

黄禄渊,王成虎,杨树新.地震位错模拟在有限元软件 MSC. Marc 中的实现[J].华北地震科学,2018,36(1):1-9.

地震位错模拟在有限元软件 MSC. Marc 中的实现

黄禄渊^{1,2},王成虎²,杨树新²

(1. 中国地质科学院地质研究所,大陆构造与动力学重点实验室,北京 100037

2. 中国地震局地壳应力研究所,地壳动力学重点实验室 北京 100085)

摘要:介绍了在通用有限元软件 MSC. Marc 中实现“分裂节点法”地震位错模拟,并使用此方法验算走滑断层震例引起的同震位移场。结果表明,该方法精确、简单、有效,也可以很方便地移植到其他具有二次开发接口的有限元软件中。

关键词:有限元;地震位错;“分裂节点法”;二次开发

中图分类号:P315-39

文献标志码:A

文章编号:1003-1375(2018)01-0001-09

doi:10.3969/j.issn.1003-1375.2018.01.001

0 引言

20 世纪以来研究同震形变的准静态地震位错理论得到迅速发展。Steketee^[1]最早把位错理论引入地震学,导出了弹性半无限空间中走滑断层的位移格林函数。其后,许多地震学家针对不同地球模型和断层类型推导出了解析或半解析的同震变形位错表达式。Chineery^[2-3]利用格林函数推导垂直断层走滑位错附近的位移表达式;Berry 和 Shales^[4]推导了张裂位错的地表位移公式;Maruyam^[5]把 Chineery^[2-3]的结果推广到了倾滑断层;Yamazaki^[6]推导了膨胀源产生的地壳变形场;Iwasaki 和 Sato^[7]推导了倾斜矩形断层引起的地球内部应变场;Davis^[8]推导了倾斜张拉断层引起的地表形变;Okada^[9-10]给出了经典的半无限空间介质剪切与张拉断层引起的地表和内部的位移、应变表达式。研究者们^[11-12]发现使用半无限空间模型反演得到的断层深度大于真实的断层深度,并且反演的滑移量也偏大,采用层状地球模型能够更接近真实地球;Wang 等^[13]发布程序 EDGRN/EDCMP 用于计算层状地球模型中地震位错引起的位移和应力。同震位错理论的进一步发展是能够考虑地球曲率和分层的球形位错理论,例如,一些无自重球形地球模型位错理论研究工作者^[14-16]导出了位移和应变的解析解;Sun^[17]、Sun 和 Okubo^[18]发展了考虑重力位的球状分层地

球模型位错理论;Sun 和 Okubo^[19]还将球形位错格林函数应用于有限断层积分,解释 1964 年阿拉斯加大地震的同震重力变化。位错解析或解析渐近解在解决同震形变问题中的应用已经十分成熟,但是半空间或者分层地球模型仍然不能完全考虑真实地球模型,因为真实地球具有强介质非均匀性,例如俯冲带地区和造山带,地表地形起伏剧烈和介质具有强非均匀性。解析方法考虑真实地球具有其局限性,例如 Fu^[20]采用“微小扰动理论”研究地球三维不均匀构造。但微小扰动理论只适用于较小三维构造变化的情况,而实际地球横向不均匀性很大,有时超过 100%^[21]。采用数值方法是解决真实地球强介质不均匀性和地表地形起伏的有效途径,在同震形变数值研究中,有限元方法已经成为一个运用广泛的方法。Lin^[22]用二维模型计算了青藏高原东缘地形对汶川地震同震形变的影响,发现地形对同震水平位移最高影响达到 9%;邵志刚等^[23]利用有限元方法,根据 2001 昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震同震及震后断层两侧变形场的非对称分布,反演断层两侧弹性和黏滞系数的差异;Masterlark^[24]利用三维有限元模型讨论俯冲带地震同震形变对介质参数的敏感性。

同震位移场和应力场,对于估计地震引起的后续地震活动发展趋势十分重要,特别是库仑应力变化的计算常作为估计后续地震活动性的重要手段。例如,Parsons 等^[25]计算了汶川地震引起的同震静

收稿日期:2017-06-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41704097);中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项项目(Y201706);中央级科研院所基本科研业务专项项目(ZDJ2017-12)

作者简介:黄禄渊(1988—),男,福建泉州人,助理研究员,主要从事计算地球动力学研究。E-mail:pekinghly@163.com

态库仑应力变化,2013 年庐山地震位于库仑应力正值区。在有限元软件中,采用合适的方法获得正确的同震位移场和应力场显得尤为重要。科研工作者使用有限元软件模拟地震位错时,有学者采用弱化带方式^[26-27]使断层单元两盘产生相对运动,也有学者直接在有厚度的断层单元两盘施加大小相等方向相反的位移边界^[28]来模拟地震位错,这两种方法地震断层单元均有一定厚度,不符合位错理论的断层零厚度要求,并且前种方法通过“降刚”去精确匹配精细断层滑动模型具有很大局限与困难。目前,鲜有文献介绍如何利用通用有限元软件精确模拟地震位错。本文以“分裂节点法”为例,介绍了在有限元软件 MSC. Marc 中借助其二次开发模块实现位错模拟的方法,代码量小,也可以很方便移植到其他具有二次开发接口的有限元软件中。

1 有限元位错模拟方法

传统有限元法使用连续形函数,在处理位错这种间断解问题时研究者提出了一些特殊的处理方法,如 DG 方法、“罚函数法”、“双节点法”、“弹性位错等效体力法”、“分裂节点法”、“扩展有限元法”等^[29-34]。

“罚函数法”、“双节点法”、“分裂节点法”等方法要求单元之间分界面很好地贴合断层;“弹性位错等效体力法”和“扩展有限元法”允许单元内部出现间断面。“扩展有限元法”在节点自由度之外引入额外未知量刻画间断面,允许单元内部间断,代价是增加未知量数目,单元内部间断也对数值积分造成困难;“弹性位错等效体力法”是张贝等^[32]基于 Burridge 和 Knopoff^[35]弹性介质中位错源与体力源等价的表达式,推导出的有限元位错等效体力表示,可以处理任意复杂形状断层^[32,36-38],但需要计算面积分;“分裂节点法”^[33]具有物理含义明确、形式简洁的优点,因此本文地震位错的有限元模拟采用该方法。

分裂节点法,是根据有限元刚度矩阵性质做数学处理,将地震位错等效成体力,物理含义明确,简单有效地以初始位移的形式将断层引入有限元数值模拟中,编程代码量小,许多研究者在如 FEPG 平台^[23]或其他自主开发平台上^[39-40]采用该方法引入地震位错。目前暂没有文献介绍如何在商业有限元软件中引入该方法,本文将简要介绍“分裂节点法”,并给出该方法在商业有限元软件 MSC. Marc 中的实现,供习惯使用商业有限元软件的地震工作者借鉴使用。

Melosh 和 Raefsky 在文献^[33]中对“分裂节点

法”的介绍以一维单元为例,本文仅做简单复述。如图 1 所示,单元 1 和单元 2 分别位于断裂的左右两侧, U 为位移,上标表示单元号,下标表示单元内的节点号, ΔU 表示位错量,则有 $U_2^1 = \bar{U}_2 + \Delta U_2^1$, $U_1^2 = \bar{U}_1 + \Delta U_1^2$,其中分裂节点上位移平均值为 $\bar{U}_2 = \bar{U}_1$, $\Delta U_2^1 = -\Delta U_1^2$ 。

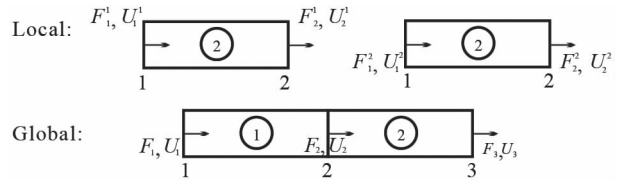


图 1 “分裂节点法”一维单元示意图

(修改自 Melosh 和 Raefsky^[33])

在有限元分析中,单元 1 的刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ \bar{U}_2 + \Delta U_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^1 \\ F_2^1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将位错移到等式右边,

$$\begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^1 \\ \bar{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^1 - K_{12}^1 \Delta U_2^1 \\ F_2^1 - K_{22}^1 \Delta U_2^1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

同理,单元 2 经过整理的局部刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ K_{21}^2 & K_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ U_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^2 - K_{11}^2 \Delta U_1^2 \\ F_2^2 - K_{21}^2 \Delta U_1^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

全局的总体刚度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & 0 \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K_{11}^2 & K_{12}^2 \\ 0 & K_{21}^2 & K_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - K_{12}^1 \Delta U_2^1 \\ F_2 - K_{22}^1 \Delta U_2^1 - K_{11}^2 \Delta U_1^2 \\ F_3 - K_{21}^2 \Delta U_1^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: U_i 为位移, F_i 为力, i 为全局节点编号,并且, $U_1 = U_1^1$, $U_2 = \bar{U}_2 = \bar{U}_1$, $U_3 = U_2^2$, $F_1 = F_1^1$, $F_2 = F_2^1 + F_1^2$, $F_3 = F_2^2$ 。

由式(4)可知,地震引起位错可等效为体力,在有限元分析其他部分不做改动情况下,“节点分裂法”将地震引起的位错引入到有限元计算中,确实是一种物理含义明确且简单有效的方法。

2 “分裂节点法”在 MSC. Marc 中的实现

2.1 子程序设计流程

Marc 软件是 MSC 软件公司于 1999 年收购的 Marc 公司的产品。Marc 公司创于 1967 年,是全球

首家非线性有限元软件公司。MSC. Marc 是功能齐全的高级非线性有限元软件,具有极强的结构分析能力。可以处理各种线性和非线性结构分析包括:线性/非线性静力分析、模态分析、简谐响应分析、频谱分析、随机振动分析、动力响应分析、自动的静/动力接触、屈曲/失稳、失效和破坏分析等。为满足工业界和学术界的各种需求,提供了层次丰富、适应性强、能够在多种硬件平台上运行的系列产品。

根据式(4),“分裂节点法”的核心思路是把地震位错等效成体力,修改单元右端项。通用有限元软件如 Ansys、Abaqus、MSC. Marc 和 MSC/Nastran 等,基本上都提供了开放的二次开发接口,方便用户开发出自身需要的特定功能模块,因此这些有限元软件能够借助二次开发接口实现地震位错模拟。本文以 MSC. Marc 为例介绍“分裂节点法”在有限元软件中的实现,对地震位错模拟在其他有限元软件上的实现有一定借鉴意义。

MSC. Marc 软件提供了 108 个用户子程序入口,覆盖了有限元分析的所有环节,从几何建模、网格划分、边界定义、材料模型到分析求解、结果输出。用户子程序是以 Fortran 语言编写的子程序模板文件,使用时按 Fortran 编程规则,用户根据需要填充子程序模板文件完成子程序编写。MSC. Marc 提供了用户自定义单元的子程序 USELEM,用户在该子程序中需定义与单元相关的等效节点荷载、单元刚度矩阵、单元质量矩阵、单元右端项、内力矩阵、应力、应变增量、高斯点坐标和输出信息等。

子程序 USELEM 中各参数意义,详见 MSC. Marc 软件帮助文件 D 卷^[41],此处不做详述。程序运行过程中,主程序将根据 iflag 参数(图 2)调用相应计算模块,将用户单元信息组装到总体刚度矩阵和荷载矩阵中,并将计算结果返回子程序。当 iflag=2~5 时 USELEM 子程序的书写和标准有限元流程相似;仅当 iflag=1 时,返回等效节点荷载,此处需要按式(4)修改右端项。程序设计的总体思路见图 2,附录代码以常应变三角形单元为例,列出“分裂节点法”在 MSC. Marc 中的实现代码,其中 Subroutine ModifyRHSMain 是等效节点荷载的修改子程序。

2.2 结果验证

我们以直立走滑断层为例,对代码可靠性进行验证。利用上述代码在 MSC. Marc 中计算走向正北直立断层发生纯右旋 1 m 位错的同震位移场。采用三维模型,为保证对称性,建模时先建立 1/4 模型,再通过镜像得到完整模型。算例中断层长度为

20 km,计算区域为 100 km×100 km,施加限制法向位移的边界条件,地震位错根据“分裂节点法”等效成体力采用子程序 USELEM 施加在相应断层单元(图 3)。模型中断层处网格尺寸为 400 m,其余网格尺寸为 2 km,网格总计 123 060 个六面体单元和 132 112 个节点,计算用时仅为 6 min,“分裂节点法”几乎不增加额外费用,计算快速。根据图 3,该算例的同震东向位移和北向位移都呈现出了反对称花瓣图像,北向位移最大值为 0.48 m,这个值和网格尺寸有关,网格尺寸越小,北向位移最大值越接近 0.5 m。

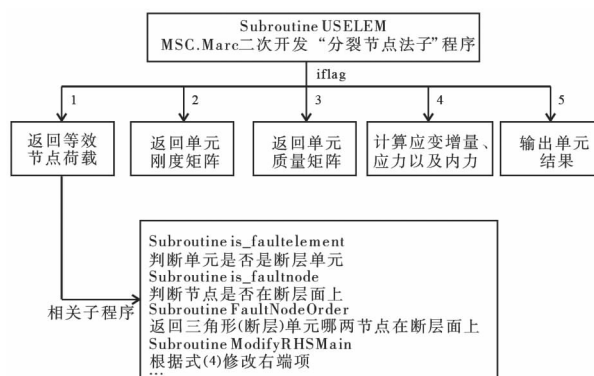
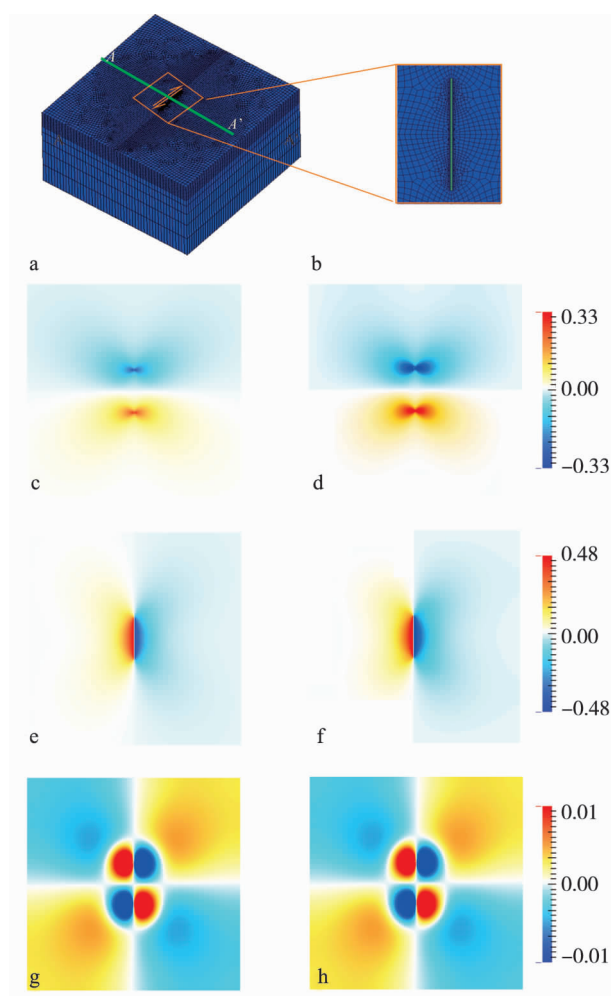


图 2 “分裂节点法”子程序结构示意图

为了检验方法和程序编制的可靠性,也为了便于比较,我们把有限元网格节点作为观测点,采用 Okada 表达式解算各节点处的位移值,将二者的结果绘成图(图 4)。有限元解和 Okada 解析解的水平位移以及垂直位移均吻合得很好。在“分裂节点法”首次被提出的文献里, Melosh 和 Raefsky^[33] 只给出了二维模型逆冲断层的水平位移和垂向位移与解析解的比较,本文的工作进一步验证了该方法在三维模型下的有效性。通过和解析解的验证,证明借助 MSC. Marc 的二次开发功能可以简单、有效、精确地采用“分裂节点法”模拟地震位错。

2.3 介质非均匀影响

为了讨论介质非均匀性的影响,笔者设计了 3 组简单的数值对比试验,试验采用的模型和 2.2 小节一致。3 组试验如下:第 1 组,走滑断层的左盘弹性模量/右盘弹性模量=1.0;第 2 组,走滑断层的左盘弹性模量/右盘弹性模量=0.5;第 3 组,走滑断层的左盘弹性模量/右盘弹性模量=2.0。3 组数值试验的东向和北向位移示于图 4,3 组试验分别对应图 4 中的“有限元解 1”、“有限元解 2”、“有限元解 3”。



a 计算网格; b 断层放大图; c、e、g 分别为解析解的 EW 向、NS 向和垂向位移; d、f、h 分别为有限元解的 EW 向、NS 向和垂向位移。

图 3 网格及计算结果

通过图 3c~d、3g~h 不难发现, 跨过图 3a 所示的 A-A' 基线, EW 向和垂向位移均为 0, 因此我们只绘制了 A-A' 剖面 3 组数值试验有限元解的北向位移于图 4。首先对于第 1 组试验, 并未考虑介质的横向非均匀, 应当和解析解有较好的吻合, 经笔者统计二者最大误差为 3%, 并且随着有限元网格加密, 二者间差异更小。

通过比较 3 组数值试验结果, 当考虑断层左右两盘介质横向非均匀性时, 同震位移出现不对称性。比较 3 组对比试验, 较弱一盘的同震位移相对较大,

参考文献:

- [1] Steketee J A. On volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium[J]. Canadian Journal of Physics, 1958, 36(2): 192-205.
- [2] Chinnery M A. The deformation of the ground around surface faults[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1961, 51(3): 355-372.
- [3] Chinnery M A. The stress changes that accompany strike-slip faulting[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(5): 921-932.

并且最大同震位移大于介质均匀的情况。可以预计的是, 两盘强弱差异越大, 不对称性越大, 最大同震位移也越大。

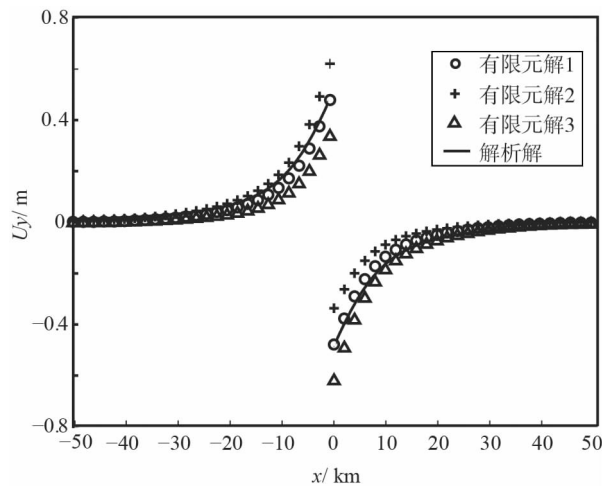


图 4 有限元解与解析解比较

3 讨论与结论

本文借助 MSC. Marc 软件二次开发功能, 介绍了在 MSC. Marc 中采用“分裂节点法”实现地震位错模拟的方法, 并利用解析解进行了验证。结果表明, “分裂节点法”可以在 MSC. Marc 平台实现, 算法简单有效, 不增加额外计算代价。

本文介绍的方法并不局限于 MSC. Marc 平台, 例如 Abaqus 软件的 UEL 子程序和 MSC. Marc 的 USELEM 子程序功能类似, 理论上也能够其他通用有限元平台实现地震位错模拟(限于软件版权问题, 笔者并未在其他有限元平台上实现“分裂节点法”)。本文所做的工作期望能够为习惯使用通用有限元软件的科研人员提供有益思路。

限于篇幅, 笔者仅仅讨论了走滑断层一种算例, 且没有将该方法应用于具体震例。在未来工作中, 将使用本文方法, 基于有限元方法的通用性, 能够研究考虑到地表地形起伏、介质非均匀性的同震形变和应力场, 并用于具体震例, 取得更接近真实的结果。此外, “分裂节点法”并不局限于同震位错模拟, 也可以结合黏弹性本构关系实现震后位错模拟。

- [4] Berry D S, Sales T W. An elastic treatment of ground movement due to mining—III three dimensional problem, transversely isotropic ground[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1962, 10(1): 73-83.
- [5] Maruyama T. Statical elastic dislocations in an infinite and semi-infinite medium[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1964, 42(2): 289-368.
- [6] Yamazaki K. Theory of crustal deformation due to dilatancy and quantitative evaluation of earthquake precursors[C]//Association of Clinical Biochemists in Ireland Annual Conference. 2015: 1978.
- [7] Iwasaki T, Sato R. Strain field in a semi-infinite medium due to an inclined rectangular fault[J]. *Earth, Planets and Space*, 1979, 27(4): 285-314.
- [8] Davis P M. Surface deformation associated with a dipping hydrofracture[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B7): 5826-5834.
- [9] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [10] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154.
- [11] Savage J C. Displacement field for an edge dislocation in a layered half-space[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B2): 2439-2446.
- [12] Cattin R, Briole P, Lyon-Caen H, et al. Effects of superficial layers on coseismic displacements for a dip-slip fault and geophysical implications[J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 137(1): 149-158.
- [13] Wang R J, Mart?? n F L, Roth F. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust—FORTRAN programs EDGRN/EDCMP[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(2): 195-207.
- [14] Ben-Menahem A, Singh S J, Solomon F. Static deformation of a spherical earth model by internal dislocations[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1969, 59(2): 813-853.
- [15] Smylie D E, Mansinha L. The elasticity theory of dislocations in real earth models and changes in the rotation of the earth[J]. *Geophysical Journal International*, 1971, 23(3): 329-354.
- [16] Saito M. Excitation of free oscillations and surface waves by a point source in a vertically heterogeneous earth[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(14): 3689-3699.
- [17] Sun W K. Potential and gravity changes caused by dislocations in spherically symmetric earth models[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1992, 67(2): 89-238.
- [18] Sun W K, Okubo S. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical earth—I. Theory for a point dislocation[J]. *Geophysical Journal International*, 1993, 114(3): 569-592.
- [19] Sun W K, Okubo S. Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical earth—II. Application to a finite fault[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 132(1): 79-88.
- [20] Fu G Y. Surface gravity changes caused by tide-generating potential and by internal dislocation in a 3-D heterogeneous earth[D]. Tokyo: University of Tokyo, 2007.
- [21] 孙文科. 地震火山活动产生重力变化的理论与观测研究的进展及现状[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(4): 44-53.
- [22] Lin X G, Sun W K, Zhang H, et al. A feasibility study of an FEM simulation used in Co-seismic deformations: a case study of a dip-slip fault[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2013, 24(4): 637-647.
- [23] 邵志刚, 傅容珊, 薛霆斌, 等. 昆仑山 $M_s 8.1$ 级地震震后变形场数值模拟与成因机理探讨[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 805-816.
- [24] Masterlark T. Finite element model predictions of static deformation from dislocation sources in a subduction zone: sensitivities to homogeneous, isotropic, Poisson-solid, and half-space assumptions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B11): 2540.
- [25] Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. *Nature*, 2008, 454(7203): 509-510.
- [26] 胡才博, 周一杰, 蔡永恩. 如何用有限元新模型研究地震触发和应力场连续演化[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(5): 546-555.
- [27] 董培育, 石耀霖. 关于“用单元降刚法探索中国大陆强震远距离跳迁及主体活动区域转移”的讨论——横向各向同性“杀伤单元”才是更好的途径[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(6): 2133-2139.
- [28] 李玉江, 陈连旺, 杨树新, 等. 两次于田 $M_s 7.3$ 地震间应力触发作用及 2014 年于田地震的发生对周缘断层的影响[J]. *地球学报*, 2015, 36(1): 94-102.
- [29] Arnold D N. An interior penalty finite element method with discontinuous elements[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1982, 19(4): 742-760.
- [30] Aagaard B, Williams C, Knepley M. PyLith: A finite-element code for modeling quasi-static and dynamic crustal deformation[C]//Eos

- Transactins of the AGU, Fall Meeting Supplemental. Washington DC: AGU, 2008; 52.
- [31] 朱桂芝, 王庆良. 双节点有限元模拟直立走滑断裂地震位移场[J]. 地震研究, 2005, 28(2): 189-192.
- [32] 张贝, 张怀, 石耀霖. 有限元模拟弹性位错的等效体力方法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1666-1674.
- [33] Melosh H J, Raefsky A. A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(5): 1391-1400.
- [34] Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 45(5): 601-620.
- [35] Burridge R, Knopoff L. Body force equivalents for seismic dislocations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(6A): 1875-1888.
- [36] 瞿武林, 张贝, 黄禄渊, 等. 2004年苏门答腊地震的几个断层滑动模型的全局同震位移对比[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2843-2858.
- [37] 黄禄渊, 张贝, 程惠红, 等. 2015年智利 Illapel M_w 8.3地震同震效应及其对南美大陆地震危险性影响[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 163-173.
- [38] 黄禄渊, 张贝, 瞿武林, 等. 2010智利 Maule 特大地震的同震效应[J]. 地球物理学报, 2017, 60(3): 972-984.
- [39] Wang K L. Coupling of tectonic loading and earthquake fault slips at subduction zones[M]//Wang R, Aki K. Mechanics Problems in Geodynamics Part I. Basel: Birkh? user, 1995; 537-559.
- [40] Parker J, Lyzenga G, Norton C, et al. Geophysical finite-element simulation tool (GeoFEST): algorithms and validation for quasistatic regional faulted crust problems[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(3/4): 497-521.
- [41] MSC Software Corporation. MSC. Marc Volume D: User subroutines and special routines[M]. Santa Ana, California: MSC Software Corporation, 2005.

Numerical Modeling of Earthquake Dislocation Using MSC. Marc

HUANG Lu-yuan^{1,2}, WANG Cheng-hu², YANG Shu-xin²

(1. Institute of Geology, CAGS, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Beijing 100037, China;

2. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Key Laboratory of Crustal Dynamics, Beijing 100085, China)

Abstract: This paper discusses the implementation of the “splitting nodes” technique in the MSC. Marc software. Adopt this technique, coseismic displacements resulted from strike-slip fault are calculated and compared with the analytic solutions. The technique described here offers a simple and efficient method of introducing faults into finite element computations, and can be implemented in other FEM soft through the user subroutine.

Key words: finite element method; earthquake dislocation; “splitting nodes methods”; secondary development

附录(MSC. Marc 二次开发实现“分裂节点法”代码)

```

subroutineuselem(m,xk,xm,nnode,ndeg,f,r,
* jtype,dispt,disp,ndi,nshear,ipass,nstats,ngenel,
* intel,coord,ncrd,iflag,idss,t,dt,etota,gsigs,de,
* geom,jgeom,sigxx,nstrmu)
implicit real * 8 (a-h,o-z)
include './common/matdat'
include './common/space'
include './common/array4'
include './common/heat'

integerndi, ngenel, nnode, nshear, nstats, nstrmu,i,j,tem-
plist
real * 8 r,sigxx,t,xk,xm,stff
real * 8 x1,y1,z1,x2,y2,z2,x3,y3,z3
real * 8 v1,v2,s1,s2,s3,a,b,displa,beta,se,help,
eps,sigma
real * 8 dux,duy
character * 30:leftfault,rightfault,fnode
integercflag
dimension xk(idss,idss),xm(idss,idss),dispt
(ndeg,*),disp(ndeg,*)
dimension t(nstats,*),dt(nstats,*),coord(ncrd,*)
dimensionetota(ngenel,*),gsigs(ngenel,*),de(ngenel,*)

```

```

dimension f(ndeg, *), r(ndeg, *), sigxx(nstrmu,
*), geom(*), jgeom(*)
dimensionstff(6,6), templist(nnode)
dimension v1(2), v2(2), s1(2), s2(2), s3(2)
dimension a(3), b(3), displa(6), beta(3,6), se(3,
3)
dimension help(6,3), eps(3,3), sigma(3,3)

c -----
---用户输入量-----
-----
c 平面应力问题 planetype=1 or 平面应变问题 planetype
=2?
planetype=1
c 断层左盘单元集名称、右盘单元集名称、断层节点集
名称
leftfault='flele'
rightfault='frele'
fnode='fnode'
c 位错量一半
dux=-0.433d0
duy=0.250d0
c check matrix dimension
if (idss.ne.6) then
write(6,*) '* * * dimensions not OK * * * '
call quit(1234)
goto 9999
endif
c 节点坐标
x1=coord(1,1)
y1=coord(2,1)
z1=0.0d0
x2=coord(1,2)
y2=coord(2,2)
z2=0.0d0
x3=coord(1,3)
y3=coord(2,3)
z3=0.0d0
c 单元基准
v1(1)=1.0d0
v1(2)=0.0d0
v2(1)=0.0d0
v2(2)=1.0d0
c 计算 a3 b3 a1 b1 a2 b2
s3(1)=x2-x1
s3(2)=y2-y1
s1(1)=x3-x2
s1(2)=y3-y2
s2(1)=x1-x3
s2(2)=y1-y3
c 计算任意两节点的距离
snorms1=sqrt(s1(1)*s1(1)+s1(2)*s1(2))
snorms2=sqrt(s2(1)*s2(1)+s2(2)*s2(2))
snorms3=sqrt(s3(1)*s3(1)+s3(2)*s3(2))
c 判断距离是否为0。若为0则单元定义不正确
if ((snorms1.eq.0.0).or.(snorms2.eq.0.0).or.
(snorms3.eq.0.0)) then
write(6,*) 'badly defined element'
call quit(1234)
goto 9999
endif
a(1)=s1(1)*v1(1)+s1(2)*v1(2)
b(1)=-s1(1)*v2(1)-s1(2)*v2(2)
a(2)=s2(1)*v1(1)+s2(2)*v1(2)
b(2)=-s2(1)*v2(1)-s2(2)*v2(2)
a(3)=s3(1)*v1(1)+s3(2)*v1(2)
b(3)=-s3(1)*v2(1)-s3(2)*v2(2)
c 计算单元面积
area=0.5d0*(a(1)*b(3)-a(3)*b(1))
c 位移
displa(1)=dispt(1,1)+disp(1,1)
displa(2)=dispt(2,1)+disp(2,1)
displa(3)=dispt(1,2)+disp(1,2)
displa(4)=dispt(2,2)+disp(2,2)
displa(5)=dispt(1,3)+disp(1,3)
displa(6)=dispt(2,3)+disp(2,3)
c 计算应变矩阵 beta 矩阵应力-应变本构矩阵 se
do 120 i=1,3
do 110 j=1,3
beta(i,j)=0.0d0
beta(i,j+3)=0.0d0
se(i,j)=0.0d0
110continue
120continue
c 计算矩阵 beta
do 130 i=1,3
k=2*i-1
l=k+1
beta(1,k)=b(i)/(2.0*area)
beta(2,l)=a(i)/(2.0*area)
beta(3,k)=a(i)/(2.0*area)
beta(3,l)=b(i)/(2.0*area)
130 continue
c 计算应力-应变矩阵 se
c 平面应力
if (planetype==1) then
se(1,1)=et(1)/(1.0-xu(1)*xu(1))
se(1,2)=xu(1)*se(1,1)
se(2,1)=se(1,2)
se(2,2)=se(1,1)
se(3,3)=shmod(1)
c shmod(1)是剪切模量
else
c 平面应变

```

```

        se(1,1)=et(1)*(1.0-xu(1))/(1.0+xu(1))/
(1.0-2.0*xu(1))
        se(1,2)=et(1)*xu(1)/(1.0+xu(1))/(1.0-2.0
* xu(1))
        se(2,1)=se(1,2)
        se(2,2)=se(1,1)
        se(3,3)=shrmod(1)
    endif
endif
c  根据 iflag 标识计算不同的返回数据
goto(1000,2000,3000,4000,5000) iflag
1000continue
c  等效节点荷载 f
c  刚度矩阵计算 xk=beta'D*beta*thickness*area
callgtprd(beta,se,help,3,6,3)
callgmprd(help,beta,stff,6,3,6)
do 1020 i=1,6
do 1010 j=1,6
c  geom(1)厚度
stff(i,j)=stff(i,j)*area*geom(1)
1010 continue
1020 continue
callModifyRHSMain ( m, leftfault, rightfault, fnode,
stff,f,
1 nnode,ndeg,dux,duy)
goto 9999
2000continue
c  刚度矩阵计算 xk=beta'D*beta*thickness
* area
callgtprd(beta,se,help,3,6,3)
callgmprd(help,beta,xk,6,3,6)
do 2020 i=1,6
do 2010 j=1,6
xk(i,j)=xk(i,j)*area*geom(1)
2010continue
2020continue
c  计算应变 eps=beta*displa 应变矩阵=B矩阵乘以
位移
callgmprd(se,eps,gsigs,3,3,1)
c  把 eps 复制到 etota
callmcpy(eps,etota,3,1,0)
c  等效节点荷载计算 r=beta*gsigs 然后在单元上积分
c  三节点常应变单元,积分直接乘以面积和厚度
callgtprd(beta,gsigs,r,3,6,1)
do 2030 i=1,6
r(i,1)=r(i,1)*area*geom(1)
2030continue
goto 9999
3000continue
c  质量矩阵 xm
goto 9999
4000continue

```

```

c  计算应变 eps=beta*displa
callgmprd(beta,displa,eps,3,6,1)
callmcpy(eps,etota,3,1,0)
callmcpy(eps,de,3,1,0)
c  计算应力 gsigs=se*eps
callgmprd(se,eps,gsigs,3,3,1)
callmcpy(gsig, sigxx,3,1,0)
c  等效节点荷载计算 r=beta*gsigs 并在单元上积分,
callgtprd(beta,gsigs,r,3,6,1)
do 4010 i=1,6
r(i,1)=r(i,1)*area*geom(1)
4010continue
goto 9999
5000continue
c  输出、显示应力
c  修改单元类型参数 jtype
jtype=-jtype
goto 9999
9999continue
return
end

```

其他相关子程序描述:

```

subroutineiselement_in_set(ele,set,N,flag)
! 判断单元是否在 set 里面
代码...
end subroutine iselement_in_set

subroutineis_faulelement(ele_nu,faultname,flag)
! 根据单元号判断单元是否包含地震位错面
代码...
end subroutine is_faulelement

subroutineis_faultnode(node_nu,faultname,flag)
! 根据节点号判断节点是否在位错面上
代码...
end subroutine is_faultnode

subroutineGetNodeNu(elenu,list,nnode)
! 根据单元号返回该单元包含的节点编号
代码...
end subroutine GetNodeNu

subroutineFaultNodeOrder(ele_nu,norder,nnode,fault-
name)
! 返回三角形单元中哪两个节点落在断层面(线)上
代码...
end subroutine FaultNodeOrder

subroutineModifyRHS(stiff,f,norder,nnode,ndeg,dux,
duy,sign)
! 根据刚度矩阵 stiff、右端等效节点力 F 以及 norder 修

```



```

改 F
integer norder, nnode, ndeg, sign, i, j, k
dimension norder(nnode)
real * 8 stiff, f, dux, duy
dimension stiff(nnode * ndeg, nnode * ndeg), f(nnode *
ndeg)

doi = 1, nnode
  if (norder(i) == 1) then
    k = (i - 1) * ndeg + 1
    do j = 1, nnode * ndeg
      f(j) = f(j) + sign * dux * stiff(j, k)
      f(j) = f(j) + sign * duy * stiff(j, (k + 1))
    enddo
  endif
enddo

end subroutine ModifyRHS

subroutine ModifyRHSMain(ele_nu, leftf, rightf, fnode,
stiff, f,
  1 nnode, ndeg, dux, duy)
! 根据刚度矩阵 stiff、右端等效节点力 F 以及 norder 修
改 F
integer norder, nnode, ndeg, sign, i, j, k, ele_nu, elflag, er-
flag
dimension norder(nnode)
real * 8 stiff, f, dux, duy
dimension stiff(nnode * ndeg, nnode * ndeg), F(nnode *
ndeg)
character * 30 : leftf, rightf, fnode

! 先判断单元是不是断层单元
callis_faultelement(ele_nu, leftf, elflag)
callis_faultelement(ele_nu, rightf, erflag)
! 左盘
if (elflag == 1) then
  ! 找到断层单元哪 2 节点在断层面 'fnode' 上, 返回
数组 fnode
  callFaultNodeOrder(ele_nu, norder, nnode, fnode)
  ! 修改单元右端项
  callModifyRHS(stiff, f, norder, nnode, ndeg, dux,
  duy, 1)
! 右盘
elseif (erflag == 1) then
  callFaultNodeOrder(ele_nu, norder, nnode, fnode)
  callModifyRHS(stiff, f, norder, nnode, ndeg, dux,
  duy, -1)
else
  continue
endif
end subroutine ModifyRHSMain

```

欢迎订阅《华北地震科学》

《华北地震科学》是由河北省地震局主办的地震科学综合性学术刊物,国内公开发行人。主要刊登地震学方面具有创新性的研究成果,也登载地球物理、地震地质、地震工程等方面的学术论文及国内外地震科学研究的最新进展和成果。

《华北地震科学》为季刊,每季末出版,每年 4 期,每期定价 15 元,全年定价为 60 元(含邮寄费)。2018 年继续由编辑部直接发行。欲订本刊的读者朋友可通过全国非邮发报刊联合征订服务部或与本刊编辑部联系。

(1) 全国非邮发报刊联合征订服务部

邮 编: 300381

地 址: 天津市卫津南路李七庄邮局 9801 信箱全国非邮发报刊联合征订服务部

电 话: 022-23973378, 022-23962479

传 真: 022-23973378

E-mail: wms@lhzd.com

(2) 本刊编辑部

邮 编: 050022

地 址: 石家庄市槐中路 262 号《华北地震科学》编辑部

电 话: 0311-85814313

E-mail: he3g@eq-he.ac.cn; hbdzcx2015@163.com