

一类实用的湿态混凝土单轴静动态本构模型

白卫峰¹, 陈健云^{1, 2}, 刘智光¹

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:引入饱和度, 根据试验结果研究湿态混凝土强度、初始弹性模量与饱和度、加载应变率之间的关系。考虑含水率对混凝土强度和初始弹性模量的影响, 结合现有规范建议的混凝土本构模型, 建立湿态混凝土静、动态工况单轴拉伸、压缩应力~应变全过程曲线实用经验表达式。算例表明, 湿度和应变率是影响混凝土本构行为的 2 个重要因素; 孔隙自由水的存在显著影响着混凝土的强度以及变形特性, 在实际工程中有必要考虑湿度条件对混凝土材料本构行为的影响。本文模型为湿态混凝土试验与理论成果难以实用化的问题提供了有效的解决途径。

关键词:湿态混凝土; 饱和度; 单轴荷载; 应力~应变全曲线; 应变率

中图分类号: TU317 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2009)S1-0044-04

近年来, 研究者相继对湿态混凝土静动态力学性能进行了试验和理论研究; 许多研究工作只限于研究混凝土的强度和初始弹性模量^[1-2], 少数针对整个变形过程进行分析^[3], 得到了一些有益的结论。试验表明^[2], 静态工况下, 孔隙水的存在削弱了混凝土颗粒间的作用, 降低了材料强度, 但同时提高了材料的初始弹性模量; 饱和湿度条件下混凝土表现出力学性质与自然湿度条件有很大差异。李庆斌等^[4]采用细观夹杂理论对孔隙水对混凝土初始弹性模量的增强机理进行了探讨。王海龙等^[5-6]采用细观断裂力学方法探讨孔隙水对混凝土强度的影响机制。动态工况下, 湿度条件是影响应变率与混凝土动态强度以及变形特性关系的最主要因素。孔隙中的自由水在动力荷载作用下对于混凝土强度有双重影响^[7]: 一方面孔隙水在压力作用下促使更多的微细裂纹发展, 另一方面由于水的黏性作用又延缓了裂纹的发展。随着加载速率的提高, 其动强度可能超过自然湿度混凝土的动强度, 这表明孔隙水的黏性起到了主要作用。Ross 等^[1]对干、湿 2 种混凝土进行静动态拉伸和压缩试验, 发现应变率对干混凝土动态强度的影响很小, 而对湿混凝土强度的影响显著。Weerheijm^[8]认为干燥混凝土强度增加的原因是由材料自身惯性引起的, 而湿混凝土强度增加的原因是由于材料自身惯性和孔隙中自由水的黏性引起

的。闫东明^[3]对饱和和自然 2 种湿度的混凝土进行了不同应变速率下的动态拉、压试验, 系统研究了湿度条件对混凝土动态性能的影响作用; 分析了强度、弹性模量、泊松比、临界应变等与应变速率之间的定量关系, 得到了大量有价值的数据库。

笔者通过现有干燥与饱和混凝土试验资料, 研究孔隙湿度对混凝土力学性能的影响, 基于规范^[9]推荐的单轴应力~应变全曲线, 在现阶段可得到的试验数据不完备的情况下, 针对不同湿度混凝土材料建立了相应单轴拉、压静动态全曲线方程。

1 准静态工况单轴全曲线方程

考虑到饱和混凝土与干燥混凝土试验全曲线有着良好的相似性^[3, 7], 笔者对干燥与湿态混凝土采用统一的全曲线形式。首先假设干燥混凝土单轴拉伸、单轴压缩全曲线可以直接由规范^[9]推荐公式得到。

1.1 单轴拉伸准静态全曲线方程

1.1.1 规范推荐形式

混凝土结构设计规范^[9](附录 C)中建议采用的混凝土单轴(轴心)受拉应力~应变全曲线方程中, 上升段为多项式形式, 下降段采用有理分式形式, 具体如下:

$$\begin{cases} y = 1.2x - 0.2x^6 & (x \leq 1) \\ y = \frac{x}{a_f(x-1)^{1.7} + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金(90510018)(50679006)教育部新世纪优秀人才计划(NCET-06-0270)

作者简介: 白卫峰(1982—)男, 河南鹤壁人, 博士, 从事混凝土损伤机理研究及结构抗震分析。E-mail: yf9906@163.com

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_t$, $y = \sigma/f_t$, $a_t = 0.312f_t^2$, $\varepsilon_t = 65f_t^{0.54}$; 其中 f_t , ε_t 分别为峰值状态对应峰值应力(抗拉强度)和峰值应变; a_t 为下降段形状控制参数。

1.1.2 标准损伤形式

以上应力~应变全曲线形式可转化为标准的损伤形式:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (2)$$

$$\begin{cases} D = 1 - \frac{1.2 - 0.2x^5}{1.2} & (x \leq 1) \\ D = 1 - \frac{1}{1.2[a_t(x-1)^{1.7} + x]} & (x > 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$E = f_t/\varepsilon_t(1 - D_{\text{峰}}) \quad (4)$$

式中: D 为损伤变量, 表征弹性模量损伤劣化的程度; $D_{\text{峰}}$ 为峰值状态对应损伤值, $D_{\text{峰}} = 1/6$; E 为初始弹性模量。

由式(2)~(4)可知, 规范中只需知道单轴抗拉强度 f_t 即可确定整个全应力~应变曲线。

1.1.3 湿态混凝土单轴拉伸应力~应变全曲线

假设同种混凝土材料在不同饱和度情况下的应力-应变关系具有相同的标准损伤本构形式, 即 D 的演化过程相同。

首先, 以干燥混凝土准静态结果作为参考状态, 当已知对应的单轴抗拉强度为 f_{tds} , 则可得到对应的应力~应变全曲线表达式。对应的干燥准静态初始弹模 E_{ds} 为

$$E_{\text{ds}} = f_{\text{tds}}/\varepsilon_{\text{tds}}(1 - D_{\text{峰}}) \quad (5)$$

式中: ε_{tds} 为对应峰值应变, $\varepsilon_{\text{tds}} = 65f_{\text{tds}}^{0.54}$ 。

湿度条件对混凝土材料准静态的抗拉强度和初始弹性模量产生显著的影响。在 Ross^[2] 的试验中, 饱和混凝土的初始弹性模量较干燥混凝土的弹性模量提高了 40%; 在闫东明^[3] 的试验中, 饱和混凝土的抗拉强度比自然湿度状态混凝土的抗拉强度降低了 41.2%。

设准静态工况下, 不同湿度混凝土的抗拉强度 f_{tws} 和初始弹性模量 E_{ws} 满足如下线形近似关系:

$$\begin{cases} f_{\text{tws}} = f_{\text{tds}}(1 - gK_t) \\ E_{\text{ws}} = E_{\text{ds}}(1 + gK_E) \end{cases} \quad (6)$$

式中: g 为饱和度, $g = 0$ 为干燥, $g = 1$ 为饱和; K_t , K_E 分别为饱和状态与干燥状态相比抗拉强度的减小系数和初始弹性模量的增长系数, 按照试验结果可取 $K_t = 0.4$, $K_E = 0.4$ 。

至此, 可以根据 E_{ws} 和 f_{tws} 确定准静态工况单轴拉伸全应力~应变曲线:

$$\sigma = E_{\text{ws}}\varepsilon(1 - D) \quad (7)$$

其中: $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$, $\varepsilon_t = \frac{f_{\text{tws}}}{E_{\text{ws}}(1 - D_{\text{峰}})}$

1.2 单轴压缩准静态全曲线方程

类似上述确定湿态混凝土单轴拉伸全曲线过程的步骤, 可确定湿态混凝土单轴压缩全曲线。

1.2.1 规范推荐形式

规范^[9]中建议采用的混凝土单轴(轴心)受压应力~应变全曲线表达式为

$$\begin{cases} y = a_a x + (3 - 2a_a)x^2 + (a_a - 2)x^3 & (x \leq 1) \\ y = \frac{x}{a_d(x-1)^2 + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_c$, $y = \sigma/f_c$, $a_a = 2.4 - 0.0125f_c$, $a_d = 0.157f_c^{0.785} - 0.905$, $\varepsilon_c = (700 + 172\sqrt{f_c}) \times 10^{-6}$; 其中 f_c , ε_c 分别为峰值状态对应峰值应力(抗压强度)和峰值应变, a_a , a_d 分别为上升段和下降段形状控制参数。

1.2.2 标准损伤形式

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (9)$$

$$\begin{cases} D = 1 - \frac{a_a + (3 - 2a_a)x + (a_a - 2)x^2}{a_a} & (x \leq 1) \\ D = 1 - \frac{1}{a_d[a_d(x-1)^2 + x]} & (x > 1) \end{cases} \quad (10)$$

$$E = \frac{f_c}{\varepsilon_c(1 - D_{\text{峰}})} \quad (11)$$

$$D_{\text{峰}} = 1 - \frac{1}{a_a} \quad (12)$$

规范中只需知道 f_c 就可确定整个全应力~应变曲线。

1.2.3 湿态混凝土单轴压缩应力~应变全曲线

假设不同湿度混凝土应力-应变关系具有相同的标准损伤本构形式。

干燥混凝土准静态单轴抗压强度 f_{cds} 作为参考强度, 则可得到对应的应力~应变全曲线表达式; 对应的初始弹性模量 E_{ds} 可表达为

$$E_{\text{ds}} = \frac{f_{\text{cds}}}{\varepsilon_{\text{cds}}(1 - D_{\text{峰}})} \quad (13)$$

式中: ε_{cds} 为对应峰值应变。

在闫东明^[3] 试验中, 饱和状态下混凝土的抗压强度比自然湿度状态下混凝土的抗压强度降低了 20%。设准静态工况下不同湿度混凝土的抗压强度 f_{cws} 和 E_{ws} 满足如下线形近似关系:

$$\begin{cases} f_{\text{cws}} = f_{\text{cds}}(1 - gK_c) \\ E_{\text{ws}} = E_{\text{ds}}(1 + gK_E) \end{cases} \quad (14)$$

式中: K_c 为饱和状态与干燥状态相比抗压强度的减小系数, 按照试验结果可取 $K_c = 0.2$ 。笔者认为混凝土拉伸或压缩情况下具有相同的初始弹性模量。

至此, 可以根据不同湿度混凝土的 E_{ws} 和 f_{cws} 确

定准静态工况单轴压缩全应力~应变曲线:

$$\sigma = E_{ws}\epsilon(1 - D) \quad (15)$$

其中: $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}, \epsilon_c = \frac{f_{cws}}{E_{ws}(1 - D_{峰})}$

2 动态工况单轴全曲线方程

试验结果表明^[3,10],不同应变率情况下混凝土应力~应变全过程曲线具有很好的相似性。这里假设相同湿度混凝土不同应变率下的应力-应变关系具有相同的标准损伤本构形式,因此只要知道湿态混凝土各种应变率下的强度和初始弹性模量即可确定全曲线方程。当饱和度为 g 时,以对应湿态混凝土在准静态工况的抗拉(抗压)强度 $f_{tws}(f_{cws})$ 和初始弹性模量 E_{ws} 为参考值。

2.1 单轴拉伸动态全曲线方程

文献^[3]给出自然湿度条件下混凝土的动态拉伸强度与应变速率间的关系(这里将自然湿度作为参考的干燥状态):

$$D_{IF} = 1 + 0.1341g(\bar{\epsilon}_t/\bar{\epsilon}_s) \quad (16)$$

式中: D_{IF} 表示不同速率下的强度与拟静态强度的比值; $\bar{\epsilon}_s$ 为拟静态应变速率,文中取 $10^{-5}s^{-1}$; $\bar{\epsilon}_t$ 为当前拉伸应变速率。

饱和条件下混凝土的动态拉伸强度与应变速率间的关系:

$$D_{IF} = 1 + 0.2651g(\bar{\epsilon}_t/\bar{\epsilon}_s) \quad (17)$$

根据文献^[3]提供的数据可以得到饱和混凝土的动态初始弹性模量与应变速率间的关系:

$$D_{IF} = 1 + 0.18981g(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_s) \quad (18)$$

文献^[2]指出,干燥混凝土的初始弹性模量几乎不受动态应变率的影响,因此干燥混凝土的动态初始弹性模量与应变速率间的关系:

$$D_{IF} = 1 \quad (19)$$

根据以上成果可建立如下关系:

$$f_{twd} = f_{tws} \{ 1 + [g(K_{tsd} - K_{tdd}) + K_{tdd}]g(\bar{\epsilon}_t/\bar{\epsilon}_s) \} \quad (20)$$

$$E_{wd} = E_{ws} \{ 1 + [g(E_{sd} - E_{dd}) + E_{dd}]g(\bar{\epsilon}_t/\bar{\epsilon}_s) \} \quad (21)$$

式中: f_{twd}, E_{wd} 分别为湿态混凝土动态抗拉强度和动态初始弹性模量; K_{tsd}, K_{tdd} 分别为饱和和干燥混凝土动态抗拉强度增长系数,按照上面数据可取 $K_{tsd} = 0.265, K_{tdd} = 0.134$; E_{sd}, E_{dd} 分别为饱和和干燥混凝土动态初始弹性模量增长系数,这里取 $E_{sd} = 0.18981, E_{dd} = 0$ 。

2.2 单轴压缩动态全曲线方程

文献^[3]给出饱和湿度条件下混凝土的动态抗

压强度与应变速率间的关系:

$$D_{IF} = 1 + 0.09691g(\bar{\epsilon}_c/\bar{\epsilon}_s) \quad (22)$$

式中: $\bar{\epsilon}_c$ 为当前压缩应变速率。

自然湿度条件下混凝土的动态抗压强度与应变速率间的关系:

$$D_{IF} = 1 + 0.08291g(\bar{\epsilon}_c/\bar{\epsilon}_s) \quad (23)$$

根据以上成果可建立如下关系:

$$f_{cwd} = f_{cws} \{ 1 + [g(K_{csd} - K_{cdd}) + K_{cdd}]g(\bar{\epsilon}_c/\bar{\epsilon}_s) \} \quad (24)$$

式中: f_{cwd} 为湿态混凝土动态抗压强度; K_{csd}, K_{cdd} 分别为饱和和干燥混凝土动态抗压强度增长系数,按照上面数据可取 $K_{csd} = 0.0969, K_{cdd} = 0.0829$ 。

3 算例分析

模拟单轴拉伸过程中,干燥混凝土准静态抗拉强度采用 $f_{tds} = 2 \text{ MPa}$,模拟单轴压缩过程中,干燥混凝土准静态抗压强度采用 $f_{cds} = 30 \text{ MPa}$ 。首先,假定干燥状态混凝土准静态情况下的单轴拉伸、单轴压缩应力~应变全曲线可由规范推荐公式确定,确定对应的干燥混凝土准静态初始弹性模量 E_{ds} ;然后根据本文建议的公式预测不同饱和度混凝土静、动态工况下单轴拉伸、压缩过程的应力~应变全曲线,分析不同湿度情况对混凝土强度、初始弹性模量以及变形性能的影响。

图1、图2分别显示了预测的不同饱和度混凝土准静态工况下单轴拉伸、单轴压缩的全过程应力~应变曲线(图中应力、应变分别采用归一化的相对值)。从图中可以看出,随着饱和度的提高,湿态混凝土的初始弹性模量不断增大,而单轴强度却不断减小,抗拉强度相较于抗压强度减小更为显著。不同饱和度情况下得到的应力~应变全曲线的形状具有良好的相似性。

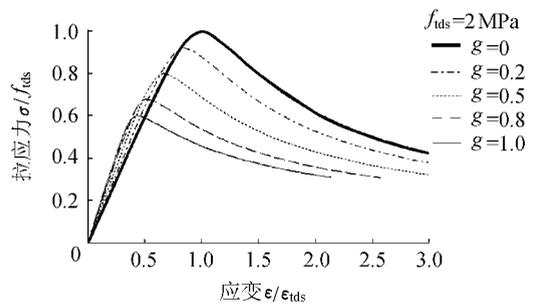


图1 不同湿度混凝土准静态单轴拉伸应力~应变全曲线

图3、图4分别显示了不同应变率工况下不同湿度混凝土单轴拉伸、单轴压缩全过程应力~应变曲线(图中应力、应变分别采用归一化的相对值)。从图中可以看出,动态应变率和湿度条件是影响混凝土材料力学性能的2个主要因素。相同湿度情况

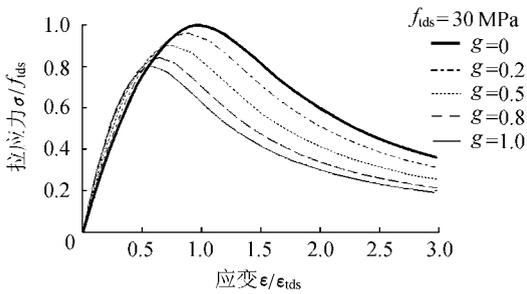


图2 不同湿度混凝土准静态单轴压缩应力~应变全曲线下,不同应变率工况得到的全曲线形状具有良好的相似性;强度以及对峰值应变均随着动态应变率的增大而增大。干燥状态下混凝土的初始弹性模量受应变率的影响很小,而饱和混凝土的初始弹性模量随着应变率的提高而显著增大。同时,随着湿度的增大,混凝土的强度随应变率增大的效应更加显著,在一定的应变率下湿态混凝土的强度可超过干燥混凝土静态时的对应强度。从整个混凝土单轴受力变形趋势看,和应变率因素相比,湿度因素对混凝土单轴变形性能的影响更为显著,随着湿度的增大,全曲线的形状整体向左下侧偏移。

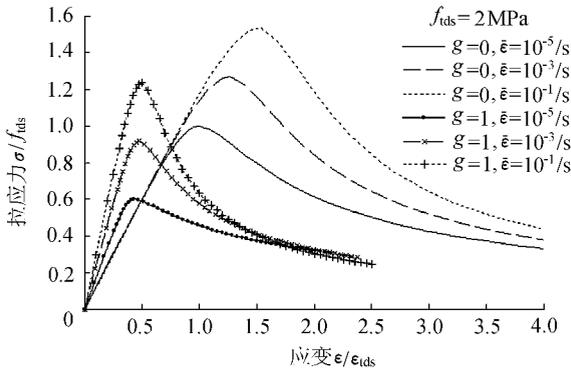


图3 不同湿度混凝土动态单轴拉伸应力~应变全曲线

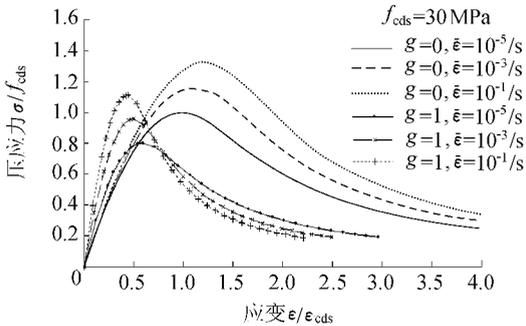


图4 不同湿度混凝土动态单轴压缩应力~应变全曲线

在目前混凝土结构的有限元计算中,往往忽略了湿度对混凝土自身本构行为的影响,不区分干燥状态、自然湿度状态以及饱和状态,均采用同样的本构模型;只是针对水下的混凝土部位考虑渗流的影响。如在水工坝体的有限元计算中混凝土坝体的水下部位和水上部位采用相同的本构曲线;在动力工况中也只是考虑动态应变率对混凝土本构模型的影

响而未考虑湿度因素。根据大量的试验结果以及本文经验公式模拟的算例,很明显地表明湿度条件和应变率一样是影响混凝土本构行为的重要因素;忽略湿度对混凝土本构的影响将会使计算结果跟实际产生很大的误差。

4 结论

- 湿态混凝土静、动态工况下的强度和初始弹性模量可以表示为饱和度 g 及相对应应变率对数 $\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$ 的线性函数。
- 结合规范推荐的混凝土单轴拉伸、压缩全曲线表达式,提出了一种实用、近似、经验的湿态混凝土静态工况单轴本构模型,考虑了不同饱和度、不同加载速率对混凝土强度、弹性模量以及变形特性的影响。算例表明湿度和应变率是影响混凝土本构行为的2个重要因素。
- 在现有本构模型中引入饱和度的方法,虽然需要一些补充假定,建立的也是经验公式,但非常直观,易于接受,是一种近似而实用的处理方法。利用有限的试验数据建立实用的单轴本构模型,充分考虑湿度条件对混凝土静态力学性能及本构关系的影响,为实际工程仿真模拟提供参考。

参考文献:

- [1] ROSS C A, DAVID M J, JOSEPH W T, et al. Moisture and strain rate effects on concrete strength[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(3): 293-300.
- [2] ROSSI P, Van MIER J G M, BOULAY C. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension[J]. Materials and Structures, 1994, 27(4): 260-264.
- [3] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [4] 李庆斌, 郑丹. 混凝土动力强度提高的机理探讨[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 188-193.
- [5] 王海龙, 李庆斌. 孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 141-144.
- [6] 王海龙, 李庆斌. 湿态混凝土抗压强度与本构关系的细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1531-1536.
- [7] 王海龙, 李庆斌. 不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 84-89.
- [8] WEERHEIJM J. Concrete under impact tensile loading and lateral compression[D]. Delft: Delft University of Technology, Netherlands, 1992.
- [9] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [10] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的试验研究及其本构关系[J]. 水利学报, 1997(7): 72-77.

(收稿日期 2008-12-17 编辑: 方宇彤)