

文章编号: 1000-4750(2019)06-0157-07

高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)连续梁模型 在地震荷载下的响应及其敏感性分析

古 泉¹, 张 宁¹, 郑 越²

(1. 厦门大学土木工程系, 福建, 厦门 361005; 2. 同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要: 综述了高延性纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC 材料)在拉伸荷载下呈现高延展性等特点, 常用于弥补普通混凝土抗拉性能不足的缺点。该文基于现有的 ECC 本构模型, 利用非线性有限元平台 OpenSees 对已有的算法进行二次开发, 利用 OpenSees 建立 ECC 连续梁模型, 并将模拟结果与试验结果进行了比较分析。该文基于直接微分法(direct differentiation method, DDM), 推导实现 ECC 材料参数的敏感性算法, 并将 DDM 计算结果与有限差分法(finite difference method, FDM)结果进行对比, 验证了 DDM 分析算法的优越性。该文利用连续梁算例, 体现敏感性分析的重要性, 并将模拟结果进行分析总结。

关键词: 有限元; 敏感性分析; ECC 本构; OpenSees; 连续梁

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.0268

RESPONSE AND SENSITIVITY ANALYSIS OF CONTINUOUS BEAM MODEL USING ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC) UNDER SEISMIC LOADING

GU Quan¹, ZHANG Ning¹, ZHENG Yue²

(1. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The ECC material exhibit high ductility under tensile load and are frequently used as substitute of concrete. After reviewing the current research on the existing ECC constitutive model, this paper utilized the nonlinear finite element platform OpenSees and conduct secondary development on the established algorithm. Using the software to simulate the behavior of the ECC continuous beam model, comparison is made between the simulation results and the experimental results. Furthermore, this paper derives the sensitivity algorithm for ECC material parameters based on the DDM. The DDM calculation results is compared with the FDM results, which further verified the superiority of DDM. This paper also present the simulation results of the continuous beam as a case study to demonstrate the importance of sensitivity analysis.

Key words: finite element analysis; sensitivity analysis; ECC constitutive model; OpenSees; continuous beam

混凝土作为常见的建筑材料, 从最初使用到现在已经进行了一定程度的优化和改善, 但在实际应用时仍存在诸多不足。混凝土的缺陷主要在于极端

荷载下的脆性破坏, 耐久性不足等原因。在这种背景下, 高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC 材料)得到广泛关注。ECC 材料是一种具有高延性、高韧

收稿日期: 2018-05-24; 修改日期: 2018-12-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701106); 国家自然科学基金项目(51261120376, 51578473); 浦江人才计划资助项目(16PJ1409600)

通讯作者: 郑越(1975—), 男, 山东人, 助理教授, 博士, 硕导, 主要从事桥梁结构的抗震与减震研究(E-mail: yzheng@tongji.edu.cn).

作者简介: 古泉(1974—), 男, 新疆人, 教授, 博士, 博导, 主要从事非线性结构体系地震动力分析等(E-mail: quangu@xmu.edu.cn);

张宁(1995—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事结构分析(E-mail: zhangningswing@outlook.com).

性和细密裂缝特征的纤维增强水泥基复合材料。在直接拉伸和弯曲荷载下可呈现出应变硬化特性和多缝开裂的水泥基材料, 具备很好的延展性和微裂缝宽度控制能力^[1]。为了将 ECC 材料用于数值模拟, 本文将 ECC 本构模型通过二次开发嵌入 OpenSees 中。在采用 ECC 材料建立有限元模型时, 很多研究者在得到其结构响应的同时, 也希望进行高效的敏感性分析, 所以本文将 ECC 材料的敏感性分析程序也编入 OpenSees 中。敏感性分析可以帮助研究者进行结构的不确定性分析, 并为研究者进一步了解结构响应提供了一个重要工具。响应的敏感性分析现如今用于结构工程的诸多方面, 包括结构优化、结构可靠性分析以及有限元模型修正等^[2-3]。目前有限元响应敏感性分析常用的方法包括有限差分法(FDM)、伴随法(AM)、摄动法(PM)和直接微分法(DDM)等。其中, 有限差分法是敏感性分析中最简单、常用的一种方法, 但此方法计算量大, 对有限元响应的计算精度要求很高, 易受数值噪声的影响^[4-6]。而直接微分法计算高效、准确, 可应用于复杂的非线性体系中^[6], 是解决这一类问题最合适的方法。本文对 ECC 弹塑性本构模型进一步推导和编程实现了基于直接微分法(DDM)的响应敏感分析算法。并通过 DDM 和 FDM 的结果对比, 验证 DDM 方法的正确性和高效性。

1 ECC 材料

1.1 材料简介

ECC 材料是一种具有高延性、高韧性和细密裂缝特征的高性能材料, 由于开裂时状态的稳定性, 在承受应力作用下, 呈现出多重细微裂纹^[7]。ECC 材料相对于混凝土有着更高的拉伸延展性, 拉伸(应变)硬化行为和能量耗散均优于普通混凝土。ECC 材料具有 3%~7% 的高延展性^[8]。钢筋混凝土构件的荷载-变形行为受到加筋和水泥基材料的性能及其相互作用的影响, ECC 材料的本构包含类似于金属应变硬化的阶段^[9-11]。ECC 材料和普通混凝土的抗拉特性有很大的区别, ECC 材料具有拉伸强化段, 普通混凝土没有抗拉强化段而且抗拉能力与 ECC 材料相比要低的多。

1.2 基于递归方法的模型优化

ECC 的模型最初由 Han 等提出^[8], 该模型非常适合于数值计算。该材料的应力-应变曲线如图 1 所示, 具体的本构关系不再赘述。

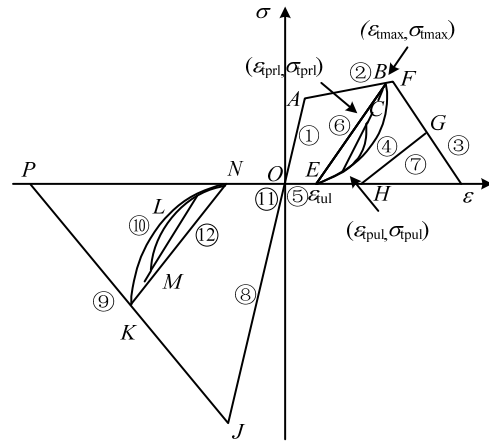


图 1 ECC 材料本构简化说明图

Fig.1 ECC material structure simplified illustration

为了简化说明过程, 本文对 ECC 材料本构的应力-应变曲线进行如图 1 的编号, 并以受拉区完全卸载为例, 说明记录历史应力、应变的重要作用。

当材料从 2 骨架线上卸载, 下一时步会向 $(\epsilon_{tul}, 0)$ 点运动, 而 ϵ_{tul} 的计算和 ϵ_{max} 有很大的关系。 ϵ_{max} 的值是由历史时步在 2 骨架线上的应变最大值确定。当研究者进行计算时, 不仅需要下一时步的应变, 还需要当前时步的运动状态, 以及某些历史变量。ECC 材料在文献中的算法采用传统排列组合的方式, 即遍历从上一时步状态通过加载或卸载沿全部应力-应变曲线的可能性。通过对当前时步传来的应变大小, 通过不断的筛选, 最终选择真实走过的应力-应变曲线进行计算。

在这种情况下, 本文算法考虑采用递归的方式, 减少判断流程, 减少迭代和收敛的次数, 简化计算流程, 最终达到加快计算的目的。同样以图 2 为例, 递归法将 ECC 材料的应力-应变曲线划分为 12 个模式(mode), 以 mode 为判断基础, 每次计算先通过当前时步传来的应变计算更新的 mode 位置, 然后在不同的 mode 下, 采用不同的应力-应变关系, 计算新一步的应力。

本文通过一个简单的例子来说明自调用的实现。假设上一时步处于 5 骨架线上, 当前时步判断为加载。如图 2 所示, 传统编写会先按照穷举法判断当前应力-应变所处的位置和加卸载情况, 然后分部判断加载后最终所处的位置, 根据不同的位置和对应的函数计算应力大小。History⑤=1 代表经历过 ⑤骨架线, 线路 1 和 2 分别代表本构函数历史分别从 ②和 ③骨架线上进行过卸载。

而本文提出的递归方法, 首先会自动识别上一

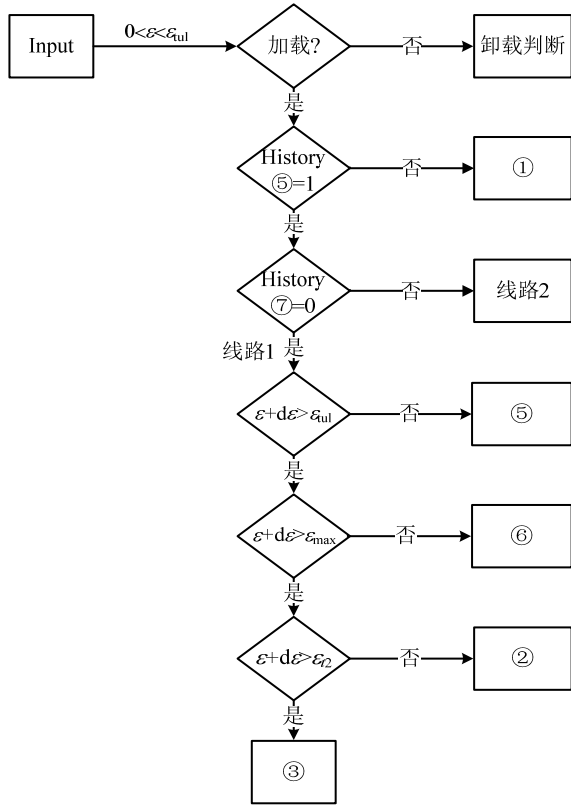


图2 传统算法流程图

Fig.2 Flow chart of traditional algorithm

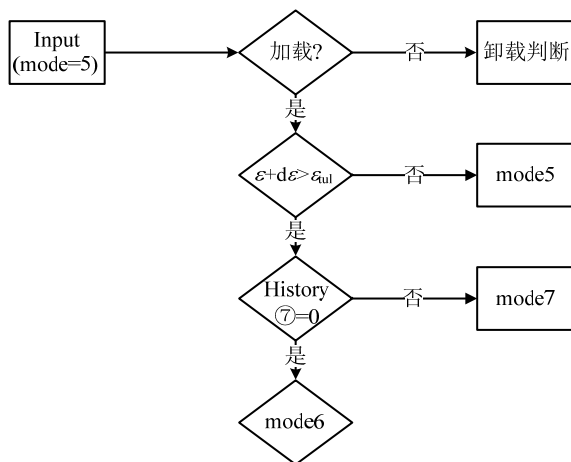


图3 递归算法流程图

Fig.3 Flow chart of recursive algorithm

时步所处的位置 mode=5。在这种情况下，加载的条件只会产生 mode=5, mode=6, mode=7 三种情况。通过应变大小判断哪个 mode。比如当应变超出 mode=5 而进入 mode=6 时，模型将执行 mode=6 这个分区内的判断。History(7)=0 表示从未经历过 7 骨架线，12 个 mode 的互相调用，不仅记录了上一时步的位置，省去了初始状态的重新确定，而且减少了穷举法多余的判断。无论是从编写上，还是在模拟计算上，递归法都简化了流程，加快了计算的

速度和效率。

1.3 数值模拟同实验对比

本文采用编译的 ECC 本构，模拟 Fischer 和 Li^[12]所研究的 ECC 材料构件在往复循环加载条件下弯曲变形的实验，然后将数值模拟结果同实验结果进行对比。进一步说明二次开发的材料本构模型的正确性和可行性。下面简要阐述实验模型和实验材料参数^[13]。

本文采用悬臂梁模型，对 ECC 材料弯曲构件的结构性能进行数值模拟，并与实验数据进行对比验证。该实验悬臂梁梁高 500 mm，采用方形横截面，截面尺寸为 100 mm×100 mm。纵向钢筋由 4 根钢筋(Φ10 mm)提供，相对于两根轴线对称布置。截面采用核心区尺寸 80 mm×80 mm，附 10 mm 保护层，钢筋布置于核心区四角。具体布置方式如图 4 所示，材料参数如表 1 所示。

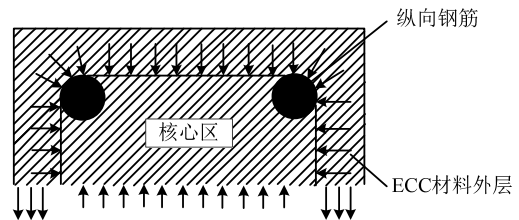


图4 悬臂梁截面示意图

Fig.4 Cross section of cantilever beam

表1 模拟材料的参数设计

	应变/(%)	-2.0	-0.5	0	0.01	3.8	6
ECC 材料	应力/MPa	0.0	-80	0	4.5	6.0	0.0
	应变/(%)	-14	-0.2	0	0.2	14	16
钢筋	应力/MPa	-620	-410	0	410	620	650

该实验研究的是 ECC 材料弯曲构件在往复循环加载卸载条件下的变形，即在悬臂梁的顶端加载水平推力，以位移控制的方式对构件进行加载。位移的加载方式如图 5 所示，采用往复循环加载^[14-15]。

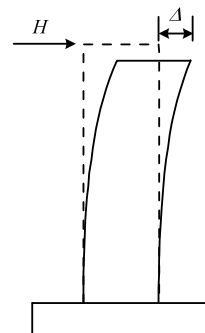


图5 结构和荷载布置示意图

Fig.5 Diagram of structure and load

加载形式如图 6 所示, 该荷载的位移加载幅值不断增大, 最大顶部加载位移为 75 mm, 层间位移角约 15%。通过对结构进行分析计算, 进一步得到结构的位移和反力, 材料的应力和应变。经过数值模拟, 本文得到了材料的水平荷载和层间位移角的关系。

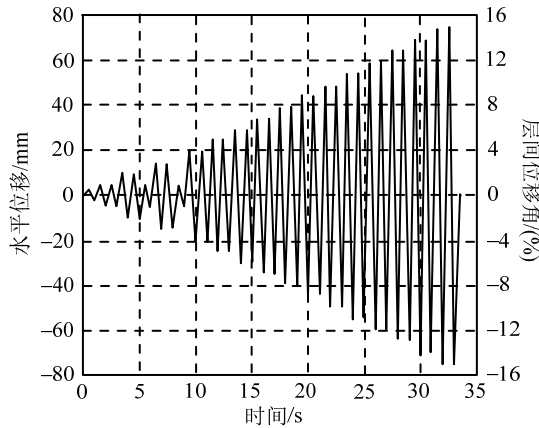


图 6 水平位移加载示意图

Fig.6 Horizontal displacement loading diagram

图 7 为实验所做的材料水平力与漂移率的关系曲线, 和由 OpenSees 模拟的关于相同材料、相同荷载条件下的模拟结果。从曲线上可以看出, 实验结果和数值模拟的结果在形状和数值上都比较接近, 最大的承载力均出现在层间位移角 3%附近, 且承载力大约 17 kN。另输出(-0.5, -0.5)这个角点上, 关于 ECC 材料的应力-应变关系曲线, 如图 8 所示。通过观察和对比, ECC 材料的拉裂强度为 4.0×10^6 Pa, 拉裂应变大小为 0.0001, 抗拉强化强度为 6.0×10^6 Pa, 抗拉强化应变为 0.038, 抗拉破坏应变为 0.056, 压裂强度为 -0.8×10^7 Pa, 压裂应变为 -0.005, 压碎应变为 -0.012, 这些参数均符合本研究所设计的材料参数。由此说明本文在 OpenSees

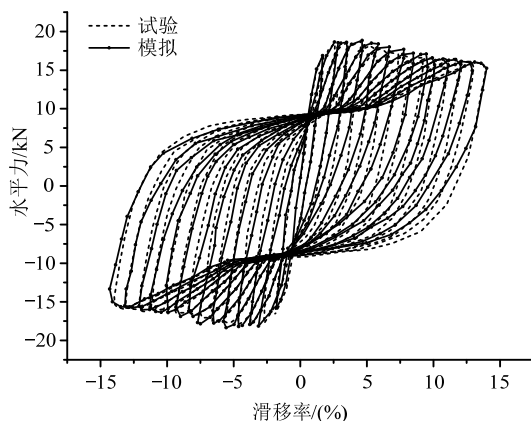


图 7 水平荷载和漂移率示意图

Fig.7 Horizontal load and drift ratio

中所研究编译的 ECC 材料, 可以较好地模拟实验的结果^[16-17]。

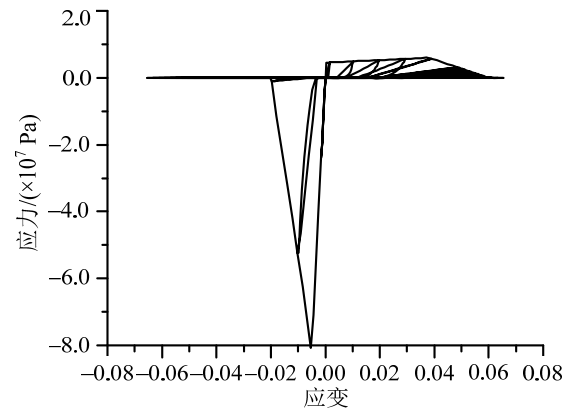


图 8 ECC 材料应力-应变关系曲线图

Fig.8 ECC material stress-strain diagram

2 ECC 材料敏感性分析

有限元敏感性分析是计算梯度的一种重要的工具, 常常用于基于梯度的优化分析、系统识别、模型更新和参数重要性研究等问题的研究。结构响应的敏感性或者梯度通常定义为 $\frac{\partial r}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \theta_0}$ ^[3]。其中

r 代表结构任何的输出响应, 例如全局响应(位移、速度、加速度等)和局部响应(高斯点上的应力、应变等); θ 为敏感性参数, 在当前 ECC 模型中取为材料参数, 也包括荷载等。这里响应敏感性从数学上定义为响应 r 对 θ 的偏导数, 即在其他参数确定不变的情况下, 分析考虑由制定参数 θ 改变引起的响应 r 改变, 也可以理解为响应的梯度。本文主要研究基于直接微分法(DDM)的 ECC 材料敏感性, 并同有限差分法(FDM)进行对比, 以体现 DDM 的高效性和准确性^[18-20]。

2.1 直接微分法框架

此方法是对有限元离散化后的平衡方程直接求导, 通过求解此方程, 计算材料敏感性。对涉及影响 ECC 材料本构的各个参数可进行分别求导。通过直接微分法可以计算响应敏感性的精确值, 计算方法可能得到解析解, 因而可以弥补 FDM 算法上的某些缺点^[21-22]。

本文采用有限元方法进行空间离散后, 对结构系统的材料非线性模型的运动方程采用以下非线性微分方程:

$$\mathbf{M}(\theta)\ddot{\mathbf{u}}(t, \theta) + \mathbf{C}(\theta)\dot{\mathbf{u}}(t, \theta) + \mathbf{R}(\mathbf{u}(t, \theta), \theta) = \mathbf{F}(t, \theta) \quad (1)$$

式中: t 表示时间; θ 表示本研究要考虑的敏感性参数; $\mathbf{u}(t)$ 表示节点位移矢量; \mathbf{M} 表示质量矩阵; \mathbf{C}

表示阻尼矩阵； \mathbf{R} 表示历史结构内的非线性抵抗力矢量； $\mathbf{F}(t)$ 表示施加的动荷载矢量。本文运用时间连续的空间离散运动方程(1)，利用已知的 Newmark- β 结构动力学时间步长的方法对时间进行数值积分，得到非线性矩阵代数方程(2)：

$$\psi(\mathbf{u}_{n+1}) = \tilde{\mathbf{F}}_{n+1} - \left[\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} \mathbf{u}_{n+1} + \frac{\alpha}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} \mathbf{u}_{n+1} + \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}) \right] = 0 \quad (2)$$

其中：

$$\tilde{\mathbf{F}}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+1} + \mathbf{M} \left[\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{u}_n + \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{u}}_n - \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{u}}_n \right] + \mathbf{C} \left[\frac{\alpha}{\beta \Delta t} \mathbf{u}_n - \left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) \dot{\mathbf{u}}_n - \Delta t \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{u}}_n \right] \quad (3)$$

参数 α 、 β 控制 Newmark- β 法的准确性和稳定性；对式(2)进行直接求导：

$$\left[\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} + \frac{\alpha}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + (\mathbf{K}_T^{\text{stat}})_{n+1} \right] \frac{d\mathbf{u}_{n+1}}{d\theta} - \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \frac{d\mathbf{M}}{d\theta} + \frac{\alpha}{\beta(\Delta t)} \frac{d\mathbf{C}}{d\theta} \right) \mathbf{u}_{n+1} - \left. \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \right|_{\mathbf{u}_{n+1}} + \frac{d\tilde{\mathbf{F}}_{n+1}}{d\theta} = 0 \quad (4)$$

其中：

$$\frac{d\tilde{\mathbf{F}}_{n+1}}{d\theta} = \frac{d\mathbf{F}_{n+1}}{d\theta} + \frac{d\mathbf{M}}{d\theta} \cdot \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{u}_n + \frac{1}{\beta(\Delta t)} \dot{\mathbf{u}}_n - \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{u}}_n \right) + \mathbf{M} \left[\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \frac{d\mathbf{u}_n}{d\theta} + \frac{1}{\beta(\Delta t)} \frac{d\dot{\mathbf{u}}_n}{d\theta} - \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right) \frac{d\ddot{\mathbf{u}}_n}{d\theta} \right] + \frac{d\mathbf{C}}{d\theta} \left(\frac{\alpha}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{u}_n + \left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) \dot{\mathbf{u}}_n - \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{u}}_n \right) + \mathbf{C} \left[\frac{\alpha}{\beta(\Delta t)^2} \frac{d\mathbf{u}_n}{d\theta} + \left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) \frac{d\dot{\mathbf{u}}_n}{d\theta} - \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta}\right) \frac{d\ddot{\mathbf{u}}_n}{d\theta} \right] \quad (5)$$

式(4)中 $\mathbf{K}_T^{\text{stat}}$ 表示一致切线刚度矩阵，其可由 $(\mathbf{K}_T^{\text{stat}}) = \frac{\partial \mathbf{R}_{n+1}}{\partial \mathbf{u}_{n+1}}$ 获得。

敏感性分析需对每一个敏感性参数 θ 都进行式(4)的求解。其中 $\left. \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \right|_{\mathbf{u}_{n+1}}$ 的计算最为关键。该过程需要分别计算 $\left. \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \right|_{\mathbf{u}_{n+1}}$ 和 $\frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta}$ 。

求解 $\left. \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \right|_{\mathbf{u}_{n+1}}$ 采用式(6)，即在单元的层面上求解，然后进行内力梯度的集成。

$$\left. \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \right|_{\mathbf{u}_{n+1}} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\sum_{e=1}^{N_{el}} \int_{\Omega} \mathbf{B}^T(x) \cdot \boldsymbol{\sigma}(x) \cdot d\Omega_e \right] \Big|_{\mathbf{u}_{n+1}} \quad (6)$$

式中： $\left. \right|_{\mathbf{u}_{n+1}}$ 表示固定位移 \mathbf{u}_{n+1} 再对敏感性参数 θ 求导； \mathbf{B} 表示应变位移转换矩阵； x 表示空间坐标； Ω 为单元域。先求解当应变 \mathbf{u}_{n+1} 固定时，即 $\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}(x, \theta)}{d\theta} = 0$ 时的值 $\left. \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \right|_{\mathbf{u}_{n+1}}$ ，求解之后，

可以根据式(4)求解 $\frac{d\mathbf{u}(\theta)}{d\theta}$ ，再根据：

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}(x, \theta)}{d\theta} = \mathbf{B}(X) \frac{d\mathbf{u}(\theta)}{d\theta} \quad (7)$$

求解出无条件下的 $\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}(x, \theta)}{d\theta}$ ，然后求解无条件下的 $\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \theta}$ 。

2.2 有限差分法(FDM)简介

有限差分法通过两次扰动计算近似得到位移敏感性。有限差分方法具有简单、灵活以及通用性强的特点，计算过程如下：

$$\left. \frac{\partial r(t, \theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} \approx \frac{r(t, \theta_0 + \Delta\theta) - r(t, \theta_0)}{\Delta\theta} \quad (8)$$

有限差分法的计算方式较为简单，比较适用于计算机计算，但是同时存在着很多缺点，比如计算成本较高，噪声对数值计算的影响较大，对精度要求较高。本文主要研究的是直接微分法，有限差分法作为验证 DDM 结果的一种方式，进一步体现 DDM 方法的准确性。

2.3 DDM 和 FEM 对比分析

本文对 ECC 材料进行定义，根据如图 2 所示的 ECC 材料模型，需要确定拉裂强度 σ_{t0} ，拉裂应变大小 ε_{t0} ，抗拉强化强度 σ_{t1} ，抗拉强化应变 ε_{t1} ，抗拉破坏应变 ε_{t2} ，压裂强度 σ_{c0} ，压裂应变 ε_{c0} ，压碎应变 ε_{c1} ，以及部分加载卸载过程中需要的 α_t 、 α_c 、 β_t 、 β_c ，共 12 个参数，也就需要研究关于这十二个材料参数的敏感性分析^[3,22]。

本研究采用图 9 的结构，在 2 节点处添加一个随时间序列的三角函数水平荷载，对 2 节点处的荷

载采用梯段式逐步增大, 逐渐的触发关于材料的 12 个参数, 通过 DDM 和 FEM 对比, 验证 DDM 敏感性的正确性。

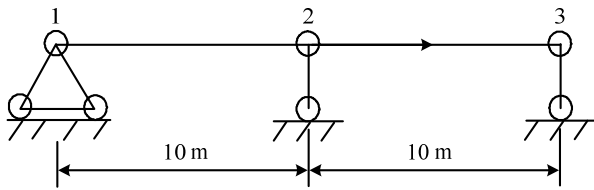


图9 简支梁水平加载示意图

Fig.9 The horizontal load acts on the simple beam

首先在 2 点作用一个大小为 5000 N 的水平三角函数荷载, 通过 600 次迭代计算, 每次迭代计算改变大小为 50 N 的荷载, 以 200 次迭代为一个周期, 对 2 点施加往复荷载。本文通过记录直接求导的结果, 即直接微分法计算材料的敏感性, 并通过扰动敏感性参数, 即采用有限差分法, 得到敏感性结果。图 10 为将二者进行比较和对照^[23]。

由于有限差分法的局限性, 即扰动的最佳幅度不易确定, 故本研究分别设计了扰动值大小为 1/10、1/100、1/1000 等众多对照组, 用来同直接微分法进行结果对比。图 11 是放大后的结果对比。

经过对比, 不难发现, 随着扰动值的逐渐缩小, 即扰动值从 1×10^{-1} 逐渐缩小直至 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ 时, 有限差分法计算的结果越来越接近直接微分法计算的结果, 也就是通常所说的解析解的结果, 这一点同本研究设计目的相同, 同时也验证了直接微分法的正确性。但是当扰动值从 1×10^{-7} 再次缩小时, 通过图像可以发现, 直接微分法计算的结果逐渐远离有限差分法计算的敏感性曲线, 分析原因主要是由于精度的局限性等, 由于需计算 $r(t, \theta_0 + \Delta\theta) - r(t, \theta_0)$, 在相减的过程中损失了精度, 因此更加说

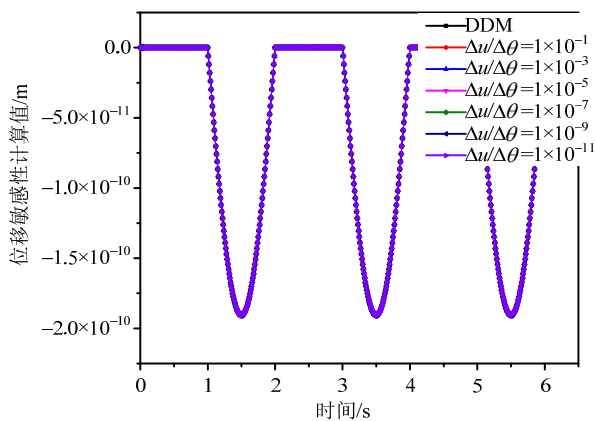


图 10 ECC 材料关于 σ_0 参数的敏感性曲线

Fig.10 Sensitivity curve of ECC material for σ_0

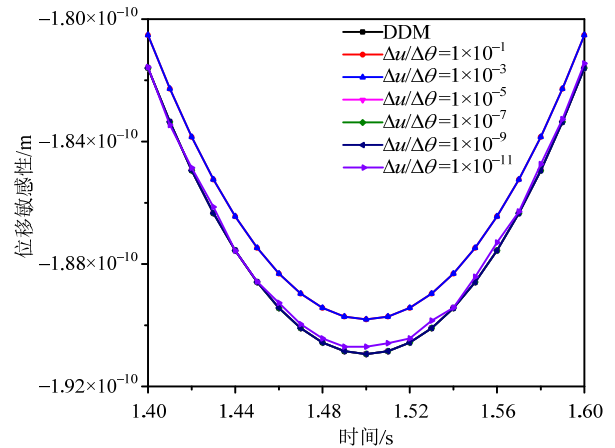


图 11 ECC 材料关于 σ_0 参数的敏感性曲线(放大图)

Fig.11 Sensitivity curve of ECC material for σ_0 (enlarged view)

明有限差分法对响应的精度要求很高。本文采用了保留 16 位有效数字的方式, 根据同 DDM 方法的对比, 发现 FEM 计算的结果逐渐收敛于 1.0×10^{-7} 附近。

2.4 各参数敏感性分析

因为决定 ECC 材料的参数有很多, 所以有必要研究所有参数敏感性的相对重要程度^[13]。同样以图 7 为例, 本研究将示例从静力荷载更改为动力荷载。对该模型加载地震波, 加速度的大小如图 12 所示。

本文将简支梁在该地震波荷载下各参数的位移敏感性归一化后的结果进行输出, 对它们的峰值的绝对值进行比较, 图 13 显示了 ECC 材料简支梁的 12 个材料参数对水平位移响应的相对敏感性。此结构响应的敏感性参数按重要程度排列如下: 拉裂强度 σ_{t0} , 抗拉强化强度 σ_{t1} , 参数 β_t , 压裂应变 ϵ_{c0} , 压裂强度 σ_{c0} 。

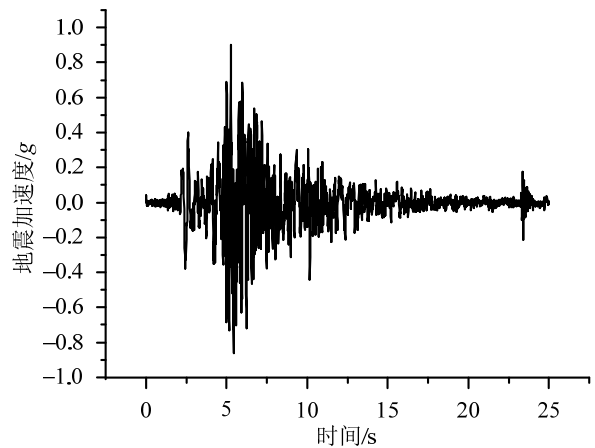


图 12 tabas 地震波地震加速度示意图

Fig.12 Earthquake acceleration diagram

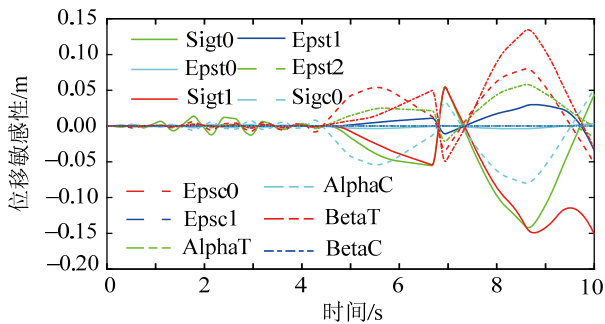


图 13 各参数的位移敏感性比较

Fig.13 Comparison of the displacement sensitivity of each parameter

3 结论

本文在研究 Tong-Seok Han 等^[8]提出的 ECC 本构的基础上, 利用 OpenSees 平台进行二次开发, 实现了 ECC 材料在通用有限元软件上的应用, 为研究者通过数值模拟的方式研究 ECC 材料提供了便利。从方法上, 本文采用了递归的方式, 对原有的 ECC 的本构关系重新分类编号, 通过多次自调用, 达到减少判断、提高计算效率的目的。随后本文通过数值模拟与 Gregor Fischer 所研究的 ECC 材料构件在往复循环加载条件下弯曲变形的实验进行对比, 证明了数值模拟结果的正确性和可行性。

随后本文使用直接微分法, 研究了 ECC 本构关于材料参数的敏感性, 并同有限差分法的结果进行对比, 不仅说明了 DDM 在计算精度和效率上的优势, 同时对影响结构的材料参数相对敏感性进行了分析对比。本文将敏感性分析的方法应用于具体的连续梁之中, 得到了在具体的地震荷载下各个参数相对于该连续梁模型的位移敏感性结果。该结果为基于敏感性响应的, 进一步结构优化、结构可靠性分析以及有限元模型修正提供了基础。

参考文献:

[1] LI Victor C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531—536.
LI Victor C. Progress and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531—536. (in Chinese)

[2] Stavroulakis G E. Parameter sensitivity in nonlinear mechanics. Theory and finite element computations: by Kleiber M, Antúney H, Hien T D, Kowalczyck P, (Wiley, Chichester, 1997) [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 1998, 17(4): 702—703.

[3] Conte J P. Finite element response sensitivity analysis in earthquake engineering [J]. Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium, 2001: 395—401.

[4] Conte J P, Vijalapura P K, Meghella M. Consistent finite-element response sensitivity analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(12): 1380—1393.

[5] Ditlevsen O, Madsen H O. Structural reliability methods [M]. New York: Wiley, 1996.

[6] Zhang Y, Kiureghian A D. Dynamic response sensitivity of inelastic structures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1993, 108(1-2): 23—36.

[7] 丁然, 苟双科, 樊健生, 等. 后浇 LSECC 装配整体式梁受力性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 56—65, 74.
Ding Ran, Gou Shuangke, Fan Jiansheng, et al. Experimental research on mechanical performance of monolithic precast beams using cast-in-place low-shrinkage engineered cementitious composite [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 56—65, 74. (in Chinese)

[8] Han T S, Feenstra P H, Billington S L. Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement based composite components under cyclic loading [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(6): 749—757.

[9] Li V C, Leung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246—2264.

[10] Li V C, Stang H, Krenchel H. Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete [J]. Materials & Structures, 1993, 26(8): 486—494.

[11] Dhawale A W, Joshi V P. Engineered cementitious composites for structural applications [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(2): 66—69.

[12] Fischer G, Li V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6): 781—790.

[13] Fischer G, Li V C. Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced engineered cementitious composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(1): 25—35.

[14] 司炳君, 孙治国, 艾庆华, 等. 钢筋混凝土桥墩滞回性能的有限元参数敏感性分析及模型改进[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 174—180.
Si Bingjun, Sun Zhiguo, Ai Qinghua, et al. Sensitive analysis and model modification for finite element analysis of R/C bridge piers under cyclic loading [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 174—180. (in Chinese)

(参考文献[15]—[23]转第 182 页)

- bridges under varying temperature effects using time-series analysis and artificial neural networks [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(10): 04017065.
- [27] Kifokeris D, Xenidis Y. Constructability: Outline of past, present, and future research [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2017, 143(8): 04017035.
- [28] Bilal M, Oyedele L O, Qadir J, et al. Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, 30(3): 500—521.
- [29] Lu X Z, Zeng X, Xu Z, et al. Improving the accuracy of near-real-time seismic loss estimation using post-earthquake remote sensing images [J]. *Earthquake Spectra*, 2018, 34(3): 1219—1245.
- [30] McKinsey Global Institute. Big Data: The next frontier for innovation, competition and productivity [R]. Technical Report. <https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/big-data-the-next-frontier-for-innovation>, 2011.
- [31] 李杰. 论第三代结构设计理论 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5): 617—632.
Li Jie. On the third generation of structural design theory [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(5): 617—632. (in Chinese)
- [32] Trifunac, Mihailo D. Site conditions and earthquake ground motion- a review [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 90: 88—100.
- [33] Reilly J, Dashti S, Ervsti M, et al. Mobile phones as seismologic sensors: automating data extraction for the iShake system [J]. *Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(20): 242—251.
- [34] Feng M, Fukuda Y, Mizuta M, et al. Citizen sensors for SHM: use of accelerometer data from Smartphones [J]. *Sensors*, 2015, 15(2): 2980—2998.
- [35] 韩瑞聪. 基于智能手机的多参数监测技术及地震应急响应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Han Ruicong. Multi-parameter monitoring technology based on smart phone and earthquake emergency response research [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [36] Chen J, Li Y, Li R. Big data methodology for structure live load investigation: a case study [C]. Hang Zhou: Zhe Jiang University Press, 2018: 555—556.

(上接第 163 页)

- [15] 潘金龙, 何佳轩, 王路平, 等. ECC 双轴压力学性能及破坏准则试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(6): 186—193.
Pan Jinlong, He Jixuan, Wang Luping, et al. Experimental study on mechanical behaviors and failure criterion of engineered cementitious composites under biaxial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(6): 186—193. (in Chinese)
- [16] Zheng Y, Dong Y. Performance-based assessment of bridges with steel-SMA reinforced piers in a life-cycle context by numerical approach [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018: 1—22.
- [17] Zheng Y, Dong Y, Li Y. Resilience and life-cycle performance of smart bridges with shape memory alloy (SMA)-cable-based bearings [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 389—400.
- [18] Conte J P, Barbato M, Spacone E. Finite element response sensitivity analysis using force - based frame models[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59(13): 1781—1820.
- [19] Gu Q, Barbato M, Conte J P. Handling of constraints in finite-element response sensitivity analysis [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(12): 1427—1438.
- [20] Fenves G L, Filippou F C, Scott M H, et al. Response sensitivity for nonlinear beam column elements [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(9): 1281—1288.
- [21] Haukaas T, Kiureghian A D. Strategies for finding the design point in non-linear finite element reliability analysis [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2006, 21(2): 133—147.
- [22] Gu Q, Conte J P, Elgamal A, et al. Finite element response sensitivity analysis of multi-yield-surface J 2, plasticity model by direct differentiation method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2009, 198(30—32): 2272—2285.
- [23] Barbato M, Gu Q, Conte J P. Probabilistic push over analysis of structural and soil-structure systems [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(11): 1330—1341.