

爆炸荷载作用下钢纤维混凝土梁的动力响应分析

张仲林¹, 许金余^{1,2}, 朱笃美³, 葛洪海², 范建设⁴

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 力学与建筑工程学院, 陕西 西安 710072; 3. 空后机营部, 北京 100720; 4. 中国航空港建设第九工程总队, 四川 新津 611430)

摘要:在混凝土、钢纤维混凝土已有动力实验资料的基础上,以材料动力强度提高系数与应变速率的关系为主要依据,建立了材料的一维粘弹塑性动力本构模型并用 chen - chen 模型将其推广为二维动力本构模型。运用改进了的 chen - chen 模型对钢纤维混凝土简支梁进行了非线性动力响应分析,所得结果与实验结果吻合良好。

关键词:钢纤维混凝土梁;动力响应;爆炸荷载;动力本构模型;chen - chen 模型

中图分类号:TU75 **文献标识码:**A **文章编号:**1009 - 3516(2004)05 - 0092 - 03

普通混凝土中掺入钢纤维后,钢纤维以其较高的抗拉强度、较好的裂后延性和冲击韧性大大提高了结构构件的延性和吸收能量的能力。钢纤维混凝土是目前用于抗爆结构的一种优良材料。对其在爆炸荷载条件下的性能,国内外的专家学者在试验和理论方面都进行了大量的研究^[1]。从动力计算的整个过程来看,计算结果能否接近结构的真实响应,应从三个方面来考虑:力学分析过程正确无误,计算过程收敛;所选爆炸荷载曲线与实际爆炸荷载接近;材料动力本构模型正确模拟材料的受力和变形。近年来,随着数学、力学的不断发展和计算机的不断更新,结构动力学分析已日趋完善和成熟,尤其是有限元方法获得了巨大的发展。关于爆炸荷载已有许多基于大量试验建立起来的经验公式,能准确地模拟爆炸时所产生的应力波。而混凝土材料动力本构模型的发展却相对缓慢,计算结果偏差主要来自本构模型的不准确性。

1 动力本构模型

1.1 混凝土和钢纤维混凝土动力单轴应力 - 应变关系

根据建立在粘弹性塑性力学基础上的静力本构模型,建立动力本构关系如下:认为应力 - 应变全曲线的基本函数关系不变,峰值应变不变,极限应变不变,唯一变化的是顶点峰值应力。动力作用下的峰值应力可由静力强度乘以与应变速率有关的动力系数得到。若静力本构关系表达式为 $\sigma = f(\varepsilon)$, 材料的动力提高系数为 $k_d = A\dot{\varepsilon}^B$, 则材料的动力本构关系可表示为 $\sigma_d = A\dot{\varepsilon}^B f(\varepsilon) = g(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 。若考虑应变历史的影响(当材料处于卸载或卸载后再加载状态时,认为本构关系按此应变速率下的初始弹性模量直线变化),关系式为 $\sigma_d = k(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, h)$, h 为与应变历史有关的参数。上述表达式中 A 和 B 为试验所得到的回归系数, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率。

混凝土和钢纤维混凝土静力单轴应力 - 应变关系本文采用的表达式分别有:

拉应力 - 应变关系(上升、下降段)分别为

$$\frac{\sigma}{f_t} = \frac{E_{fc}\varepsilon}{E_p\varepsilon_{f0}} + \left(1.5 - 1.25 \frac{E_{fc}}{E_p}\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{f0}}\right)^2 + \left(0.25 \frac{E_{fc}}{E_p} - 0.5\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{f0}}\right)^6 \quad (1) \quad \frac{\sigma}{f_t} = \frac{(\varepsilon/\varepsilon_{f0})}{\alpha[(\varepsilon/\varepsilon_{f0}) - 1]^{\beta_f} + (\varepsilon/\varepsilon_{f0})} \quad (2)$$

式中: E_p 为峰点割线模量; E_{fc} 为相应基体的初始弹性模量; f_t 为轴拉强度($f_t = 0.85 f_{ts}$)。 $\beta_f = 1.7$, $\alpha_f = \alpha_0 / (1 + 3.58v_f/d)$, $\alpha_0 = 0.312f_t^2$ (f_t 为相应基体的轴拉强度)。

压应力 - 应变关系(上升、下降段)分别为

收稿日期:2004 - 03 - 10

基金项目:总后科研资助项目

作者简介:张仲林(1977 -),男,陕西韩城人,硕士生,主要从事防护工程、结构工程研究;

许金余(1963 -),男,吉林靖宇人,教授,博士生导师,主要从事防护工程、结构工程研究。

$$\sigma = f'_c [2(\varepsilon/\varepsilon_0) + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2] \quad (3) \quad \sigma = f'_c \varepsilon/\varepsilon_0 / (\alpha(\varepsilon/\varepsilon_0 - 1)^2 + (\varepsilon/\varepsilon_0)) \quad (4)$$

$$\alpha = \phi/(\phi - 1)^2, \phi = \varepsilon'_{0.5}/\varepsilon_{0.5}, \varepsilon_{0.5} = (2000R - 24892)/(R - 8.3), \varepsilon'_{0.5} = \varepsilon_{0.5} + 1358p2 \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_{0.5}$ 为相应混凝土应力 $0.5\sigma_0$ 的应变值 ($\times 10^{-6}$); f'_c 为棱柱体抗压强度, 其与立方体抗压强度的 R 的关系是: $f'_c = 0.818R, R \leq 30, \varepsilon_0 = 1800 \mu\varepsilon; R > 30, \varepsilon_0 = 2100 \mu\varepsilon$ 。

1.2 Chen - Chen 模型的改进

该模型是美国 Purdue 大学陈惠发 (W. F. Chen) 等在 1975 年提出的, 是较早提出的一种弹塑性硬化断裂本构模型, 他将混凝土应力应变关系理想化为三部分: 线弹性、塑性硬化和脆断。模型假定混凝土的拉、压初始弹性模量一样, 受压混凝土从弹性转入塑性, 其应力从 $-f_c$ 到 $-f'_c$, 然后发展到全塑性一直到压应变达到 $-\varepsilon_u$, 混凝土压碎应力值立即下降为零。受拉与之相似, 从弹性转入塑性, 应力从 f_c 到 f'_c , 此时到达极限拉应变 ε_t , 混凝土开裂, 拉应力降为零。混凝土的卸载和重新加载路径均按初始弹性模量 E 来考虑^[2]。

该模型由于未考虑峰值以后的下降段, 与实际情况不符, 用于普通混凝土时, 差距较小。而钢纤维混凝土的重要特性是其在开裂后的优良延性。充分考虑纤维的增强效果, 因此引入下降段, 计算结果表明, 考虑下降段后, 计算结果更接近试验结果, 可以改善用该模型使结构刚度降低的缺陷。因此, 对该模型作如下改进: 对于抗压应力 - 应变曲线, 由试验结果知, $0.45f'_c$ 为比例极限, 这样, 根据已有的全曲线将 $0 \sim 0.45f'_c$ 一段取为直线, 可得出其弹性模量, 然后将次弹性模量反馈到受拉应力 - 应变曲线中即可, 其过程见图 1。

1.3 钢筋的动力本构关系

关于钢筋在动力荷载作用下的性能, 国内外都进行了系统的研究, 国内主要是清华大学的研究工作, 根据这些研究成果, 采用与处理混凝土相同的方法。钢筋的静力本构关系模型采用双线性模式, 若第一阶段的解析表达式为 $\sigma_s = f(\varepsilon)$, 则其动力本构关系可表示为 $\sigma_d = k_d f(\varepsilon) = g(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 在第二阶段中, 认为强度极限不变, 将动屈服强度与强度极限用直线相连即可。

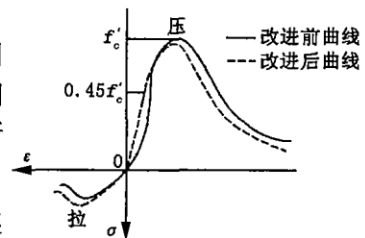


图 1 对 chen - chen 模型的改进

2 钢纤维梁的动力响应分析

2.1 响应数值计算方法

2.1.1 爆炸冲击波荷载的确定

根据试验结果及计算方便, 假定在梁的每一横截面的顶端荷载集度相同 (实际上略有差别), 这样就可以较方便的确定出沿梁长荷载的分布规律, 基本上呈钟形分布。限于篇幅, 不详细讨论。

2.1.2 有限元计算方案

1) 动力基本方程为 $[M]\Delta\{\delta\} + [C]\Delta\{\delta\} + [K]\Delta\{\delta\} = \Delta\{R\}$ 。

2) 对混凝土运用 8 节点矩形等参单元, 对钢筋运用 3 节点等参单元。认为钢筋与钢纤维混凝土间无滑移, 并选用弥散裂缝模式。

3) 下降段单元刚度矩阵的计算。单向开裂见式 (6); 双向开裂见式 (7)。

$$[D]_{cr1} = E \begin{bmatrix} 1/(\mu^{-1} - v^2) & 1/(\mu^{-1} - v^2) & 0 \\ 0 & \mu^{-1}/(\mu^{-1} - v^2) & 0 \\ 0 & 0 & \beta/2(1+v) \end{bmatrix} \quad (7) \quad [D]_{cr2} = E \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta E/2(1+v) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: μ 为开裂系数, β 为残余抗剪系数。当考虑应变软化曲线来模拟混凝土开裂时, 会遇到数值计算上的困难 (刚度矩阵非正定)。应用逐步软化函数法可以有效的解决此问题。在每一对应的割线模量上乘以一折减因子 p , 使开裂方向混凝土的即时切线模量以各小台阶近似模拟, 从而获得单元的近似本构矩阵^[3]。

4) 求解方法。用 Newmark - β 方法对运动方程求解。认为 $[M]$ 不变, $[K]$ 随单元状态而发生变化, $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$, 关键是确定 $[K]$ 。

2.2 算例

运用本文所建立的本构模型, 对静力作用下的混凝土构件、钢纤维混凝土构件进行计算, 能够得到比较准确的结果, 这也是建立正确动力本构模型的必要条件。下面对动力作用下的钢纤维混凝土构件进行计算, 来验证本构模型的准确性。

例 1: 一根简支梁, 梁的截面尺寸 22.86×55.25 (cm), 跨度 1.828 m; 钢纤维混凝土的抗压强度 $f_c = 41.8$ Mpa; 抗拉强度 $f_t = 6.42$ Mpa; 泊松比 $\nu = 0.27$ 例 2: 一根简支梁 (纤维含量为 1%), 梁的截面尺寸 12×20

(cm), 跨度 0.85 m; 钢纤维混凝土抗压强度 28.8 Mpa; 抗拉强度 3.12 Mpa; 泊松比 $\nu=0.27$ 。

钢筋: 16 Mn 钢: 屈服强度 390.2 Mpa; 抗拉强度 470 Mpa。A3 钢: 屈服强度 287.4 Mpa; 抗拉强度 312.2 Mpa。压力持续时间 1.7 ms; 采用相同的爆炸荷载。

分别计算了梁跨中挠度、钢筋应变两个指标。例 1 的计算结果见图 2, 例 2 的计算结果见图 3。其中的试验结果来自于文献[4]。从计算结果比较中可以得出: 运用本模型所得计算曲线与试验所得曲线基本吻合, 因此, 动力本构模型是合理的、可行的。

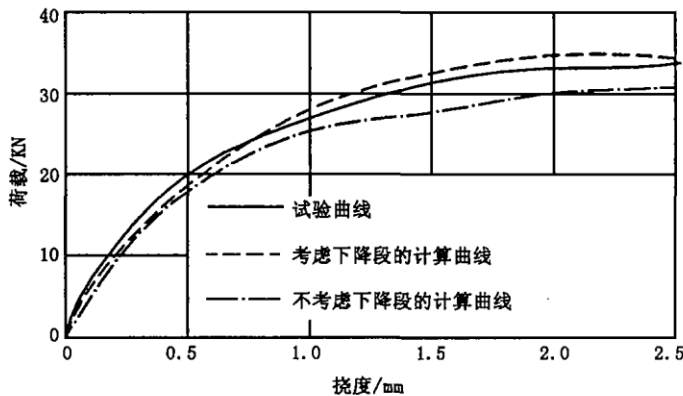


图 2 荷载 - 挠度曲线的计算与试验比较

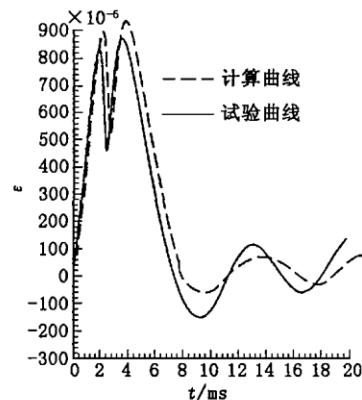


图 3 钢筋应变曲线的实际与试验比较

3 结论

1) 本文所建立的动力本构模型能够反映混凝土、钢纤维混凝土、钢筋的动力性能, 而且形式简便, 可以满足结构设计的要求。

2) 在 Chen - Chen 模型的基础上引入本构曲线下阶段后, 较好的反映了钢纤维混凝土的特性, 克服了纯粹 Chen - Chen 模型使计算结果趋于软化的缺陷, 计算结果更加符合实际。

3) 运用改进后的 Chen - Chen 模型对钢筋混凝土、钢纤维钢筋混凝土简支梁进行非线性分析所得的结果与实验结果吻合良好, 证明该模型较好地反映了材料的动力特性。

4) 应运用动力本构模型完善钢纤维混凝土抗剪试验研究, 以期更加系统反映钢纤维混凝土动力性能。

参考文献:

- [1] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [3] 吕西林. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.
- [2] 廖松涛. 钢筋混凝土梁仿真试验[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 1995.
- [4] 尚仁杰. 混凝土动态本构行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1994.

(编辑: 姚树峰)

Dynamic Response of Steel Fiber Concrete Beam under Explosive Load

ZHANG Zhong - lin¹, XU Jin - yu^{1,2}, ZHU Du - mei³, GE Hong - hai², FAN Jian - she⁴

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 3. Airport and Barracks Department, Air Force Logistics Office, Beijing 100720, China; 4. The Ninth Engineering Head Group of China Airport, Xinjin, Sichuan 611430, Chian)

Abstract: Based on the existing dynamic experimental data of concrete and steel fiber concrete, the dynamic model of one dimension about the connection between stress and strain is developed in the paper. The dynamic model of one dimension is extended to the dynamic model of two dimensions according to the Chen - Chen model. The non-linear analysis of the simply supported steel fiber beam is done according to the improved Chen - Chen model. The result is consistent with the experimental result.

Key words: steel fiber concrete beam; dynamic response; explosive load; dynamic model; Chen - Chen model