

膨胀混凝土延迟膨胀损伤模型

杜宇^{1 2 3} 蒋林华^{1 2} 仇高山⁴ 周晓明^{1 2 3} 杨虎^{1 2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学力学与材料学院 江苏 南京 210098 ; 3. 华电电力科学研究院 浙江 杭州 310030 ;
4. 中铁十四局集团第三工程有限公司 山东 兖州 271200)

摘要 :以钙矾石为膨胀源的膨胀混凝土的延迟钙矾石在很大程度上影响混凝土耐久性。当得到充足水分和硫酸盐时,延迟钙矾石迅速生成,导致混凝土损伤。对该情形下的延迟钙矾石行为进行分析研究。根据膨胀混凝土延迟膨胀的特点,利用时间标志将膨胀混凝土延迟钙矾石损伤理论分段讨论。在此基础上,利用 Fick 扩散定律、损伤力学理论建立损伤模型,同时利用损伤力学及弹性力学对时间标志进行推定。

关键词 :钙矾石膨胀源;膨胀混凝土;延迟钙矾石;损伤模型

中图分类号 :TU528.55 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)04-0004-04

Damage model for delayed-expansion of expansive concrete//DU Yu^{1,2,3}, JIANG Lin-hua^{1,2}, QIU Gao-shan⁴, ZHOU Xiao-ming^{1,2,3}, YANG Hu^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 3. Huadian Electric Research Institute, Hangzhou 310030, China ; 4. 3rd Engineering Co., Ltd. of China Railway 14th Group Corporation, Yanzhou 271200, China)

Abstract : The delayed ettringite formation in the expansive concrete with ettringite as the expansive source has great impact on the durability of the expansive concrete. When there is plenty of water and sulfate, the delayed ettringite formation is rapidly generated, resulting in the damage of concrete. The behaviors of the delayed ettringite formation under the above situation were studied. According to the properties of delayed expansion of the expansive concrete, the damage procedure of the concrete owing to the delayed ettringite formation was separated into different stages by using time marks. On such a basis, a damage model was established by means of the Fick's diffusion law and the damage mechanics. The time marks were calculated based on the damage mechanics and the elastic mechanics.

Key words : ettringite expansion source ; expansive concrete ; delayed ettringite formation ; damage model

人们对高性能混凝土提出了强度、耐久性、和易性等要求,但随着水泥及掺合料细度的减小,混凝土的稳定性越来越差,导致混凝土早期裂缝问题趋于严重。由于膨胀混凝土很大程度上能够缓解早期裂缝问题,因此在我国已得到了广泛的应用,其中大部分是采用钙矾石为膨胀源的膨胀混凝土。

以钙矾石为膨胀源的膨胀混凝土(下文简称膨胀混凝土)存在延迟钙矾石(delayed ettringite formation, DEF)问题,这是该类膨胀混凝土最大的缺陷。英国已经出现了由于 DEF 所导致的现浇混凝土结构破坏^[1]。

目前对膨胀混凝土 DEF 问题的研究大多停留

在机理及微观层面上。如钙矾石的物相结构及显微形貌、形成机理、膨胀机理、热稳定性^[2],以及水泥、骨料、养护条件对生成延迟钙矾石的影响都有研究^[3]。而 DEF 对其力学及其他性能上的影响则鲜有报道。笔者拟根据膨胀混凝土延迟膨胀的特点,对 DEF 损伤展开讨论,并利用时间标志将损伤分段,推导得出膨胀混凝土在充足水分及硫酸盐情况下的 DEF 损伤模型。

1 膨胀混凝土损伤过程

假设混凝土为内部含孔隙的均匀物质,将膨胀混凝土在硫酸盐环境下的 DEF 损伤分成 3 个阶段:

①混凝土密实阶段 ;②微裂纹扩展阶段 ;③急剧劣化阶段。

硫酸盐环境下 ,腐蚀初期随着硫酸根离子的扩散 ,硫酸根离子与水分和膨胀混凝土内部的铝相开始生成钙矾石。这些膨胀产物在反应初始并没有对混凝土造成损伤 ,它们在混凝土的孔隙中生成并逐渐填满孔隙 ,直至孔隙内填充物的膨胀应力开始破坏孔隙外壁。将这一过程定义为混凝土的密实过程。这一过程中 ,膨胀产物将使混凝土内部结构密实 ,使混凝土内部的孔隙变小 ,混凝土呈现负损伤。接着 ,膨胀应力开始对孔隙壁产生影响 ,裂纹开始出现并展开 ,扩展至混凝土表面。这一过程定义为微裂纹扩展段。

当裂纹扩展至混凝土表面 ,裂纹中的钙矾石在接触到空气中的二氧化碳后 ,晶格破碎 ,迅速碳化。碳化后的钙矾石被外界迅速带走 ,使混凝土表面裂纹张开 ,表面剥蚀。硫酸根离子迅速进入混凝土试件内部。将这一过程定义为急剧劣化段 ,混凝土相对动弹性模量迅速下降。

1.1 膨胀混凝土损伤的密实阶段

混凝土密实过程可利用损伤力学中的自洽方法^[4]来研究 :

$$\frac{\bar{E}}{E} = 1 - \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} f \tag{1}$$

式中 : $\bar{E}$ 为侵蚀后混凝土的弹性模量 ; E 为侵蚀前混凝土的弹性模量 ; ν 为侵蚀后混凝土的泊松比 ; f 为微裂纹密度。

混凝土损伤度为

$$\omega = 1 - \frac{\bar{E}}{E} = \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} f \tag{2}$$

在钙矾石填充混凝土内部孔隙过程中 ,混凝土泊松比变化不大 ,可假设泊松比不变 ,损伤度为

$$\omega = \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} f \tag{3}$$

式中 : ν 为侵蚀前混凝土的泊松比。

若令膨胀混凝土损伤度为

$$\omega = \omega_0 + \omega(t) \tag{4}$$

其中
$$\omega_0 = \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} f_0$$

$$\omega(t) = \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} f(t)$$

式中 : ω_0 为膨胀混凝土侵蚀前损伤度 ; $\omega(t)$ 为 DEF 造成的损伤 ; $f(t)$ 为时间 t 时的裂纹密度函数 ; f_0 为混凝土试件的原有裂纹密度参数。

本文主要研究 DEF 造成的损伤 ,即 $\omega(t)$,由 Fick 扩散定律可得硫酸盐侵入深度^[5] :

$$x = \psi \sqrt{t} \tag{5}$$

其中

$$\psi = \frac{D_c c_0}{2h}$$

式中 : ψ 为只与材料和溶液性质有关的常数 ; D_c 为硫酸根离子在已腐蚀混凝土基体中的扩散系数 ; c_0 为硫酸根离子在腐蚀层中的质量浓度。

硫酸盐侵入密实过程如图 1 所示。

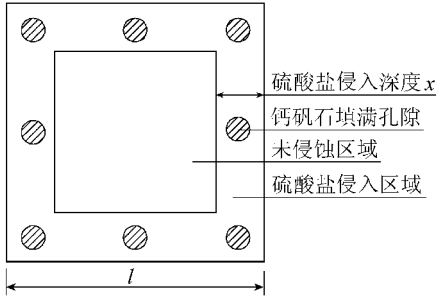


图 1 膨胀混凝土密实示意图

当硫酸根离子侵入 dx 时 ,积分得损伤影响区

域面积 $S = \int_0^x 4l dx = 4lx$,将式(5)代入 ,得

$$S = 4l\psi \sqrt{t} \tag{6}$$

又有 $\frac{\omega(t)}{\omega_0} = \frac{f(t)}{f_0} = \frac{(\sigma_0 - \sigma_m)S}{\sigma_0 l^2} = \frac{4\psi \sqrt{t}}{l} p$,其中 $p = \frac{\sigma_0 - \sigma_m}{\sigma_0}$, σ_0 为损伤前混凝土强度 , σ_m 为密实后混凝土强度 ,可得 $f(t) = \frac{4\psi \sqrt{t}}{l} p f_0$,故有

$$\omega(t) = \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} \frac{4\psi \sqrt{t}}{l} p f_0 \tag{7}$$

将式(7)简化为

$$\omega(t) = A \sqrt{t} \tag{8}$$

其中
$$A = \frac{16(1 - \nu^2) \chi}{45} \frac{10 - 3\nu}{2 - \nu} \frac{4\psi}{l} p f_0$$

1.2 膨胀混凝土损伤的微裂纹扩展阶段

假定填充孔隙钙矾石的膨胀应力为均布的。裂纹扩展简化为在混凝土内部存在长为 $2a$ 、宽度不计的微裂纹 ,受到膨胀应力的作用。可将假定简化为如图 2 所示的两部分相减 ,其中 σ_p 为膨胀应力 , σ_∞ 为 y 方向无穷远处所受常拉应力。

对于后者 ,类似于无裂纹板 ,对裂纹发展的作用与前者相比极其有限 ,将其忽略。将微裂纹扩展模型简化为如图 3 所示 ,试件在 y 方向无穷远处受一定常拉应力 σ_∞ 的作用 , $\sigma_\infty = \sigma_p$,如图 3 所示。

在裂纹尖端附近的应力场由混凝土抗拉应力 σ_y 控制 ,引入 Dugdale 裂纹扩展模型^[6] :

$$K_1 \sqrt{\pi a} - 2\sigma_y \arccos(1 - \frac{\Delta a}{a}) = K_{ic}^{ini} \tag{9}$$

其中

$$\Delta a = \beta a$$

$$\beta = 1 - \cos\left(\frac{\pi a \sigma_\infty - K_{ic}^{ini}}{2a \sigma_y}\right)$$

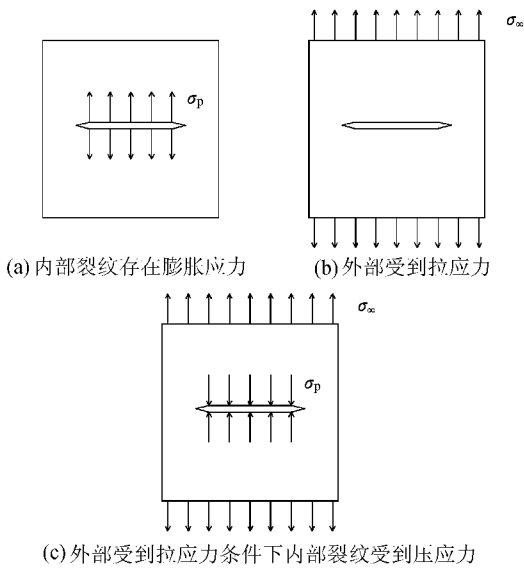


图2 裂纹模型简化示意图

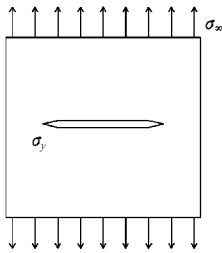


图3 裂纹模型示意图

式中: K_1 为应力强度因子, $K_1 = \sigma_\infty \sqrt{\pi a}$; a 为原始半裂纹长度; Δa 为裂纹尖端的损伤开裂长度; K_{ic}^{ini} 为起裂韧度。

计算得损伤开裂 Δa 所需时间 $t' = [A(k+1)(\sigma_y)^k]^{-1}$, 扩展后半裂纹长度 $a_1 = (1+\beta)a_0$ 。

将同一时刻扩展的裂纹看作一个裂纹带, 损伤的速率与裂纹变宽的速率保持一致。令 $t' = [A(k+1)(\sigma_y)^k]^{-1}$ 为单位时间, 则在 q 次循环后得到半裂纹长度扩展为

$$x_f = \frac{(1+\beta)a[(1+\beta)^q - 1]}{\beta} \quad (10)$$

考虑到分形曲线^[7]影响, 修正裂纹影响宽度为

$$x = \frac{(1+\beta)a[(1+\beta)^q - 1]}{n\beta} \quad (11)$$

式中: n 为由于裂纹的分形现象造成的混凝土半裂纹长度与影响区域宽度之比, 即 $n = \frac{x_f}{x}$ 。

忽略表面最近孔隙与表面距离, 可得微裂纹扩展阶段损伤度为

$$\omega(t) = 1 - \frac{\bar{E}}{E} = \frac{l^2 \sigma_0' - (l^2 - S)\sigma_0' - S\sigma_f}{l^2 \sigma_0'} = \frac{4x}{l} k_2 \quad (12)$$

式中: σ_0' 为裂纹扩展前混凝土抗压应力; σ_f 为混凝土内部出现裂纹后, 裂纹区域抗压应力; $k_2 =$

$$\frac{\sigma_0' - \sigma_f}{\sigma_0'}。$$

假定裂纹扩展的瞬间在每个 t' 之后发生, 令 $q \approx \frac{t}{t'}$, 则

$$\omega(t) = \frac{4x}{l} k_2 = \frac{4(1+\beta)a[(1+\beta)^q - 1]}{n\beta l} k_2 = \frac{4(1+\beta)a[(1+\beta)^{\frac{t}{t'}} - 1]}{n\beta l} k_2 \quad (13)$$

简化为

$$\omega(t) = B(C^t - 1) \quad (14)$$

$$\text{其中 } B = \frac{4(1+\beta)a}{n\beta l} k_2, \quad C = (1+\beta)^{\frac{1}{t'}} \sigma_y^k$$

1.3 膨胀混凝土损伤的急剧劣化阶段

假设钙矾石晶粒崩裂的情形符合陈贤拓等^[8]提出的裂变模型。设每一干湿循环裂变 n 代, 令每次循环时间为 t_0 , 经历了 h 次循环后足够小, 将随着溶液析出, 裂变 h 次循环试样碳化速度

$$\frac{dl}{dt} = k_s' P_{CO_2} P_{H_2O} N_0 2^n 4\pi \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2nt}{3}} R^2 = k_s 2^{\frac{nt}{3}} \quad (15)$$

式中: k_s' 为钙矾石单位表面积反应速率常数; P_{CO_2} 为二氧化碳的分压; P_{H_2O} 为水的分压; N_0 为碳化前钙矾石晶粒个数; R 为碳化前钙矾石晶粒半径; $k_s = k_s' P_{CO_2} P_{H_2O} N_0 4\pi R^2$; $t = ht_0$ 为 h 次循环总时间。

将式(15)转化为

$$\frac{dS}{dt} = 4l \frac{dl}{dt} = 4lk_s 2^{\frac{nt}{3}} \quad (16)$$

积分可得损伤影响区域面积

$$S = \frac{12lk_s}{n \ln 2} (2^{\frac{nt}{3}} - 1) \quad (17)$$

随着碳化的进行, 混凝土裂纹间的填充物快速松散。混凝土表面迅速剥落, 强度急速下降, 认为该区域混凝土几乎已经完全失去强度。

急速劣化阶段损伤度为

$$\omega(t) = 1 - \frac{\bar{E}}{E} = \frac{l^2 \sigma_0'' - [l^2 - S(t)]\sigma_0'' - S(t)\sigma_c}{l^2 \sigma_0''} = \frac{12k_s' k_3}{n \ln 2} (2^{\frac{nt}{3}} - 1) \quad (18)$$

式中: σ_0'' 为混凝土急速劣化前强度; σ_c 为经历急速劣化过程后, 劣化区的混凝土抗压应力; $k_3 = \frac{\sigma_0'' - \sigma_c}{\sigma_0''}$ 。

将式(18)简化为

$$\omega(t) = D(2^{qt} - 1) \quad (19)$$

$$\text{其中 } D = \frac{12k_s' k_3}{n \ln 2}, \quad q = \frac{n}{3}$$

2 关于时间标志的讨论

令钙矾石充满混凝土表层孔隙,产生足够膨胀应力的时间为 t_1 ;令微裂纹扩展至混凝土表面的时间为 t_2 。到达 t_1 意味着表层混凝土孔隙填充完毕,混凝土表层开始损伤。采用硫酸盐密实模型来定义 t_1 ,硫酸盐侵入深度 $x = \psi \sqrt{t}$ 。设第 1 孔隙到混凝土表面的距离为 r ,则硫酸盐进入混凝土孔隙所用时间为 $t'_1 = \frac{r^2}{\psi}$,进入速度为 $v_1 = \frac{dx}{dt} = \frac{\psi^{3/2}}{2r}$ 。假设孔隙容积为 V ,同时假定在单位时间 t_0 时,进入的硫酸盐能够产生单位体积为 V_0 的钙矾石填充孔隙,填满时间为 $t''_1 = \frac{V}{V_0} t_0$ 。钙矾石充满后,假定硫酸盐进入的速度不变,按照上述假设继续产生钙矾石,直至孔隙内壁出现裂纹。

将孔隙内部钙矾石看作体积为 V 的微元,随着硫酸盐的进入,孔隙内继续生成钙矾石,孔隙出现塑性变形,容积变为 $V + \Delta V$,钙矾石体积应变 $\epsilon = \frac{\Delta V}{V}$ 。此时孔隙表面所受压应力 $\sigma = B\epsilon = B \frac{\Delta V}{V}$,其中 B 为钙矾石弹性模量。应力分布如图 3 所示。

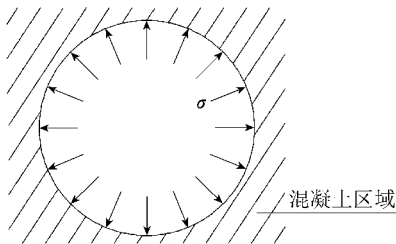


图 4 孔隙内应力模型

假设此模型为弹性体,孔隙内壁受孔隙内压应力 σ ,孔隙半径为 e ,体力不计。边界条件为 $f_r = 0$, $\sigma_r|_{r=e} = -\sigma$, $\sigma_r|_{r=\infty} = 0$ 。弹性力学解答为 $\sigma_\theta = \sigma_\varphi = \frac{\sigma e^3}{2r^3}$ 。式中 $\sigma_\theta, \sigma_\varphi$ 为距孔心距离 r 处的 x, y 方向的切向正应力(模型受到 x, y, z 方向的应力,其中 x, y 方向为切应力, z 方向为正应力); r 为距孔心距离。

孔边产生 $\sigma/2$ 的切向拉应力,当大于最大拉应力时,孔隙裂纹开展,即

$$\Delta V = \frac{2\tau V}{B} \tag{20}$$

式中 τ 为混凝土最大拉应力。

此时所用时间

$$t'''_1 = \frac{\Delta V}{V_0} t_0 = \frac{2\tau V}{BV_0} t_0 \tag{21}$$

联合可得

$$t_1 = t'_1 + t''_1 + t'''_1 = \frac{r^2}{\psi} + \frac{V}{V_0} t_0 + \frac{2\tau V}{BV_0} t_0 \tag{22}$$

进入 t_2 意味着微裂纹扩展到混凝土表面,混凝土表面开始剥蚀疏松,失去强度,外界有害物质迅速进入混凝土内部,混凝土将快速劣化。

采用急剧劣化模型,假设孔隙平均分布,孔到试件边缘的距离为 λ ,每个孔之间的距离为 2λ 。

同前,令 $q = \frac{t}{t'}$,则 $\lambda = [(1 + \beta)^q - 1]a$,可得

$$q = \log_{1+\beta} \left(\frac{\lambda}{a} + 1 \right) \quad \text{所用时间:}$$

$$t_2 = qt' = \log_{1+\beta} \left(\frac{\lambda}{a} + 1 \right) [A(k+1)\sigma_y^k]^{-1} \tag{23}$$

3 硫酸盐环境下膨胀混凝土 DEF 损伤模型

硫酸盐环境下膨胀混凝土 DEF 损伤模型分为 3 个部分:①时间标志 t_1 前只有内部密实过程;②时间标志 t_1 至 t_2 间是内部密实和微裂纹扩展的叠加;③时间标志 t_2 后是内部密实、微裂纹扩展及急剧劣化的叠加。故延迟钙矾石造成的损伤为

$$\omega(t) = -A\sqrt{t} + B[C^{(t-t_1)} - 1] + D[2^{(t-t_2)} - 1] \tag{24}$$

其中,当 $t - t_1 \leq 0$ 时,取 $t - t_1 = 0$;当 $t - t_2 \leq 0$ 时,取 $t - t_2 = 0$ 。

4 结 论

利用时间标志将膨胀混凝土损伤分为密实段、微裂纹扩展段以及急剧劣化段。利用损伤力学及弹性力学推导时间标志,在到达时间标志 t_1 时,膨胀混凝土开始损伤;当到达时间标志 t_2 时,膨胀混凝土开始急剧劣化。同时利用 Fick 扩散定律、损伤力学理论得出膨胀混凝土的损伤模型。

参考文献:

[1] HOBBS D W. Concrete deterioration :causes ,diagnosis ,and minimizing risk[J]. International Materials Reviews ,2001 ,46 (3) :117-144.

[2] 蒋敏强.海水侵蚀下混凝土材料的微结构演化及宏观力学性能的研究[D].扬州:扬州大学,2005 5-10.

[3] 莫样银,卢都友,梅来宝,等.国外延迟性钙矾石反应研究进展及评述[J].混凝土,2000(7):6-10.

[4] 余文寿,冯桥西.损伤力学[M].北京:清华大学出版社,1997 81-85.

[5] 李士伟.桥用混凝土配合比设计及硫酸盐腐蚀研究[D].南京:河海大学,2008.

[6] 杨光松.损伤力学与复合材料损伤[M].北京:国防工业出版社,1995 61-62.

[7] 叶志明.各向异性材料与混凝土材料:断裂力学引论[M].北京:中国铁道出版社,2000 89-100.

[8] 陈贤拓,邹瑞珍.钙矾石晶体内部碳化过程物理模型的研究[J].化学学报,1995 53 855-860.

(收稿日期 2009-08-14 编辑:方宇彤)