

位错理论在西安地面沉降模拟中的应用

张永志, 罗凌燕, 王卫东

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:介绍了用位错理论研究地面变形的基本理论和方法。根据西安地面变形的地质模型,利用位错理论对西安市11条地裂缝活动与地面垂直变形的综合影响进行了数值模拟计算,并将计算结果与精密水准实测结果进行了对比分析。结果表明:位错理论模型数值模拟结果与实测的水准结果在空间分布具有很好的一致性。从理论上分析了西安地区的地面沉降除与抽取地下水,地面负荷等有关外,还与西安地区的地质构造特征有密切的关系。

关键词: 西安; 位错理论; 数值模拟; 地面沉降; 地裂缝

中图分类号: P642.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2008)01-0017-04

Computed Subsidence by Dislocation Model in Xi'an City

ZHANG Yong-zhi, LUO Ling-yan, WANG Wei-dong

(Institute of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The theory and method of dislocation model to compute ground surface deformation is introduced. Based on the geological model for ground deformation in Xi'an city, the relationship between subsidence and 11 underground fissures is discussed and computed with dislocation model. Comparing the results of the calculation with the result obtained by leveling, it is showed that the result computed by dislocation model has the same characteristics as that obtained by leveling in space distribution. It is considered that the subsidence have relation not only with groundwater pumping and surface loading, but also with tectonics of Xi'an region.

Key words: Xi'an; Dislocation model; Digital simulation; Subsidence; Ground fissure

0 引言

自从 Steketee 第一次将位错理论^[1]引入地学问题研究以来,位错理论经历了几十年的发展过程,无数描述均匀半无限空间中变形的位错表示公式随着“源”的类型的增加和完全而被导出。如 Steketee^[1]导出了 Poisson 体中垂直走滑点源位错引起的地面位移场表示公式;Iwasaki^[2]导出了在具有任意弹性模量的介质中倾斜断层引起的地面应变场表示公式。在后续的发展中,更多的努力放在发展更真实的地球模型,如在位错模型中包含地球曲率的影响^[3-5]、包含地形的影响^[6-8]及地壳分层结构的影响等^[9-10]。Okada 综合了弹性半无限空间介质中所有的弹性位错理论模型与地面的变形表示关系^[11]和

位错理论模型与地壳内部变形场的表示关系^[12]。在 20 世纪 90 年代前,由于缺乏有效的大区域变形水平监测手段,位错理论的应用主要集中在同震变形的模拟,如陈运泰等^[13-14]采用位错理论模型模拟了我国邢台地震的同震变形和利用大地测量数据对唐山地震进行了反演研究。在 20 世纪 90 年代后,随着 GPS 等空间大地测量技术的发展,区域性甚至全球性的水平形变监测成为可能,断层活动与地面形变场的关系有了实验观测依据,位错理论在模拟断层活动与地面形变场的关系也得到了相应的发展与应用。如 Heki^[15]采用位错理论模拟了板内地震后断层的无震滑动;申重阳^[16]等采用位错理论模型

收稿日期:2007-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40674001);国土资源大调查项目(121201064140)

作者简介:张永志(1961—),男(汉族),博士,教授(博士生导师),主要从事地壳形变、重力测量、INSAR、GPS 测量等的教学与研究。

结合 GPS 数据反演了川滇菱形块体主要边界的运动速率。位错理论用于城市地面沉降和地裂缝研究报告较少,本文采用位错理论对西安市地面沉降与地裂缝的关系进行了应用研究。

1 地面沉降与地裂缝的位错理论模型描述

位错理论首先由 Steketee 于 1958 年引入大地变形研究领域。位错理论模型描述了介质中不连续面上位移场的分布与周围介质和边界位移场分布的理论关系。目前只有几何形状比较简单的位错(如点源位错和矩形位错)可用解析表达式来表示,如果将断层分成若干段,每段可用图 1 所示的矩形位错来进行近似描述:图中表示倾角为 φ 的断层的下盘,以地面断层走向为 X 轴,地面的垂线方向为 Z 轴, U_1, U_2, U_3 分别表示断层上盘相对下盘的走滑、倾滑和张开运动; L, W, d 分别表示断层的长、宽和下底面深度。则矩形断层走滑运动引起的地面位移场在垂直轴方向的分量可通过断层面上的位移分量表示为^[12]

$$u'_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q\sin\delta}{R+\eta} + I_1 \sin\delta \right] \parallel \quad (1)$$

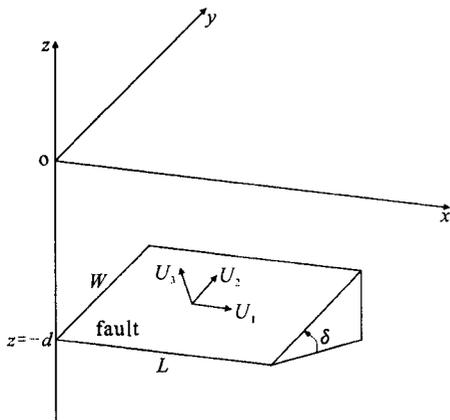


图 1 矩形位错理论模型

Fig. 1 Rectangle dislocation model.

矩形断层倾滑运动在垂直方向的位移场分量可表示为

$$u''_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\zeta)} + \sin\delta \arctan \frac{\xi\eta}{qR} - I_2 \sin\delta \cos\delta \right] \parallel \quad (2)$$

矩形断层张开运动在垂直方向的位移场分量可表示为

$$u'''_z = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\zeta)} + \cos\delta \left\{ \frac{\xi\eta}{R(R+\eta)} \right. \right.$$

$$\left. \left. - \arctan \frac{\xi\eta}{qR} \right\} - I_2 \sin^2\delta \right] \parallel \quad (3)$$

在公式(1~3)中,在函数后面加符号 \parallel 表示函数在整个断层面上的积分结果通过矩形断层角点的坐标表示关系,如符号 $f(\zeta, \eta) \parallel$ 的含义为

$$f(\zeta, \eta) \parallel = f(x, p) - f(x, p-W) - f(x-L, p) + f(x-L, p-W)$$

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos\varphi} \frac{1}{\varphi} [\ln(R + \tilde{d}) - \sin\varphi \ln(R + \eta)]$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos\varphi} \frac{2}{\varphi} \arctan \frac{\eta(X + q\cos\varphi + X(R+X)\sin\varphi}{\xi(R+X)\cos\varphi} \quad (4)$$

如果 $\cos\delta = 0$, 式(4)的参数由式(5)计算:

$$I_1 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R + \tilde{d}} \quad (5)$$

$$I_2 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin\varphi}{R + \tilde{d}}$$

而

$$p = y\cos\varphi + d\sin\varphi$$

$$q = y\sin\varphi - d\cos\varphi$$

$$\tilde{y} = \eta\cos\varphi + q\sin\varphi$$

$$\tilde{d} = \eta\sin\varphi - q\cos\varphi$$

$$R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2$$

$$X^2 = \xi^2 + q^2$$

式中, λ, μ 为拉梅常数; x, y 为地面变形点在局部坐标系中的坐标; ξ, η, ζ 为断层面上质点在局部坐标系中的坐标。一个断层的三维运动在地面局部断层坐标系中的垂直位移场可表示为

$$u_z = u'_z + u''_z + u'''_z \quad (6)$$

2 西安市地裂缝的数值模拟结果及分析

西安市地裂缝的空间展布具有明显的方向性、成带性和等间距性。市区 11 条地裂缝带的总走向为 $N70 \sim 80^\circ E$, 局部地段走向为 NW, NNE 和 EW 向。西安地裂缝一般都由主缝及其下降一侧的次级裂缝组成地裂缝带, 宽 3~8 m, 局部可达 20~30 m; 各条地裂缝带呈等间距排列, 间距为 0.4~2.1 km, 平均为 1 km。

西安地裂缝带的活动还具有明显的分区和分区活动方式一致性。地裂缝带的活动速率表现为南部大于北部, 东部大于西部, 而每条裂缝带的不同地段, 其活动速率都有不同的差异; 市区内 11 条地裂缝以垂直位移量为最大, 南北拉张次之, 而水平错动量则

很小,三者之比为 1 : 0.31 : 0.03。西安市区的地面沉降速率从北向南逐渐增大,而从东向西则逐渐减小,其总体表现为从西北向东南递增。市区西北部的地面平均沉降速率为 1.2~2.7 mm/a,东南部则达 11.0~55.5 mm/a。

描述地裂缝活动的地质模型有张家明^[17]的断块掀斜模型。该模型假设在 NNW 向区域引张应力作用下,以断块掀斜为主要活动形式的西安伸展断裂系活动(图 2),构成了西安地裂缝形成和发展的本质。图中西安地区的地裂缝表示成向北倾斜的多个地质块体间的界面,每个块体相对于北面的块体经以地裂缝为界面向下倾滑。根据该模型,本文得出西安地裂缝模型参数见表 1。

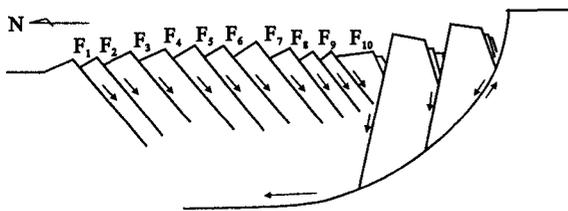


图 2 西安地裂缝的断块掀斜成因机制概念模型

Fig. 2 The dip slip faults model for underground fissures in Xi'an.

本文根据位错理论模型,采用 C 语言自己编制了计算程序,对西安地区地面沉降分布模拟结果如图 3 所示。从图中看出,西安地区的地面沉降较大地区主要是小寨、大雁塔南面的陕西师范大学一带。图 4 为西安地区 1988—1991 年的精密水准测量获得的地面沉降等值线。

从图 3 与图 4 的水准测量结果对比分析可以看出,在西安地区采用断块掀斜模型模拟的地面沉降与西安地区水准测量观测的地面沉降图表现出的总

表 1 地裂缝模型参数选取表

裂缝名	位置		滑动速率/mm·a ⁻¹			长度 L/km	宽度 W/m	深度 d/m	走向 α/°	倾向 δ/°
	E/°	N/°	走滑 U ₁	倾滑 U ₂	张开 U ₃					
F ₁	108.956	34.315	3	-20	10	2.5	3	5	70	80
F ₂	108.964	34.305	3	-30	10	5.0	3	5	70	80
F ₃	108.913	34.291	3	-40	10	12.0	3	5	80	80
F ₄	108.870	34.247	3	-50	20	15.0	3	5	60	80
F ₅	108.879	34.236	3	-60	20	15.0	3	5	70	80
F ₆	108.877	34.210	3	-70	20	20.0	3	5	60	80
F ₇	108.904	34.215	3	-80	20	15.0	3	5	70	80
F ₈	108.870	34.191	3	-90	30	20.0	3	5	85	80
F ₉	108.914	34.198	3	-100	30	10.0	3	5	70	80
F ₁₀	108.922	34.179	3	-110	20	9.0	3	5	60	80
F ₁₁	108.939	34.178	3	-120	20	7.5	3	5	60	80

体特征基本一致,即以西安城墙为界,西安地区的沉降速率分布总的表现为东郊大,西郊小;南郊大,北郊小。在模拟图中出现沉降漏斗的地方主要是在东南郊一带,如小寨—陕师大附近,西安交大及胡家庙一带,及东北郊的八府庄一带。且漏斗形状均成椭圆状分布,长轴方向与地裂缝走向保持一致。以上说明西安地面沉降除与抽水、地面负荷等有关外,与地质构造特征也密切相关。

4 结论与认识

通过位错理论结合断块掀斜模型对西安市地面沉降与地裂缝模拟所得到的结果与水准测量获得的西安市地面沉降图比较分析可得出如下结论和认识:

(1) 断块掀斜模型模拟得出的地面沉降特征与西安市观测地面沉降图表现出的总体特征基本一致。即以西安城墙为界,西安地区的沉降速率分布总的表现为东郊大,西郊小;南郊大,北郊小。在模

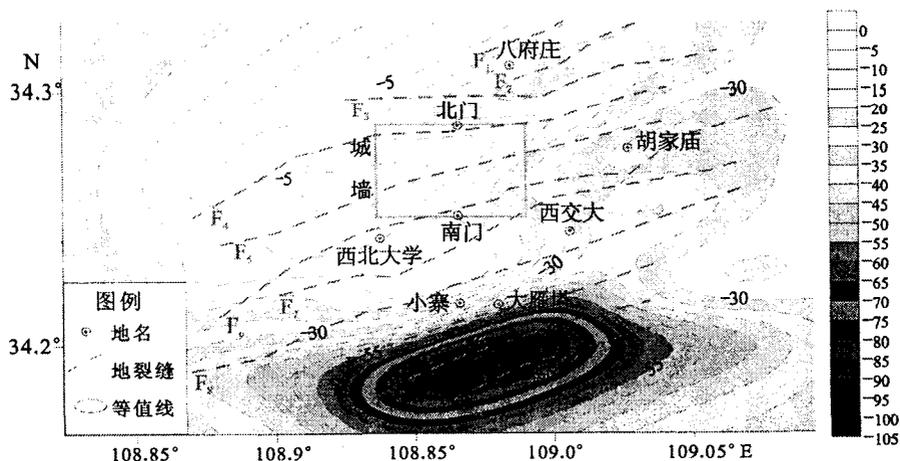


图 3 西安市地面沉降与地裂缝的位错模型模拟结果

Fig. 3 Distribution of subsidence computed by the dislocation model in Xi'an city.

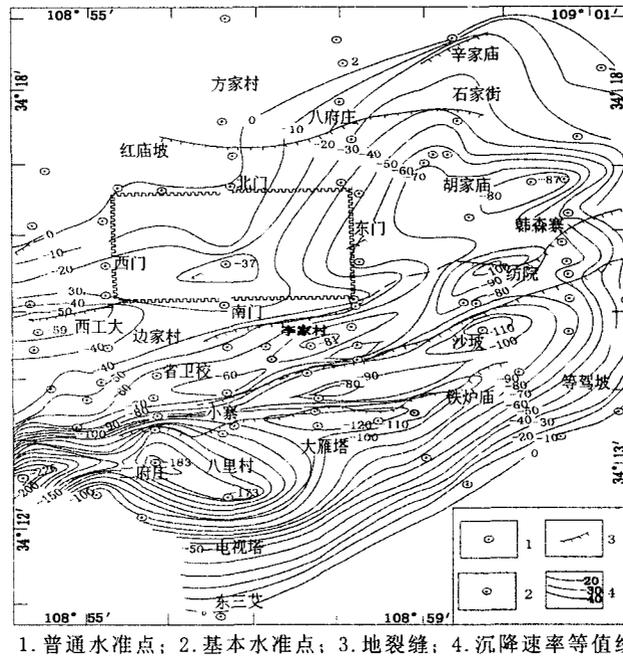


图4 西安地面沉降的水准测量结果(1988—1991年)(据祝意青等,2005)

Fig. 4 The subsidence velocity by leveling in Xi'an area (1988—1991).

拟图中出现沉降漏斗的地方主要是在东南郊一带,如小寨—陕师大附中附近,西安交大及胡家庙一带;还有在东北郊出现的八府庄一带。且漏斗形状均成椭圆状分布,长轴方向与地裂缝走向一致。

(2) 西安地区的地面沉降除与抽取地下水、地面负荷等因素有关外,还与西安地区的地质构造特征有密切的关系。

[参考文献]

[1] Steketee J A. On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium[J]. Can. J. Phys., 1958, 36:192-205.
 [2] Iwasaki T, R Sato. Strain field in a semi-infinite medium due to an inclined rectangular fault[J]. J. Phys. Earth, 1979, 27: 285-314.
 [3] McGinley J R. A comparison of observed permanent tilts and strain due to earthquakes with those calculated from displacement dislocations in elastic earth model[D]. Pasadena, California; California Institute of Technology, 1969.
 [4] Ben-Menahem A, S J Singh, F Solomon. Static Deformation of a spherical earth model by internal dislocations [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1969, 59:813-853.
 [5] Ben-Menahem A, S J Singh, F Solomon. Deformation of an homogeneous earth model by finite dislocations [J]. Rev. Geophys. Space Phys., 1970, 8:591-563.
 [6] Ishii H, A Takagi. Theoretical study on the crustal movements. Part I. The influence of surface topography (two-dimensional SH-torque source)[J]. Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys, 1967, 19:77-94.
 [7] Takemoto S. Effects of local inhomogeneities on tidal strain measurements[J]. Bull. Disis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.

1981, 33:15-46.
 [8] Segall P, D F McTigue. Vertical displacements from a dip slip fault beneath surface topography [A] // Abstract Chapman Conference on Vertical crustal Motion; Measurement and modeling[C]. Washington D. C.; AGU, 1984.
 [9] Ishii H, A Takagi. Theoretical study on the crustal movements. Part II. The influence of horizontal discontinuity [J]. Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys, 1967, 19: 95-106.
 [10] Sato R. Crustal deformation due to dislocation in a multi-layered medium[J]. J. Phys. Earth, 1971, 19:31-46.
 [11] Okada Y. Surface Deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. Bull. Seis. Soc. Am., 1985, 82:1018-1040
 [12] Okada Y. Internal Deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. Bull. Seis. Soc. Am., 1992. 82:1018-1040
 [13] 陈运泰, 林邦慧, 林中洋, 等. 根据地面形变的观测研究 1966年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报, 1975, 18(3):164-180.
 [14] 陈运泰, 黄立人, 林邦慧, 等. 用大地测量资料反演的 1976年唐山地震的位错模式[J]. 地球物理学报, 1979, 22(3):201-217.
 [15] Heki K, S Miyazaki, H Tsuji. Silent fault slip following an interplate earthquake at the Japan Trench [J]. Nature, 1997, 386:595-597, .
 [16] 申重阳, 王琪, 吴云, 等. 川滇菱形块体主要边界运动模型的GPS数据反演研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3):352-361.
 [17] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安:西北大学出版社, 1990: 68-88.