滑脱层强度对挤压构造的影响:离散元数值模拟

李长圣¹, 尹宏伟^{2*}

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

(¹E-mail: sheng0619@163.com, ^{2*}通讯作者, E-mail: hwyin@nju.edu.cn)

Effects of décollement strength on the compressional tectonics:

discrete element numerical simulation

LI Changsheng¹, YIN Hongwei^{2*}

School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023

1 引言

离散元(Discrete Element Method, DEM)数值模拟是研究构造变形过程与变形机制的重要方法,在一定程度上突破了物理模拟存在的流变学和比例化问题。与其他连续体数值模拟方法相比,DEM采用颗粒相互作用来模拟系统的动力学机制,因此实验者可以对系统的运动演化进行模拟和观测。另外由于它允许颗粒间较大相对位移,可以更好地模拟高度形变, 尤其适合研究构造变形相关的地质问题。

2 模型设计

模拟使用课题组自主研发的离散元程序 VBOX(www.geovbox.com),采用 Hertz-Mindlin 接触力学模型更新颗粒间的接触力(Morgan, 2015),采用蛙跳法更新颗粒位移(Itasca, 2004)。

第一步:在长约 60km,高 15km 的矩形盒子内,由 92 个直径 160m 的颗粒分别生成左 墙和右墙,由 749 个直径 80m 颗粒生成底墙,之后在盒子内随机生成 17000 个直径 120m 的 颗粒,10000 个直径为 160m 的颗粒。第二步:设置颗粒间的细观参数,剪切模量 2.9e9 Pa,, 泊松比 0.2,密度 2.5e3 kg·m⁻³,重力加速度 9.8m·s⁻²,时间步 5.0e-2s,速度阻尼系数 β 为 0.01 (更新颗粒位移时,使得 V_{t+dt/2}=V_{t-dt/2}(1-β),用于耗散系统动能)(Morgan, 2015)。第三步: 生成颗粒之后,使得其在重力作用下沉积 5 万步,系统动能基本稳定不变。删除高度 6km 以 上的颗粒(不删除墙体),体系上覆地层重量减小,体系有微小的回弹膨胀,再计算 1 万步, 保证体系稳定。VBOX 在戴尔 PowerEdge R720 机架式服务器(Xeon E5-2650)上使用 16 线程 并行计算,约 16 分钟即可完成初始模型的生成。

最终,得到长约 60km,高约 6km 的初始模型,见图 1,岩层(黑色和黄色)、滑脱层(红色)和墙体(紫色和红色)共 24309 个颗粒。左右边墙和岩层颗粒的摩擦系数为 0.3,岩层

1/4

颗粒设置粘结,其中杨氏模量 2.0e8Pa,剪切模量 2.0e8 Pa,抗拉强度 1.0e7 Pa,剪切强度 2.0e7 Pa(Morgan, 2015)。滑脱层及墙体内的颗粒间无粘结。试验共设置 4 个模型,其唯一区 别是滑脱层内颗粒的摩擦系数,不同的摩擦系数表征了滑脱层不同强度。模型 0,模型 1, 模型 2,模型 3 中滑脱层颗粒间的摩擦系数分别为 0.0, 0.1, 0.2, 0.3,并且底墙和滑脱层的 颗粒拥有一样的摩擦系数。通过双轴压缩试验,测得岩层的宏观内摩擦角越为 20°,内聚力 约为 6MPa (Morgan, 2015);所有模型中滑脱层的内聚力约为零,模型 0 中滑脱层宏观内摩 擦角越为 6°,模型 1 约为 15°,模型 2 约为 18°,模型 3 约为 20°。设置完岩层和滑脱层属 性,左墙以 2.0 m·s⁻¹的速度开始挤压,试验结果见图 2。每个挤压试验,都是使用同一初始 模型 (图 1),挤压 10 万步,左墙移动 10km,计算用时约 20 分钟。



3 模拟结果

图 2 中体积应变和变形应变按照 Morgan 于 2015 年给出的方法计算,一个应变单元大 小约为 200m×200m,相关代码见 www.geovbox.com。由图 2 可知,高摩擦滑脱层模型中(模 型 2 和模型 3),主要构造形态为前展式逆冲叠瓦构造,主要发育正向逆冲断层(变形应变 图中的红色条带),这些逆冲断层密集排布于挤压端一侧,构造变形传播距离短;在低摩擦 滑脱模型中(模型 0 和模型 1),正向和反向逆冲断层(变形应变图中的蓝色条带)间隔出 现,形成冲起构造,构造变形传播距离较远,模拟结果显示滑脱层的强度对褶皱冲断带构造 形态影响很大。并且,由图 2 中的体积应变图可见,模型 2 和模型 3 中体压缩(蓝色)多于 模型 0 和模型 1,显示高摩擦滑脱体系压缩更强烈,而低摩擦体系中的褶皱冲断带内有更多 的体膨胀(红色),可能发育更多的拉张孔隙。

2 / 4



图 2 模拟结果。体积应变图中,蓝色表示体压缩,红色表示体膨胀;变形应变图中,蓝色表示逆时针剪切, 红色表示顺时针剪切 (Morgan, 2015)。

图 3 为滑脱层内颗粒间的摩擦系数与褶皱冲断带变形传播距离的关系。滑脱层内颗粒

间的内摩擦系数表征了其强度大小,摩擦系数越大滑脱层强度越大。图 3 中褶皱冲断带地表 变形距离由图 2 中的构造变形图得出,滑脱层应变的影响距离由图 2 中的变形应变图获取。 图 3 可知,滑脱层强度与地表变形和滑脱层应变的传播距离呈现负相关关系,滑脱层强度越 小,影响范围越大。并且,滑脱层应变传播距离先于地表变形 5~10km。



图 3 滑脱层内颗粒间的摩擦系数与褶皱冲断带变形传播距离的关系

4 结论

使用课题组自主研发的离散元程序 VBOX (www.gcovbox.com),通过一系列离散元数值 模拟实验研究了滑脱层强度对褶皱冲断构造特征的影响。模拟结果显示:(1)滑脱层的强度 对褶皱冲断带构造形态影响很大,高摩擦滑脱层模型中,主要构造形态为前展式逆冲叠瓦构 造,主要发育正向逆冲断层,这些逆冲断层密集排布于挤压端一侧,构造变形传播距离短; 在低摩擦滑脱模型中,正向和反向逆冲断层间隔出现,形成冲起构造,构造变形传播距离较 远。(2)高摩擦滑脱体系褶皱冲断带内压缩更强烈,而低摩擦体系中的褶皱冲断带内有更多 的体膨胀,可能发育更多的拉张孔隙。(3)滑脱层强度与地表变形和滑脱层应变的传播距离 呈现负相关关系,滑脱层强度越小,影响范围越大。并且,滑脱层应变传播距离先于地表变 形 5~10km。

本研究由国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB214703); 国家自然科学基金资助项目(41572187, 41272227, 41602208)资助

参考文献

- Morgan, J. K. (2015). Effects of cohesion on the structural and mechanical evolution of fold and thrust belts and contractional wedges: Discrete element simulations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(5), 3870-3896.
- [2] Itasca (2004). PFC2D Users' Manual (version3.1). Minnesota: Itasca Consulting Group Inc.