

RHT 模型的改进与数值拟合

施德胜, 施冠银, 陈江瑛*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: RHT 模型普遍用于混凝土的数值模拟当中, 但该模型的相关参数较难获得. 利用 SHPB 实验测得 C40 混凝土应力应变曲线, 并从该曲线中选取 RHT 模型中弹性极限面和失效强度面对应的应力状态点进行数值拟合, 从而得到 RHT 模型参数 A 、 N 、 δ 、 α . 并引进当前面所对应的归一化静水压参量和应变增量, 改进了损伤量 D 的描述, 从而改进了在混凝土数值计算中广泛应用的 RHT 模型. 结果表明: 改进 RHT 模型得到的理论应力应变曲线与实验曲线吻合良好, 可作为获得 RHT 模型参数的有效方法.

关键词: RHT 模型; 失效强度参数; 当前面表达式; SHPB; 冲击动态

中图分类号: TU502⁺.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 03-0093-04

随着混凝土材料冲击动态力学性能研究的深入, 数值模拟方法引起人们的普遍重视^[1-3]. 在对混凝土材料数值计算中, Holmquist-Johnson-Cook (HJC)^[1]与 Riedel-Hiermaier-Thoma(RHT)本构模型的使用最为普遍^[2-4]. 较早提出的 HJC 本构模型综合考虑了材料的压缩损伤、应变率效应以及静水压对屈服应力的影响等, 因而能较好地反映脆性材料在压缩加载下的挤压变形, 但不能反映混凝土拉伸损伤, 因而也就不能模拟像层裂这种由试样表面拉伸波引起的物理现象. 此外, 还由于不考虑偏应力张量第三不变量的影响, 且模型参数较少, 在侵彻和冲击等现象模拟中, 计算用时较少、精度较易控制, 因而被广泛采用. RHT 模型在 HJC 模型的基础上发展而来, 引入了偏应力张量第三不变量对破坏面的影响, 引入 3 个强度极限面概念, 考虑了拉静水压的应变率敏感性, 因而能综合反映材料的拉伸和压缩损伤、应变率效应、应变硬化、软化与失效等现象, 更为全面地反映了混凝土材料在不同应力状态下的动态力学行为, 目前也广为应用. 由于 RHT 模型引进了应变硬化和角隅函数 $R_3(\theta)$, 能更好地反应混凝土在达到最大应变前

的非弹性变形以及破坏强度在压缩子午线上的变化等现象^[2,5-6]. 但与 HJC 模型相比, RHT 模型的参数较多, 选取合适的参数也更困难^[7-8].

笔者在 RHT 模型中引进当前面对应的归一化静水压, 以代替残余强度所对应的归一化静水压, 对 RHT 模型进行理论简化, 并用混凝土分离式霍普金森压杆(SHPB)实验得到的应力-应变曲线进行数值拟合, 得到了一组 RHT 模型参数, 且实验证明理论曲线与实验结果吻合良好.

1 RHT 模型

Riedel 等^[2]通过改进 HJC 模型提出了 RHT 模型. 在 RHT 模型中有弹性极限面、失效面及残余强度面这三个极限面, 分别用来描述弹性极限值、失效强度及残余强度与静水压的关系.

失效面相应的失效函数 Y_{fail}^* 表示如下:

$$Y_{\text{fail}}^* = \sigma_{\text{eq}}^* (P, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_{\text{TXC}}^* (P) R_3(\theta) F_{\text{RATE}}(\dot{\epsilon}), \quad (1)$$

其中, σ_{eq}^* 为归一化等效应力, $\sigma_{\text{eq}}^* = \sigma_{\text{eq}} / f_c$, f_c 为准静态单轴抗压强度; $Y_{\text{TXC}}^* (P)$ 为压缩子午线强度.

$$Y_{\text{TXC}}^* (P) = A [P^* - P_{\text{spall}}^* F_{\text{RATE}}(\dot{\epsilon})]^N, \quad (2)$$
$$P_{\text{spall}}^* = P_{\text{spall}} / f_c,$$

收稿日期: 2013-10-15.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journallg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(10972109, 11272165, 10802039); 973 计划项目(61392010202); 宁波大学学科基金(ZJ1013).

第一作者: 施德胜(1989-), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: shidesheng89@163.com

*通信作者: 陈江瑛(1964-), 女, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: chenjiangying@nbu.edu.cn

其中, $F_{\text{RATE}}(\dot{\varepsilon})$ 为应变速率效应函数角隅函数,

$$F_{\text{RATE}}(\dot{\varepsilon}) = \begin{cases} (\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})^\alpha, P > \frac{f_c}{3}, \dot{\varepsilon}_0 = 30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}, \\ (\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})^\delta, P < \frac{f_c}{3}, \dot{\varepsilon}_0 = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}. \end{cases} \quad (3)$$

$R_3(\theta)$ 代表任意应力角对应的子午线半径和压缩子午线半径之比:

$$R_3(\theta) = (2(1-Q_2^2)\cos\theta + (2Q_2-1)(4(1-Q_2^2)\cos^2\theta + 5Q_2^2 - 4Q_2)^{1/2}) / (4(1-Q_2^2)\cos^2\theta + (1-2Q_2)^2), \quad (4)$$

式中, $\theta = (\cos^{-1}(3\sqrt{3}J_3 / 2J_2^{3/2})) / 3, 0 \leq \theta \leq \pi/3$, $Q_2 = r_t / r_c = Q_0 + B_Q P^*$, $0.51 \leq Q_2 \leq 1.0$, 其中, A 、 N 、 α 、 δ 、 Q_0 和 B_Q 是材料常数.

弹性极限面的描述如下:

$$Y_{\text{ela}}^* = Y_{\text{fail}}^* F_{\text{CAP}}(P), \quad (5)$$

其中, 盖帽函数 $F_{\text{CAP}}(P)$ 表示如下:

$$F_{\text{CAP}}(P) = \begin{cases} 1, \text{ for } P^* \leq 1/3, \\ \sqrt{1 - \left(\frac{P^* - 1/3}{P_0 / f - 1/3} \right)^2}, \\ \quad \text{for } 1/3 < P^* < P_0 / f_c, \\ 0, \text{ for } P^* \geq P_0 / f_c, \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_0 为材料的弹性极限值; F_{ela} 为材料弹性强度与极限强度之比; P^* 为归一化静水压.

残余强度面的描述如下:

$$Y_{\text{residual}}^* = B \times (P^*)^M, \quad (7)$$

其中, B 为残余失效面常数; M 为残余失效面指数.

对当前面描述如下: 若当前面位于弹性极限面和最大失效面之间时, 当前面 Y_{pre} 通过弹性极限面 Y_{ela} 与最大失效面 Y_{fail} 插值得到.

$$Y_{\text{pre}} = Y_{\text{ela}} + \varepsilon_{\text{pl,eq}}(Y_{\text{fail}} - Y_{\text{ela}}) / \varepsilon_{\text{plhard,eq}}, \quad (8)$$

式中, $\varepsilon_{\text{pl,eq}}$ 和 $\varepsilon_{\text{plhard,eq}}$ 分别为当前失效面和最大失效面对应的塑性应变.

当前面位于最大失效面和残余失效面之间时, 失效面取决于损伤量 D .

$$Y_{\text{pre}} = Y_{\text{fail}} - D(Y_{\text{fail}} - Y_{\text{residual}}), \quad (9)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_{p,\text{failure}}} = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{D_1(P^* - P_{\text{spall}}^*)^{D_2}} = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon_p}{D_1(P^* - P_{\text{spall}}^*)^{D_2}}, \varepsilon_{p,\text{failure}} \geq \varepsilon_{f,\min}, \quad (10)$$

其中, $\varepsilon_{f,\min}$ 为材料破坏时的最小塑性应变, 取

$0.01^{[3]}$; D_1 和 D_2 为材料损伤常数; ε_p 为塑性应变.

2 RHT 模型的改进

在 RHT 模型中, 在当前面的应变值超过最大应力对应的应变值时, 其应力值在失效强度与残余强度之间根据(9)式进行插值. 在此段区间中, 应力值由失效强度、残余强度及损伤量 D 决定. 失效强度与其对应的静水压有关. 但事实上, 在此区间中, 静水压往往是不不断变化的. 因此我们改进(7)式, 将公式中残余强度对应的归一化静水压换为当前面所对应的归一化静水压, 则:

$$Y_{\text{respre}}^* = B \times (P_{\text{pre}}^*)^M, \quad (11)$$

其中, P_{pre}^* 为当前面所对应的归一化静水压; Y_{respre}^* 表示在该当前面对应的静水压作用下混凝土的残余强度.

当应变超过失效力对应的应变时, 塑性应变随着应变的增加而增加. 文中笔者通过应变增量来近似表示塑性应变增量, 假设应变增量与塑性应变增量存在线性关系, 且,

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon \cdot \left(\sum \frac{\Delta \varepsilon}{D_1(P_{\text{pre}}^* - P_{\text{spall}}^*)^{D_2}} \right)^{-1},$$

$$\text{则, } D_{\text{pre}} = \int_0^{\varepsilon_{\text{pre}} - \varepsilon_{\text{fail}}} \frac{d\varepsilon}{D_1(P_{\text{pre}}^* - P_{\text{spall}}^*)^{D_2}} \times$$

$$\left(\int_0^{\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{fail}}} \frac{d\varepsilon}{D_1(P_{\text{pre}}^* - P_{\text{spall}}^*)^{D_2}} \right)^{-1}, \quad (12)$$

其中, $\varepsilon_{\text{fail}}$ 表示失效强度对应的应变; ε_{max} 表示残余强度对应的应变. 规定在 SHPB 实验中, 当应变达到 ε_{max} 时, 混凝土失去承载能力, $D_{\text{pre}} = 1$. 则,

$$Y_{\text{pre}} = Y_{\text{fail}} - D_{\text{pre}}(Y_{\text{fail}} - Y_{\text{respre}}). \quad (13)$$

3 实验研究

3.1 试样基本参数

文中所用到 2 种试样, 其质量配比为水:水泥:砂:碎石=0.43:1:1.2:2.4, 碎石的最大粒径不超过 6 mm, 几何尺寸分别为 $\Phi 74 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$ 的圆柱试样和 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的立方体试样. 将成型试样置于相对湿度 100%, 温度 20°C 的环境中养护 28 d 后, 对试样端面打磨至符合试验要求.

3.2 静态压缩试验

准静态压缩试验采用上海百若实验仪器有限公司生产的微机控制电液伺服万能机, 对 3 个立方

体试样进行应变率为万分之一的静态压缩试验, 得到混凝土泊松比为 0.223, 测得抗压强度分别为 40.8、46.5、45.0 MPa, 则平均抗压强度为 44.1 MPa.

3.3 SHPB 冲击试验

利用宁波大学自制的变截面霍普金森压杆装置对直径为 74 mm 混凝土圆柱试样进行冲击压缩试验, 子弹打击气压分别为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1 MPa, 得到的应力应变曲线如图 1 所示.

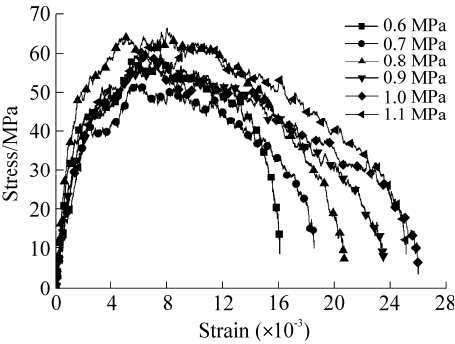


图 1 混凝土不同应变率下的应力应变曲线

4 数值拟合

选取应力应变曲线中弹性极限(取经光滑后的应力应变曲线上斜率开始变化的点)、失效强度(最大应力处的点)和残余强度(应变最大的点)应力状态点, 并取其沿压杆方向应力 σ_1 、对应的应变 ϵ_{eff} 以及应变率 $\dot{\epsilon}_{\text{eff}}$ 分别列于表 1.

取 $D_1 = 0.04$, $D_2 = 1$, $\epsilon_{\text{FMIN}} = 0.01$ [4], 将所得应力应变曲线光滑处理, 并进行数值拟合. 根据 (1)~(6)式及(8)式和表 1 中弹性极限与失效强度应力状态的数据, 可以得到参数 A 、 N 、 δ 、 α . 并根据(11)~(13)式可得到改进的 RHT 模型参数 B 和 M .

得到模型中的各参数列示于表 2. 各组实验曲线与经曲线拟合得到的理论曲线显示出良好的吻

表 1 SHPB 试验曲线中的弹性极限、失效强度和残余强度等状态量

打击气压/MPa	平均应变率/(s ⁻¹)	应力状态	σ_1 /MPa	$\epsilon_{\text{eff}}/(\times 10^{-3})$	$\dot{\epsilon}_{\text{eff}}/(\text{s}^{-1})$
0.6	32.69	弹性极限	30.44	0.44	32.15
		失效强度	58.69	4.04	30.90
		残余强度	9.62	8.51	-
0.7	36.35	弹性极限	29.34	0.66	36.48
		失效强度	52.70	3.04	40.34
		残余强度	10.15	9.82	-
0.8	38.83	弹性极限	32.92	0.40	25.67
		失效强度	66.80	4.23	41.20
		残余强度	6.41	10.97	-
0.9	44.17	弹性极限	39.05	0.97	43.92
		失效强度	57.23	3.85	53.61
		残余强度	8.21	12.46	-
1.0	47.87	弹性极限	41.11	1.15	45.39
		失效强度	59.73	3.41	57.80
		残余强度	4.48	13.78	-
1.1	48.07	弹性极限	42.05	1.29	46.75
		失效强度	64.85	3.32	43.78
		残余强度	8.30	13.33	-

表 2 改进后的 RHT 模型中各参数的拟合结果

A	N	δ	α	B	M
1.475	0.703	0.028	0.020	1.484	0.723

合结果, 相关性均在 98.7%以上, 图 2 则为应变率为 32.69 s^{-1} (图 2(a))和 48.07 s^{-1} (图 2(b))时的实验结果和理论曲线的比较.

由(12)式计算可以得到损伤量 D_{pre} . 随应变量增加的变化规律, 图 3 给出了平均打击气压(0.8 MPa)下的试样的损伤量 D_{pre} 与平均应变的关系.

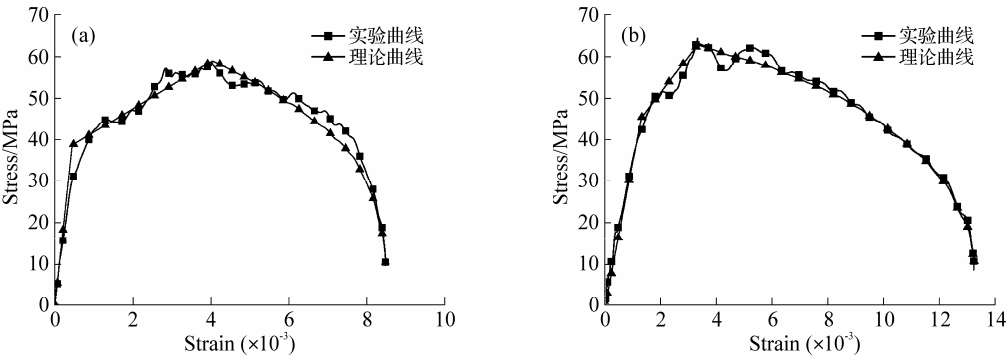


图 2 实验应力应变曲线和理论曲线的比较

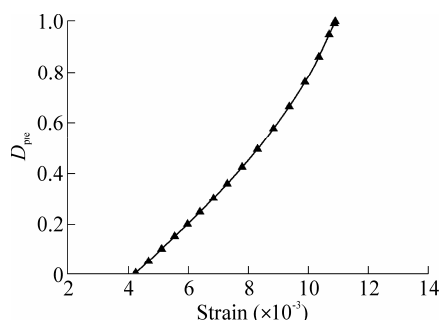


图3 D_{pre} —平均应变曲线

5 结论

(1)引进当前面所对应的归一化静水压参量和应变增量,改进了损伤量 D 的描述,修改了破坏应力之后的当前面描述,得到改进后的RHT模型.改进后的模型能够更好地描述静水压不断变化的应力状态.(2)引进弹性极限面和失效强度面对应的应力状态拟合RHT模型,并得到了改进RHT模型的一套本构参数 A 、 N 、 δ 、 α 、 B 和 M .(3)理论曲线与实验曲线吻合良好,表明采用简单的SHPB压缩实验曲线进行拟合得到本构参数的方法是获得RHT模型参数的一种有效方法.

参考文献:

[1] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]. Proceedings 14th

International Symposium on Ballistics, Quebec, Canada, 1993:591-600.

- [2] Riedel W, Thoma K, Hiermaier S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA2B2500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]. 9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg: IBMAC, 1999:315-322.
- [3] Hansson H, Skoglund P. Simulation of concrete penetration in 2D and 3D with the RHT material model[R]. Sweden: Tumba, Swedish Defence Research Agency, 2002.
- [4] 姜华, 王君杰. 弹体垂直侵彻钢筋混凝土数值模拟[J]. 同济大学学报, 2010, 38(4):557-563.
- [5] Zhenguo Tu, Yong Lu. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36:132-146.
- [6] Tu Zhenguo, Lu Yong. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(10):1072-1082.
- [7] 张若棋, 丁育青, 汤文辉, 等. 混凝土HJC、RHT本构模型的失效强度参数[J]. 高压物理学报, 2011, 25(1): 15-21.
- [8] 李世民, 李晓军. 几种常用混凝土动态损伤本构模型评述[J]. 混凝土, 2011, 260(6):19-22.

Improvement and Numerical Fitting of RHT Model

SHI De-sheng, SHI Guan-yin, CHEN Jiang-ying*

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

Abstract: The RHT model is widely employed in the numerical simulation of concrete, but its associated parameters are hard to obtain. The stress-strain curves of C40 concrete are obtained by taking advantage of SHPB, and the special arguments of the stress-strain curves for the given material corresponding to the elastic limit surface and failure surface are used in numerical fitting, and finally the parameters of RHT model A , N , δ and α are obtained. The normalization pressure P^* of the strength between failure surface and residual strength surface, as well as the increment of strain are introduced to improve the description of the damage D . Consequently, the RHT model is further improved. The theoretic stress-strain curves of improved RHT model are in good agreement with experimental ones. The proposed method proves to be an efficient way to obtain the parameters of RHT model.

Key words: RHT constitutive model; parameter of the failure surface; expression of current face; SHPB; dynamic impact

(责任编辑 章践立)