混凝土材料非线性多轴动态强度准则

杜修力, 王国盛, 路德春*

北京工业大学岩土与地下工程研究所, 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124

* E-mail: dechun@bjut.edu.cn

收稿日期: 2014-04-02; 接受日期: 2014-09-23

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(编号: 2011CB013600)和国家自然科学基金(批准号: 51421005, 51278012)资助项目

摘要 将广义非线性强度理论的 4 个材料参数转化为混凝土材料的基本强度参数, 通过混凝土材料的基本强度特性, 分析了 4 个材料参数的变化规律与取值范围. 基于 S 准则建立了混凝土材料 4 个基本强度参数的率效应表达式, 建立了混凝土材料的非线性多轴动态强度准则, 分析了动态强度参数的率效应规律, 结果表明, 混凝土材料的强度特性随着应变率的提高, 逐渐向金属材料的强度特性过渡, 在应变率从 $-3 \sim 3$, 应变率对混凝土动态强度的影响较大, 并且动强度不是随着应变率的提高无限增大的, 而是存在动强度峰值. 通过与 3 组双轴压-压和 2 组双轴拉-压动态加载时混凝土材料试验结果的比较, 表明非线性多轴动态强度准则可较好地描述混凝土材料双轴动强度规律. 在同一应变率下, 可较好地描述强度的非线性特性; 不同应变率下, 动强度面互不相交, 即应变率效应与多轴应力状态对强度规律不存在耦合影响.

关键词

混凝土
应变率效应
广义非线性
强度理论
S 准则
多轴动态强度
准则

1 引言

自 1917 年 Abrams^[1]首次发现混凝土材料的应变率效应以来, 混凝土材料的动态力学特性一直备受关注, 不仅是常见的工程问题, 在地震、冲击、爆炸等工程中广泛应用, 同时也是速率相关塑性力学研究的主要内容之一. 近年来, 土木工程防灾减灾以及国防工程建设的需要, 极大地推动了混凝土材料速率相关特性的研究^[2~7]. 高速碰撞、爆炸或冲击荷载作用时, 动态荷载与混凝土相互作用的复杂性对混凝土材料率相关特性的研究提出了新的挑战, 其问题是在荷载作用点附近, 受载介质处于大变形、高应变率和高静水压力状态; 在远离荷载作用点处, 混凝土材料应变率效应减弱而处于复杂的多轴应力状态.

解决此类问题的关键就在于如何获得不同位置处混凝土材料的真实应变率, 以及某一应变速率下混凝土材料的峰值强度.

混凝土材料的力学特性非常复杂, 表现为三维非线性特性, 并具有软化、剪胀现象, 一般基于连续介质力学原理利用宏观力学方法研究. 现已取得较为成熟的研究成果, 主要集中在静态力学特性与本构理论方面, 如静态多轴强度^[8,9]与变形^[10,11]、强度准则^[12,13]与本构模型^[14]等. 相对而言, 混凝土材料的动态力学特性研究远没有静态力学特性研究的深入和成熟, 但也取得了一些有代表性的研究成果. 早期主要利用落锤法研究混凝土材料单轴抗压强度的速率效应^[15,16], 最大应变率可达 10 s^{-1} . 1936 年 Jones 和 Richart^[17]研究了加载速率对混凝土抗压强度与弹性

引用格式: 杜修力, 王国盛, 路德春. 混凝土材料非线性多轴动态强度准则. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1319–1332

Du X L, Wang G S, Lu D C. Nonlinear multi-axial dynamic strength criterion for concrete material (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1319–1332, doi: 10.1360/N092014-00107

参数的影响; 1953 年 Watstein^[15]对混凝土圆柱体试件进行了应变率从 $10^{-6} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 的单轴抗压试验, 结果表明混凝土的强度增加了约 85%; 1995 年 Bischoff 和 Perry^[18]用落锤试验技术研究了混凝土动静态强度、断裂应变的差异, 研究表明动态单轴抗压强度随着加载速率的增加而提高. 由于落锤本身的惯性, 所测得的试验结果很难保证是材料动态性能的真实反映. SHPB(split hopkinson pressure bar)方法减少了试件惯性效应的影响, 加载速率可达 10^4 s^{-1} , 进行劈裂试验时, 可测试混凝土材料的动态单轴抗拉强度^[19-21], 研究表明动态单轴抗拉强度随着加载速率的增大而提高, 提高的幅度和增长速率都大于单轴抗压强度. 随着试验技术的发展, 已经开展了初始静水压力下的 SHPB 试验^[22]与较高应变速率下的动态三轴试验^[23,24], 并考虑了初始静载对动态强度的影响, 但尚未见真三轴加载条件下混凝土材料动强度试验成果的报道. 我国在混凝土材料动力学特性方面的研究起步较晚, 至今国家规范仍没有建议混凝土材料的动态强度准则, 现行《水工建筑物抗震设计规范(DL5073-2010)》只是简单地将混凝土材料的动态强度和动态弹性模量的标准值较其静态标准值提高 30%, 动态抗拉强度的标准值取为动态抗压强度标准值得 10%, 对混凝土材料动态特性的考虑是十分初步的.

混凝土材料的动态强度试验成果, 为建立动态强度准则奠定了基础. 研究思路主要是通过动态强度与静态强度的比较, 建立强度放大系数与应变速率的函数, 进而建立混凝土材料的动态单轴强度准则^[25,26], 最具代表性的成果即为 CEB-FIP 规范建议的双线性单轴动态强度准则^[27]. 该准则公式简单便于应用, 对于简单的动力问题可获得解析解; 其不足在于: 第一, 准则存在拐点, 拐点位置的确定现在缺乏理论依据; 第二, 双线性准则是发散、不收敛的, 即随着应变速率的提高动态强度无限增大. Stolarski 基于 Campbell 准则^[28]建立的混凝土材料非线性动态强度准则^[29], 其强度曲线连续光滑, 但仍然是发散的. 陈樟福生和李庆斌^[30]探讨了混凝土材料的双轴动态强度准则, 杜修力等人^[31]提出了混凝土材料强度增长幅值的动力增长因数与对数应变速率之间关系的微分方程, 进而建立了混凝土材料的非线性动态单轴强度准则, 即 J 准则, 通过引入强度增长幅值的最大动力增长因数, 将 J 准则改进为能描述混凝土材料动态峰值强度特性的 S 准则, S 准则材料参数少, 具

有统一的表达式, 强度曲线连续光滑, 且 S 准则可反映混凝土材料动态单轴极限强度. 本文将广义非线性强度理论^[32-35]的 4 个材料参数转化为混凝土材料的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、双轴抗压强度和双轴抗拉强度, 结合动态强度 S 准则, 建立单轴强度、双轴强度的速率相关表达式, 进而提出混凝土材料的广义非线性多轴动态强度准则, 并利用文献试验结果验证多轴动态强度准则的有效性.

2 广义非线性强度理论

广义非线性强度理论不是一个单一的强度理论, 而是一个非线性强度理论体系, 包含了一系列连续变化的非线性强度理论. 在主应力空间的偏平面上, 强度曲线涵盖了从下限 SMP 准则到上限 Mises 准则范围的所有区域; 子午面上为幂函数曲线, 通过 4 个相互独立的材料参数的变化实现统一, 与双剪统一强度理论对应, 完善了强度理论体系. 广义非线性强度理论可较好地反映不同类型混凝土材料的多轴非线性强度特性, 4 个强度参数均具有明确的物理意义, 分别为参考应力 p_r 处的破坏应力比 M_f , 三轴抗压强度比 α , 三向拉伸强度 σ_0 和静水压力效应指数 n . 4 个强度参数可表示为混凝土材料的基本强度, 包括单轴抗压强度 f_c , 单轴抗拉强度 f_t , 双轴抗压强度 f_{cc} 和双轴抗拉强度 f_{tt} , 将基本强度条件代入广义非线性强度理论, 获得强度参数与基本强度的函数关系, 进而将强度参数转化为基本强度.

广义非线性强度理论^[26-29]的表达式为

$$\alpha \sqrt{\bar{I}_1^2 - 3\bar{I}_2} + \frac{2(1-\alpha)\bar{I}_1}{3\sqrt{(\bar{I}_1\bar{I}_2 - \bar{I}_3)/(\bar{I}_1\bar{I}_2 - 9\bar{I}_3)} - 1} = M_f p_r \left(\frac{p + \sigma_0}{p_r} \right)^n, \quad (1)$$

式中, $\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$ 和 $\bar{I}_3$ 为过渡应力空间的应力不变量, 表达式为

$$\bar{I}_1 = \bar{\sigma}_{ij}, \quad (2)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{2}(\bar{I}_1^2 - \bar{\sigma}_{ij}\bar{\sigma}_{ij}), \quad (3)$$

$$\bar{I}_3 = \frac{1}{3}(3\bar{I}_1\bar{I}_2 - \bar{I}_1^3 + \bar{\sigma}_{ij}\bar{\sigma}_{jk}\bar{\sigma}_{ki}). \quad (4)$$

过渡应力空间的应力张量为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} + \left[p_r \left(\frac{p + \sigma_0}{p_r} \right)^n - p \right] \delta_{ij}, \quad (5)$$

式中, σ_{ij} 为原始应力空间的应力张量; $p = \sigma_{ii}/3$ 为平均应力或静水压力; δ_{ij} 为 Kronecher 符号. 广义非线性强度理论在主应力空间的强度面, 如图 1 所示, 为连续光滑的曲面.

单轴压缩荷载为三轴压缩条件, 将破坏应力状态 $(f_c, 0, 0)$ 代入(1)式, 可表示为

$$f_c = M_f p_r \left(\frac{f_c/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^n. \quad (6)$$

双轴拉伸荷载为三轴压缩条件, 将破坏应力状态 $(0, -f_t, -f_t)$ 代入(1)式得

$$f_t = M_f p_r \left(\frac{-2f_t/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^n. \quad (7)$$

将(6)除以(7)式得

$$\frac{f_c}{f_t} = \left(\frac{f_c/3 + \sigma_0}{-2f_t/3 + \sigma_0} \right)^n. \quad (8)$$

记 $m=1/n$, 代入(8)式得

$$\left(\frac{f_c}{f_t} \right)^m = \frac{f_c/3 + \sigma_0}{-2f_t/3 + \sigma_0}. \quad (9)$$

由(9)式求得 σ_0 为

$$\sigma_0 = \frac{2f_c^m f_t + f_c f_t^m}{3(f_c^m - f_t^m)}. \quad (10)$$

取参考应力为单轴压缩强度的应力条件, 即 $p_r = f_c/3 + \sigma_0$, 由(10)式得

图 1 主应力空间中的强度面

$$p_r = \frac{(2f_t + f_c)f_c^m}{3(f_c^m - f_t^m)}. \quad (11)$$

在参考应力 p_r 处确定破坏应力比 $M_f = M_c$ 为

$$M_f = \frac{3f_c}{f_c + 3\sigma_0}. \quad (12)$$

将(10)代入(12)式得

$$M_f = \frac{3f_c(f_c^m - f_t^m)}{f_c^m(f_c + 2f_t)}. \quad (13)$$

类比(6)和(7)式, 由三轴拉伸条件下的单轴拉伸和双轴压缩荷载得

$$\left(\frac{f_t}{f_{cc}} \right)^m = \frac{-f_t/3 + \sigma_0}{-2f_{cc}/3 + \sigma_0}. \quad (14)$$

对(14)式取对数, 得参数 $n=1/m$ 的表达式为

$$n = \frac{\ln f_{cc} - \ln f_t}{\ln(3\sigma_0 + 2f_{cc}) - \ln(3\sigma_0 - f_t)}. \quad (15)$$

将单轴拉伸强度条件 $(0, 0, -f_t)$ 代入(1)式, 即

$$\begin{aligned} \alpha f_t + (1-\alpha) \frac{3f_t p_r \left(\frac{-f_t/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^n}{3p_r \left(\frac{-f_t/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^n - f_t} \\ = M_f p_r \left(\frac{-f_t/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^n. \end{aligned} \quad (16)$$

化简(16)式得参数 α 为

$$\alpha = \frac{(3 + M_f) f_t p_r \left(\frac{-f_t/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^n - 3M_f p_r^2 \left(\frac{-f_t/3 + \sigma_0}{p_r} \right)^{2n}}{f_t^2}. \quad (17)$$

由(10)和(15)式联立即可确定参数 n 和 σ_0 , 再由(13)式确定参数 M_f , 进而由(17)式确定参数 α . 即广义非线性强度理论的 4 个材料参数 M_f , σ_0 , n 和 α 均可由混凝土材料的基本强度参数 f_c , f_t , f_{cc} 和 f_{tt} 确定.

2.1 三向拉伸强度

三向拉伸强度是在 3 个相等的拉伸主应力作用下的材料强度, 反映了混凝土材料的黏聚特性, 即内聚力效应, 表现为子午面上的强度曲线与静水压力轴交点与坐标原点的距离. (10)式表明, 三向拉伸强度 σ_0 可由 f_{tt} , f_c 和 m 表示, 令

$$k = f_{tt}/f_c. \quad (18)$$

大量的试验结果表明^[36], 混凝土材料单轴拉压强度比 f_t/f_c 一般介于 $1/15 \sim 1/5$. f_u 与 f_t 的值相近, 通常 f_u 小于 f_t , 本文取 k 值的范围在 $1/20 \sim 1/5$ 进行分析, 将(18)代入(10)式得

$$\frac{\sigma_0}{f_c} = \frac{2k + k^m}{3(1 - k^m)}. \quad (19)$$

(19)式表明, 三向拉伸强度 σ_0 与单轴压缩强度 f_c 的比值 σ_0/f_c 是 m 和 k 的函数, 变化规律如图 2 所示. 由图 2 可知 σ_0 的取值规律, 当静水压力效应指数 n 为常数时, σ_0 随着比值 k 的增大而增大, 且 n 值越大时, 增大的比例越大. 当 $1/20 < k < 1/5$ 时, σ_0/f_c 与 f_u/f_c 近似为线性关系, 即 σ_0 值与 f_u 相近, 一般 σ_0 略小于 f_u . 令

$$\sigma_0 = df_u. \quad (20)$$

将(20)代入(10)式得

$$d = \frac{\sigma_0}{f_u} = \frac{2 + k^{m-1}}{3(1 - k^m)}. \quad (21)$$

(21)式的变化规律如图 3 所示, 当 $1/20 < k < 1/5$ 时, d 的范围约为 $2/3 < d < 4/3$, 一般 $d < 1$, 由此可估的三向拉伸强度 σ_0 . 过镇海^[36]根据混凝土材料的强度试验结果, 也得出如下规律:

$$\sigma_0 = 0.9f_t = 0.09f_c. \quad (22)$$

2.2 静水压力效应指数

在同一子午面上, 混凝土材料的抗剪强度随着静水压力增大而增大, 但破坏剪应力比降低, 表现为非线性特性, 由静水压力效应指数描述. 在三轴压缩子午面内, 由(15)和(20)式化简得

图 2 黏聚力效应 $\sigma_0/f_c \sim f_u/f_c$ 曲线

图 3 黏聚力效应 $\sigma_0/f_c \sim f_u/f_c$ 曲线

$$n = \frac{\ln k}{\ln(3dk - 2k) - \ln(3dk + 1)}. \quad (23)$$

(23)式表明, 静水压力效应指数 n 为比值 k 和 d 的函数, 即可通过参考应力 p_r 下混凝土材料的材料参数分析 n 的变化规律. n 变化规律如图 4 所示, n 随 k 的增大而减小, 开始减小较快而后比较平缓. d 的取值不同则 n 减小的速度也不同, d 值越小, n 减小的越快. n 的取值范围介于 $0 \sim 1$, 当 $n=0$ 时, $f_u/f_c=1$, 即 $f_u=f_c$, 此时材料表现为金属的性质.

2.3 破坏应力比

广义非线性强度理论确定了某一参考应力 p_r 下的破坏应力比, 并基于一个点结合幂函数曲线描述材料的摩擦特性. 对于混凝土材料, 可取单轴压缩强度处的应力条件作为参考应力. 将(20)代入(12)式得

$$M_t = \frac{3}{1 + 3dk}. \quad (24)$$

图 4 静水压力效应 $n \sim f_u/f_c$ 曲线

(24)式表明, 参考应力 $p_r=f_c/3+\sigma_0$ 处的破坏剪应力比 M_f 是 d 和 k 的函数, 变化规律如图 5 所示. 当参数 d 为某一常数时, M_f 随着比值 f_u/f_c 的增大而减小, 参数 d 的大小对 M_f 的影响不大, 且 d 值越大对应的 M_f 越小, M_f 的最大值为 3.

2.4 三轴拉压强度比

随着静水压力增大, 混凝土材料的应力诱导各向异性减弱, 表现为偏平面上的强度曲线从三角形向圆形变化, 不同类型和标号的混凝土材料变化规律不同. 广义非线性强度理论通过三轴拉压强度比 α 描述参考应力处 p_r 偏平面上强度曲线的形状, 反映了混凝土材料的中主应力效应. (17)式表明, 三轴拉压强度比 α 可由 f_t, f_c, f_u 和 d 表示, 令

$$h = f_t / f_c. \quad (25)$$

将(18), (21)和(25)代入(17)式得

$$\alpha = \frac{2+2k-k^m}{h(1-k^m)} \left[\frac{(h+1)k^m+2k-h}{2k+1} \right]^n - \frac{2k+1}{h^2(1-k^m)} \left[\frac{(h+1)k^m+2k-h}{2k+1} \right]^{2n}. \quad (26)$$

3 非线性单轴动态强度准则

在混凝土材料单轴动态强度试验研究成果的基础上, 作者通过混凝土材料强度增长幅值的动力增长因数与对数应变速率之间关系的微分方程, 建立了混凝土材料的非线性单轴动态强度准则, 即 J 准则^[25]. 在 J 准则的基础上, 通过引入强度增长幅值的最大动

力增长因数, 将 J 准则改进为能描述混凝土材料动态峰值强度特性的 S 准则^[31]. 通过国际上取得的混凝土材料单轴动态强度试验结果, 验证了 S 准则的有效性, 表明 S 准则可较好地描述混凝土材料的单轴非线性动态强度特性, 并且 S 准则材料参数少, 具有统一的表达式, 强度曲线连续光滑, 且 S 准则可反映混凝土材料单轴动态极限强度.

S 准则首先定义了混凝土材料的单轴动态强度动力增长因数 DIF(dynamic increase factor), 为混凝土材料动态强度与静态强度的比值, 即

$$\text{DIF} = f_{id} / f_{is}, \quad (27)$$

式中, 当 $i=c$ 时, 表示单轴抗压强度; 当 $i=t$ 时, 表示单轴抗拉强度; d 表示动态单轴强度; s 表示拟静态单轴强度, f_{cs} 为应变速率 $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ 时的单轴抗压强度; f_{ts} 为应变速率 $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ 时的单轴抗拉强度. 混凝土材料强度增长幅值的动力增长因数 $F(u)$, 为动态强度增长幅值与静态强度的比值, 即

$$F(u) = \frac{\Delta f_i}{f_{is}} = \frac{f_{id} - f_{is}}{f_{is}} = \text{DIF} - 1, \quad (28)$$

式中, u 为应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的对数, 即

$$u = \lg \dot{\epsilon}_1 \quad (29)$$

S 准则的表达式可写为

$$\text{DIF} = 1 + F(u) = 1 + \frac{F_{\max}}{1 + (F_{\max}/F_0 - 1)e^{-\xi(u-u_0)}}, \quad (30)$$

式中, F_0 为应变率 u_0 时的动力增长因数, 一般可取拟静应力状态, 即 $u_0 = -5$, u_0 的取值不影响强度曲线. ξ 为材料参数, 反映混凝土强度随应变率增大而增长的程度; $F_{\max}$ 为强度增长幅值的动力增长因数 F 的极限值, 反映混凝土材料动态强度的极限值. 由(30)式可知

$$\frac{d^2 \text{DIF}}{du^2} = \frac{d^2 F}{du^2} = \xi^2 \left(1 - \frac{2F}{F_{\max}} \right) \left(1 - \frac{F}{F_{\max}} \right). \quad (31)$$

当 $F = F_{\max}/2$ 时, 动强度曲线存在拐点 $\text{DIF}'' = 0$, 强度曲线如图 6 所示. $u < u_0$ 时, 动力增长因数 DIF'' 随着 u 的增大而增大; $u > u_0$ 动力增长因数 DIF'' 随着 u 的增大而减小. 若把初始条件选在拐点处, 即将 $F = F_{\max}/2$ 代入(30)式, 将其简化为

$$F(u) = \frac{F_{\max}}{1 + e^{-\xi(u-u_0)}}. \quad (32)$$

S 准则只有 2 个材料参数, 分别为 ξ 和 $F_{\max}$. 当

图 5 摩擦效应 M_f - f_u/f_c 曲线

图6 S 准则的强度曲线

$F_{\max}$ 为常数时, ξ 对 S 准则强度曲线的影响规律如图 7 所示, ξ 值越大, 动强度受应变率的影响范围越小, 在影响范围内对应变率越敏感; ξ 值越小, 动强度受应变率的影响范围越大, 在影响范围内随应变率的增大动强度增长缓慢. 当 $u < u_0$ 时, ξ 值越小, 动强度越大; 当 $u > u_0$ 时, ξ 值越大, 动强度越大. 当 ξ 为常数时, $F_{\max}$ 对 S 准则强度曲线的影响规律如图 8 所示, $F_{\max}$ 值越大, 混凝土材料的动态极限强度越高.

4 非线性多轴动态强度准则

在描述多轴静态强度特性的广义非线性强度理论的基础上, 引入描述单轴动态强度特性的 S 准则, 可建立多轴动态强度准则. 本文通过广义非线性强度理论材料参数的率效应关系建立多轴动态强度准则. 在多轴加载状态下, 应变率效应通过广义剪应变率 $\dot{\epsilon}_d$ 描述, 其表达式为

$$\dot{\epsilon}_d = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2)^2 + (\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_3)^2 + (\dot{\epsilon}_3 - \dot{\epsilon}_1)^2}. \quad (33)$$

在单轴压缩条件下, 由于当 1 方向产生应变率时,

图7 参数 ξ 对 S 准则强度曲线的影响 图8 参数 $F_{\max}$ 对 S 准则的强度曲线的影响

2 方向也会产生应变率, 且有如下关系:

$$\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_3 = -\nu \dot{\epsilon}_1, \quad (34)$$

式中, ν 为泊松比. 将(34)代入(33)式得

$$\dot{\epsilon}_d = \frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3) = \frac{2}{3} (1 + \nu) \dot{\epsilon}_1. \quad (35)$$

由(35)式得

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{3}{2(1+\nu)} \dot{\epsilon}_d. \quad (36)$$

将(36)代入(29)式, 得

$$u = \lg \frac{3}{2(1+\nu)} + \lg \dot{\epsilon}_d, \quad (37)$$

令

$$u_d = \lg \dot{\epsilon}_d, \quad (38)$$

则

$$u = \lg \frac{3}{2(1+\nu)} + u_d. \quad (39)$$

在 CEB 规范^[21]中, 认为 ν 与应变率无关. 由(39)式可知, u 与 u_d 只相差一个常数, 因此用增量表示时, 二者相等, 即 $u - u_0 = u_d - u_{d0}$. 将其带入到 S 准则即(30)式中, 得

$$\text{DIF} = 1 + F(u_d) = 1 + \frac{F_{\max}}{1 + \left(\frac{F_{\max}}{F_0} - 1 \right) e^{-\xi(u_d - u_{d0})}}. \quad (40)$$

联立(27)和(40)式得

$$f_{id} = \left[1 + \frac{F_{\max}}{1 + \left(\frac{F_{\max}}{F_0} - 1 \right) e^{-\xi(u_d - u_{d0})}} \right] f_{is}, \quad (41)$$

式中, f_{id} 和 f_{is} 动态强度和静态强度. f_{cd} 和 f_{cs} 为单轴动

态和静态抗压强度, F_{cmax} 和 ξ_{c} 为对应的单轴抗压动态强度参数; f_{td} 和 f_{ts} 为单轴动态和静态抗拉强度, F_{tmax} 和 ξ_{t} 为对应的单轴抗拉动态强度参数; f_{ccd} 和 f_{ccs} 为双轴动态和静态抗压强度, F_{ccmax} 和 ξ_{cc} 为对应的双轴轴抗压动态强度参数; f_{ttd} 和 f_{tts} 为双轴动态和静态抗拉强度, F_{ttmax} 和 ξ_{tt} 为对应的双轴抗拉动态强度参数. 将(41)分别带入到(10), (13), (15)和(17)式, 即可获得广义非线性强度理论材料参数的率效应表达式, 进而建立混凝土材料广义非线性多轴动态强度准则.

4.1 强度参数的率效应分析

由(41)式可知, 混凝土材料的广义非线性多轴动态强度准则共有 8 个材料参数. 目前, 作者已经分析了混凝土材料的动态单轴抗压强度和动态抗拉强度特性^[31], 但缺少较多的多轴动态强度试验结果, 鉴于此, 本文根据单轴动态强度特性与多轴静态强度特性, 分析混凝土材料的多轴动态强度特性. 混凝土材料在双轴拉伸条件下的强度特性与单轴拉伸条件下的强度特性相似, 假定二者的率效应也相似, 即有如下关系:

$$f_{\text{ttd}} = lf_{\text{td}}, \quad (42)$$

式中, l 为材料参数, 当与应变率无关时, 为常数. 将(42)代入(20)式, 可得

$$\sigma_{0d} = dl f_{\text{td}}. \quad (43)$$

当 d 为常数时, 可由单轴动态抗拉强度特性分析动态三向拉伸强度.

参考应力取为 $p_{\text{rd}} = f_{\text{cd}}/3 + \sigma_{0d}$, 结合(43)式得

$$p_{\text{rd}} = \frac{f_{\text{cd}}}{3} + dl f_{\text{td}}. \quad (44)$$

将(43)式代入(12)式得参考应力 p_{rd} 处的动态剪应力比

$$M_{\text{fd}} = \frac{3f_{\text{cd}}}{f_{\text{cd}} + 3dl f_{\text{td}}}. \quad (45)$$

由(8)式得

$$n = \frac{\ln lf_{\text{td}} - \ln f_{\text{cd}}}{\ln(3dl f_{\text{td}} - 2lf_{\text{td}}) - \ln(3dl f_{\text{td}} + f_{\text{cd}})}. \quad (46)$$

由(17)式得参考应力 p_{rd} 处的动态三轴抗压强度比

$$\alpha_d = \frac{(3 + M_{\text{fd}}) f_{\text{td}} p_{\text{rd}} \left(\frac{-f_{\text{td}}/3 + \sigma_{0d}}{p_{\text{rd}}} \right)^n - 3M_{\text{fd}} p_{\text{rd}}^2 \left(\frac{-f_{\text{td}}/3 + \sigma_{0d}}{p_{\text{rd}}} \right)^{2n}}{f_{\text{td}}^2}. \quad (47)$$

(43)~(47)式为多轴动态强度准则强度参数的率效应形式. 作者等已根据多种混凝土材料的动态单轴抗压强度与抗拉强度试验结果, 统计分析了动态强度参数, 建议取值为: $\xi_{\text{c}}=0.94$, $F_{\text{cmax}}=2.12$; $\xi_{\text{t}}=1.09$, $F_{\text{tmax}}=6.36$. 当初始状态取为 $\dot{\epsilon}_{d0}=10^{-4}$, $F_0=0.1$, 则 $u_{d0}=-4.26$, 将其代入(41)式得

$$f_{\text{cd}} = \left[1 + \frac{2.12}{1 + 20.2e^{-0.94(u_d + 4.26)}} \right] f_{\text{c}}, \quad (48)$$

$$f_{\text{td}} = \left[1 + \frac{6.36}{1 + 62.6e^{-1.09(u_d + 4.26)}} \right] f_{\text{t}}. \quad (49)$$

取混凝土材料的单轴压缩强度 $f_{\text{c}}=50$ MPa, 单轴拉伸强度 $f_{\text{t}}=5$, $d=0.80$ 且 $l=0.73$ 时, 强度参数的率效应曲线如图 8~11 所示.

图 9 为动态三向拉伸强度 σ_{0d} 的率效应曲线, 表明 σ_{0d} 随着应变速率的增大而增大, 从 $\sigma_{0d}|_{u_d=-6}=2.96$ MPa 增大到 $\sigma_{0d}|_{u_d=-6}=21.47$ MPa, 率效应增长幅度为 6.25 倍.

参考应力 p_{r} 不是材料参数, 但参数 M_{fd} 与 α_d 的取值与 p_{r} 的值相对应. 本文已确定了参考应力的取值方法, 即在单轴压缩强度处 $p_{\text{r}}=f_{\text{c}}/3+\sigma_0$, 因 f_{c} 与 σ_0 均具有率效应, 导致 p_{r} 也具有率效应, 率效应关系如(44)式所示, 率效应曲线如图 10 所示. 动态参考应力 p_{rd} 随着应变率的增加而增大, 从 $p_{\text{rd}}|_{u_d=-6}=19.96$ MPa 增大到 $p_{\text{rd}}|_{u_d=-6}=73.43$ MPa, 率效应增长幅度为 3.68 倍.

图 11 为参考应力 p_{rd} 处破坏应力比 M_{fd} 的率效应曲线, 曲线表明参数 M_{fd} 随着应变率的增大而减小,

图 9 参数 σ_{0d} 的率效应曲线

图 10 p_{rd} 的率效应曲线 p_{rd} 图 12 参数 α_d 的率效应曲线 图 11 参数 M_{fd} 的率效应曲线 图 13 参数 n_d 的率效应曲线

$M_{fd}|_{u_d=-6}=2.55$ 减小到 $M_{fd}|_{u_d=6}=2.12$, 率效应变化幅度为 0.20 倍。

图 12 为参考应力 p_{rd} 处三轴拉压强度比 α_d 的率效应曲线, 曲线表明参数 α_d 随着应变速率的增大而增大, 从 $\alpha_d|_{u_d=-6}=0.71$ 增大到 $\alpha_d|_{u_d=6}=0.79$, 率效应增长幅度为 0.11 倍。在参考应力处的偏平面上, 强度曲线随着应变速率增大时 α_d 的增大逐渐向圆形变化, 高应变率时更接近于 Mises 圆。

图 13 为静水压力效应指数 n_d 的率效应曲线, 曲线表明参数 n_d 随着应变数量的增大而减小, 从 $n_d|_{u_d=-6}=0.71$ 减小至 $n_d|_{u_d=6}=0.58$, 率效应变化幅度为 0.22 倍。

图 9 和 11~13 中, 动态强度参数的率效应规律表明, 混凝土材料的多轴动态强度准则随着应变率的提高, 逐渐趋近于 Mises 强度准则。表现为, σ_{0d} 随着

应变速率的增大而增大, Mises 准则的 $\sigma_0 \rightarrow \infty$; M_{fd} 随着应变速率的增大而减小, 其中, M_{fd} 的范围是, $0 \leq M_{fd} \leq 3$, Mises 准则 $M_f=0$; α_d 随着应变速率的增大而增大, 其中, α_d 的范围是 $0 \leq \alpha_d \leq 1$, Mises 准则 $\alpha=1$; n_d 随着应变速率的增大而减小, 其中, n_d 的范围是 $0 \leq n_d \leq 1$, Mises 准则 $n=0$ 。因此, 混凝土材料的力学特性随着加载速率的增大, 有向金属材料力学特性过渡的趋势, 并且混凝土材料多轴动态强度并不是无限增大的, 而是一个有限值。在应变速率较小 $u_d < -3$ 和较大 $u_d > 3$ 时, 强度参数变化较小; 而在 $-3 < u_d < 3$ 范围内, 强度参数变化较大。

4.2 主应力空间中的多轴动态强度准则

利用 3.1 节的混凝土材料强度参数, 分别在偏平面和子午面内分析动强度曲线, 在主应力空间中分析动强度曲面。

4.2.1 子午面与偏平面内的动强度曲线

在子午面上的动强度曲线如图 14 所示. 在子午面上, 因三向拉伸强度随着应变速率的增大而增大, 动强度曲线随着应变速率的增大向左移动; 同时, 动态强度随着应变速率的提高而增大, 强度曲线向上移动. 在不同应变速率下, 强度曲线互补相交. 单轴动态强度状态如图 14 中的点所示, 都在过坐标原点斜率为 3 的直线上(单轴压缩条件下的应力条件为, $p=f_{cd}/3, p=f_{cd}$, 所以, $q/p=3$).

在参考应力 p_{rd} 处, 与图 14 相对应的偏平面上动态强度曲线如图 15 所示. 动强度曲线在一定范围内连续变化, 随着应变速率提高, 动态抗剪强度提高, 强度曲线向外扩展. 不同应变速率下的动强度曲线互不相交.

图 14 非线性多轴动态强度准则在子午面上的强度曲线

图 15 非线性多轴动态强度准则在偏平面上的强度曲线

在图 14 和 15 中, 同一条强度曲线的应变速率相同, 曲线反映不同应力状态下的强度特性; 不同强度曲线的差异, 描述了混凝土材料强度的应变速率效应. 不同强度曲线所反映的动态强度规律表明, 在 $-3 < u_d < 3$ 范围内, 应变速率对混凝土动态强度的影响较大.

4.2.2 主应力空间中的动强度面

主应力空间中, 混凝土材料非线性多轴动态强度准则的强度面如图 16 所示, 其中图 16(a)和(b)为同一图的不同角度. 在同一曲面上, 应变速率为常数, 3 个强度面的应变速率由小到大分别为 $u_d=-5, u_d=0$ 和 $u_d=5$. 不同应变速率下的强度面互不相交, 反映了混

图 16 (网络版彩图)非线性多轴动态强度准则在主应力空间内的强度面

凝土材料多轴动态强度的率效应规律, 即在任一应力状态下混凝土的强度都具有应变率放大效应, 且应变率对动态强度的放大程度不受应力状态的影响. 在同一应变率下, 混凝土的动强度只受应力状态影响, 与广义非线性强度理论的强度面特点相同, 随着静水压力的增大, 偏平面上的强度曲线逐渐扩大, 并且不同子午面的强度曲线也不同.

5 非线性多轴动态强度准则试验验证

混凝土材料的多轴动态强度试验, 是混凝土多轴动态强度准则研究的一个重要方面. 国内外学者已经获得了较多的单轴动态抗压和抗拉, 以及部分双轴动态强度试验成果, 但目前尚未有混凝土材料的真三轴动态强度试验成果报道. 本文利用四组混凝土材料双轴动态强度试验结果, 验证混凝土材料的非线性多轴动态强度准则. 其中, 部分材料参数作者利用多种混凝土材料的单轴动态加载试验结果统计给出^[31], 分别为: $F_{cmax}=2.12$, $\xi_c=0.94$, $F_{tmax}=6.36$, $\xi_t=1.09$.

5.1 压-压区动态双轴强度特性分析

吕培印等人^[37]、闫东明和林皋^[38]、关萍^[39]开展了混凝土材料在小主应力 σ_3 为0时, 双轴压-压动态加载试验. 具体试验条件为, 在加载过程中保持小主应力 $\sigma_3=0$, 在同一加载应变率下, 改变中主应力 σ_2 的值, 测得破坏时的大主应力 σ_1 的值. 加载应变率 u_d 分别为-6, -5, -4, -3和-2, 动态双轴压-压强度试验结果在表1~3中给出, 如图17~19中的点所示.

吕培印等人^[37]开展了混凝土材料的双轴压-压动态加载试验, 所用混凝土材料的单轴抗压强度 $f_c=20$ MPa. 试验时, 控制的中主应力 σ_2 为常数, 分别为0, $0.25f_c$, $0.5f_c$ 和 $0.75f_c$; 大主应力 σ_1 动态加载, 加载时的应变率 u_d 分别为-6, -5, -4和-3, 试验结果^[37]在表1中给出, 如图17中的点所示. 根据试验结果确定混凝土的材料参数分别为, $d=0.74$, $l=0.80$. 多轴动态强度准则的计算结果如表1和图17中的曲线所示, 较好地描述了试验结果.

闫东明和林皋^[38]开展了混凝土材料的双轴压-压动态加载试验, 所用混凝土材料的单轴抗压强度 $f_c=9.84$ MPa. 试验时, 控制的中主应力 σ_2 为常数, 分别为0, $0.25f_c$, $0.5f_c$ 和 $0.75f_c$; 大主应力 σ_1 动态加载,

表1 双轴压-压动态加载试验结果^[37]与理论计算结果($f_c=20$ MPa)

σ_2/f_c		不同加载应变率 u_d 破坏时的 σ_1/f_c			
		-6	-5	-4	-3
试验	0	0.91	1.00	1.18	1.29
	0.25	1.07	1.18	1.28	1.36
	0.50	1.28	1.37	1.50	1.56
	0.75	1.40	1.50	1.65	1.75
计算	0	0.93	0.98	1.21	1.32
	0.25	1.15	1.23	1.34	1.55
	0.50	1.30	1.41	1.57	1.60
	0.75	1.38	1.49	1.63	1.71

图17 (网络版彩图)多轴动态强度准则与双轴压-压试验结果^[37]的比较

加载时的应变率 u_d 分别为-5, -4, -3和-2, 试验结果^[38]在表2中给出, 如图18中的点所示. 根据试验结果确定混凝土的材料参数分别为, $d=0.72$, $l=0.80$. 多轴动态强度准则的计算结果如表2和图18中的曲线所示, 较好地描述了试验结果.

关萍^[39]开展了混凝土材料的双轴压-压动态加载试验, 所用混凝土材料的单轴抗压强度 $f_c=20.00$ MPa. 试验时, 控制中主应力 σ_2 为常数, 分别为0, $0.25f_c$, $0.35f_c$ 和 $0.5f_c$; 大主应力 σ_1 动态加载, 加载时的应变率 u_d 分别为-5, -4, -3和-2, 试验结果^[39]在表3中给出, 如图19中的点所示. 根据试验结果确定混凝土的材料参数分别为, $d=0.78$, $l=0.81$. 多轴动态强度准则的计算结果如表3和图19中的曲线所示, 较好地

表 2 双轴压-压动态加载试验结果^[38]与理论计算结果($f_c=9.84$ MPa)

σ_2/f_c		不同加载应变率 u_d 破坏时的 σ_1/f_c			
		-5	-4	-3	-2
试验	0	1.00	1.08	1.16	1.25
	0.25	1.51	1.57	1.64	1.74
	0.50	1.64	1.70	1.76	1.85
	0.75	1.67	1.70	1.78	1.90
计算	0	1.05	1.09	1.17	1.28
	0.25	1.53	1.56	1.62	1.73
	0.50	1.64	1.71	1.76	1.83
	0.75	1.68	1.70	1.78	1.89

图 18 (网络版彩图)多轴动态强度准则与双轴压-压试验结果^[38]的比较

表 3 双轴压-压动态加载试验结果^[39]与理论计算结果($f_c=20.00$ MPa)

σ_2/f_c		不同加载应变率 u_d 破坏时的 σ_1/f_c			
		-5	-4	-3	-2
试验	0	1.00	1.13	1.22	1.36
	0.20	1.10	1.20	1.28	1.40
	0.35	1.17	1.28	1.36	1.46
	0.50	1.26	1.36	1.45	1.60
计算	0	1.01	1.13	1.22	1.36
	0.20	1.11	1.21	1.29	1.35
	0.35	1.18	1.29	1.38	1.47
	0.50	1.25	1.36	1.46	1.61

图 19 (网络版彩图)多轴动态强度准则与双轴压-压试验结果^[39]的比较

描述了试验结果.

5.2 拉-压区双轴动态强度特性分析

Shang 和 Song^[40]和吕培印等人^[37]开展了混凝土材料双轴拉-压动态加载试验.

Shang 和 Song^[40]开展了混凝土材料双轴拉-压动态加载试验和单轴动态拉伸试验,所用混凝土材料的单轴抗压强度 $f_c=31.20$ MPa. 双轴试验时,保持中主应力 $\sigma_2=0$; 小主应力 σ_3 为拉伸状态,并控制为常数,分别为 0, $-0.022f_c$, $0.045f_c$, $-0.067f_c$ 和 $-0.090f_c$; 大主应力 σ_1 动态加载,加载时的应变率 u_d 分别为-5, -4, -3 和-2,试验结果^[40]在表 4 中给出,如图 20 中的点所示. 根据试验结果确定混凝土的材料参数分别为, $d=0.97$, $l=0.70$. 多轴动态强度准则的计算结果如表 4 和图 20 中的曲线所示,较好地描述了试验结果.

吕培印等人^[37]开展了混凝土材料双轴拉-压动态加载试验,所用混凝土材料的单轴抗压强度 $f_c=20.00$ MPa. 双轴试验时,保持中主应力 $\sigma_2=0$; 大主应力 σ_1 为压缩状态,并控制为常数,分别为 0, $0.25f_c$, $0.5f_c$ 和 $0.75f_c$; 小主应力 σ_3 为拉伸状态的动态加载,加载时的应变率 u_d 分别为-5, -4, -3 和-2,试验结果^[37]在表 5 中给出,如图 21 中的点所示. 根据试验结果确定混凝土的材料参数分别为, $d=0.74$, $l=0.80$. 多轴动态强度准则的计算结果如表 5 和图 21 中的曲线所示,较好地描述了试验结果.

通过与 5 组混凝土材的双轴压-压、双轴拉-压

表 4 双轴拉-压动态加载试验结果^[40]与理论计算结果($f_c=31.20$ MPa)

σ_3/f_c		不同加载应变率 u_d 破坏时的 σ_1/f_c			
		-5	-4	-3	-2
试验	0	1	1.042	1.096	1.128
	-0.022	0.857	0.900	0.981	1.037
	-0.045	0.679	0.737	0.843	0.901
	-0.067	0.487	0.522	0.582	0.663
	-0.090	0.319	0.338	0.349	0.398
计算	0	0.985	1.062	1.110	1.151
	-0.022	0.861	0.903	0.988	1.038
	-0.045	0.722	0.743	0.849	1.038
	-0.067	0.524	0.571	0.587	0.662
	-0.090	0.337	0.340	0.349	0.397
动态单轴拉伸强度 f_t/f_c	试验	-0.123	-0.126	-0.130	-0.133
	计算	-0.124	-0.126	-0.131	-0.137

图 20 (网络版彩图)多轴动态强度准则与双轴拉-压试验结果^[40]的比较

动态加载强度试验结果的比较表明,非线性多轴动态强度准则可较好地描述混凝土材料双轴加载时的动态强度特性,一方面,较好地描述了混凝土材料动态强度随着应变速率的提高而增大的规律;另一方面,在同一应变速率时,在双轴压-压区,较好地描述了混凝土材料中主应力效应,即破坏时的大主应力 σ_1 随着中主应力 σ_2 的增大而变化的规律;在双轴拉-压区,较好地描述了即破坏时的大主应力 σ_1 随着小主应力 σ_3 的增大而变化的规律。

图 21 (网络版彩图)多轴动态强度准则与双轴拉-压试验结果^[40]的比较

表 5 双轴拉-压动态加载试验结果^[37]与理论计算结果($f_c=20.00$ MPa)

σ_1/f_c		不同加载应变率 u_d 破坏时的 σ_3/f_c			
		-6	-5	-4	-3
试验	0	-0.092	-0.097	-0.102	-0.113
	0.25	-0.090	-0.093	-0.101	-0.108
	0.50	-0.082	-0.088	-0.094	-0.101
	0.75	-0.076	-0.081	-0.087	-0.094
	1.0	-0.071	-0.076	-0.082	-0.089
计算	0	-0.091	-0.097	-0.101	-0.113
	0.25	-0.090	-0.094	-0.102	-0.201
	0.50	-0.080	-0.089	-0.093	-0.101
	0.75	-0.079	-0.080	-0.086	-0.094
	1.0	-0.078	-0.079	-0.085	-0.093

6 结论

作者在以往的研究中,提出了广义非线性强度理论,该理论可用于岩石、混凝土、土等岩土类材料,描述材料的静态非线性多轴强度特性,反映中主应力效应、静水压力效应等;建立了混凝土材料的非线性单轴动态强度 S 准则, S 准则的动强度曲线具有光滑、连续、收敛的特性,可较好地描述混凝土材料的单轴动态抗压和单轴动态抗拉强度特性. 本文将广义非线性强度理论与 S 准则结合,通过强度参数的应变速率效应规律,建立了混凝土材料的非线性多轴动态强度准则。

1) 将广义非线性强度理论的 4 个材料参数转化为混凝土材料的基本强度参数,即混凝土材料的单

轴抗压强度 f_c , 单轴抗拉强度 f_t , 双轴抗压强度 f_{cc} 和双轴抗拉强度 f_{tt} , 并通过混凝土材料的基本强度特性, 分析了广义非线性强度理论描述混凝土强度特性时, 4 个材料参数 σ_0 , n , M_f 和 α 的变化规律与取值范围.

2) 基于 S 准则建立了混凝土材料 4 个基本强度参数的率效应表达式, 得到 σ_0 , n , M_f 和 α 的率效应表达式, 进而建立了混凝土材料的非线性多轴动态强度准则, 并分析了 4 个强度参数 σ_{0d} , n_d , M_{fd} 和 α_d 的率效应规律. 强度参数的率效应分析结果表明, 混凝土材料的强度特性随着应变率的提高, 逐渐向金属材料

料的强度特性过渡, 在 $-3 < u_d < 3$ 范围内, 应变率对混凝土动态强度的影响较大, 并且动强度不是随着应变率的提高无限增大的, 而是存在动强度峰值.

3) 通过与 3 组双轴压-压和 2 组双轴拉-压动态加载时混凝土材料试验结果的比较, 表明非线性多轴动态强度准则可较好地描述混凝土材料双轴动态强度规律; 在同一应变率下, 可较好地描述强度的非线性特性, 且应变率效应与多轴应力状态对强度规律不存在耦合影响, 表现为不同应变率下的动强度面互不相交.

参考文献

- 1 Abrams D A. Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete. ASTM J, 1917, 17: 364–377
- 2 Khaliq W, Kodur V K R. Effect of high temperature on tensile strength of different types of high-strength concrete. ACI Mater J, 2011, 108: 394–402
- 3 Chen X D, Wu S X, Zhou J K, et al. Effect of testing method and strain rate on stress-strain behavior of concrete. J Mater Civil Eng, 2013, 25: 1752–1761
- 4 Lu Y B, Li Q M. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials. Int J Impact Eng, 2011, 38: 171–180
- 5 Snozzi L, Caballero A, Molinari J F. Influence of the meso-structure in dynamic fracture of concrete under tensile loading. Cement Concrete Res, 2011, 41: 1130–1142
- 6 宋玉普, 刘浩. 混凝土率型内时损伤本构模型. 计算力学学报, 2012, 29: 589–593, 598
- 7 邹笃建, 刘铁军, 藤军, 等. 混凝土柱单轴动态抗压特性的应变率效应研究. 振动与冲击, 2012, 31: 145–150
- 8 Kupfer H B, Gerstle K H. Behavior of concrete under biaxial stresses. J Eng Mech ASCE, 1973, 99: 853–866
- 9 Wang C Z, Guo Z H. Experimental investigation of biaxial and triaxial compressive concrete strength. ACI Mater J, 1987, 84: 92–100
- 10 Chen J C, Yang H J, Chen H W. Behavior of steel fiber reinforced concrete in multiaxial loading. ACI Mater J, 1993, 89: 32–40
- 11 Sfer D, Carol I, Gettu R, et al. Study of the behavior of concrete under triaxial compression. J Eng Mech ASCE, 2002, 128: 156–163
- 12 Ottosen N S. A failure criterion for concrete. J Eng Mech ASCE, 1977, 103: 527–535
- 13 Yu M H. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century. Appl Mech Rev ASME, 2002, 55: 169–218
- 14 Chen W F. Plasticity in reinforced concrete. New York: McGraw-Hill, 1982
- 15 Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete. ACI Mater J, 1953, 49: 729–744
- 16 Hughes B P, Gregory R. Concrete subjected to high rates of loading in compression. Mag Concrete Res, 1972, 24: 25–36
- 17 Jones P G, Richart F E. The effect of testing speed on strength and elastic properties of concrete. P Am Soc Test Mater, 1936, 36: 380–392
- 18 Bischoff P H, Perry S H. Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression. J Eng Mech ASCE, 1995, 121: 685–693
- 19 Rossi P, Mier J G M, Toutlemonde F O, et al. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension. Mater Struct, 1994, 27: 260–264
- 20 Wu H J, Zhang Q M, Huang F L, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete. Int J Impact Eng, 2005, 32: 605–617
- 21 Lu Y B, Li Q M. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials. Int J Impact Eng, 2011, 38: 171–180
- 22 Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization. Int J Impact Eng, 2001, 25: 869–886
- 23 Gran J K, Florence A L, Colton J D. Dynamic triaxial tests of high-strength concrete. J Eng Mech ASCE, 1989, 115: 891–904
- 24 Yan D M, Lin G, Chen G D. Dynamic properties of plain concrete in triaxial stress state. ACI Mater J, 2009, 106: 89–94
- 25 Atchely B L, Furr H L. Strength and energy absorption capabilities of plain concrete under dynamic and static loading. ACI Mater J, 1967, 64: 745–756
- 26 Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D. Int J Impact Eng, 1997, 19: 847–873

- 27 CEB FIP model code 1990, Comite Euro-International Du Beton.
- 28 Campbell J D. The dynamic yielding of mild steel. *Acta Metallurgica*, 1953, 1: 706–710
- 29 Stolarski A. Dynamic strength criterion for concrete. *J Eng Mech ASCE*, 2004, 130: 1428–1435
- 30 陈樟福生, 李庆斌. 混凝土动态双轴强度探讨. *水利学报*, 2008, 39: 385–393
- 31 杜修力, 王阳, 路德春. 混凝土材料的非线性单轴动态强度准则. *水利学报*, 2010, 41: 300–309
- 32 Yao Y P, Lu D C, Zhou A N, et al. Generalized non-linear strength theory and transformed stress space. *Sci China Ser E Tech Sc*, 2004, 47: 691–709
- 33 路德春. 基于广义非线性强度理论的土的应力路径本构模型. 北京: 北京航空航天大学, 2006
- 34 Du X L, Lu D C, Gong Q M, et al. Nonlinear unified strength criterion for concrete under three dimensional stress states. *J Eng Mech ASCE*, 2010, 136: 51–59
- 35 路德春, 杜修力, 龚秋明, 等. 混凝土材料的广义非线性强度理论. *水利学报*, 2009, 40: 542–549
- 36 过镇海. 混凝土的强度和变形试验基础和本构关系. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 37 吕培印, 宋玉普, 侯景鹏. 一向侧压混凝土在不同加载速率下的受压试验及其破坏准则. *工程力学*, 2002, 19: 67–71
- 38 闫东明, 林皋. 双向应力状态下混凝土的动态压缩试验研究. *工程力学*, 2006, 23: 104–108
- 39 关萍. 定侧压混凝土双轴动态抗压性能的试验研究. *土木工程学报*, 2009, 42: 33–37
- 40 Shang S M, Song Y P. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete. *Constr Build Mater*, 2013, 40: 322–329

Nonlinear multiaxial dynamic strength criterion for concrete material

DU XiuLi, WANG GuoSheng & LU DeChun

Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Basic strength parameters of concrete material which are uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, biaxial compressive strength and biaxial tensile strength are used to replace the four material parameters of generalized nonlinear strength theory in this study. The change rules and value ranges of four material parameters are acquired by studying the basic strength characteristics of concrete materials. Nonlinear multiaxial dynamic strength criterion for concrete material is proposed by four rate effect expressions of basic strength parameters for concrete material, and the four rate effect expressions are established on the basis of S criterion. The rate effect rules of dynamic strength parameters express that with the increase of strain rate, strength properties of concrete gradually transform to that of metal material. Dynamic strength of concrete is significantly influenced by the strain rate in the range of -3 to 3 , and dynamic strength does not increase indefinitely, instead, there is a peak dynamic strength. Compared with dynamic loading test of biaxial compressive-compressive and biaxial tensile-compressive of concrete, nonlinear multiaxial dynamic strength criterion can describe the biaxial dynamic strength rule of concrete reasonably and the nonlinear strength characteristics at a certain strain rate. Strength rules are not influenced by coupling between the strain rate effect and multiaxial stress state, in other words, the dynamic strength surfaces dose not intersect at different strain rates.

concrete, strain rate effect, generalized non-linear strength theory (GNST), S criterion, multiaxial dynamic strength criterion

doi: 10.1360/N092014-00107