

粘弹性分层和重力作用对地震形变场数值模拟的影响

张晁军^{1,2}, 石耀霖², 黄建平³(1. 中国地震局地震台网中心, 北京 100045; 2. 中国科学院研究生院计算地球动力学实验室, 北京 100049;
3. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要:弹性半无限空间模型程序(Okada)经常被用于计算同震形变,但该程序不能考虑岩石分层和重力作用对变形的影响,也无法考虑震后粘弹性变形。本文利用汪容江考虑分层、重力作用的粘弹性模型程序(PSGRN/PSCMP),讨论走滑和倾向滑动断层的几种情况,并与Okada模型进行比较。结果表明重力影响不大,分层作用的影响要大于重力作用的影响;考虑重力和分层可给出更好的结果;粘滞系数的大小对震后形变曲线的形态和幅度都有很大的影响,涉及震后形变的问题考虑粘滞性是非常重要的。

关键词: 分层; 重力; 粘弹性; 同震形变; 数值模拟

中图分类号: P315.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)03-0201-07

Influence of the Role of Visco-elastic Stratification and Gravity on Numerical Simulation of Coseismic Deformation Field

ZHANG Chao-jun^{1,2}, SHI Yao-lin², HUANG Jian-ping³

(1. China Earthquake Networks Center, China Earthquake Administration, Beijing 100045, China;

2. Laboratory of Computational Geodynamics, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract: The code of elastic half-space (Okada) is often used to calculate the coseismic deformation. However, this code can not consider the effect of the stratification of rock, gravity and viscosity on deformation. In this paper, with the help of Wang's code (PSGRN/PSCMP), considering the level / tilt strike-slip and dip-slip several situations, the influences of role of stratification and gravity on numerical simulation of co-seismic deformation field are discussed, and a comparison with the results of half-space model without considering the stratification of rock and gravity is done also. The result shows that gravity has little influence on coseismic deformation; visco-elastic stratification has larger influence on it than gravity; better result could be got undoubtedly if considering both role of stratification and gravity. Magnitude of viscosity had a very important influence on the shape and amplitude of postseismic deformation curves, and that it is very necessary to consider the role of crust viscosity if the problem deals with post-seismic deformation.

Key words: Layer; Gravity; Visco-elasticity; Co-seismic deformation; Numerical simulation

0 引言

研究形变场变化的方法有数值和解析两种。早期人们使用的是解析方法,随着计算机和计算技术

发展,逐渐有了有限差分、有限单元方法等。目前应

用较广泛的有以弹性半无限空间模型为基础,以解

收稿日期:2008-01-10

基金项目:973 国家重点基础研究发展计划资源环境领域项目(2004CB418405);中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(02076902-05)

作者简介:张晁军(1965-),男(汉族),高级工程师,主要从事慢地震及计算地球动力学的研究。

析解为算法的 Okada 程序^[1,2]和以 3 维边界元为数值算法的 3D-DEF 程序^[3],以及汪荣江提出的以粘弹性分层模型为基础,并考虑地壳重力影响的解析算法程序 PSGRN/PSCMP^[4]。Okada 和 3D-DEF 程序属于计算同震形变的程序,其局限是仅考虑弹性半无限空间模型下断层错动的弹性响应,忽略了地壳内介质的粘塑性作用。一般来讲,在震后几个月地壳内介质的粘塑性就会体现出来,而在更长的时间尺度上,地壳介质并非完全弹性,其粘性更不容忽视。震后应力变化的一种可能原因就是粘性松弛。因此,弹性模型不能解释应力变化过程的时间延迟,研究震后应力场变化的问题、应力转移等问题,而相应地使用粘弹性模型、粘性流体模型更合理^[5]。

汪荣江在他人研究成果的基础上,将 Okada 的方法拓展到分层弹性半无限空间模型^[6]。之后又进行了发展。许多研究者认为:活动断层的物质变迁和构造变形会导致地壳质量的重新分布,必然在地表发生相应的重力变化;相反,一时间段内的相对重力变化必然会包含断层运动的相关信息^[7-10]。汪荣江等人考虑到重力和震后应力随时间变化的影响,将分层弹性半无限空间模型程序 EDPSG/EDCMP^[11]拓展到分层粘弹性模型程序 PSGRN/PSCMP^[4]。此程序可计算弹性体、Maxwell 体、Kelvin 体和标准线性固体等模型的同震及震后形变,使研究工作更接近实际。该程序主要解决了计算不同埋藏深度的位错源的格林函数问题,并通过线性迭加的方法计算地震造成的断层面扩张而引起的与时间有关的地形变、大地水准面和重力变化,模拟同震和震后地壳岩石变形的演化过程。

PSGRN/PSCMP 粘弹性程序与 Okada 3D-DEF 弹性程序的区别主要在于:①粘弹性的形变和时间有关;②考虑了重力影响下的完整形变场,如大地水准面和重力在同震和震后的变化,这意味着这个程序不仅解决了线动量平衡方程问题而且也解决了由于形变导致的重力重新分布控制重力势变化的泊松方程问题;③将准静态的问题,变成准动态问题,模拟更接近真实性;④采用了传播算法:时间域的格林函数用了反折叠技术,通过快速 FFT 转换得到,这确保了计算震后瞬间形变的数值稳定性。

然而考虑分层、重力作用的粘弹性模型程序与没考虑这些因素的弹性半无限空间模型程序在计算同震形变到底存在多大的差异,尚无定量分析的结果。因此我们将分水平/倾斜走滑直立断层和逆断层或正断层几种情况来讨论这些因素对同震形变的

影响(表 1),并定性分析粘滞系数大小对震后形变的影响。

1 考虑分层、重力影响对同震形变的影响

在计算中假设了不同的断层类型,其参数见表 1。弹性半无限空地壳模型和粘弹性分层模型参数分别列在表 2 和表 3 中。假设在各层泊松比为 0.25;表 2 中地壳(0~30 km)弹性模量与表 3 中地壳(0~30 km)弹性模量的平均值相同,密度平均值相差 0.86%,表 2 中 30 km 以下地壳弹性模量与表 3 中 30 km 以下地壳弹性模量的平均值相同,密度平均值相差 0.78%。

计算中分别设 4 种情况:①不分层不考虑重力(NFNG);②不分层考虑重力(NEG);③分层不考虑重力(FNG);④分层考虑重力(FG)。

表 1 断层参数一览表

断层类型	走向长度/km	倾向宽度/km	走向角/°	深度/km	倾角/°	滑动角/°	同震位移/m
直立走滑断层					90	0	
倾斜走滑断层					45	45	
直立逆(正)断层	100	25	90	20	90	90	4
倾斜逆(正)断层					45	90	
倾斜走滑逆(正)断层					45	45	

表 2 不分层地壳模型

分层数	分层厚度/km	P 波速度 V_p / [km · s ⁻¹]	S 波速度 V_s / [km · s ⁻¹]	地壳密度 ρ / [kg · m ⁻³]	粘滞系数 η / [Pa · s]
1	0~30	6.05	3.50	2 900	∞ (弹性体)
2	31~ ∞	7.55	4.39	3 250	1.0E+19

表 3 分层地壳模型

分层数	分层厚度/km	P 波速度 V_p / [km · s ⁻¹]	S 波速度 V_s / [km · s ⁻¹]	地壳密度 ρ / [kg · m ⁻³]	粘滞系数 η / [Pa · s]
1	0~15	5.80	3.35	2800	∞ (弹性体)
2	16~30	6.35	3.67	2950	∞ (弹性体)
3	31~50	7.20	4.16	3150	1.0E+20
4	51~ ∞	7.90	4.57	3300	1.0E+18

1.1 走滑断层(断层直立、水平错动)

第一种情况假设断层是水平错动断层直立的走滑断层(strike = 90°, dip = 90°, rake = 0°),在断层两侧取点(150, 50)、(150, 250)点做剖面 AA'(图 1),并任取点(150, 120)、(150, 180),计算剖面及各点在不同情况下的同震位移。

由表 4 可看出,(1)单考虑重力的影响,会引起水平位移 0.3%~1%的变化;会引起垂直位移 2%~6%的变化;引起应力变化也极小,可以忽略不计。(2)单考虑上地壳分为两层(弹性模量平均值为 88.75 GPa 和密度有大约 0.86%的差异)的影响,会

引起水平位移不到 1.5% 的变化,与重力影响差别不大;引起垂直位移的变化小于 5%;引起正应力 8% ~ 12% 的变化;引起剪应力 2% ~ 10% 左右的变化。(3)同时考虑重力和分层影响,会引起水平位移 1.5% 左右的变化;引起垂直位移的变化小于 5%;引起正应力 11% 左右的变化;引起剪应力 10% 的变化。但需注意:位移变化的量级为 10^{-3} m,较小,应力变化的量级为 10^{-2} MPa。

1.2 倾斜走滑断层(断层倾斜、水平错动)

假设断层面倾斜,水平错动 (strike = 90°, dip = 45°, rake = 0°)。由表 5 可得出:(1)单考虑重力的影响,会引起水平位移 0.3% ~ 1.5% 的变化;会引起垂直位移 1% 左右的变化;引起应力变化也极小,可以忽略不计。(2)单考虑分层的影响,会引起水平位移不到 2% ~ 9% 的变化,与重力影响差别明

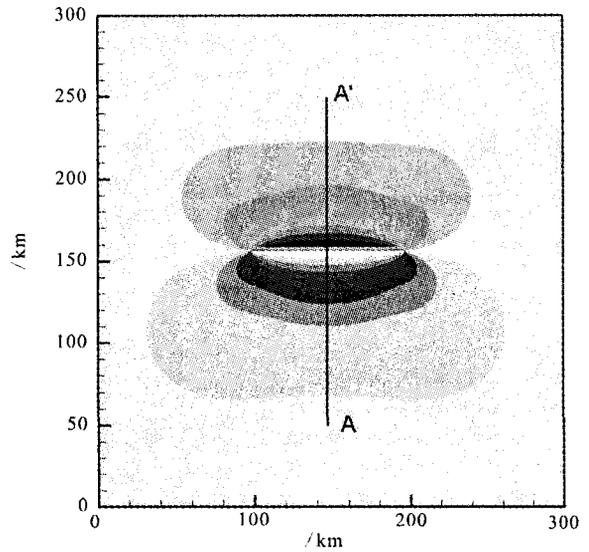


图 1 虚拟断层及剖面示意图

Fig.1 Sketch of virtual fault and section plane.

表 4 二种程序计算对水平走滑直立断层的同震形变结果对比

观测点	模型	位移/cm			应力/MPa					
		U_x	U_y	U_z	S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}	S_{xy}	S_{yz}	S_{zx}
(150,120,0)	Okada	154.0	12.02	1.28	0.74	-0.26	0.03E-6	2.25	0	0
	PSGRN/PSCMP(NFG)	154.0	12.13	1.21	0.74	-0.26	0.03E-6	2.25	0	0
	PSGRN/PSCMP(FNG)	153.6	11.85	1.32	0.67	-0.23	-0.01E-6	2.03	0	0
	PSGRN/PSCMP(FG)	153.6	11.96	1.26	0.66	-0.23	-0.01E-6	2.02	0	0
(150,180,0)	Okada	144.3	-19.64	-3.48	-1.51	0.57	-0.04E-6	2.39	0	0
	PSGRN/PSCMP(NFG)	144.3	-19.79	-3.39	-1.51	0.57	-0.04E-6	2.39	0	0
	PSGRN/PSCMP(FNG)	143.8	-19.35	-3.63	-1.34	0.52	0.03E-6	2.15	0	0
	PSGRN/PSCMP(FG)	143.9	-19.49	-3.53	-1.34	0.52	0.03E-6	2.14	0	0

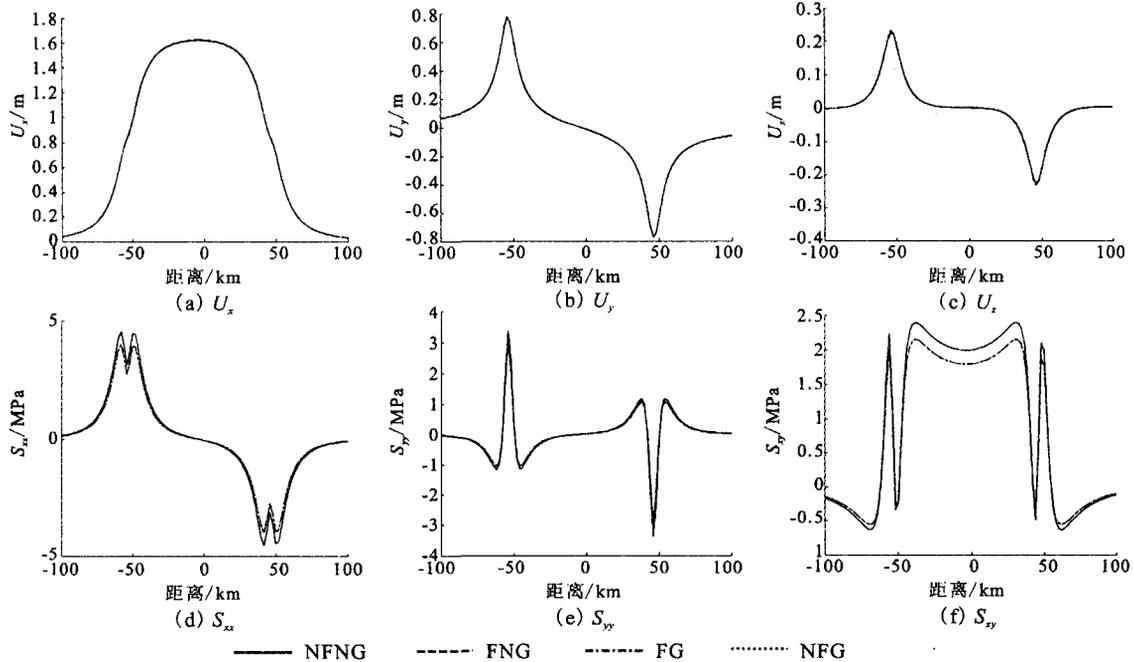


图 2 水平走滑直立断层在 4 种情况下的位移和应力分布比较

Fig.2 Comparisons of the displacement and stress distribution in four different conditions for erect strike-slip fault.

表5 二种程序计算对水平走滑倾斜断层的同震形变结果对比

观测点	模型	位移/cm			应力/MPa					
		U_x	U_y	U_z	S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}	S_{xy}	S_{yz}	S_{zx}
(150,120,0)	Okada	265.4	7.03	2.68	0.92	0.04	0.04E-6	2.22	0	0
	PSGRN/PSCMP(NFG)	265.4	7.11	2.66	0.91	0.04	0.04E-6	2.14	0	0
	PSGRN/PSCMP(FNG)	272.0	5.85	2.88	0.84	0.02	-0.01E-6	2.01	0	0
	PSGRN/PSCMP(FG)	272.0	5.93	2.84	0.84	0.02	-0.01E-6	2.01	0	0
(150,180,0)	Okada	254.0	-10.68	-6.42	-2.04	-0.03	-0.13E-6	2.73	0	0
	PSGRN/PSCMP(NFG)	254.0	-10.79	-6.38	-2.04	-0.03	-0.13E-6	2.73	0	0
	PSGRN/PSCMP(FNG)	260.2	-08.91	-6.29	-1.97	-0.02	0.05E-6	2.47	0	0
	PSGRN/PSCMP(FG)	260.1	-09.01	-6.23	-1.86	-0.01	0.05E-6	2.47	0	0

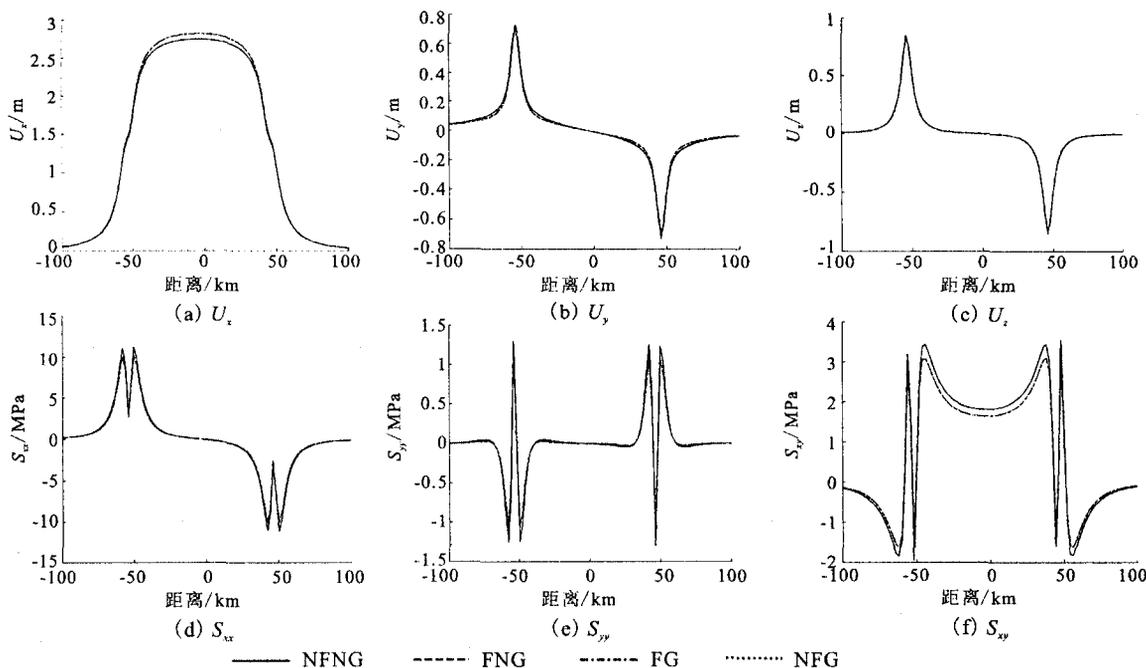


图3 倾斜走滑断层在4种情况下的位移和应力分布比较

Fig. 3 Comparisons of the displacement and stress distribution in four different conditions for tilt strike-slip fault.

显;引起垂直位移的变化小于3%;引起正应力5%~10%的变化;引起剪应力2%~10%左右的变化。(3)考虑重力和分层影响,会引起水平位移、垂直位移、正应力和剪应力的变化量级同(2)。

从图2、图3也可看出:对于直立和倾斜走滑断层使用Okada与PSGRN/PSCMP在考虑分层和重力作用下计算水平位移和垂直位移差别不大,位移变化的量级为 10^{-3} m;对正应力在有些点位和区域有一定的影响,特别是对剪应力的影响较大,量级为 10^{-2} MPa。从表4、表5的分析可看出:数值上的差异主要来自分层作用的影响。

1.3 直立逆断层(断层直立,垂直错动)

假设断层面直立,垂直错动(strike = 90°, dip = 90°, rake = 90°)。由表6可得出:(1)单考虑重力的影响,会引起水平位移和垂直位移的变化小于1%;引起正应力5%~12%的变化;引起剪应力的变化

较小,可以忽略不计。(2)单考虑分层的影响,会引起水平位移6%左右的变化,与重力影响差别明显;引起垂直位移的变化小于2%;需注意位移变化的量级为 10^{-2} m;引起正应力、剪应力5%~12%左右的变化。(3)考虑重力和分层影响,会引起水平位移、垂直位移、正应力和剪应力的变化量级同(2)。

1.4 倾斜逆断层(断层倾斜,倾向滑动)

假设断层面倾斜,倾向逆冲滑动(strike = 90°, dip = 45°, rake = 90°)。由表7可得出:(1)单考虑重力的影响,会引起水平位移、垂直位移1%左右的变化;引起应力变化也极小,可以忽略不计。(2)单考虑分层的影响,会引起水平位移不到5%左右的变化,与重力影响差别明显;引起垂直位移的变化小于3%;位移变化的量级为 10^{-2} m;引起正应力3%~8%的变化;引起剪应力9%左右的变化,量级为 10^{-2} MPa。(3)考虑重力和分层影响,会引起水平

位移、垂直位移、正应力和剪应力的变化幅度偏小, 量级同(2)。

表6 二种程序计算对直立逆断层同震形变结果对比

观测点	模型	位移/cm			应力/MPa					
		U_x	U_y	U_z	S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}	S_{xy}	S_{yz}	S_{zx}
(150,120,0)	Okada	-5.34	-131.9	-143.4	-0.06	-1.91	-0.12E-6	0.19	0	0
	PSCRN/PSCMP(NFG)	-5.35	-131.7	-143.2	-0.05	-1.85	-0.12E-6	0.19	0	0
	PSCRN/PSCMP(FNG)	-5.61	-138.9	-142.6	-0.07	-1.84	-0.01E-6	0.17	0	0
	PSCRN/PSCMP(FG)	-5.62	-138.7	-142.3	-0.06	-1.82	-0.01E-6	0.17	0	0
(150,180,0)	Okada	10.61	-129.2	-140.0	0.38	-2.18	-0.10E-6	-0.29	0	0
	PSCRN/PSCMP(NFG)	10.63	-129.0	-139.8	0.39	-2.16	-0.10E-6	-0.29	0	0
	PSCRN/PSCMP(FNG)	11.06	-135.9	-139.2	0.37	-2.08	0.03E-6	-0.24	0	0
	PSCRN/PSCMP(FG)	11.08	-135.7	-138.9	0.33	-2.06	0.03E-6	-0.25	0	0

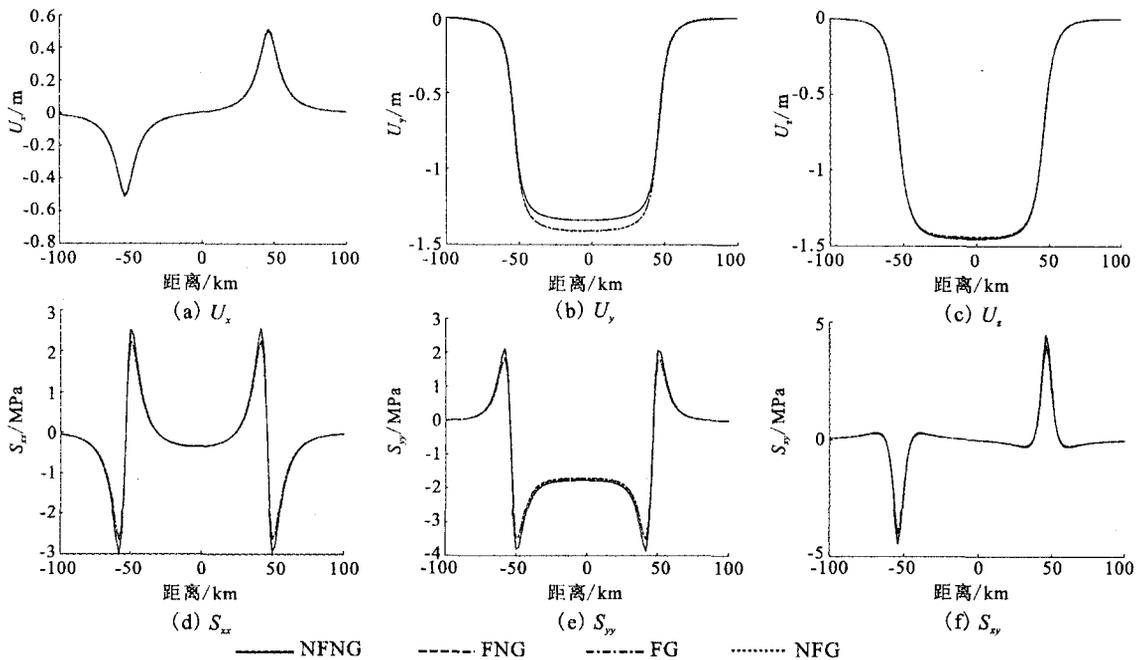


图4 直立逆断层在4种情况下的位移和应力分布比较

Fig. 4 Comparisons of displacement and stress distributions in four different conditions for erect thrust fault.

表7 二种程序计算在对倾斜逆断层的同震形变结果对比

观测点	模型	位移/cm			应力/MPa					
		U_x	U_y	U_z	S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}	S_{xy}	S_{yz}	S_{zx}
(150,120,0)	Okada	-7.44	96.45	-205.7	1.84	5.21	0.35E-6	0.17	0	0
	PSCRN/PSCMP(NFG)	-7.40	96.60	-204.6	1.84	5.21	0.35E-6	0.17	0	0
	PSCRN/PSCMP(FNG)	-6.58	96.02	-208.5	1.70	4.99	-0.12E-6	0.14	0	0
	PSCRN/PSCMP(FG)	-6.55	96.19	-207.5	1.70	4.99	-0.13E-6	0.14	0	0
(150,180,0)	Okada	13.92	94.69	-204.3	2.49	5.54	0.50E-6	-0.41	0	0
	PSCRN/PSCMP(NFG)	13.88	94.83	-203.2	2.49	5.54	0.50E-6	-0.41	0	0
	PSCRN/PSCMP(FNG)	12.99	94.42	-207.4	2.31	5.27	-0.02E-6	-0.35	0	0
	PSCRN/PSCMP(FG)	12.96	94.58	-206.5	2.31	5.27	-0.02E-6	-0.35	0	0

从图4、图5也可看出:对于直立和倾斜逆断层,使用Okada与和PSCRN/PSCMP在考虑分层和重力作用下计算水平位移和垂直位移稍有差别,量级为 10^{-2} m;对正应力、剪应力在有些点位和区域有一定的影响,量级为 10^{-1} MPa,可见考虑重力和分层作用对与逆断层或正断层更必要。从表

6、表7的分析可看出,数值上的差异主要来自分层作用的影响。

1.5 倾斜逆走滑断层(断层倾斜,斜向滑动)

假设断层为倾斜,滑动为逆冲兼走滑(strike = 90° , dip = 45° , rake = 45°)。由表8可得出:(1)单考虑重力的影响,会引起水平位移0.2%~1%的变

化,量级较小;会引起垂直位移1%左右的变化;引起应力变化也极小,可以忽略不计。(2)单考虑分层的影响,会引起水平位移不到3%左右的变化,引起垂直位移的变化小于2%,量级为 10^{-2} m。引起正应力5%~8%的变化,引起剪应力5%~12%左右的变化,量级是 10^{-1} MPa。(3)考虑重力和分层影响,会引起水平位移、垂直位移、正应力和剪应力

的变化量级同(2)。

从图6也可看出:对于倾斜走滑逆断层,使用Okada与和PSCRN/PSCMP在考虑分层和重力作用下计算水平位移和垂直位移稍有差别,位移变化的量级为 10^{-2} m;对正应力、剪应力在有些点位和区域有一定的影响,量级为 10^{-1} MPa。从表8的分析可看出,对于倾斜走滑逆断层,数值上的差异主

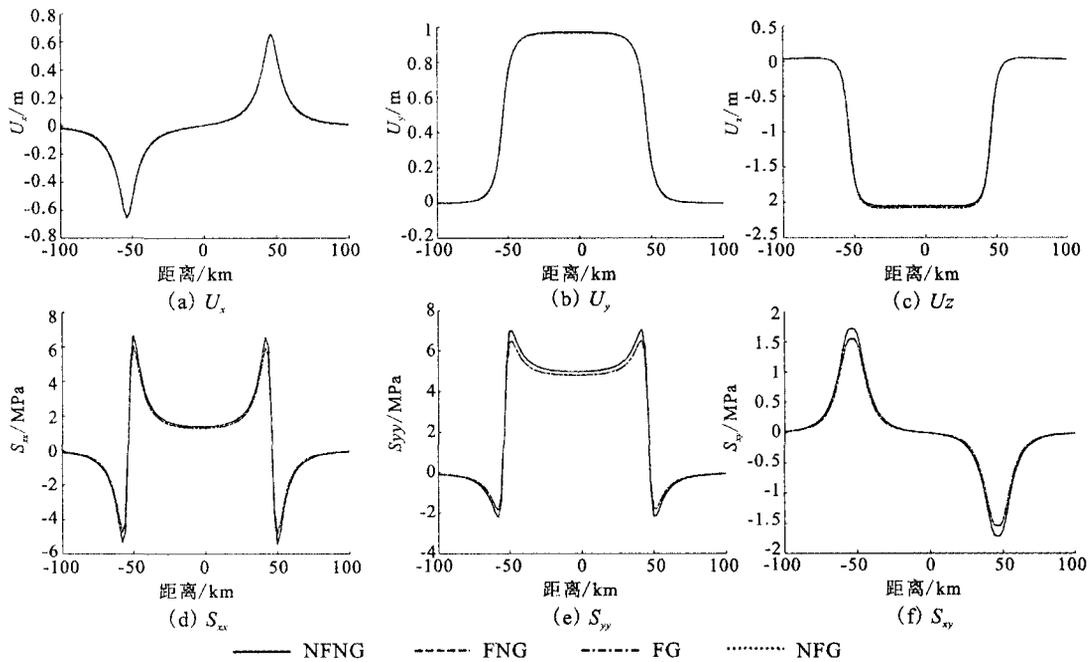


图5 倾斜逆断层在4种情况下的位移和应力分布比较

Fig. 5 Comparisons of displacement and stress distributions in four different conditions for tilt thrust fault.

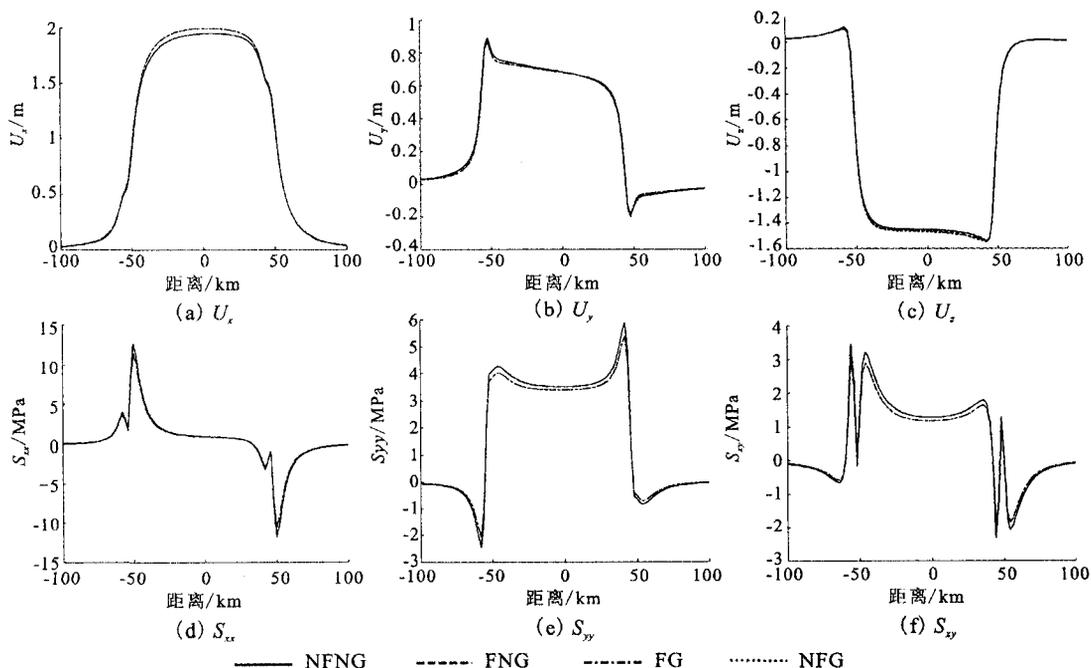


图6 倾斜走滑逆断层在4种情况下的位移和应力分布比较

Fig. 6 Comparisons of displacement and stress distributions in four different conditions for tilt thrust fault and strike-slip fault.

表8 二种程序计算对倾斜逆走滑断层的同震形变结果对比

观测点	模型	位移/cm			应力/MPa					
		U_x	U_y	U_z	S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}	S_{xy}	S_{yz}	S_{zx}
(150,120,0)	Okada	182.5	73.21	-143.6	1.95	3.72	0.32E-6	1.70	0	0
	PSGRN/PSCMP(NFG)	182.5	73.38	-142.9	1.95	3.71	0.32E-6	1.69	0	0
	PSGRN/PSCMP(FNG)	187.8	72.08	-145.5	1.80	3.54	-0.07E-6	1.53	0	0
	PSGRN/PSCMP(FG)	187.8	72.25	-144.8	1.80	3.54	-0.07E-6	1.52	0	0
(150,180,0)	Okada	189.6	59.44	-149.1	0.32	3.90	0.16E-6	1.64	0	0
	PSGRN/PSCMP(NFG)	189.5	59.45	-148.3	0.32	3.90	0.16E-6	1.64	0	0
	PSGRN/PSCMP(FNG)	193.3	60.50	-151.2	0.31	3.72	-0.04E-6	1.50	0	0
	PSGRN/PSCMP(FG)	193.2	60.54	-150.5	0.32	3.72	-0.04E-6	1.50	0	0

要来自分层作用的影响。

2 粘滞系数的大小对震后形变的影响

下面分析粘滞系数对震后形变的影响。所用粘弹性模型及参数见表2。取粘滞系数 $\eta_1 = 10^{17}$ Pa·s 和 $\eta_2 = 10^{19}$ Pa·s 计算倾斜走滑逆断层在点(150,

180)震后20年的形变。从图7可看出,粘滞系数的大小对曲线的形态和幅度都有很大的影响,因此涉及震后形变的问题考虑粘滞性是非常重要的。地壳粘滞系数究竟是多少已成为深入定量研究中突出的问题,它的数值量级将极大地影响定量模拟的结果。

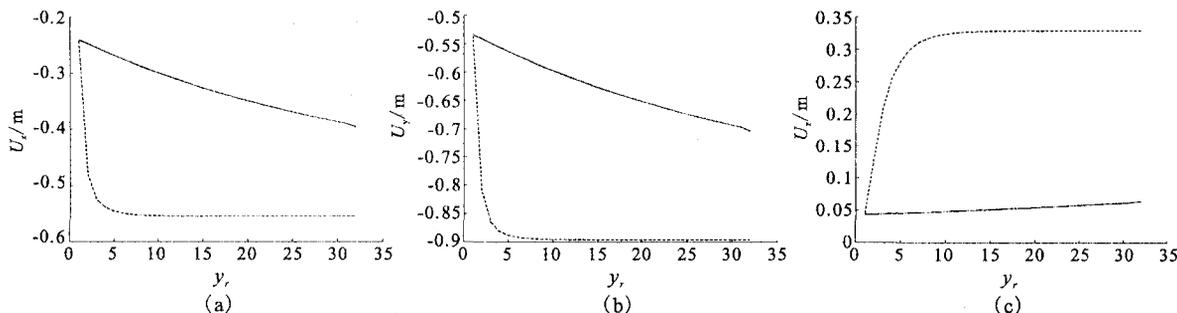


图7 点(150,180)在粘滞系数 $\eta_1 = 10^{17}$ Pa·s(虚线)和 $\eta_2 = 10^{19}$ Pa·s(实线)时震后20年的形变曲线

Fig. 7 The post-deformation curves for 20 years under the conditions of $\eta_1 = 10^{17}$ Pa·s and $\eta_2 = 10^{19}$ Pa·s at the point (150,180).

3 结论

通过以上的计算和分析,得出以下结论:

(1) 在计算走滑地震同震地表形变时,可忽略重力的影响,水平分层对地表位移的影响也不大,如果不涉及深部的应力和变形,依然可采用弹性半无限空间模型来简化计算。在计算逆断层或正断层地震同震地表形变时,虽然考虑重力影响不是绝对必要的,但考虑重力和分层,无疑可给出更好的结果。

(2) 分层作用的影响要大于重力作用的影响,

在涉及与地壳模型有关的问题时应注意分层作用。

(3) 粘滞系数的大小对震后形变曲线的形态和幅度都有很大的影响,涉及震后形变的问题考虑粘滞性是非常重要的,地壳粘滞系数究竟是多少,已成为深入定量研究中突出的问题,它的数值量级将极大地影响定量模拟的结果。

致谢:感谢德国波兹坦地球科学中心汪荣江教授提供的 PSGRN/PSCMP 程序和模型计算中给予的指导。

(下转 213 页)

- [J]. *Geophys. J. Int.*, 1999, 137: 231-242.
- [14] Varotsos P, Lazaridou M, Eftaxias K. Short term earthquake prediction in Greece by Seismic Electric Signals[A]//Lightill Sir, (ED). *A Critical Review of VAN*. World Scientific[G]. Singapore:[s. n.], 1996:29-76.
- [15] Jackson D, Kagan J. VAN method lacks validity[J]. *EOS. Trans. AGU*, 1998,79:573-579.
- [16] Uyeda S. VAN method of short - term earthquake prediction shows promise[J]. *EOS. Trans. AGU*, 1998,79:573-580.
- [17] Sornette A, Sornette D. Earthquake rupture as a critical point; consequences for telluric precursors[J]. *Tectonophysics*, 1990, 179:327-334.
- [18] Molchanov O V. Fracturing as underlied mechanism of seismoelectric signals[A]//M Hayakawa. *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes* [C]. Tokyo:Terra Scientific Publishing Co, 1999.
- [19] Surkov V V, Uyeda S, Tanaka H, et al. . Fractal properties of medium and seismoelectric phenomena[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 33:477-487.
- [20] Takeuchi A, Nagahama H. Scaling laws between seismo - electric/magnetic fields and earthquake magnitude[J]. *Terra Nova*, 2004, 16(3):152-156.
- [21] Gershenzon N I, Gokhberg M B, Yunga S L. On the electromagnetic field of an earthquake focus[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1993, 77: 13-17.
- [22] Huang Q, Ikeya M. Seismic electromagnetic signals (SEMS) explained by a simulation experiment using electromagnetic waves [J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998, 109: 107-114.
- [23] Huang Q, Ikeya M. Experimental study on the propagation of seismic electromagnetic signals (SEMS) using a mini-geographic model of the Taiwan strait[J]. *Episodes*, 1999, 22: 289-294.
- [24] 刘洪,李幼铭. 对利用震电效应勘探油气水的几点看法[J]. *石油物探*,1994, 33(2):94-101.
- [25] Vallianatos F, Tzaniis A. On the nature, scaling and spectral properties of pre - seismic ULF signals[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3:237-242.
- [26] Geller R L, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. . Earthquakes can not be predicted[J]. *Science*, 1997, 275:1616-1617.
- [27] Vallianatos F. On possible scaling laws between electric earthquake precursors (EEP) and earthquake magnitude[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26(13):2013-201.
- [28] Turcotte D L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics* [M]. Cambridge:Cambridge University Press, Second edition, 1997:397.
- [29] 钱书清,张以勤,曹惠馨,等. 岩石破裂时产生的电磁脉冲的观测与研究[J]. *地震学报*, 1986, 8(3):301-308.
- [30] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等. 受载岩石电磁辐射特征及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002,21(10):1473-1477.
- [31] Hiratsen M W, Pride S R. Electro seismic waves from point sources in layered media[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997,102: 24745- 24769.
- [32] Stauffer D. Scaling theory of percolation clusters[J]. *Phys. Reports*, 1979,54(1):1-74.

(上接 207 页)

[参考文献]

- [1] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *BSSA*, 1985, 75(4):1135-1154.
- [2] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *BSSA*, 1992,82(2):1018-1040.
- [3] Gombert J, M Ellis. Topography and tectonics of the central New Madrid seismic zone: Results of numerical experiments using a three - dimensional boundary-element program[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994,99: 20,299-20,310.
- [4] Wang R, Francisco Lorenzo Martin, Frank Roth. PSCRN/PSCMP—a new code for calculating co-and postseismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory[J]. *Computers & Geosciences*,2006, 32: 527-541.
- [5] Freed A M, Lin J. 粘弹性应力转移延迟了 1999 年赫克托矿地震的触发[J]. *世界地震译丛*,2003, (3): 42-47.
- [6] Wang R. A simple orthonormalization method for the stable and efficient computation of Green's functions[J]. *BSSA*, 1999, 89: 733 - 741.
- [7] 向文,李辉. 活动断层运动的重力场反演[J]. *地壳形变与地震*,2000,20(3):11-16.
- [8] 黄建梁,李辉,李瑞浩. 点源位错引起的重力、位势及其梯度变化[J]. *地震学报*, 1995,17(1): 72-80.
- [9] Wang R. On the singularity problem of the elastic gravitational dislocation theory applied to plane-earth models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L06307.
- [10] Wang R. The dislocation theory: a consistent way for including the gravity effect in (visco) elastic plane-earth models[J]. *Geophysical Journal International*, 2005,161:191-196.
- [11] Wang R, Francisco Lorenzo Martin, Frank Roth. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust-FORTRAN programs EDGRN/EDCMP[J]. *Computers & Geosciences*,2003. 29: 195-207.