

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0832-07

基于 DSC 模型的房屋开裂评估与监测分析

易小明^{1,2}, 张顶立¹, 陈卫忠²

(1. 北京交通大学 隧道与地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 城市隧道下穿时, 普遍存在着地表房屋变形超限、倾斜开裂等安全风险问题, 而且当前针对房屋变形开裂的计算分析、风险评估研究, 也严重滞后于实际工程的需要。通过综合分析、比选, 以及单、三轴试验验证表明: DSC (disturbed state concept) 本构模型能够较好地描述材料开裂后力学行为; 采用该模型并结合厦门机场路隧道下穿建筑群的工程实践, 对地表建筑群开裂进行定量评估, 评估结果与现场房屋裂缝监测、变形监测结果一致性良好。同时, 对照扰动变量与实际房屋开裂的对应关系, 发现扰动变量可以作为房屋开裂的定量安全指标, 进一步即可以建立房屋变形开裂的过程控制标准, 从而使隧道下穿过程中每个关键施工部、每个时段, 地表房屋变形开裂程度、开裂风险都可以进行量化评估。

关 键 词: DSC 模型; 房屋开裂; 隧道下穿; 过程控制; 监测

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

House cracking evaluation by DSC model and in-situ monitoring

YI Xiao-ming^{1,2}, ZHANG Ding-li¹, CHEN Wei-zhong²

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: House cracking and over-deforming are common risks when tunnel crossing urban territory; and relative studies of house cracking calculation and its risk evaluation lag far behind engineering need. By comparison and analysis, it is verified by uniaxial and triaxial compression tests that disturbed state concept (DSC) can give good description of material behavior after cracking, and combining this model with the practice of Xiamen airport road tunnel undercrossing building blocks, houses' deforming and cracking will be quantitatively calculated and evaluated; and the results have good accordance with in-situ house cracks and deformation monitored data. Meanwhile, it still shows close correlation between DSC disturbed factor and house cracking, thereby from mechanics, it is effective and reasonable to depict house cracking by using disturbed factor. Furthermore, process control criteria of house deforming and cracking can be set up by DSC model. Finally, in each key step and stage of tunnel undercrossing building blocks, house deforming and cracking risks can have criteria to go by and be process-evaluated and controlled well.

Key words: DSC model; house cracking; tunnel undercrossing; process control; monitoring

1 引 言

当前我国城市浅埋暗挖隧道、地铁工程都普遍存在一个重大的技术难题, 即隧道下穿城区时, 地表建筑群将面临严峻的变形开裂风险^[1]。而且对建筑物开裂的定量分析评估也一直也是土木、岩土工程中的一个研究难点。

从岩石力学的观点看, 房屋建筑材料一旦开裂以后, 其局部受力、变形情况则进入峰后区间

(post-failure), 对于材料峰后力学行为的研究, 一直倍受岩石力学界关注。如廖红建等^[2]对软岩蠕变、残余强度规律进行了试验研究; 张农、侯朝炯等^[3-4]对注浆加固、锚杆对残余强度的改善作用进行了研究; Willam 与 Warnke^[5]提出了反应脆性材料开裂的 W-W 本构关系。特别是 1974 年美国 Desai 教授提出扰动状态概念 disturbed state concept 简称 DSC^[6-9], 为峰后材料的力学特征研究开创了一个良好的思路。随后经过 Desai 教授及其合作者不断深入地研

收稿日期: 2008-10-13

基金项目: 国家 863 项目大型跨海隧道钻爆法修建核心技术研究资助(No. 2006AA11Z119)。

第一作者简介: 易小明, 男, 1979 年生, 在站博士后, 主要从事城市地铁和海底隧道相关研究工作。E-mail: yi_19_82@QQ.com

究，DSC 本构模型已逐步得到应用和推广。

当前国内对 DSC 模型的研究也在逐步展开。吴刚^[10-12]对 DSC 模型的基本原理、有限元方法进行了总结；郑建业^[13-14]研究了 DSC 模型参数的标定方法；王德玲^[15]采用临界状态模型来定义完全调整状态；王国欣等^[16]考虑土体体积应变影响，建立了结构性黏土的 DSC 模型。

也正是基于 DSC 模型对材料全过程力学行为有良好的表达能力，所以考虑采用 DSC 模型对地表房屋的变形开裂进行量化评估。该研究一方面可以促进 DSC 数值方法的应用与完善；另一方面，对城市隧道工程中普遍存在的地层开裂、建筑开裂等问题，具有一定的探索指导意义。

通过 c++编程，在 FLAC^{3D} 程序中嵌入 DSC 模型，由该模型对地表房屋变形开裂进行定量地评估与预测，以及结合现场房屋裂缝、变形监测，建立房屋开裂的安全控制标准，最终实现下穿过程中地表建筑群开裂风险的可预知、可预控。

2 房屋开裂的定量评估

2.1 DSC 模型原理

房屋开裂的本质，是由于建筑材料局部进入破坏状态，成为局部不稳定材料，导致其应力应变关系极为复杂；而经典的力学理论往往不能描述这种力学行为，这也正是房屋开裂研究困难重重的根本原因。而 DSC 模型则巧妙地通过相对稳定状态与完全调整状态的组合，较好地实现了材料峰后力学行为的描述，自然地可以应用于房屋开裂研究中。

在扰动状态概念(DSC 模型)中，假定作用力(机械力、热力、环境力等)引起材料微观结构的扰动，致使材料内部微观结构发生变化。且由于扰动，材料内部的微观结构从最初相对完整(Relative intact, RI)状态，经过一个“自觉的”自动调节过程，达到完全调整(Fully adjusted, FA)状态(通常为临界状态)，如图 1 所示。这种扰动可通过一个扰动函数来定义，它表示观测响应、初始响应和临界响应的相互关系，并能够用宏观测量来描述扰动的演化，从而对材料的本构关系进行模拟。因此，在任何状态下，材料是 RI 和 FA 状态下互相作用的两个材料部分的混合体，材料观测到的真实响应 (Actual response, AR) 由 RI 和 FA 参考状态之间的组合表示，其中扰动函数 D 起耦合和内插的作用。

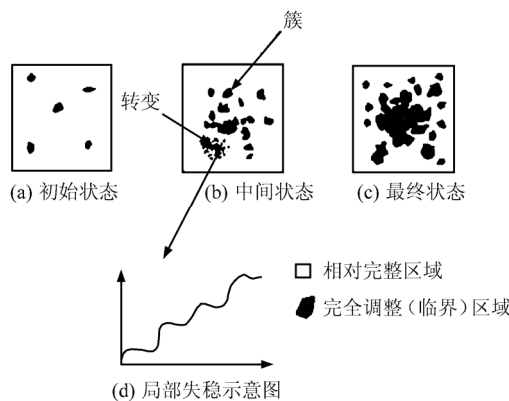


图 1 扰动状态 (DSC) 模型原理示意图
Fig.1 Principle of DSC

DSC模型的基本方程为

$$\sigma_{ij}^A = (1 - D)\sigma_{ij}^I + D\sigma_{ij}^C \quad (1)$$

式 (1) 写成增量形式：

$$d\sigma_{ij}^A = (1 - D)C_{ijkl}^I d\varepsilon_{kl}^I + DC_{ijkl}^C d\varepsilon_{kl}^C + (\sigma_{ij}^C - \sigma_{ij}^I)dD$$

其中，扰动因子 D 的演化方程为

$$D = D_u [1 - \exp(-A\xi_D^Z)] \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中： σ_{ij}^A 、 σ_{ij}^I 、 σ_{ij}^C 分别为对应于观测状态 (AR)、相对完整的初始状态 (RI)、完全调整状态 (FA) 下的应力； C_{ijkl}^I 、 C_{ijkl}^C 为对应的状态下本构方程系数矩阵； ξ_D 为累积塑性偏应变； D_u 、 A 、 Z 为材料参数，通常取 $D_u = 1$ 。文献[15]指出，岩石、混凝土等摩擦材料的内部微结构的变化应同时受累积的剪切应变和体积应变的影响，扰动方程取为累积塑性应变的函数较为合适。即：

$$D = D_u [1 - \exp(-A\xi^Z)] \quad (3)$$

$$\xi = \int (\varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式 (3)、(4) 中： ξ 为塑性应变的轨迹； ε_{ij}^p 为塑性应变。且多数情况下，由于 $\sigma_{ij}^C - \sigma_{ij}^I$ 项的存在，会导致相对运动^[11] (平移或转动)，所以通常DSC本构中 $d\varepsilon_{kl}^C \neq d\varepsilon_{kl}^I$ ，即还需要确定参考状态 (RI)、完全调整状态 (FA) 下的应变增量之间的比例关系。

$$d\varepsilon_{kl}^C = (1 + \alpha)d\varepsilon_{kl}^I \quad (5)$$

式中： α 为相对运动参数，且 α 也是 ξ 、 D 的一个函数。为了使本构关系简化，可近似认为材料各部分的变形一致，即：

$$\varepsilon_{kl}^A = \varepsilon_{kl}^C = \varepsilon_{kl}^I \quad (6)$$

所以式 (1)、(2) 可以简化表示为

$$d\sigma_{ij}^A = C_{ijkl}^{DSC} d\varepsilon_{kl}^I \quad (7)$$

$$C_{ijkl}^{DSC} = (1-D)C_{ijkl}^I + DC_{ijkl}^C + \sigma_{ij}^R R_{kl} \quad (8)$$

$$\sigma_{ij}^R = \sigma_{ij}^C - \sigma_{ij}^I \quad (9)$$

$$dD = R_{ij} d\varepsilon_{ij}^I \quad (10)$$

$$R_{pq} = \frac{\left(D_u A Z \xi^{Z-1} e^{-A\xi^Z} \right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnpq}^c \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \right)^{1/2}}{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} C_{mnpq}^c \frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} - \frac{\partial F}{\partial \xi} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \right)^{1/2}}$$

式(7)为DSC模型本构方程。 C_{mnpq}^{DSC} 、 C_{mnpq}^c 分别为DSC本构张量、弹性本构张量； F 为屈服函数；通过(7)~(10)的增量迭代即得到实际观测响应值。

直观上可以联想到，扰动因子 D 即是材料破坏程度的一个度量指标，由此即能够较好地表征材料的损伤、破坏程度（一般有 $D_u=1$ ），参照我国建设部《危险房屋鉴定标准》，针对房屋开裂进行如下定义：

$$D = \begin{cases} (0.8, 1.0) & \text{D级, 危房} \\ (0.5, 0.8) & \text{C级, 房屋结构受损、开裂等} \\ (0.2, 0.5) & \text{B级, 房屋局部、表观开裂等} \\ (0.0, 0.2) & \text{A级, 房屋安全} \end{cases} \quad (11)$$

按照式(7)~(11)，即可以实现对房屋开裂全过程进行模拟计算与定量评估。

式(11)中，对于房屋B级开裂，房屋结构安全，也基本不影响房屋的使用功能，可以不进行额外的房屋加固处理，通常需要在隧道施工过程中加强房屋裂缝开展监测，并采用必要的沉降控制措施，防止房屋变形开裂加剧。

对于房屋C级开裂，房屋功能或结构受损，则需要进行全面地修缮、恢复处理，并且隧道施工过程中务必采取控制地层沉降、房屋基础加固、房屋抬升、应急预案准备等处置措施。

对于D级危房，一般要求居民撤离，房屋予以拆除。但对于实际工程，是不允许D级危房出现的，即在出现C级房屋开裂之前，就必须启动房屋开裂应急预案，并提交房屋开裂专项处置方案，由专家会或专门的权威机构予以决策、处理。

总体而言，通过DSC模型来评估房屋开裂程度与开裂过程是可行的。

2.2 DSC模型的标定与验证

对于DSC模型，第1步需要选取初始参考状态(RI)与完全调整状态(FA)，初步确定本构系数 C_{ijkl}^{DSC} ；进一步则需要对扰动函数的参数进行标定，最终整个模型的实际响应(AR)就可以由DSC本构方程来确定。文献[13]采用CT数作为扰动变量；文献[14]采用单轴压缩试验来标定扰动函数。

根据文献[14]，RI状态可以取初始弹性状态，弹塑性状态等；FA状态可以取：无强度的“孔洞”模型、不能承受剪切强度的“受限液体”模型、临界状态模型、类似RI状态的强度折减模型等。从实用的角度出发，RI、FA状态下的模型都可以选为理想弹塑性的Mohr-Coulomb模型，并参考文献[16]，材料破坏后的变形系数为

$$E_R = 0.1E_0 \quad (12)$$

$$\mu_R = 0.45 \quad (13)$$

对于材料破坏后的残余抗剪强度、残余摩擦角，一般认为影响因素较多^[16-17]，根据相关研究取：

$$C_R = 0 \sim 0.25C_0 \quad (11)$$

$$\phi_R = 1.0\phi_0 \quad (12)$$

FA状态本构参数由式(12)~(15)确定。其中 E_R 、 μ_R 、 C_R 、 ϕ_R 分别为材料破坏后的残余刚度、泊松比、残余抗剪强度、残余摩擦角。通常认为，材料破坏后抗剪、抗拉强度基本丧失，摩擦角近似保持不变，材料峰后主要依靠摩擦力承载^[2-4, 17]。

扰动函数 D 中的参数(D_u 、 A 、 Z)，一般需要通过单轴试验来标定^[14]，或借鉴类似工程材料的经验值。为了验证DSC模型的计算结果，通过C++编程，按照本构关系(7)~(10)，将RI与FA状态都取为Mohr-Coulomb模型，按照增量形式的本构关系，编译成UserDSC.DLL，在Flac3D中进行调用。并利用湖北沪蓉西灰岩单、三轴压缩试验，对DSC模型进行验证。

试验岩样尺寸按照国际岩石力学学会(ISRM)的要求加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准岩样，试验系统为中国科学院武汉岩土力学研究所研制的RMT-150B型岩石力学伺服控制系统，三轴试验最终围压5 MPa。采用位移控制加载方式，垂直方向用1 MN的压力传感器测试轴向载荷，5 mm的位移传感器测试轴向变形，加载速率为0.002 mm/s。典型的试验结果、DSC计算结果如图2、3所示。

单轴压缩模拟时，RI 状态计算参数取： $E=51.6 \text{ GPa}$ ， $\mu=0.3$ ， $c=47.6 \text{ MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ ；

FA 状态的计算参数对应取： $E=10.3 \text{ GPa}$ ， $\mu=0.45$ ， $c=14.4 \text{ MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ ；

扰动函数计算参数取： $D_u=1$ ， $A=5\ 500$ ， $Z=1.1$ 。

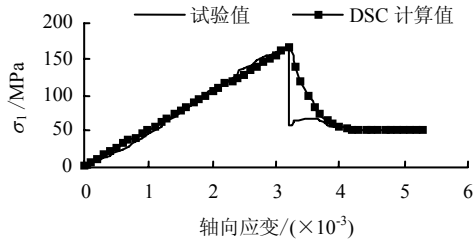


图 2 单轴压缩 & DSC 数值模拟结果
Fig.2 Results of uniaxial compression test & DSC calculated

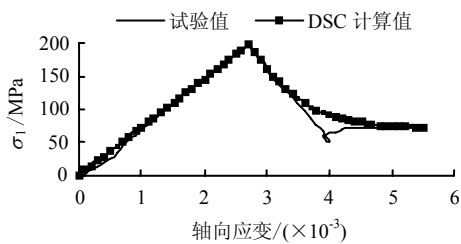


图 3 三轴压缩 & DSC 数值模拟结果
Fig.3 Results of triaxial compression test & DSC numerical simulation

三轴压缩模拟时，RI 状态计算参数取： $E=72.9 \text{ GPa}$ ， $\mu=0.3$ ， $c=53.9 \text{ MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ ；

FA 状态的计算参数对应取： $E=24 \text{ GPa}$ ， $\mu=0.45$ ， $c=17.9 \text{ MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ ；

扰动函数计算参数取： $D_u=1$ ， $A=5\ 500$ ， $Z=1.2$ 。

(1) 沪蓉西灰岩在单轴压缩条件下，显示了典型的弹弹性特征，采用 DSC 模型能粗略地反应峰后的软化特征，但误差较大。

(2) 三轴压缩条件下，灰岩峰后的塑性软化特征明显，DSC 模型的计算曲线与试验曲线吻合程度较好。

(3) 由于所采用的 RI、FA 均取弹塑性模型，使得该 DSC 模型对脆性跌落计算误差相对较大。由此也说明，DSC 模型的确立、参数的选取对最终的计算结果都有较大影响。

2.3 DSC 模型参数的影响

考虑模型刚进入塑性状态，RI 部分所占比重较

大，忽略 FA 部分影响，按一维计算：

$$\sigma^A = (1 - D)\sigma^I + o(D\sigma^C) \quad (13)$$

式中： $o(D\sigma^C)$ 表示可忽略的小量。

$$d\sigma^A = (1 - D)d\sigma^I - \sigma^I dD \quad (14)$$

如果 RI 部分取弹性或非线性弹性模型，通常有：

$$d\sigma^A > 0 \quad (15)$$

即 DSC 模型表现为一定的塑性硬化，如图 4 所示。如果 RI 部分取弹塑性模型，则：

$$d\sigma^A = -\sigma_s^I dD = -\sigma_s^I e^{-AZ\varepsilon^Z} AZ\varepsilon^{Z-1} < 0 \quad (16)$$

式中： σ_s^I 为 RI 部分的屈服强度。最终模型表现为塑性软化，见图 4。参数 A 、 Z 控制了峰后曲线的形状。

当考虑模型进入峰后稳定区域，FA 部所占比重较大，忽略 RI 部分影响，则

$$\sigma^A = o((1 - D)\sigma^I) + D\sigma^C \approx \sigma_s^C \quad (17)$$

$$d\sigma^A = Dd\sigma^C + \sigma^C dD \approx 0 \quad (18)$$

最终模型表现为相对稳定的残余强度。

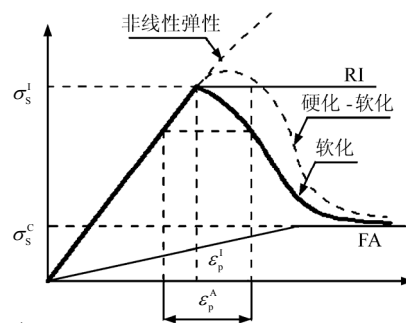


图 4 三轴压缩 & DSC 数值模拟结果
Fig.4 Results of triaxial compression test & DSC numerical simulation

通过以上分析可知，DSC 模型主要特征是：

(1) 峰前应力-应变关系主要由 RI 状态决定；峰后关系由 RI 与 FA 状态耦合构成，其中相互关系由扰动函数决定（通过扰动变量 D 插值形成）。

(2) RI 取非线性弹性模型时，DSC 模型一般具有弹性-塑性硬化-塑性软化特征；RI、FA 状态均取理想弹塑性时，DSC 为弹塑性软化模型。

(3) DSC 模型中， $(1 - D)\sigma^I$ 部分体现材料的塑性软化特征， $D\sigma^C$ 体现破坏后的力学行为及其影响程度。参数 σ_s^I 、 σ_s^C 分别对应 DSC 模型峰值和残余

强度（上下界）； A 、 Z 决定峰后塑性软化的发展过程；DSC 模型各参数力学意义明确。

(4) 通常解决开裂、软化、不稳定问题，需要转化到应变空间加以处理，而 DSC 通过 RI 状态和 FA 状态组合，实现了在应力空间来描述材料的峰后力学行为，亦即 DSC 可以利用稳定材料模型来描述不稳定材料的力学响应。并且其中 RI 与 FA 状态的选择范围广阔，数值稳定性、健壮性、收敛性都容易保证，这使得 DSC 模型具有强大的生命力。

2.4 工程实例

在建的厦门机场路梧村山隧道，设计为浅埋大跨隧道，隧道埋深 9~27 m，跨度 34 m，围岩为 VI 级，地下水位埋深 2~4 m。隧道要求下穿、侧穿约 90 多栋建筑楼群，其中正下穿建筑有 10 多栋。如 34 号楼为 6 层，浆砌片石基础，隧道覆盖层 16 m，其中有 48 户军区居民在住。毋庸置疑，当前隧道上方房屋变形、开裂安全控制，将是整个工程成败的决定性因素。

为了充分了解当前建筑群的安全风险，业主单位预留了 104-105 号楼作为工程现场试验楼，如图 5、6 试验楼位于试验段 YK7+520~YK7+545 隧道正上方，为连体结构，其中 104# 房为 3 层混凝土结构，105# 为 4 层混凝土框架结构，房屋总体长 80 m，宽 10.3 m，基础为混凝土基础，厚 50 cm，宽 2.1 m。该试验楼变形实测结果如图 7，图中 4 条虚线分别为隧道左、右洞开挖轮廓线。



图 5 试验楼现场照片
Fig.5 Photo of in-situ test buildings

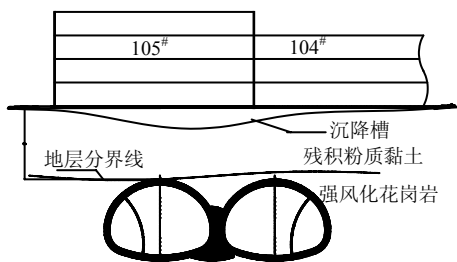


图 6 试验楼断面位置图
Fig.6 Test building and tunnel profile

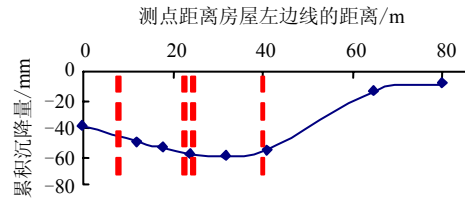


图 7 试验楼实测变形沉降槽
Fig.7 Measured subsidence slot of test houses

2.5 于 DSC 模型的房屋变形开裂评估

房屋开裂评估的方法有多种，如：按照结构设计[1]最大容许拉应力来评估开裂；按照 W-W 开裂本构[5]关系来计算裂缝宽度等。这些方法普遍存在不实用、粗糙、或计算不收敛等弊病。

相比较而言，利用 DSC 本构研究房屋开裂问题的优势是非常明显的：强壮的峰后描述、本构关系可选取的范围广泛、扰动函数具有明确的物理意义、数值稳定性、健壮性、收敛性良好。而且根据式(11)的定义，很容易得到房屋开裂的动态分布、动态演化的结果，对房屋变形开裂的预知、预防具有重要意义。

以试验楼实测变形图 7 为边界条件，采用 DSC 模型对当前房屋进行计算分析，计算结果如图 8 所示。参照相关经验，房屋计算参数取：

RI 状态计算参数： $E=10 \text{ GPa}$ ， $\mu=0.2$ ， $c=4 \text{ MPa}$ ， $\sigma_T=2 \text{ MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ ；

FA 状态的计算参数对应取： $E=1 \text{ GPa}$ ， $\mu=0.45$ ， $c=0.4 \text{ MPa}$ ， $\sigma_T=0$ ， $\phi=30^\circ$ ；

扰动函数计算参数取： $D_u=1$ ， $A=6000$ ， $Z=1.2$ 。

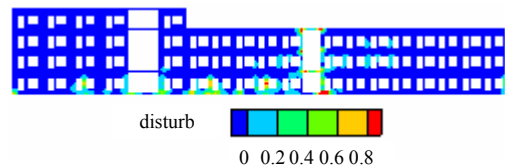


图 8 试验楼开裂的 DSC 模型评估结果
Fig.8 DSC evaluation results of test house

根据式(11)的定义，可以得到：

(1) 在当前施工状况、房屋变形条件下，（当前最大沉降为 60 mm），房屋将发生多处开裂；开裂主要集中在房屋变形沉降槽底部附近（不均匀沉降较大的部位）。

(2) 当前试验楼房屋局部点开裂严重($D>0.8$)，可见当前隧道下穿对房屋结构或使用功能将产生不利的影响；总体对试验楼开裂评估级别为 C 级。

进一步按照实测沉降槽图 7 的形状,进行缩放,类似作为 DSC 模型的位移边界,计算得到图 9。

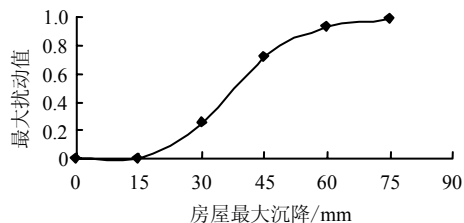


图 9 房屋开裂过程的 DSC 评估

Fig.9 Curve of house cracking process evaluation by DSC

(1) 当最大房屋沉降控制在 15 mm 以内,房屋不开裂,安全等级为 A 级;当房屋最大沉降量控制在 30 mm,房屋安全等级可控制在 B 级以内,即房屋整体结构安全,仅可能产生轻微细纹等;而通常超过 45 mm 时,房屋结构将会明显受损。

(2) DSC 模型计算结果表明:房屋沉降安全控制指标建议取 30 mm,极限指标建议取 45 mm。

说明:隧道下穿施工过程中,通常房屋的最大沉降与最大不均匀沉降基本上是正相关的,且最大沉降量在工程中应用广泛、便利,现场所采用的即是房屋最大沉降、不均匀沉降、裂缝宽度综合安全指标。

进一步可按照变形分配规律将总体控制指标分解到各施工主要部序^[18-19],即在施工过程中每个部序、时段,地表房屋的安全都有据可依。

3 现场监控量测对比分析

对厦门机场路隧道下穿工程中的地表楼群(共计 38 栋)监测结果进行统计分析,如图 10、11 所示。

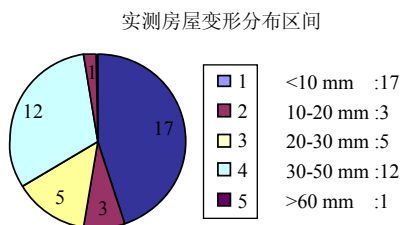


图 10 房屋沉降量分布区间统计

Fig.10 Statistics of house subsidence

尽管当前楼群的建筑结构、地质水文条件、隧道埋深等不尽相同,但所有建筑房屋之间,还是具有一定可比性的。在<10 mm 区间,该区间房屋一般位于隧道周边围护桩之外,房屋沉降量很小,房屋安全(A 级);在 10~30 mm 区间,房屋受隧道

下穿影响,但结构安全性基本良好(B 级)。超过 30 mm,房屋开裂风险增大。超过 50 mm,房屋裂缝宽大于 1.5 mm,扩展速率加剧。

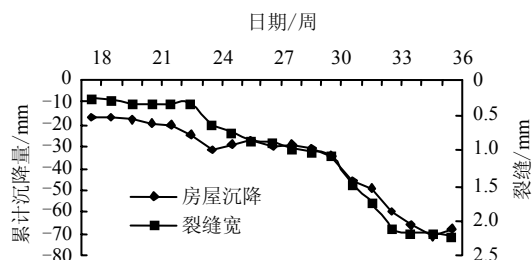


图 11 试验楼裂缝 & 房屋沉降过程曲线

Fig.11 Curves of house cracking & subsidence of test houses

现场 104#、105#试验楼已产生开裂,其开裂过程与房屋沉降过程曲线如图 11 所示。试验楼裂缝扩展存在两个典型阶段:<30 mm 时,房屋沉降平稳,裂缝扩展很小(房屋存在既有裂缝);>40 mm 时,房屋沉降明显加速,裂缝扩展加剧,在 50 mm 左右,房屋观测到新生裂缝。总体上现场监测结果反映:

(1) 当前下穿工程中多数房屋是安全的,最大沉降<30 mm 的房屋占 25/38 = 66% (B 级以内)。

(2) 最大沉降在 30~50 mm 内的房屋,占 12/38 = 32%,该区间内的房屋可能存在开裂,甚至有些风险较大(C 级),需要结合施工状况、房屋基础、结构具体情况等做深入研究分析。

(3) 监测统计结果表明:机场路房屋沉降安全标准可取 30 mm,极限标准可取 45 mm。

通过监测对比分析可知,DSC 模型从房屋受力、破坏的本质上来评估房屋开裂程度与开裂过程,是较为合理的,且模型计算得到的房屋沉降控制标准与现场监测、观测结果是基本一致的。

4 结 论

(1) 通过 C++程序编写的 DSC 模型,对地表房屋变形开裂进行量化评估,评估结果基本可靠。

(2) 通过 DSC 模型预测、评估,以及现场监控量测结果综合分析,建议机场路楼群最大沉降量安全控制标准取 30 mm。

(3) 采用 DSC 模型描述材料全过程应力应变关系,不仅物理力学意义明晰,而且数值稳定,计算便利,实用性强。

参 考 文 献

[1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽

- 教育出版社, 2004.
- [2] 廖红建, 宁春明, 俞茂宏, 等. 软岩的强度-变形-时间之间关系的试验分析[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 8—13. LIAO Hong-jian, NING Chun-ming, YU Mao-hong, et al. Experimental study on strength-deformation-time relationship of soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(2):8—13.
- [3] 张农, 侯朝炯, 陈庆敏, 等. 岩石破坏后的注浆固体体的力学性能[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 50—53. ZHANG Nong, HOU Chao-jiong, CHEN Qing-min, et al. Mechanical property of broken rock after grouting reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1998, 19(3): 50—53.
- [4] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342—345. HOU Chao-jiong, GOU Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 342—345.
- [5] WILLAM K J, WARNKE E D. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete[C]//Proceedings of International Association for Bridge and Structural Engineering. Bergamo: [s. n]: 1975, 19: 1—30.
- [6] DESAI C S, TOTH J. Disturbed state constitutive modeling based on stress-strain and nondestructive behavior[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1996, 33(11): 1619—1650.
- [7] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. **Geotechnique**, 1986, 35(1): 3—18.
- [8] GEISER F, LALOUI L, VULLIET L, et al. Disturbed state concept for partially saturated soils[J]. **Numerical Models in Geomechanics**, 1997: 129—134.
- [9] GEISER F, LALOUI L, VULLIET L. Constitutive modeling of unsaturated sandy silt[J]. **Computer Methods and Advances in Geomechanics**, 1997: 99—907.
- [10] 吴刚, 张磊. 单轴压缩下岩石破坏后区的扰动状态概念分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1628—1634. WU Gang, ZHANG Lei. Analysis on post-failure behaviors of rock in uniaxial compression using disturbed stated concept theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 1628—1634.
- [11] 吴刚. 工程材料的扰动状态本构模型(I)—扰动状态概念及其理论基础[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 759—765. WU Gang. Disturbed state constitution models of engineering material(I)-Disturbed state concept and its theory principium[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 759—765.
- [12] 吴刚. 工程材料的扰动状态本构模型(II): 基于扰动状态概念的有限元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1107—1110. WU Gang. Disturbed state constitution models of engineering material (II): DSC-based numerical simulation of finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1107—1110.
- [13] 郑建业, 葛修润, 孙红. 硬化模型描述软化响应扰动状态理论合理性细观分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 128—132. ZHENG Jian-ye, GE Xiu-run, SUN Hong. Meso analysis for rationality of disturbed state concept theory on utilization of hardening model for softening response depiction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 128—132.
- [14] 郑建业, 葛修润, 蒋宇, 等. 扰动状态概念方法的参数标定及应用初探[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 972—975. ZHENG Jian-ye, GE Xiu-run, JIANG Yu, et al. Parameter calibration and preliminary utilization of disturbed state concept(DSC) method[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2004, 38(6): 972—975.
- [15] 王德玲, 葛修润. 岩石的扰动状态本构模型研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2005, 2(1): 91—96. WANG De-ling, GE Xiu-run. Constitutive model of rock disturbance status[J]. **Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)**, 2005, 2(1): 91—96.
- [16] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [17] 强辉, 周华强, 常庆粮. 岩石峰值强度前后相关力学特性的回归分析[J]. 江西煤炭科技, 2006, (2): 48—50. QIANG Hui, ZHOU Hua-qiang, CHANG Qing-liang. Regress analysis of mechanics characteristic of the rock strength at the pre-peak and post-peak[J]. **Jiangxi Coal Science & Technology**, 2006(2): 48—50.
- [18] YU S W, FENG X Q. Micromechanical damage model for brittle materials with residual strain [C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Fracture, 1997, (2): 1167—1174.
- [19] 张顶立, 黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1703—1707. ZHANG Ding-li, HUANG Jun. Analysis and prediction of vault crown settlement in metro tunneling at shallow depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(10): 1703—1707.