内部会发生压缩和拉伸应力波的相互作用。压缩应力和拉伸应力在材料内部作用产生不同性质和不同程度的内部损伤和破坏,对材料性能产生复杂的影响。因此,构建描述冲击载荷作用下的混凝土动态力学性能的本构模型,需要考虑动态效应、内部拉、压损伤和各种复杂应力状态等因素。这与数值模拟计算中本构模型形式简单、易于嵌入和离散迭代计算简单而又准确的要求形成尖锐矛盾。

混凝土本构模型的发展与其材料力学性能实验的发展紧密相联。目前已有许多单轴应力状态和单调比例加载下的多轴应力状态的混凝土力学性能实验结果,另外也有大量单轴应力或单轴应变状态的动态力学性能实验结果。但是,目前极其缺乏应力途径不断变化的混凝土力学性能实验结果,另外还没有多轴应力状态的混凝土动态力学性能实验结果。与此相对应,静态单轴应力状态的混凝土本构模型,即单轴受压和受拉时的应力-应变关系比较明确,可以相当准确地在实验中测定,并用合理的经验回归式加以描述。即使如此,仍然因为混凝土材质的离散、变形成分的多样和影响因素的众多等而在一定范围内变动^[1]。而混凝土在复杂应力状态尤其是冲击等动态载荷作用下的本构模型的研究则要复杂得多,目前依然处于探索研究阶段。

本文中,首先系统总结了国内外关于混凝土动态力学性能的实验研究状况,然后根据混凝土多轴应力状态的实验和动态实验的结果,通过对几个有代表性的已经用于数值模拟冲击问题的混凝土本构模型的分析 and 总结,讨论建立冲击载荷下混凝土本构模型需要着重注意的问题。

* 收稿日期: 2004-10-10; 修回日期: 2005-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372024);NSAF 基金项目(10576010)

作者简介: 王政(1972—),男,博士研究生,副研究员。

2 混凝土动态力学性能实验研究

2.1 抗压强度应变率敏感性

国外很早就有人进行混凝土动态单轴抗压强度的实验研究。早期多采用液压加压法或落锤实验方法, B. Bresler 等^[2]、J. Takeda 等^[3]所用的液压加压法能达到的应变率为 1 s^{-1} 。B. P. Hughes 等^[4~5]、D. Watstein 等^[6]所用落锤实验方法能达到的应变率为 10 s^{-1} , 由于落锤本身的惯性, 所测得的实验结果很难确保是材料动态性能的真实反应。L. E. Malvern 等^[7]、C. A. Ross 等^[8~10]与 D. L. Grote 等^[11]使用 SHPB (Split Hopkinson pressure bar) 方法进行混凝土动态力学性能实验。SHPB 实验减少了试件惯性效应的影响, 另外其加载应变率达到 10^3 s^{-1} , 使我们对混凝土材料的应变率敏感性有了一个新的认识。同金属材料相比, 混凝土的 SHPB 实验有较大的难度, 主要问题是为满足均匀性要求, 混凝土试件的尺寸较大, 但为克服结构惯性效应的影响, SHPB 实验要求使用小尺寸试件。所以, 在实验数据的分析与处理中要密切注意对结构惯性效应和材料的应变率效应的解耦分析。另外, 为减少实验结果的离散性, 混凝土 SHPB 实验要求试件的加工精度要高, 需要对同一批次的试件进行多次重复实验。

最近几年, 国内许多学者也利用各种方法进行了混凝土动态抗压性能的实验研究。1997 年, 董毓利等^[12]在 MTS 电液伺服系统上完成了应变率在 $10^{-5} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 之间混凝土受压等应变率全过程的实验研究。2000 年, 严少华等^[13]采用变截面大尺寸压杆, 对直径分别为 72、62 mm 的高强混凝土试件进行了 SHPB 实验, 得到了应变率在 $28 \sim 158 \text{ s}^{-1}$ 之间的应力-应变全过程曲线。2001 年, 胡时胜等^[14]利用直锥变截面式 74 mm 直径的压杆进行了混凝土 SHPB 实验, 最高应变率为 85 s^{-1} 。2002 年, 王道荣等^[15]研究了四种不同骨料尺寸的普通混凝土材料和两种不同配比的钢纤维增强混凝土材料在冲击载荷下的动态抗压强度。2002 年, 吕培印等^[16]利用大型液压伺服静、动实验系统对普通混凝土试块进行了 4 种数量级加载速率下混凝土轴向压缩实验, 测得了混凝土动态抗压强度。

众多实验结果表明: SHPB 方法已经成为应变率在 10^3 s^{-1} 量级的混凝土动态实验的主要方法; 混凝土抗压强度随应变率提高而增加, 应变率不同的应力-应变全过程曲线具有较好的相似性, 如图 1 所示; 应变率效应有一定的阈值条件, 应变率为 10^2 s^{-1} 以下时, 动静抗压强度比与应变率的对数成线性关系, 但在 10^2 s^{-1} 以上时有急剧升高, 如图 2 所示。

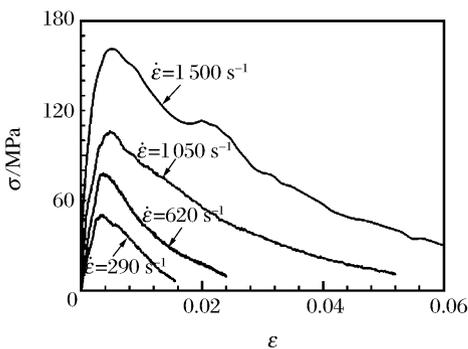


图 1 不同应变率时的应力-应变关系^[11]

Fig. 1 Relation between stress and strain with different strain rate^[11]

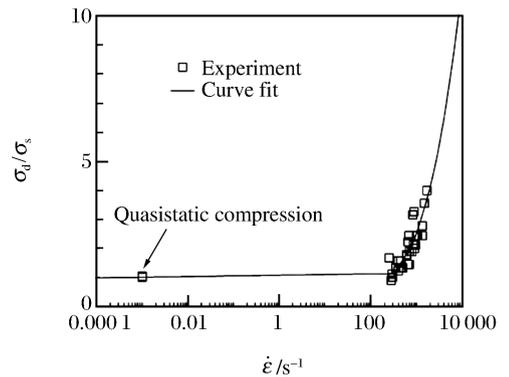


图 2 动静强度比与应变率关系^[11]

Fig. 2 Relation between dynamic/static strength and strain rate^[11]

2.2 抗拉强度应变率敏感性

混凝土的高应变率动态拉伸性能需要利用 SHPB 劈拉实验进行研究, 由于难度较大, 关于抗拉强度对应变率敏感性的实验结果较少。国内黄承逵等^[17]的实验结果如图 3 所示, 即抗拉强度随着应变率的增加而提高, 但是实验的应变率比较低。J. R. Klepaczko 等^[18]进行了干混凝土和湿混凝土的动态抗拉强度实验, 他们所用干混凝土和湿混凝土准静态抗拉强度分别是 0.5 MPa 和 0.4 MPa, 给出了应变率直到 10^2 s^{-1} 的结果, 也同其他人的结果进行了比较, 如图 4 所示。

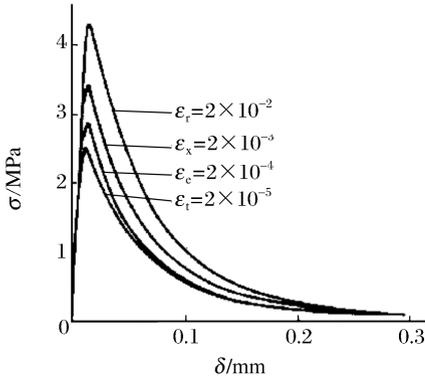


图 3 不同应变率时抗拉强度与变形的关系^[17]

Fig. 3 Relation between tension strength and strain with different strain rate^[17]

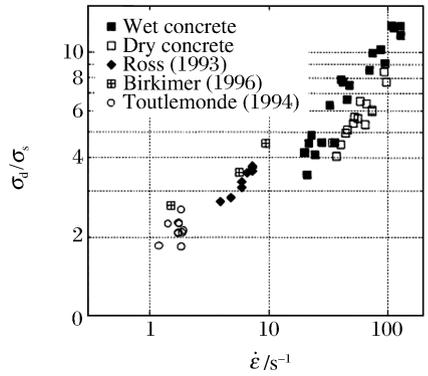


图 4 动、静态抗拉强度比与应变率关系^[18]

Fig. 4 Relation between dynamic/static tension strength and strain rate^[18]

另外, M. E. Kipp 等^[19]给出混凝土平均动态层裂强度为 30 MPa, 这与 J. R. Klepaczko 等^[18]的结果是基本一致的。由此可见, 混凝土抗拉强度也随应变率的提高而增加。

2.3 平板冲击实验

SHPB 实验中的应变率量级为 10^3 s^{-1} , 更高应变率的实验通常采用平板冲击方法。平板冲击实验能够给出 10^4 s^{-1} 以上应变率条件下的混凝土强度^[12], 但是由于平板冲击实验中的试件处于一维应变状态, 高应变率也伴随着很高的围压效应, 所以实验中混凝土强度的提高既有应变率效应, 又有压力效应, 压力和应变率效应的解耦分析很困难。

目前混凝土平板冲击实验的一个主要目的是进行高压状态方程的研究, 即利用其测定的冲击绝热数据拟合混凝土在内部空隙压实后的状态方程参数, V. G. Gregson^[20]、D. E. Grady^[21~22]、E. J. Rinehart 等^[23]、严少华等^[24]等对此进行了深入细致的研究。众多实验表明, 混凝土材料的冲击绝热关系也可以用 $S = C + \lambda u_p$ 的形式拟合, 其中 S 是冲击波速度, u_p 是波后粒子速度, C 和 λ 为参数。

3 混凝土动态本构模型分析

3.1 模型分析

多轴应力状态下混凝土本构模型的研究非常复杂, 塑性模型和塑性损伤模型是近年来不断发展完善并得到很大应用的两类模型。塑性模型有较成熟的热力学理论框架, 也能够一定程度上给出若干反映材料力学性能的结果, 如弹性区域、失效条件、应变硬化效应等。但塑性本构模型不能描述诸如微裂纹的长大导致材料强度和刚度的下降以及由于微裂纹的闭合导致材料刚度的增加等效应。另外, 在防护工程等冲击问题中, 除了内部损伤对材料性能的影响之外, 常常需要研究混凝土结构自身的损伤和失效问题, 这就需要利用损伤力学的分析方法建立塑性损伤本构模型。混凝土内部存在的大量微裂纹及微空隙在加、卸载过程中的扩展、汇聚或者闭合的过程非常复杂, 而现代损伤力学的分析方法并不完善, 建立符合连续介质损伤力学理论又便于工程应用的混凝土材料的塑性损伤模型非常困难。

目前已经用于数值模拟冲击问题的混凝土本构模型主要有以下几个:

J-H 模型: T. J. Holmquist 等^[25]提出的用于混凝土靶板冲击侵彻问题数值计算的混凝土本构模型, 国内也称为 H-J-C 模型。这是目前在国内被引用最多的一个模型, 国内很多学者^[26~28]在此基础上进行了冲击侵彻过程中混凝土材料的本构模型及数值模拟计算的研究工作。

Forrestal 模型: 该模型是对 Johnson-Cook 金属强度模型略加修改后得到的, 其中考虑了压力的非线性效应及温度的影响^[29]。孙宇新等^[30]用此模型进行了半无限厚混凝土靶的冲击侵彻计算, 李永池等^[31]考虑了塑性应变效应并对上述强度模型作了改进。

RHT 模型: 由 W. Riede 等^[32]研究提出。N. Heider 等^[33]用此模型进行了射流及动能弹对混凝土靶侵彻问题的数值计算。

Malvar 模型;该模型由 L. J. Malvar 等^[34]在 LS-DYNA 软件原混凝土及地质材料本构模型的基础上改进而成,现为 LS-DYNA 软件中的混凝土损伤本构模型。L. Ågårdh^[35]等用该模型计算了钢筋混凝土靶的穿透问题,曹德青等^[36]进行了确定钢筋混凝土的模型参数及有关侵彻的数值模拟研究。

以上几个混凝土本构模型目前主要应用在混凝土侵彻问题的数值模拟方面^[25~36],能够适当地反映对弹体的阻力起重要作用的混凝土强度效应,但是难以描述混凝土靶的破坏效应(如众多的大小裂纹以及混凝土靶板正面和背面的碎裂现象等)。当然,这个问题不仅同混凝土本构模型密切相关,也同所用的计算方法密切相关。

以上模型基本反映了目前对混凝土动态本构模型的认识,主要就以下四个方面对其进行分析。

3.1.1 极限面

极限面是塑性理论建立材料本构模型的重要依据。极限面在应力空间是三维曲面,由于不便绘制图形及分析结果,因此经常在包含静水压力轴的平面(通常为等效应力和压力面)和垂直于静水压力轴的偏平面(即 π 平面)上分析其投影曲线。

J-H 模型和 Forrestal 模型的极限面都由 Johnson-Cook 金属模型改进而来,分别是

$$\sigma = [A(1 - D) + Bp^N](1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

$$\sigma = (1 - D)(1 + B_1 p + B_2 p^2)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \quad (2)$$

式中: σ 、 p 和 $\dot{\epsilon}$ 分别为量纲一化的等效应力、压力和应变率; D 为各向同性标量损伤度; T 为温度;其它量均为模型参数。

从式(1)和式(2)可以看出:对极限面的应变率强化效应,J-H 模型和 Forrestal 模型均由对数函数描述;对极限面的压力依赖性,J-H 模型由指数函数描述,Forrestal 模型由二次多项式描述,其物理实质是相同的;这两个模型对屈服极限面描述的不同之处在于 J-H 模型考虑了残余强度效应,Forrestal 模型则考虑了温度软化效应。

RHT 模型和 Malvar 模型对极限面的描述更为细致,都假设有三个极限面,即屈服极限面、最大极限面和残余强度极限面,分别代表混凝土的初始屈服强度、峰值失效强度及峰值后的残余强度。

RHT 模型极限面如图 5 所示。其残余强度极限面为压力的指数函数,屈服极限面的思想类似帽盖模型。最大极限面函数为

$$\sigma_{\max} = |A(p - B \dot{\epsilon}^\alpha)^N| \dot{\epsilon}^\alpha R_\theta \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 N 、 α 为参数, α 在拉伸和压缩时取不同值。 R_θ 是八面体剪应力角 θ ($0 \leq \theta \leq \pi/3$) 以及拉伸和压缩子午线之比 $e(p)$ 的函数

$$R_\theta = \frac{2(1 - e^2)\cos\theta + (2e - 1)\sqrt{4(1 - e^2)\cos^2\theta - 4e + 5e^2}}{4(1 - e^2)\cos^2\theta + (1 - 2e)^2} \quad (4)$$

R_θ 能够反映混凝土拉、压强度有很大差异的性能。通过加入 R_θ 的描述,RHT 模型的极限面在应力空间的偏平面上将不再是前面 J-H 模型和 Forrestal 模型的圆形,而是一个三折对称的形状,其每隔 $\pi/3$ 角度之间的曲线是椭圆。 (R_θ, θ) 从拉伸 $(e, 0)$ 到压缩 $(1, \pi/3)$ 之间变化。 $e(p)$ 的变化范围是 $1/2 \sim 1$,即随着压力 p 的增大,偏平面上的极限面逐渐变化到圆形。RHT 模型中的函数采用线性函数。

Malvar 模型极限面如图 6 所示。Malvar 模型的三个极限面都采用式(5)的分式函数反映压力效应

$$f(p) = a_0 + p/(a_1 + a_2 p) \quad (5)$$

通过对参数 a_0 、 a_1 和 a_2 取不同值表示不同的极限面。

Malvar 模型极限面也考虑应变率敏感性,如 C 为应变率强化倍数,则极限面调整为

$$f_{\text{new}}(p) = Cf(p/C) \quad (6)$$

另外,Malvar 模型也采用式(4)来反映 θ 对极限面的影响。不同于 RHT 模型的是函数 $e(p)$ 采用更为复杂的分段线性函数,能够更好地拟合不同应力状态实验中拉伸和压缩子午线之比。

从图 5 和图 6 可以看出,RHT 模型和 Malvar 模型对初始屈服极限面和残余强度极限面的描述并

不相同。RHT 模型的初始屈服极限面类似帽盖模型，Malvar 模型则考虑了压力很高时的脆韧转化机制。这两个模型在最大载荷之前，当前加载面由屈服极限面和最大极限面的差值得到。峰值后考虑损伤软化效应，当前加载面由残余极限面和最大极限面用损伤差值计算得到。据此可以对混凝土弹性、塑性和失效后软化变形等进行定性描述。

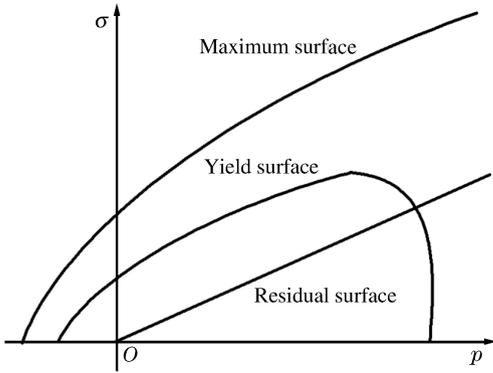


图 5 RHT 模型极限面示意图

Fig. 5 Failure surfaces of RHT model

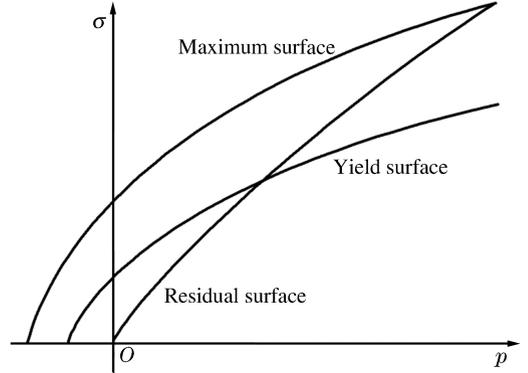


图 6 Malvar 模型极限面示意图

Fig. 6 Failure surfaces of Malvar model

3.1.2 状态方程

动力分析的数值计算程序一般将体积改变和形状改变分开考虑，材料本构模型也分为体积响应和畸变响应两部分。畸变响应利用上述极限面通过塑性理论确定，体积响应则用所谓状态方程描述。J-H 模型采用三段多项式状态方程^[25]，Forrestal 模型采用 Murnagham 状态方程^[26]，RHT 模型采用 Grüneisen 状态方程^[31]，Malvar 模型采用表控状态方程模型^[34]。其中，J-H 模型中的三段多项式状态方程考虑了混凝土材料中裂纹和空隙的压实效应，考虑了塑性体积变化，应用也比较方便。

3.1.3 损伤定义及其演化

J-H 模型和 RHT 模型都认为损伤是塑性应变的累积

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (\rho + T^*)^{D_2}} \quad (7)$$

式中： $\Delta \epsilon_p$ 是等效塑性应变增量； $\Delta \mu_p$ 是塑性体积应变增量； T^* 是量纲一化的拉伸强度； D_1 、 D_2 为参数。损伤度 D 随塑性应变的累积而增长。

Malvar 模型对此加以改进，将剪切变形损伤和三向等拉时体积变形损伤分开，剪切变形损伤又考虑拉伸和压缩的不同情形，同时考虑应变率效应。定义修正的等效塑性应变

$$\lambda = \begin{cases} \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{C(1 + p/Cf_t)^{\alpha_1}} & p \geq 0 \\ \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{C(1 + p/Cf_c)^{\alpha_2}} & p < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： f_t 为拉伸强度； C 是应变率强化倍数； α_1 、 α_2 为控制拉、压时的损伤参数。

为了描述三向等拉载荷作用时的损伤，考虑修正的等效塑性应变的增量

$$\Delta \lambda = \sum \alpha_3 f_d k_d (\epsilon_v - \epsilon_{v,yield}) \quad (9)$$

式中： k_d 是内变量因子； ϵ_v 是体积应变； $\epsilon_{v,yield}$ 是屈服点的体积应变； α_3 为参数； f_d 是将应力路径限制在三向等拉附近的因子

$$f_d = \begin{cases} 1 - |\sqrt{3J_2}/p| / 0.1 & 0 \leq |\sqrt{3J_2}/p| < 0.1 \\ 0 & |\sqrt{3J_2}/p| \geq 0.1 \end{cases} \quad (10)$$

Forrestal 模型将损伤 D 定义为单位长度内裂纹的长度所占的比例，应用断裂力学对于裂纹扩展的分析方法，给出损伤的演化方程为

$$\dot{D} = (1 - \nu^2) \pi (\sigma^2 - \sigma_c^2) c_R D / (2AE) \quad (11)$$

式中： ν 为泊松比； A 为单位面积表面能； E 为弹性模量； σ_c 为阈值应力； c_R 为表面波速。

Forrestal模型损伤的演化方程虽然有关于裂纹扩展的细观分析基础,但是该模型利用各种假设进行了很大简化,最后给出宏观的表达式(11),其关键参数很难利用实验和理论方法来确定。

3.2 模型分析小结

由模型分析可见,用于冲击问题数值模拟的混凝土动态本构模型在静态多轴模型的基础上有发展:

(1) 基本继承了静态模型的成果。屈服面的表达式(1)、(2)、(5)中有关压力效应的三种函数(指数函数、多项式函数、分式函数)是现有模型的基本代表,可以据此较好地拟合实验数据。

(2) 三个极限面的模型能够较好地体现混凝土具有初始屈服强度、峰值失效强度以及峰值后的残余强度的特点。RHT模型和Malvar模型的屈服面考虑了 θ 角对极限面的影响,与混凝土多轴材料力学性能实验相符。

(3) 屈服面在静态模型的基础上考虑动态的应变率效应。描述方式选用对数函数、指数函数以及线性函数,见表达式(1)、(3)、(6)。

(4) 采用损伤力学的基本描述方法,考虑混凝土内部损伤对屈服面及弹性模量的影响。

以上几个模型还有待研究改进的主要方面是:

(1) 应变率效应。混凝土动态实验表明应变率效应有阶段性的特点^[11],而且单轴拉伸和单轴压缩时应变率效应的影响程度不同^[18]。同时,动态力学性能实验中压力和应变率效应经常相互耦合,所以确定应变率效应描述函数及其参数时需要对接压力与应变率效应进行解耦分析。另外,关于应变率强化效应的本质机制,有的是由于高应变率时混凝土内部的粗骨料的强度效应造成的^[11],也有的人认为是摩擦效应与惯性效应等造成的^[37~41]。J. F. Georgin等^[42]提出可以利用有限元法对此问题进行分析。

(2) 损伤模型。从损伤力学的观点看,以上几个混凝土本构模型还主要是经验的唯象模型,缺乏严格的有充分细观分析的理论基础。损伤的定义、演化及其在本构模型中的影响还需要进一步在细观分析的基础上研究改进。另外,混凝土是复合材料,有很强的非均匀性以及各向异性的性质,在均匀的、各向同性的单一介质这个假设下,本构模型无法揭示混凝土内部结构与材料性能的关系,发展受到了很大的限制。值得注意的是:S. W. Park等^[43]将混凝土看作一定比例的粗骨料与水泥砂浆的随机混合物,对混凝土平板冲击问题进行了成功的数值模拟,这是宏细观相结合的混凝土本构模型研究的一个重要进展。朱万成等^[44]对相关的研究进行了总结,也给出了自己的部分计算结果。

(3) 其他力学性能。以上混凝土本构模型对冲击载荷作用下的其它一些重要的力学效应还缺乏细致考虑,如循环加载和卸载问题、容变量与畸变量的相互耦合(即压力与路径相关)问题以及混凝土中空隙的扩展与闭合的影响问题等。M. B. Rubin等^[45~46]和倪玉山等^[47]推导的弹粘塑性损伤本构模型既分解了球形应力和偏斜应力又考虑了容变量与畸变量的耦合问题。该本构模型物理概念清楚,并完全纳入不可逆热力学的基本框架内,可为进一步深入研究混凝土损伤本构模型提供研究方向。

4 总 结

综上所述,近年来混凝土在冲击载荷下动态力学性能的研究在实验与本构模型两个方面都取得了重要成果,也还需要继续深入研究。

实验方面的基本现状是SHPB方法已经比较成熟,成为应变率在 10^3 s^{-1} 之内的混凝土动态实验的主要方法。平板冲击方法也在广泛使用,其应变率可以达到 10^4 s^{-1} 以上,已经接近实际高速冲击载荷下的条件。但是,目前还没有复杂应力载荷下的混凝土动态实验。L. W. Meyer^[48]与C. Albertini等^[49]已经开展了钢材料在双轴载荷下的动态行为的研究,我们期待着混凝土材料这方面的研究也有所进展。

混凝土本构模型研究中,压力依赖性、应变率敏感性及损伤软化特性之间的相互耦合机制是研究的重点与难点。均匀的、各向同性的单一介质这个假设限制了对混凝土材料本质特性的认识,将来的研究需要进入到一个多尺度的、非均匀的、各向异性复合材料这样一个新的层次中去。

参考文献:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [2] Bresler B, Bertero V V. Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression[A]. Heidebrecht A C, Emery J J, Speirs J W, et al, ed. Proceedings of Second Canadian Conference on Earthquake Engineering[C]. Ontario,Hamilton: McMaster University, 1975:1-13.
- [3] Takeda J, Tachikawa H. The mechanical properties of several kinds of concrete at compressive, tensile, and flexural tests in high rates of loading[J]. Transactions of the Japan Architect Institute, 1962,77:1-6.
- [4] Hughes B P, Gregory R. Concrete subjected to high rates of loading in compression[J]. Magazine of Concrete Research, 1972, 24(78): 25-36.
- [5] Hughes B P, Watson A J. Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading[J]. Magazine of Concrete Research, 1978,30(105):189-199.
- [6] Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1953,49(8):729-744.
- [7] Malvern L E, Jenkins D A, Tang T, et al. Dynamic compressive testing of concrete[A]. Ross C A, Thompson P Y, ed. Proceedings of Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures[C]. Florida: U. S. Department of Defense,1985:194-199.
- [8] Ross C A, Thompson P Y, Tedesco J W. Split-Hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression[J]. ACI Materials Journal, 1989,86(5):475-481.
- [9] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of strain rate on concrete strength[J]. ACI Materials Journal, 1995,92(1):37-47.
- [10] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W, et al. Moisture and strain rate effects on concrete strength[J]. ACI Materials Journal, 1996,93(3):293-300.
- [11] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25(3):869-886.
- [12] 董毓利,谢和平,赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型[J]. 水利学报,1997(7):72-77. DONG Yu-li, XIE He-ping, ZHAO Peng. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rate[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(7):72-77.
- [13] 严少华,段吉祥,尹放林,等. 高强混凝土 SHPB 实验研究[J]. 解放军理工大学学报,2000,1(3):6-9. YAN Shao-hua, DUAN Ji-xiang, YIN Fang-lin, et al. SHPB test on high-strength concrete[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000,1(3):6-9.
- [14] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学,2001,18(5):115-126. HU Shi-sheng, WANG Dao-rong, LIU Jian-fei. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2001,18(5):115-126.
- [15] 王道荣,胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响[J]. 实验力学,2002,17(1):23-27. WANG Dao-rong, HU Shi-sheng. Influence of aggregate on the compression properties of concrete under impact [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002,17(1):23-27.
- [16] 吕培印,宋玉普. 混凝土动态压缩实验及其本构模型[J]. 海洋工程,2002,20(2):43-48. LU Pei-ying, SONG Yu-pu. Dynamic compressive test of concrete and its constitutive model[J]. The Ocean Engineering, 2002,20(2):43-48.
- [17] 黄承逵,赵国藩,尚仁杰,等. 动荷载下混凝土强度变形特性及其实验方法的研究[J]. 水电站设计,1997,13(1):17-22. HUANG Cheng-kui, ZHAO Guo-fan, SHANG Ren-jie, et al. Research on concrete strength and deformation behavior under dynamic loading and its test methods[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1997,13(1):17-22.
- [18] Klepaczko J R, Brara A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(4):387-409.
- [19] Kipp M E, Chhabildas L C, Reinhart W D. Elastic shock response and spall strength of concrete[A]. Schmidt S C, Dandekar D P, Forbes J W, et al, ed. Proceedings of Tenth American Physical Society Topical Conference on

- Shock Compression of Condensed Matter[C]. New York: American Institute of Physics, 1998:557—560.
- [20] Gregson V G. A shock wave study of fondu-fyre WA-1 and concrete[M]. USA: Defense Nuclear Agency, 1972.
- [21] Grady D E. Impact compression properties of concrete[A]. Merkle D H, ed. 6th International Symposium on Interaction of the Effects Munitions with Structures[C]. Panama City, Florida: University of Florida, 1993:173—175.
- [22] Grady D E. Shock equation of state properties of concrete[A]. Jones N, Brebbia C A, Watson A J, ed. Structures under Shock and Impact IV[M]. Southampton Boston: Computational Mechanics Publications, 1996:405—414.
- [23] Rinehart E J, Welch C R. Material properties testing using high explosive[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,17(1—3):673—675.
- [24] 严少华,钱七虎,周早生,等. 高强混凝土及碳纤维高强混凝土高压状态方程的实验研究[J]. 解放军理工大学学报,2000,1(6):49—53.
YAN Shao-hua, QIAN Qi-hu, ZHOU Zao-sheng, et al. Experimental study of equation of state for high-strength concrete and high-strength fiber concrete[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000,1(6):49—53.
- [25] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[A]. Michael J M, Joseph E B, ed. 14th International Symposium on Ballistics [C]. Quebec, Canada:[s. n.], 1993:591—600.
- [26] 曹菊珍,周淑荣,李恩征. 材料的本构关系在数值计算中的作用[J]. 兵工学报,1998,19(1):69—72.
CAO Ju-zhen, ZHOU Shu-rong, LI En-zheng. Effect of the constitutive relation of material in numerical computation[J]. ACTA ARMAMENTARII, 1998,19(1):69—72.
- [27] 陈书宇. 一种混凝土损伤模型和数值方法[J]. 爆炸与冲击,1998,18(4):349—357.
CHEN Shu-yu. A concrete damage model and numerical methods[J]. Explosion and Shock Waves, 1998,18(4):349—357.
- [28] 曹菊珍,李恩征,王政. 高速碰撞中有关混凝土与沙岩的破损问题的数值研究[J]. 计算物理,2002,19(2):137—141.
CAO Ju-zhen, LI En-zheng, WANG Zheng. Numerical study on damage of concrete and rock in the high velocity impact[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002,19(2):137—141.
- [29] Forrestal M J, Luk V K, Watts H A. Penetration of reinforced concrete with ogive-nose penetrators[J]. International Journal of Solids & Structures, 1988,24(1):77—87.
- [30] 孙宇新. 混凝土抗贯穿问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2002.
- [31] 李永池,袁福平,胡秀章,等. 卵形头部弹丸对混凝土靶板侵彻的二维数值模拟[J]. 弹道学报,2002,14(1):14—19.
LI Yong-chi, YUAN Fu-ping, HU Xiu-zhang, et al. The 2-D numerical simulation on penetration of an ovalheaded projectile into concrete targets[J]. Journal of Ballistics, 2002,14(1):14—19.
- [32] Riedel W. Beton unter dynamischen Lasten Meso-und makromechanische Modelle und ihre Parameter[D]. Freiburg, Germany:Phd Thesis, Ermst-Mach-Institut, 2000.
- [33] Heider N, Hiermaier S. Numerical simulation of tandem warheads[A]. Iris Rose Crewther, ed. 19th International Symposium Ballistics[C]. Interlaken, Switzerland:Thun: IBS2001 Symposium Office, 2001:1493—1499.
- [34] Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(9):847—873.
- [35] Ågårdh L, Laine L. 3D FE-simulation of high-velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,22:911—922.
- [36] 曹德青. 钢筋混凝土侵彻问题数值计算[D]. 北京:北京理工大学,2001.
- [37] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates[J]. Materials Structure,1991,24(144):425—450.
- [38] Bischo P H, Perry S H. Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995,121(6):685—693.
- [39] Kotsovovs M D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behavior of concrete in compression[J]. Materials

Structure, 1983, 16(91):3-12.

- [40] Tang T, Malvern L E, Jenkins D A. Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(1):108-124.
- [41] Rossi P. Strain rate effects in concrete structures: The LCPC experience[J]. Materials Structure, 1997, 30:54-62.
- [42] Georgin J F, Reynouard J M. Modeling of structures subjected to impact: concrete behavior under high strain rate [J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25:131-143.
- [43] Park S W, XIA Q, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures II: numerical simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25:887-910.
- [44] 朱万成, 赵启林, 唐春安, 等. 混凝土断裂过程的力学模型与数值模拟[J]. 力学进展, 2002, 32:579-598.
ZHU Wan-cheng, ZHAO Qi-lin, TANG Chun-an, et al. Mechanical model and numerical simulation of fracture process of concrete[J]. Advances of Mechanics, 2002, 32:579-598.
- [45] Rubin M B. Plasticity theory formulated in terms of physically based microstructural variables—Part I: Theory [J]. International Journal of Solids & Structures, 1994, 31(19):2615-2634.
- [46] Rubin M B, Vorobiev O Yu, Glenn LA. Mechanical and numerical modeling of a porous elastic-viscoplastic material with tensile failure[J]. International Journal of Solids & Structures, 2000, 37(13):1841-1871.
- [47] 倪玉山, 曹菊珍. 混凝土冲击侵彻破坏的弹粘塑性本构方程[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(增刊):65-66.
Ni Yu-shan, Cao Ju-zhen. Elastic visco-plastic constitutive equation of concrete with damage of impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(suppl):65-66.
- [48] Meyer L W. Dynamic material behavior under biaxial loading[A]. Staudhammer K P, Murr L E, Meyers M A, ed. Proceedings of International Conference on Fundamental Issues and Applications of Shockwave and High-strain-rate Phenomena(EXPLOMET2000)[C]. New York:Essevier, 2001.
- [49] Albertini C, Solomos G, Labibes K, et al. Bixaial Hopkinson bar tensile testing of a nuclear steel[A]. Staudhammer K P, Murr L E, Meyers M A, ed. Proceedings of International Conference on Fundamental Issues and Applications of Shockwave and High Strain Rate Phenomena(EXPLOMET2000)[C]. New York:Essevier, 2001.

Recent advances of dynamic mechanical behavior of concrete under impact loading

WANG Zheng^{1,2*}, NI Yu-shan¹, CAO Ju-zhen², ZHANG Wen¹

(1. Department of Mechanics and Engineering Science,
Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: The recent results of dynamical experiments of uni-axile compression, tension and planar impact on concrete are concluded. Several representative constitutive models such as J-H, Forrestal, RHT and Malvar which recently used in numerical simulation on impact and penetration problems are introduced and studied by the way of analysis on limit surfaces, equation of state, definition and evolvement of damage. And some comments are made on the development trends of dynamic mechanical behavior of concrete at last.

Key words: mechanics of explosion; impact; concrete; constitutive model

* Corresponding author: WANG Zheng
E-mail address: wang_zheng@iapcm.ac.cn
Telephone: 010-62014411-2655