

地下结构混凝土微胶囊自修复法及力学模型

周 帅^{1,2,3}, 朱合华^{1,2,3}, 闫治国^{1,2,3}, 朱建文^{1,2,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 由于受到外环境和内环境的共同作用, 地铁隧道结构的劣化现象是不可避免的, 且用常规方法难以修复. 而微胶囊自修复混凝土为地铁隧道结构的修复提供了新的方法, 它能够智能、大范围地修复细微裂缝, 且对结构造成的初始损伤较小. 为此, 提出了基于泰勒弹性损伤模型的受拉荷载下地下结构微胶囊自修复混凝土的二维自修复细观力学模型, 建立了损伤修复演化方程, 给出了修复后柔度的求解公式. 微胶囊自修复水泥的试验与数值对比分析表明, 该模型不仅能够模拟地下结构微胶囊自修复混凝土的损伤修复现象, 而且具有较好的计算精度.

关键词: 地铁隧道; 微胶囊自修复混凝土; 二维; 受拉荷载; 自修复细观力学模型

中图分类号: TU 313

文献标志码: A

Self-healing Micromechanical Model of Microcapsule-enabled Self-healing Concrete in Underground Structures

ZHOU Shuai¹, ZHU Hehua^{1,2,3}, YAN Zhiguo^{1,2,3}, JU J Woody^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Subjected to complex internal and external environment, the degradation of concrete lining in urban metro tunnels seems inevitable. It is difficult to repair it by traditional methods. Concretes with microencapsulated healing agents are very appealing due to the advantage of self-healing and potentiality of controllable healing on a large scale with little initial damage. Based on Taylor's model, a 2D self-healing micromechanical model of microcapsule-enabled self-healing concrete in underground structures subjected to

tensile load is proposed. The kinetic equations of damage-healing evolution and the formulations of compliance after healing are developed. In the end, the comparison between the theoretical and experimental results of microcapsule-enabled self-healing mortars verifies that with the model, the phenomenon of damage and healing of microcapsule-enabled self-healing concrete in underground structures can be simulated, and rational results can be obtained.

Key words: metro tunnel; microcapsule-enabled self-healing concrete; 2D; tensile load; self-healing micromechanical model

地铁隧道衬砌结构最常用的材料是钢筋混凝土. 混凝土是一种存在非连续微裂缝且多孔的准弹性不透水材料. 与地上结构不同, 地铁隧道由于受到外环境(岩土体、污染地下水、周围人为施工扰动)和内环境(低频列车振动)的共同作用, 使得其保持良好的健康服役状态非常困难. 混凝土衬砌在形成前会因为水化热产生的温度应力、自身收缩徐变以及由于养护、吊运、安装不当等原因产生初始微损伤. 服役初期, 在列车循环荷载、周近施工扰动荷载、不均匀沉降产生的附加荷载、地面建筑附加荷载等作用下, 微裂缝和空隙连通起来, 使得混凝土不透水性逐渐丧失. 之后, 由于水、二氧化碳、氯离子和硫酸根离子等的渗入, 饱水的混凝土由于一种或几种体积膨胀现象(如水结冰、钢筋锈蚀与钙矾石或碱硅凝胶体积膨胀等), 导致其孔溶液的静水压力上升; 同时, 由于水泥里的氢氧根离子溶蚀, 被氯离子或硫酸根离子所取代, 硅酸钙水化物就会丧失胶凝性和强度, 这两种损伤过程都会使微裂缝扩展, 导致水密性进一步丧失, 加剧了损伤. 周而复始, 使混凝土开裂剥落. 此外, 地铁隧道是不可拆除或不可逆结构, 其

收稿日期: 2013-08-22

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB013800); 教育部长江学者创新团队计划(PCSIRT, IRT1029)

第一作者: 周 帅(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道病害和结构材料智能自修复. E-mail: china_zhoushuai@163.com

通讯作者: 闫治国(1977—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下空间防灾. E-mail: yanzguo@tongji.edu.cn

设计使用寿命在 100 年以上,投入运营后车辆运行密度极高、使用条件苛刻,一旦损坏则不易或不可更换,甚至会诱发地下工程灾害.因此必须要求其处于良好的运营维护状态.地铁管片开裂渗漏情况见图 1.



图 1 地铁管片开裂及渗漏

Fig. 1 The cracks and leakage of urban metro lining

1 微胶囊自修复方法

地铁隧道结构的劣化现象是不可避免的,且用常规方法难以修复,而微胶囊自修复混凝土为地铁隧道结构的修复提供了新方法.微胶囊自修复混凝土是近年来新兴的一种结构自愈材料,它能够智能地、大范围地修复细微裂缝,且对结构造成的初始损伤较小.其机理是当结构内产生微裂缝时,裂缝尖端撕破预埋于结构内部大小在微米级的含有修复剂的微胶囊,微胶囊内部修复剂流出填补裂缝(图 2).它最早应用于复合材料中,White 等^[1]研究了包覆双环戊二烯微胶囊的制备、应用及修复机理.国内学者^[2]也在微胶囊修复聚合物基复合材料方面作了广泛研究,但对水泥基材料的研究报导较少.

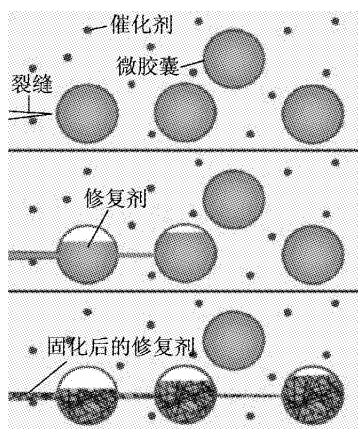


图 2 微胶囊自修复材料的自修复示意图^[1]

Fig. 2 Schematic illustration of the microcapsule self-healing materials^[1]

微裂缝的早期自修复能力对提高水泥基材料工程应用性能至关重要,目前的主要途径是依靠将包

裹聚合物胶的空心玻璃纤维预埋在水泥石中制备仿生自愈水泥石.美国伊利诺伊大学的 Dry 等^[3]是早期较全面从事混凝土自修复研究的学者,采用不同修复剂材料研究修复后混凝土的动力和静力性能等.国内也有学者研究玻璃管自修复混凝土^[4].但玻璃管自修复混凝土成本较高,工艺复杂,管壁强度高、不易破裂,且难以在混凝土里均匀分布,修复作用有限;且由于在混凝土中所采用的胶囊半径为毫米甚至厘米级别,胶囊会造成混凝土的初始损伤,引起混凝土刚度下降.因此,用毫米或厘米级的胶囊修复混凝土微裂缝的方法难以为继.相比之下,微米级的微胶囊自修复方法能够智能地、大范围地修复细微裂缝,是一种有前途的混凝土自修复方法.

目前微胶囊自修复水泥基材料研究主要关注于室内试验^[5-7],试验结果只能定性说明其确有自修复能力,但对其多尺度力学性能和损伤修复本构模型尚无研究,致使其在地下结构中的应用受到制约.

在前人微胶囊自修复混凝土试验研究的基础上^[5-7],结合泰勒损伤模型,本文从细观角度研究地下结构微胶囊自修复混凝土的修复模型,将其力学行为视为损伤和修复共同作用的结果,研究了在受拉荷载下微裂纹的损伤修复演化情况,并与试验结果进行比较以验证模型的有效性,为微胶囊自修复混凝土在地铁隧道中的应用提供一定的理论基础.

2 泰勒弹性损伤模型基本框架

2.1 热力学基础

Ju^[8-9]认为四阶弹性损伤割线柔度张量 \bar{S} 和四阶各向异性损伤张量 \bar{D} 之间存在一一对应关系,因此本文将割线柔度张量 $\bar{S}(\bar{D})$ 当作各向异性损伤变量.这里定义体积平均应变余能^[10]

$$\chi = \frac{1}{2} \bar{\sigma} : \bar{S}(\bar{D}) : \bar{\sigma} \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 是体积平均应力张量^[11]; \bar{S} 是体积平均割线柔度张量.

依据 Clausius-Duhem 不等式,可以得出

$$\dot{\chi} - \bar{\sigma} : \dot{\bar{\epsilon}} \geq 0 \quad (2)$$

其中 $\bar{\epsilon}$ 是体积平均应变张量.将式(1)对时间求导数,并依据标准 Coleman 方法,可以得到以下宏观应力应变准则和损伤耗散不等式:

$$\bar{\epsilon} = \bar{S} : \bar{\sigma} \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \bar{\sigma} : \dot{\bar{S}} : \bar{\sigma} \geq 0 \quad (4)$$

由方程(4)可知, $\dot{\bar{S}}$ 在微裂缝能量耗散和演化过

程中占据着关键位置. 弹性损伤割线柔度张量可以分解为

$$\bar{\mathbf{S}} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_d \quad (5)$$

式中: \mathbf{S}_0 代表无损伤时基体的弹性柔度; \mathbf{S}_d 代表损伤引起的附加柔度^[12].

2.2 弹性损伤割线柔度

在二维情况下, 方程(3)可以利用 Voigt 记号改写为

$$\bar{e}_i = \bar{S}_{ij} \bar{\tau}_j$$

其中: $\bar{e}_1 = \bar{\epsilon}_{11}, \bar{e}_2 = \bar{\epsilon}_{22}, \bar{e}_3 = 2\bar{\epsilon}_{12}, \bar{\tau}_1 = \bar{\sigma}_{11}, \bar{\tau}_2 = \bar{\sigma}_{22}, \bar{\tau}_3 = \bar{\sigma}_{12}$. 在受拉情况下, 割线柔度其实是卸载柔度.

利用坐标转换矩阵 \mathbf{g} 和 \mathbf{g}' , 可以得出全局坐标系下割线柔度矩阵 \bar{S}_{ij} 和局部坐标系下割线柔度矩阵 S'_{ij} 之间的关系

$$S'_{ij} = g'_{im} g'_{jn} \bar{S}_{mn}, \quad \bar{S}_{ij} = g_{mi} g_{nj} S'_{mn}$$

其中

$$\mathbf{g}' \equiv \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\frac{1}{2} \sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g} \equiv \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin 2\theta \\ -\frac{1}{2} \sin 2\theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

这里, 局部坐标系相关于某个特定的微裂缝, 例如轴 y' 平行于这个微裂缝面的法向量(图 3).

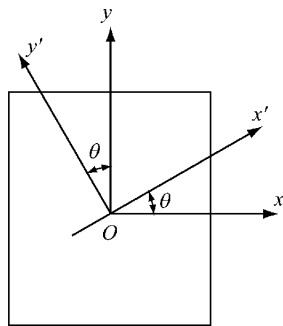


图 3 局部坐标系和整体坐标系

Fig. 3 The local and global coordinate systems

依据几何协调条件以及应力应变关系式(3), 通过复杂的推导可以得到^[13]

$$\mathbf{S}'_{d,k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\pi a_k^2 (1 - \nu_0^2)}{AE_0} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\pi a_k^2 (1 - \nu_0^2)}{AE_0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $S'_{d,k}$ 表示第 k 个裂纹在局部坐标系下引起的柔度增量; a_k 是第 k 个裂纹的长度; A 是计算截面面积; E_0 和 ν_0 分别表示基体的弹性模量和泊松比.

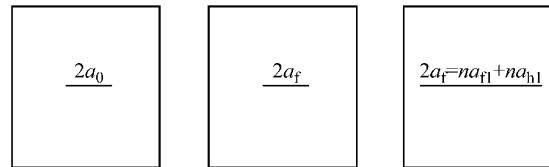
在基体内所有微裂缝的非弹性柔度张量 \mathbf{S}_d 可以表示为^[9]

$$\mathbf{S}_d = N \int_{\Omega} \mathbf{S}_{d,k} p(\theta, a) d\Omega \quad (7)$$

式中: N 表示微裂缝的数量; Ω 表示微裂缝所有长度和倾角组合的取值; $\mathbf{S}_{d,k}$ 表示第 k 个微裂缝在全局坐标系下引起的柔度增量; $p(\theta, a)$ 是裂纹倾角 θ 和裂纹长度 a 的联合概率密度函数.

3 地下结构微胶囊自修复混凝土细观修复模型

当地下结构混凝土中含有微胶囊时, 由于微裂纹扩展撕裂微胶囊, 微胶囊中的修复剂流出填补微裂纹, 从而产生修复效果. 考虑以环氧树脂等黏度较大的修复剂作为微胶囊芯材的地下结构微胶囊自修复混凝土, 假设微裂纹从起始尺寸 $2a_0$ 沿弱面或界面瞬间扩展到最终尺寸 $2a_f$ 的过程中将碰到 n 个微胶囊, 微裂纹将被流出的修复剂分割为 n 段, 其中每颗微胶囊修复微裂纹的长度为 a_{hl} . 简化起见, 假设修复剂将微裂纹修复成均匀等长的裂纹 a_{fl} . 地下结构微胶囊自修复混凝土的损伤修复机理见图 4.



a 损伤前 b 损伤后 c 修复后

图 4 微胶囊自修复材料的损伤修复机理

Fig. 4 The damage-healing mechanism of microcapsule-enabled self-healing materials

当微胶囊中心处于微裂纹附近的灰色区域时(图 5), 微胶囊将会碰到微裂纹引发修复. 这里假设微胶囊数量较少, 因此忽略微胶囊之间的相互影响. 同时假设微胶囊在基体里均匀分布. 微裂纹几何概率修复模型原理见图 5.

微胶囊修复微裂纹后的情况可由几何概率推导得出. 设微裂纹碰到一颗微胶囊的概率为 p , 碰到微胶囊颗数的数学期望为 $E(n)$, 一颗微胶囊修复裂纹的长度为 a_{hl} , 修复后每一小段微裂纹的长度为 a_{fl} , 微胶囊的半径为 r , 微裂纹的宽度为 l_2 , 计算截面的总面积为 A , 离裂缝距离小于 r 的面积为 A_{al} , 计算

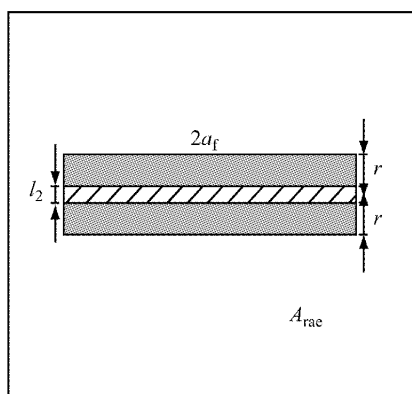


图 5 微裂纹几何概率修复模型

Fig. 5 The microcrack geometric probability healing model

截面初始微裂纹数量为 N . 本文中定义代表面积单元为在细观尺度上只含一条微裂纹的面域. 代表面积单元面积为 A_{rea} . 由图 5 可以得出

$$p = \frac{A_{a1}}{A_{rea}} = \frac{2a_f(l_2 + 2r)}{(A/N)} = \frac{2Na_f(l_2 + 2r)}{A} \quad (8)$$

设微胶囊的总颗数为 m , 每个代表面积单元内的微胶囊数量为 n' , 易知微裂纹碰到微胶囊的颗数服从二项分布, 则 n 的数学期望值为

$$E(n) = n'p = \frac{m}{N} \frac{2Na_f(l_2 + 2r)}{A} = \frac{2ma_f(l_2 + 2r)}{A} \quad (9)$$

假设每一颗微胶囊内含有的修复剂全部流入微裂纹中, 则一颗微胶囊修复微裂纹的长度 a_{h1} 为

$$a_{h1} = \pi r^2 / l_2 \quad (10)$$

修复后每一小段微裂纹的长度 a_{f1} 为

$$a_{f1} = 2a_f / n = \pi r^2 / l_2 \quad (11)$$

修复前微裂纹的扇形分布域见图 6a, 修复后微裂纹的扇形域见图 6b. θ_1 为未修复时长度为 $2a_f$ 裂纹的扇形角(图 6a), θ_{h1} 为修复发生时长度为 $2a_f$ 裂纹的扇形角(图 6b).

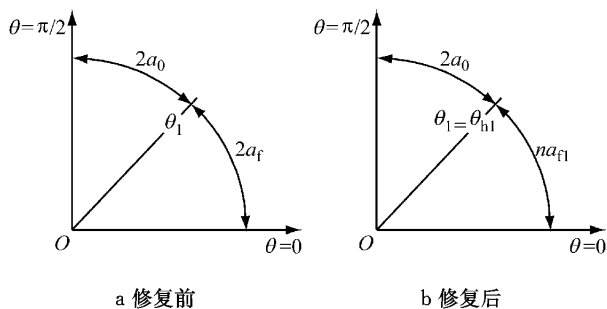


图 6 修复前后微裂纹扇形域

Fig. 6 The domains of Mode I microcrack before and after healing

修复后混凝土的总体柔度

$$\bar{S} = S_0 + S_{d,h} + S_{d,i} \quad (12)$$

式中: $S_{d,h}$ 表示修复后微裂纹引起的附加柔度, 由 n 条长度为 a_{f1} 的短裂缝组成; $S_{d,i}$ 表示长度为 $2a_0$ 的初始裂纹引起的附加柔度. 其中

$$S_{d,i} = \frac{N}{\pi} \int_{-\theta_1}^{+\pi/2} \mathbf{g}_k^T \mathbf{S}'_{d,k}(\theta, a_0) \mathbf{g}_k d\theta \quad (13)$$

由于泰勒模型不考虑微裂纹的相互影响, 故可将修复后的 n 段微裂纹的柔度贡献进行叠加得出最终修复后微裂纹引起的柔度. 故

$$S_{d,h} = \frac{N}{\pi} \int_{-\theta_1}^{+\theta_1} \mathbf{g}_k^T (n \mathbf{S}'_{d,k}(\theta, a_{f1}/2)) \mathbf{g}_k d\theta \quad (14)$$

4 地下结构微胶囊自修复混凝土微裂缝演化方程

4.1 微裂纹扩展判定准则

即使在未加载情况下, 在地下结构混凝土中仍含有大量初始微裂缝(例如骨料水泥浆界面和微孔洞). 在初始微裂纹被更高的能量势垒阻止前, 它们会以自相似的准则沿着同一个弱面扩展, 通过假设激活的初始微裂缝沿着弱面增长到最终长度, 问题可以得到简化^[14]. 例如, 在水泥石中的微孔洞直径从 $2a_0$ 沿直线增长到 $2a_f$. 经典断裂力学判定准则可以作为确定初始裂缝是否扩展的判定依据. 但这种方式无法模拟新的微裂缝的成核. 本文中的模型无法模拟应力应变曲线的下降段, 因为在此阶段有大量微裂缝成核现象发生. 本文只考虑在拉应力下微胶囊自修复材料的损伤修复本构模型的上升段. 计算截面的应力状态如图 7.

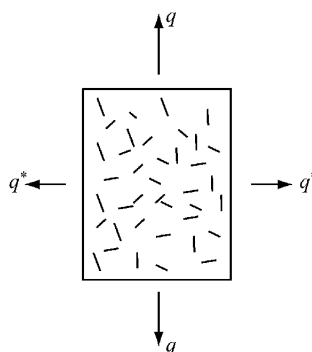


图 7 计算截面的应力状态

Fig. 7 The stress state of computational section

在单轴受拉荷载和双轴受拉荷载下, 定义轴向受拉荷载 $\tau_2 = q$, 侧向受拉荷载 $\tau_1 = q^*$. 在角度为 θ 的典型微裂缝面的正向应力 $\bar{\tau}'_2$ 为

$$\bar{\tau}'_2 = q \cos^2 \theta + q^* \sin^2 \theta > 0 \quad (15)$$

简化起见, 这里采用单裂纹稳定准则判断裂纹

的扩展情况^[15]:

$$f = K'_I - K_{IC,0} = 0 \quad (16)$$

式中: $K'_I = \tau'_2 \sqrt{\pi a_0}$; $K_{IC,0}$ 代表基体弱面的断裂韧度. 简化起见, 假设侧向受拉荷载 q^* 是常数, 且轴向受拉荷载 $q > q^*$. 因此可以得出使某条角度为 θ 的裂纹扩展的荷载为

$$q = \frac{K_{IC,0}}{\sqrt{\pi a_0 \cos^2 \theta}} - q^* \tan^2 \theta \quad (17)$$

因此可以得出第一条微裂缝产生的位置为 $\theta = 0$, 且此时 q 为

$$q(\theta = 0) \equiv q_0 = K_{IC,0} / \sqrt{\pi a_0} \quad (18)$$

其中 q_0 为第一条裂纹产生时对应的轴向荷载.

4.2 微裂纹演化计算模型

定义 q_1 为计算截面轴向最大荷载. 考虑以环氧树脂等修复剂作为微胶囊芯材. 由于环氧树脂固化耗时较长, 故试验过程中需卸载并等待其修复效果发生, 即定义 $q = 0$ 时修复发生. 微裂纹演化过程如下.

(1) 当 $q = q_1 < q_0$, 且修复未发生时, 此时所有的微裂缝均保持初始大小 $2a_0$. 由于所有微裂缝都张开, 且各个方向有相同的概率, 基体仍处于各向同性状态. 此时总体柔度 $\bar{S} = S_0 + S_{d,i}$.

(2) 当 $q = q_1 \geq q_0$, 且修复尚未发生时, 方向在扇形角 $(-\theta_1, \theta_1)$ 内的微裂缝被激活, 并且长度从 $2a_0$ 增加到 $2a_f$, 材料从此变为各向异性材料. 其中, θ_1 由 q_1, q^* 和 q_0 决定. 其值可通过如下方程得出:

$$q_1 \cos^2 \theta_1 + q^* \sin^2 \theta_1 = q_0 \quad (19)$$

可以得到

$$\cos \theta_1 = \sqrt{(q_0 - q^*) / (q_1 - q^*)} \quad (20)$$

此时柔度由三部分组成

$$\bar{S} = S_0 + S_{d,i} + S_{d,f} \quad (21)$$

$$S_{d,f} = \frac{N}{\pi} \int_{-\theta_1}^{\theta_1} \mathbf{g}_k^T \mathbf{S}'_{d,k}(\theta, a_f) \mathbf{g}_k d\theta$$

$$S_{d,i} = \frac{N}{\pi} \int_{\pm\theta_1}^{\pm\pi/2} \mathbf{g}_k^T \mathbf{S}'_{d,k}(\theta, a_0) \mathbf{g}_k d\theta$$

式中: $S_{d,f}$ 表示扩展后长度为 $2a_f$ 的裂纹引起的附加柔度. 此时假设微裂缝方向的概率密度函数为均匀分布, 其值大小为 $1/\pi$.

(3) 当 $q < q_1$, 即试件处于卸载状态且修复尚未发生时, 微裂缝不再扩展, 但由于损伤的不可逆性, θ_1 将保持先前的最大值. 因此, 弹性损伤柔度也将保持先前的最大值.

(4) 当 $q = 0$, 即对试件卸载并静置等待其修复时, 修复效果将发生, 在 $(-\theta_1, \theta_1)$ 内长度为 $2a_f$ 的微裂缝被修复, 修复模型详见第 3 部分.

(5) 当修复发生后重新加载且 $q < q_1$ 时, 微裂纹不扩展, 此时微裂纹的扇形角同图 6b. 此时基体柔度见式(12)~(14).

(6) 当重新加载过程中 $q \geq q_1$ 时, 微裂纹将继续扩展, 此时附加非弹性损伤柔度由三部分组成, 分别是未扩展的长度为 $2a_0$ 的微裂缝, 扩展后的长度为 $2a_f$ 的微裂缝, 以及扩展后又经过修复的微裂缝. 附加非弹性柔度 S_d 有如下形式:

$$S_d = S_{d,h} + S_{d,i} + S_{d,f} \quad (22)$$

因此, 总的基体柔度有如下形式:

$$\bar{S} = S_0 + S_{d,h} + S_{d,i} + S_{d,f} \quad (23)$$

其扇形角如图 8 所示.

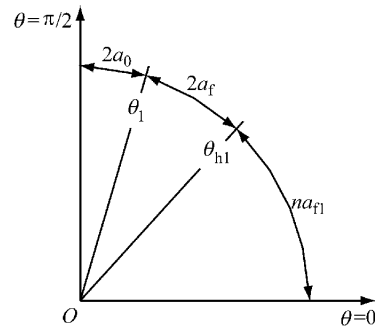


图 8 修复后又继续损伤时的微裂纹扇形域

Fig.8 The domains of microcrack which continues to be damaged after healing

(7) 修复后, 如果 q 继续增加, 基体发生最终破坏的条件为当 $\theta = \theta_{h1}$ 时未修复的微裂纹应力强度因子达到基体的极限断裂韧度 $K_{IC,c}$, 或者 $\theta = 0$ 时修复后微裂纹尖端的应力强度因子达到修复剂的断裂韧度 $K_{IC,h}$. 两者对应荷载分别为 $q_{max,h}$ 和 $q_{max,l}$. 故

$$q = \min(q_{max,h}, q_{max,l}) \quad (24)$$

其中

$$q_{max,h} = K_{IC,h} / \sqrt{\pi a_{fl} / 2}$$

$$q_{max,l} = (q - q^* \sin^2 \theta_{h1}) / \cos^2 \theta_{h1}$$

由于 $K_{IC,h}$ 与修复剂固化环境条件有关, 故有

$$K_{IC,h} = \alpha K_{IC,t} \quad (25)$$

式中: α 是折减系数; $K_{IC,t}$ 是修复剂完全固化时的断裂韧度.

5 模型初步验证

根据建议的地下结构微胶囊自修复混凝土的自修复细观力学模型, 作者编制了相应的 MATLAB 程序以计算其应力应变曲线以及抗拉强度, 对水泥石材料在单调和周期反复荷载作用下的试验进行了数值模拟, 分析结果验证了模型的正确性和有效性. 本文仅给出微胶囊自修复水泥石三点弯曲试验^[7]数

值分析结果.

试验概况^[7]:对自修复水泥材料进行抗弯强度测试,环氧树脂自修复微胶囊直径为120 μm ,水泥样品尺寸为4 cm \times 4 cm \times 16 cm,水泥材料的抗折强度为11.3 MPa,含体积分数为2.2%的有机微胶囊水泥石经过8 MPa的设计破坏和热修复后,水泥的抗折强度降为11.15 MPa,经过相同压力破坏和室温修复的水泥材料,抗折强度为10.0 MPa.除文中已给出的模型参数外,其他模型参数分别为: $E_0 = 41.37 \text{ GPa}$, $\nu_0 = 0.2$, $K_{\text{IC},0} = 0.165 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $K_{\text{IC},c} = 0.577 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $K_{\text{IC},t} = 0.75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $a_t = 0.83 \text{ mm}$, $a_0 = 0.2 \text{ mm}$, $q^* = 0$, $N = 353$, $A = 16 \text{ cm}^2$, $m = 3$, $l_2 = 60 \mu\text{m}$, $r = 60 \mu\text{m}$, $\alpha_1 = 0.45$, $\alpha_2 = 0.4$.

从表1可以看出,采用上述模型参数能够较好描述受弯状态下的试验结果.由于缺乏地下结构微胶囊自修复混凝土全应力应变曲线的试验数据,本文并没有提供更进一步的试验验证.进一步试验验证将会在以后的文章中进行.但是,提出的数值模拟说明了该细观力学模型能够不依赖于唯象学的连续介质损伤修复力学,而是通过细观机理定量解释和模拟地下结构微胶囊自修复混凝土的损伤修复力学行为.

表1 抗拉强度实测值与计算值比较

Tab.1 The calculated and the measured values of tensile strength

修复	抗拉强度		
	计算值/MPa	实测值/MPa	误差/%
高温修复	11.90	11.15	6.7
室温修复	10.58	10.00	5.8

6 结语

在地铁隧道内外环境的共同作用下,其结构劣化现象是不可避免的,而微胶囊自修复混凝土提供了新的修复途径.本文在微胶囊自修复混凝土物理损伤修复机制分析基础上,基于泰勒损伤模型,提出适用于地下结构微胶囊自修复混凝土的损伤修复模型,确定了受拉荷载下其修复后柔度计算方法,进而通过断裂力学得到微裂纹的演化法则.从而形成了适用于地下结构微胶囊自修复混凝土的二维弹性损伤修复本构模型.对微胶囊自修复水泥石三点弯曲试验数值模拟表明,本文提出的修复模型不仅具有较好的理论基础,而且和试验结果吻合较好.

参考文献:

- [1] Whits S R, Sottos N R, Geubelle P H, *et al.* Autonomic healing of polymer composites[J]. *Nature*, 2001, 409(6822): 794.
- [2] Ni Z, Du X X. Materials design for self-healing epoxy adhesive [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2009, 25(7): 134.
- [3] Dry C. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices [J]. *Smart Materials and Structures*, 1994, 3(2): 118.
- [4] 欧进萍,匡亚川.内置胶囊混凝土的裂缝自愈行为分析和试验[J]. *固体力学学报*, 2004, 25(2): 320.
OU Jinping, KUANG Yachuan. Experiments and analysis of concrete material with crack self-repairing performance using embedded capsules filled with adhesive[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2004, 25(3): 320.
- [5] Yang Z X, Hollar J, He X D, *et al.* A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(4): 506.
- [6] Yang Z X, Hollar J, He X D, *et al.* Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2142(1): 9.
- [7] 邢锋,倪卓.使用脲醛树脂类高分子微胶囊的自修复混凝土及其制造方法:中国,200810067312.9[P]. 2008-10-22.
XING Feng, NI Zhuo. A self repairing concrete containing microcapsules of urea formaldehyde resin and producing method thereof: China, 200810067312.9[P]. 2008-10-22.
- [8] JU J W. On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(7): 803.
- [9] JU J W. On two-dimension self-consistent micromechanical damage models for brittle solids[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1991, 27(2): 227.
- [10] Krajcinovic D, Sumarac D. A mesomechanical model for brittle deformation processes: part I [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1989, 56(3): 51.
- [11] Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, 13(4): 213.
- [12] Horii H, Nemat-Nasser S. Overall moduli of solids with microcracks: load induced anisotropy [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1983, 31(2): 155.
- [13] Sumarac D, Krajcinovic D. A self-consistent model for microcrack-weakened solids [J]. *Mechanics of Materials*, 1987, 6(1): 39.
- [14] Zaitsev Y. Crack propagation in a composite material [M]. Amsterdam: Elsevier, 1983.
- [15] Krajcinovic D, Fanella D. A micromechanical damage model for concrete[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 25(56): 585.