

基于损伤理论的横观各向同性基础刚性路面分析

刘俊卿, 叶 雯, 王保实

(西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 基于不可逆热力学理论和弹性损伤理论, 采用有限元方法, 建立了均布荷载作用下横观各向同性路基的混凝土路面结构的损伤三维仿真模型, 并借助 MATLAB 语言进行程序设计, 对横观各向同性路基的混凝土路面损伤的破坏过程进行了数值模拟计算. 结果表明, 损伤对刚性路面层的竖向位移的影响显著; 随着荷载增大, 损伤程度越来越明显. 本文的计算方法能较好地描述刚性路面结构的损伤与破坏行为.

关键词: 混凝土路面; 横观各向同性; 损伤理论; 有限元模型

中图分类号: U 416.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)05-0700-05

国内外的大量研究表明, 刚性路面结构混凝土材料的微观结构非常复杂, 其内分布有大量的微孔洞与微缺陷, 尤其是在车辆荷载及温度等的影响下容易形成较大的裂纹和缺陷, 导致混凝土材料的损伤破坏现象比较严重, 因此, 用损伤力学理论来描述更能反映实际混凝土材料的损伤破坏过程^[1-5]. 现有的混凝土损伤模型大多数为连续、基于塑性的损伤模型, 它采用各向同性弹性损伤结合各向同性拉伸和压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性行为, 其损伤本构方程和损伤演化方程是建立在应变等效假设和有效应力概念基础上的, 只考虑了 Von Mises 等效应力^[6-10]. 实际上, Von Mises 等效应力只能反映材料剪切变形对材料的损伤与破裂的影响, 而无法反映对于材料的损伤与破裂起着重要作用的体积变形的影响. 另外, 路基土往往呈层状分布, 在各层内土的性质比较均匀, 而各层之间差别较大, 其水平方向与垂直方向的弹性模量比在 0.9~4 之间^[11-13]. 考虑路基土的横观各向同性更接近实际的混凝土刚性路面结构.

针对以上情况, 笔者在考虑路基土的横观各向同性的基础上, 采用弹性损伤的基本理论^[6]和有限元相结合的数值计算方法, 应用 MATLAB 语言编写八结点六面体单元程序, 建立横观各向同性路基的混凝土刚性路面结构的三维仿真模型, 来研究和分析损伤对刚性路面结构的影响.

1 损伤理论

对于一个等温的无穷小的变形过程, Clausius-Duhem 耗散不等式为

$$\sigma : \dot{\epsilon} - \dot{\psi} \geq 0 \quad (1)$$

式中: σ , ϵ 为 Cauchy 应力和无穷小应变张量, ψ 是单位体积的 Helmholtz 比自由能, 圆点表示求物质导数, 冒号表示张量的双点积.

假设损伤材料是弹性的, 并采用二阶对称损伤张量 D 来描述材料各向异性的损伤状态, 则 Helmholtz 比自由能 ψ 与应变 ϵ 、损伤 D 有关, 可表示为

$$\psi = \psi(\epsilon, D) \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial \epsilon} : \dot{\epsilon} + \frac{\partial \psi}{\partial D} : \dot{D} \quad (3)$$

(3)代入(1), 有:

收稿日期: 2013-04-27 修改稿日期: 2013-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178387)

作者简介: 刘俊卿(1957-), 男, 陕西神木县人, 教授, 博士, 主要从事工程力学的教学与研究.

$$\left(\sigma - \frac{\partial \psi}{\partial D}\right) : \dot{\epsilon} - \frac{\partial \psi}{\partial D} : D \geq 0 \quad (4)$$

若 ϵ 的任意值对上式都成立,则要求

$$\sigma = \frac{\partial \psi}{\partial \epsilon} \quad (5)$$

定义损伤对偶张量:

$$Y = -\frac{\partial \psi}{\partial D} \quad (6)$$

则不等式(4)成为:

$$Y : \dot{D} \geq 0 \quad (7)$$

其中, D 、 \dot{D} 和 Y 都为非负张量.

本文采用将比自由能 ψ 展开成多项式级数的方法^[7],不再考虑应变等效假设和有效应力概念,这样得到的发生损伤后的材料的应变能密度表达式、本构方程以及损伤张量表达式分别为:

$$\psi = \frac{1}{2} \epsilon : c : \epsilon + \frac{1}{2} \epsilon : \left[\sum_{n=1}^N A_n (:)^n D \right] : \epsilon \quad (8)$$

$$\sigma = c : \epsilon + \left[\sum_{n=1}^N A_n (:)^n D \right] : \epsilon \quad (9)$$

$$Y = -\frac{1}{2} \epsilon : \left[\sum_{n=1}^N n A_n (:)^{n-1} D \right] : \epsilon \quad (10)$$

其中, A_n 是系数张量, c 是材料无损时的四阶弹性张量. 材料的损伤演化方程为^[4]

$$\dot{D} = A \cdot Y^m \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)得:

$$\dot{D} = A \cdot \left\{ -\frac{1}{2} \epsilon : \left[\sum_{n=1}^N n A_n (:)^{n-1} D \right] : \epsilon \right\}^m \quad (12)$$

其各向同性形式:

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} \left[1 - \sum_{n=1}^N \beta^{(n)} D^n \right] + \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} \left[1 - \sum_{n=1}^N \alpha^{(n)} D^n \right] \quad (13)$$

$$\dot{D} = A \left[\mu \epsilon_{ij} \epsilon_{ij} \sum_{n=1}^N n \beta^{(n)} D^{n-1} + \frac{1}{2} \lambda (\epsilon_{kk})^2 \sum_{n=1}^N n \alpha^{(n)} D^{n-1} \right]^m \quad (14)$$

2 损伤理论的有限元分析方法

为了实现混凝土刚性路面的损伤分析,将损伤理论与有限元方法相结合,建立考虑损伤的有限元分析方法. 本文采用(13)式的二阶形式:

$$\{\sigma\} = (1 - \alpha_1 D - \alpha_2 D^2) [C] \{\epsilon\} \quad (15)$$

$$\Delta D = A (\alpha_1 + 2\alpha_2 D)^m \left[\frac{3}{2} \mu (\epsilon_{eq})^2 + (3\mu + \frac{9}{2} \lambda) (\epsilon_m)^2 \right]^m \quad (16)$$

其中: α_1 、 α_2 、 A 和 m 为材料损伤特性参数,可根据试验结果来确定, ϵ_m 为平均正应变,反映体积变形对材料损伤演化的影响, ϵ_{eq} 为 Von Mises 等效应变,反映剪切变形对材料损伤演化的影响.

由虚功原理导出的单元刚度方程为

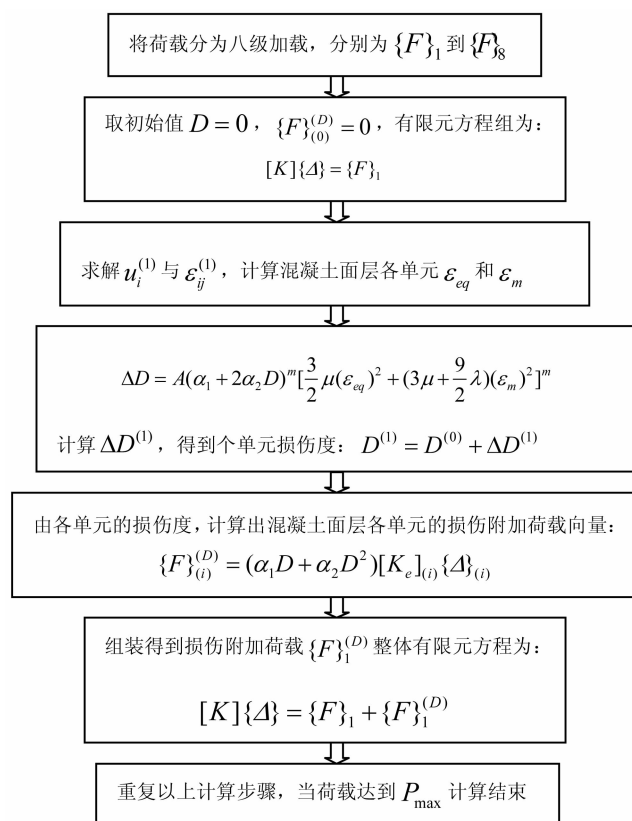
$$[K_e]_{(i)} \{\Delta\}_{(i)} = \{F\}_{(i)} + \{F\}_{(i)}^{(D)} \quad (17)$$

$$\{F\}_{(i)}^{(D)} = (\alpha_1 D + \alpha_2 D^2) [K_e]_{(i)} \{\Delta\}_{(i)} \quad (18)$$

其中 $\{F\}_{(i)}^{(D)}$ 为损伤附加荷载向量,随着损伤度的增加而增加,整体有限元方程组为

$$[K] \{\Delta\} = \{F\} + \{F\}^{(D)} \quad (19)$$

采用 MATLAB 语言进行程序设计^[14-16],计算过程如下:



3 路面结构有限元模型

采用 8 节点六面体线性三维实体单元模拟路面结构, 假设路面结构各层之间完全连续, 单元节点一一对应. 有限元模型如图 1 所示:

3.1 计算模型

本文所采用的计算模型为混凝土路面结构, 共分三层, 第一层为水泥混凝土面层, 为混凝土材料, 厚 0.24 m; 第二层为水泥稳定层, 由水泥稳定碎石材料构成, 厚 0.36 m; 第三层为土基层厚 2 m.

有限元分析时采用以下假设: 1) 路基为横观各向同性材料, 其他层均为连续、均质、各向同性线弹性材料组成, 服从胡克定律; 2) 各结构层均不计自重; 3) 道路表面考虑为水平平面.

模型尺寸 (x, y, z) 为 $5.4 \text{ m} \times 2.6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. 模型边界条件: Z 轴为道路横向, Y 轴为垂直方向, X 轴为道路纵向, 底面和侧面全部固定.

3.2 材料参数

对混凝土路面结构进行分析时, 路面结构的材料参数具体见表 1.

4 数值分析结果

本文对均布荷载作用下,

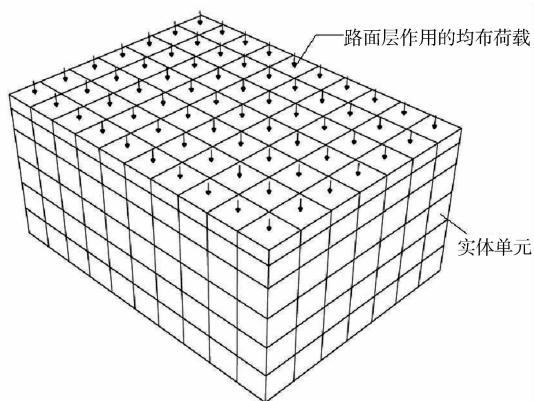


图 1 单元网格划分

Fig. 1 Finite element meshing

表 1 路面结构材料参数

Tab. 1 Parameters of the pavement structure and the materials

结构层次	层厚/cm	结构层料	本构模型及参数取值
混凝土面层	24	水泥混凝土	线弹性/ $E = 15.46 \text{ GPa}$, $\mu = 0.2$
水泥稳定层	36	水泥稳定碎石	线弹性/ $E = 3 \text{ GPa}$, $\mu = 0.3$
路基	200		横观各向同性 $E_1 = 28.6 \text{ MPa}$, $E_2 = 16.4 \text{ MPa}$ $G_2 = 8.11 \text{ MPa}$, $\mu_1 = 0.299$, $\mu_2 = 0.146$

路基横观各向同性的混凝土路面结构路面层进行了损伤破坏分析. 考虑在混凝土路面上作用路面荷载 $P=100\text{ kPa}$, 并将荷载分为八级加载, 加载前不考虑路面层的初始损伤, 令损伤初始值 $D=0$.

4.1 路面层损伤分布

当施加的荷载为 $0.125P$ 时, 整个路面层的损伤程度较小, 其损伤程度分布如图2所示; 当施加的荷载为 $0.5P$ 时, 整个路面层的损伤程度进一步增加, 已有部分单元失效, 其损伤分布如图3所示; 当施加的荷载达到最大荷载时, 整个路面层的损伤程度进一步增加, 大部分单元已经失效, 损伤情况如图4所示. 从三幅图中可以看出, 路面层的损伤首先出现在路面边缘逐步向中心扩展, 达到最大荷载后, 损伤区域已经有部分连接, 在此区域路面更易产生裂缝.

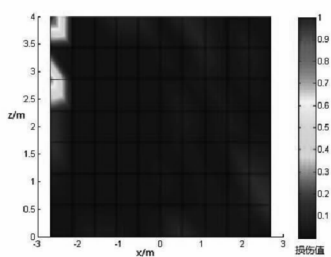


图2 荷载 $0.125P$ 时损伤分布

Fig. 2 The damage distribution at the applied load of $0.125P$

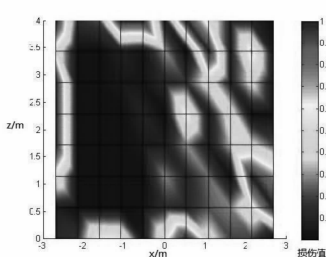


图3 荷载 $0.5P$ 时损伤分布

Fig. 3 The damage distribution at the applied load of $0.5P$

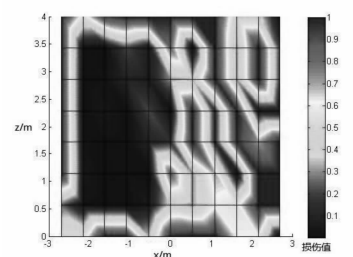


图4 最大荷载 P 时损伤分布

Fig. 4 The damage distribution at the applied load of P

4.2 考虑损伤累积效应有限元计算结果分析

本文选择混凝土刚性路面结构的主要控制指标中的竖向位移来进行对比, 考虑混凝土损伤累积效应与线弹性有限元计算结果对比如图5所示. 线弹性有限元计算得到的路面层竖向位移最大值为 1.15 mm , 而在考虑损伤的情况下计算得到的路面层竖向位移最大值为 6.44 mm .

图中显示施加荷载小于 $0.5P$ 时, 路面层各处的损伤值很小, 考虑损伤和未考虑损伤的位移曲线基本上重合, 说明在加载过程的前半段路面层具有良好的线弹性性能, 但加载到 $0.5P$ 后, 考虑损伤与未考虑损伤的两条曲线明显分开. 线弹性有限元计算结果仍为直线, 而损伤理论计算曲线呈加速下降的趋势. 说明在加载过程的后半段, 由于考虑了路面层的损伤, 降低了材料的整体刚度.

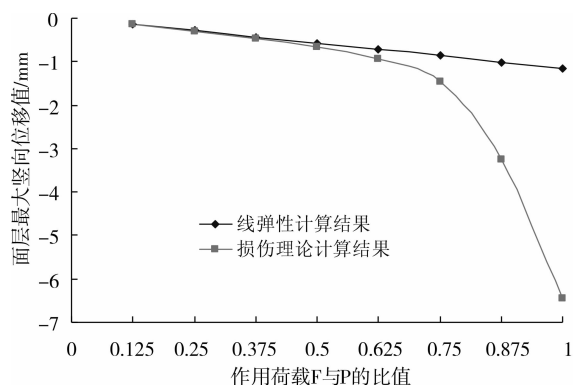


图5 考虑混凝土损伤累积效应与线弹性有限元计算结果对比

Fig. 5 Comparison between calculation results of linear elastic finite element and those considering damage accumulation effect of concrete

5 结 论

(1) 基于损伤理论, 文中所建立的考虑损伤的有限元数值计算方法和所提供的损伤演化方程可有效描述刚性路面结构的损伤行为, 同时考虑了材料剪切变形与体积变形对材料损伤演化的影响.

(2) 通过 Matlab 编写程序, 对横观各向同性路基的混凝土路面损伤的破坏过程进行了数值模拟, 并对比分析了考虑路面层损伤累积效应的有限元模型和线弹性有限元模型, 结果表明: 在考虑损伤的情况下, 与未考虑损伤时路面层竖向位移最大值明显增加; 且在荷载较大的情况下混凝土材料呈现明显的非线性.

(3) 路面作用荷载较小时其损伤程度相应较小, 而当荷载逐渐增加达到最大荷载时, 路面损伤累积效应也急剧增加, 直致路面层单元大部分已经失效.

(4)材料在损伤演化阶段的大部分时间里,损伤演化速度都比较慢,损伤的量级也较小.当其在接近失效的阶段,损伤值会迅速增加,从而验证了混凝土材料破裂发生的突然性.

参考文献 References

- [1] MAZARS J. A description of micro-and macroscaledamage of concrete structure [J]. Eng. Frac. Mech. , 1986, 25 (5/6): 729-737.
- [2] 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
XIE He-ping. Rock and Concrete Damage Mechanics [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1990.
- [3] 刘文晶,姚婵娟,刘 涛. 冲击荷载作用下混凝土路面的损伤分析[J]. 公路交通科技,2010(10): 159-161.
LIU Wen-jing,YAO Chan-juan, LIU Tao. Analysis damage of concrete pavement under impact loading[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2010(10): 159-161.
- [4] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. J. Eng. Mater. Tech. , 1985(107): 83-89.
- [5] TANG X S, JIANG C P, ZHENG J L. Anisotropic elastic constitutive relations for damaged materials by application of irreversible thermodynamics[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2002, 38(3): 211-220.
- [6] 唐雪松,张建仁,李传习,等. 基于损伤理论的钢筋混凝土拱结构破坏过程的数值模拟[J]. 工程力学,2006, 23 (2): 115-125.
TANG Xue-song, ZHANG Jian-ren, LI Chuan-xi, et al. Numerical simulation of failure process of reinforced concrete arch by damage theory[J]. Engineering Mechanics 2006, 23(2): 115-125.
- [7] 唐雪松,蒋持平,郑健龙. 弹性损伤材料的应力-应变关系与损伤演化方程[J]. 长沙交通学院学报,1999,15(4): 9-13.
TANG Xue-song, JIANG Chi-ping, ZHENG Jian-long. Stress-strain constitutive relation and damage evolution equation for elastic damaged materials[J]. Journal of Changsha Communications University, 1999, 15(4): 9-13.
- [8] 刘俊卿,李红孝,李 倩. 增量型横观各向同性损伤理论与数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2013, 45(1): 1-4.
LIU Jun-qing, LI hong-xiao, LI Qian. Increment transverse isortopic damage theory and numerical analysis[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2013, 45(1): 1-4.
- [9] 范 文,闫芙蓉,俞茂宏. 考虑各向异性损伤的统一弹塑性损伤模型[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2009, 41(3): 304-311.
LIU Jun-qing, LI hong-xiao, LI Qian. Increment transverse isortopic damage theory and numerical analysis[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2013, 45(1): 1-4.
- [10] 赵锡宏,孙 红,罗冠威. 损伤土力学[M]. 上海:同济大学出版社,2000.
ZHAO Xi-hong, SUN Hong, LUO Guan-wei. Damage Soil Mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2000.
- [11] GRAHAM J , Houlsby G T. Anisotropic elasticity of a natural clay[J]. Geotechnique, 1983, 33(2): 164-181.
- [12] GAZETAS G. Stresses and displacements in cross-anisotropic soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 108(4): 532-554.
- [13] Lo S-CR, LEE I K. Response of granular soil along constant stress increment ratio path [J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1990 , 116(3) : 355-376.
- [14] 徐荣桥. 结构分析的有限元法与 Matlab 程序设计[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
XU Rong-qiao. The Finite Element Method and Matlab Program Design of Structure Analysis[M]. Beijing, China Communications Press, 2005.
- [15] KATTAN P I. Matlab 有限元分析与应用[M]. 韩来彬,译. 北京:清华大学出版社,2004.
KATTAN P I. Matlab Finite Element Analysis and Application[M]. HAN Lai-bin, Translation. Beijing: Tsing-hua University Press, 2004.
- [16] 蒙坤江,喻 勇. 基于 Matlab 的三维有限元程序设计[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2008(40):93-96.
MENG Kun-jiang, YU Yong. 3D-FEM programming based on Matlab[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008(40):93-96.

(下转第 718 页)

Numerical simulation and experiment for temperature and velocity field in man-made environment laboratory

MENG Qing-long^{1,2}, WANG Yuan², Li Yan-peng¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Numerical simulations of temperature and velocity field of the environment simulation laboratory space under multiple conditions were carried out. Considering the characteristics of the environment simulation laboratory, with Group A lamp of the simulator on at the height of 2 m, numerical results were compared with the experimental results. The results showed that: the simulation results of temperature are more accurate than that of wind velocity and both simulation values are respectively consistent with the experimental ones. The experimental temperature value is no more than the simulation one by 0.3 °C. According to the model validation root mean square error (RMSE), the following results could be achieved: at the height of 0.2 m, 0.6 m, 1.0 m, 1.5 m, the air temperature RMSE are 5.3 %, 7.1 %, 6.5 %, 8.9 %, corresponding to the high wind velocity RMSE of 2.1 %, 3.4 %, 4.1 %, 5.3 %. The average root mean square error of the simulation was 5.34 %, and the numerical model can be used as the baseline model for other working conditions.

Key words: *computational fluid dynamics; environment simulation; velocity field; temperature field*

Biography: MENG Qing-long, Lecturer, Ph. D., Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086-18229017219, E-mail: mql19@163.com

(上接第 704 页)

Analysis of rigid pavement with transversely isotropic foundation by damage theory

LIU Jun-qing¹, YE Wen¹, WANG Bao-shi¹

(School of Arch. & Tech., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Combining the irreversible thermodynamic theory and elastic damage theory with the finite element method, a three dimension simulation model for rigid pavement with transversely isotropic subgrade under uniform distributed load is established by matlab language. The failure of damage process of the rigid pavement with transversely isotropic subgrade is simulated. The results show a significant effect on the vertical displacement of pavement considering the damage condition. The damage degree becomes increasingly evident with increasing loads. It better reveals the act of pavement's damage.

Key words: *rigid pavement; transversely isotropic subgrade; elastic damage theory; finite element model*

Biography: LIU Jun-qing, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991319036, E-mail: liujunqingjd@126.com