

利用广东数字地震波资料对比分析 计算环境剪应力场的方法

叶秀薇, 闻则刚, 康英, 孙崇赤
(广东省地震局, 广东广州 510070)

摘要:根据陈培善推导的多个环境剪应力场公式,利用广东数字地震台网记录到的华南地区60个 $M_L \geq 2.5$ 地震参数分别对 τ_0 进行计算。相对偏差及相关性分析表明,由震源峰值加速度 a_p 计算的 τ_{0s} 相对偏差最小,与其他方法的相关性最高。对于数字化地震资料, a_p 的求解较为简便,由此计算环境剪应力场的方法更适合在日常分析预测工作中推广应用。

关键词:应力场; 环境剪应力场; 震源参数; 数字地震记录; 广东

中图分类号: P315.72*7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)01-0069-05

Comparison of Some Methods for Estimating Ambient Shear Stress Based on the Data of Guangdong Digital Telemetry Seismic Wave

YE Xiu-wei, WEN Ze-gang, KANG Ying, SUN Chong-chi
(Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Using some formulae about relations between source parameters and ambient shear stress τ_0 deduced by Chen Pei-shan, the τ_0 for 60 earthquakes ($M_L \geq 2.5$) occurred in South China are calculated, based on the data of Guangdong Digital Telemetry seismic wave with the source parameters: seismic radiated energy E , corner period f_c , source peak acceleration a_p , source peak velocity v_p , source peak displacement d_p and seismic moment M_0 . The analysis results of the relative errors and correlations for estimated τ_0 values from different methods shows that the smallest relative error $\delta\tau_0/\tau_0$ is (5~15)%, when using the source peak acceleration a_p , and the correlative coefficient is maximum. For the digital data, τ_0 could be calculated by a_p directly, without seismic moment M_0 for which calculation is complicated. So the method of calculating the ambient shear stress with source peak acceleration a_p is simple and reliable.

Key words: Stress field; Ambient shear stress; Source parameter; Digital seismic record; Guangdong

0 引言

地震是一个力学过程,绝大多数浅源地震是岩石在构造环境剪应力的作用下发生破裂的结果,控制地震发生的主要因素是背景应力场或构造环境剪应力场 τ_0 。

陈培善等从位错模式出发,引进断裂力学的研究成果研究地震的破裂过程^[1],推导出多个求解环境剪应力场的公式^[2-4],推动了对区域剪应力场的深入了解。公式中涉及的参数包括了最大谱震级、

体波震级、地震波辐射能量、拐角频率、峰值加速度、峰值速度、峰值位移以及地震矩,这些参数的求解往往要求地震的震级不小于某个下限。随着数字化地震观测技术的发展,求解这些参数的震级下限已有所降低,甚至能对 $M_L \geq 2.5$ 地震进行较准确的求解^[5-8]。本文拟在求解华南地区60个 $M_L \geq 2.5$ 地震震源参数的基础上,根据上述公式进行环境剪应力场的计算,并对比分析不同方法计算的结果。

收稿日期:2005-05-29

基金项目:国家“十五”攻关科技项目(2001BA601B-04-03)

作者简介:叶秀薇(1970—),女(汉族),高级工程师,主要从事地下流体及数字化地震资料研究。

1 环境剪应力场的计算公式及研究思路

早在20世纪70年代,陈培善等提出地震是裂纹在一定条件下由稳态扩展发展到失稳扩展的结果,在假设摩擦剪应力和终剪应力均为0的前提下,推导出利用平均位错、断层长度、岩石剪切屈服强度、刚性模量来估算构造剪应力的公式^[1]。此后,陈培善和陈海通^[2]利用地震定标律获得了在不同频率范围的速率谱;在此基础上陈培善和Duda推导出实用的利用震源参数估算 τ_0 的公式^[4]。各公式分述如下:

$$\hat{m}(f) = \frac{2}{3}\lg(M_0) + \frac{2}{3}\lg(\tau_0) + C_1 \quad (1)$$

$$m_b = \frac{1}{3}\lg(M_0) + \frac{4}{3}\lg(\tau_0) + C_2$$

$$3.8 < \hat{m}_b \leq 5.2 \quad (2)$$

$$m_b = \frac{2}{3}\lg(M_0) + \frac{2}{3}\lg(\tau_0) + C'_2$$

$$5.2 < \hat{m}_b \leq 6.5$$

$$\lg(E) = \lg(M_0) + 2\lg(\tau_0) + C_3 \quad (3)$$

$$\lg(f_c) = -\frac{1}{3}\lg(M_0) + \frac{2}{3}\lg(\tau_0) + C_4$$

$$f_c = 1/T_c \quad (4)$$

$$\lg(a_p) = 2\lg(\tau_0) + C_5 \quad (5)$$

$$\lg(v_p) = \frac{1}{3}\lg(M_0) + \frac{3}{4}\lg(\tau_0) + C_6 \quad (6)$$

$$\lg(d_p) = \frac{2}{3}\lg(M_0) + \frac{2}{3}\lg(\tau_0) + C_7 \quad (7)$$

式中 M_0 是地震矩; $\hat{m}(f)$ 是最大谱震级; m_b 是体波震级; E 是地震波辐射能量; f_c 是拐角频率; T_c 是拐角周期; a_p 是震源处峰值加速度; v_p 是震源处峰值速度; d_p 是震源处峰值位移; $C_1 \sim C_7$ 为常数。陈培善曾据上述公式对大量地震进行计算,震级范围从微震一直到强震($M_w = 1.0 \sim 6.9$),计算结果^[4]与Zoback等人^[9]的原地应力测量结果十分吻合。广东数字地震台网没有提供最大谱震级和体波震级 m_b ,因此本文仅就公式(3) - (7)对华南地区进行环境剪应力场的计算,并对公式的误差传递展开讨论。

2 计算结果

2.1 震源参数的求解

广东数字地震台网1999年8月开始试运行,2000年1月1日通过验收后正式运行。地震台网由16个地震台组成,其中9个台位于花岗岩或花岗

片麻岩上,其余7个位于石英斑岩或石灰岩上。每个台站都安装了三分向数字地震仪,地震信号以50 Hz的采样率通过有线DDN或无线通讯实时传送到广东省地震局台网中心。16个地震台中10个采用短周期地震仪,在1 Hz到20 Hz之间具有速度平坦的响应;4个采用宽带地震仪(0.05 Hz到20 Hz);1个采用甚宽带地震仪(360 s到20 Hz);1个为加速度宽带地震仪。本文采用其中14个地震台站记录的资料进行计算,包括:汕头、汕尾、龙川、连南、梅州、韶关、新丰江、广州、肇庆、深圳、珠海、阳江、信宜以及湛江,记录仪器为短周期地震仪或宽带地震仪。

康英等采用三段几何衰减模型,根据遗传算法测定和研究了广东地区剪切波的几何衰减和非弹性衰减,并得到台站的场地响应;从观测谱中扣除场地响应、路径影响、仪器响应,可以得到震源谱。计算中采用Brune^[10]圆盘位错模型,测定了震源谱的参数(拐角频率 f_c 和零频谱值 Ω_0),并由下面公式求得地震矩:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_s^3 \Omega_0}{2R_{\theta\phi}} \quad (8)$$

式中 V_s 是S波速度,根据广东省的速度模型取3.5 km/s; ρ 是密度,计算中取2.7 g/cm³; $R_{\theta\phi}$ 是辐射花样系数,取S波在全震源球上的平均值的 $\sqrt{2/5}$,这种取值只有当台站处在S波的节线上,或十分接近S波节线时才有严重的误差。按上述方法求解了华南地区1999年以来72个 $M_L 2.5 \sim 5.2$ 地震的拐角频率及地震矩^[7]。

地震波辐射能量 E 根据统计公式,由近震震级求得:

$$\lg E = 4.8 + 1.5M_s \quad (9)$$

$$M_s = 1.13M_L - 1.08 \quad (10)$$

广东数字地震台网记录的是地震波速度,对数据进行仪器响应消除、基线矫正和滤波等预处理后,由观测点处的峰值速度 V_s 分别进行数值微分和积分后求得峰值加速度 a_s 和峰值位移 d_s ;再采用合适的衰减模式,反演得到震源处峰值加速度 a_p 、峰值速度 v_p 和峰值位移 d_p ,每个台的三分向的求解结果取矢量和为最终计算结果。

仪器的传递函数用复变函数表示^[11]

$$H(s) = A_0 D_s \frac{(s - z_1)(s - z_2) \cdots (s - z_n)}{(s - p_1)(s - p_2) \cdots (s - p_m)} \quad (11)$$

其中 z_1, z_2, \dots, z_n 是仪器零点; p_1, p_2, \dots, p_m 是仪器极点; A_0 是仪器放大因子; D_s 是仪器灵敏度; $s = i\omega, \omega$

为角频率, $\omega = 2\pi k/T$ ($k = 1, 2, \dots, N, T$ 为数据长度)。原始地震数据文件为时间序列函数时,需作傅立叶变换,在频率域中消除仪器响应。

据闻则刚研究结果^[11],采用以下衰减模式:

$$F(r, f) = r^{-0.75} \exp(-\pi fr/\beta Q) \quad (12)$$

$$Q = Q_0 f^\eta \quad (13)$$

式中, r 是震源距, f 是相应波的优势频率,对于加速度 $f = f_a = 10^{(-0.4M_w + 1.8)}$,对于速度 $f = f_v = f_a/2.0$,对于位移 $f = f_d = f_v/2.24$; β 是 S 波速度,取 $\beta = 3.5 \text{ km/s}$; Q_0 为 1 Hz 时的值,在对本区反演求 Q 值的基础上^[12],取 $Q_0 = 290$; η 为 Q 对频率的依赖指数,取 $\eta = 0.2$ 。本文求解了 1999 年以来广东及邻近地区 60 个 $M_L 2.0 \sim 5.2$ 地震的 a_p 、 v_p 和 d_p 。

2.2 环境剪应力场的计算

公式中的常数 $C_3 \sim C_7$ 引用已有的研究成果^①,取 $C_3 = -5.707$, $C_4 = 4.678$, $C_5 = -0.259$, $C_6 = -5.90$, $C_7 = -12.03$; 公式中 τ_0 单位为 MPa, M_0 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$, E 的单位为 J, a_p 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, v_p 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, d_p 单位为 m。

将上述求解的震源参数及常数代入公式(3) - (7)中,求得结果见表 1 和图 1。同一地震取不同地震台求解的结果的平均值做最终估算结果。 $\tau_{03} \sim \tau_{07}$ 依次表示利用地震波能量、拐角频率、峰值加速度、峰值速度、峰值位移估算得到的环境剪应力场。

3 讨论

(1) 对公式(1) - (4)两边微分,并假设 $\delta \lg M_0 = 0.3$, $\delta m_b = 0.1 \sim 0.2$, $\delta \lg E = 0.2 \sim 0.4$, $\delta \hat{m}(f) = 0.1 \sim 0.5$, $\delta \lg M_0 = 0.3$, $\delta f_c/f_c = 0.2 \sim 0.4$, 则利用体波震级、地震波幅射能量、谱震级、拐角频率等估算的 τ_0 的相对偏差依次增大,分别为 11% ~ 17%、18% ~ 25%、34% ~ 38%、42% ~ 67%^[13]。按此思路,本文从理论上推导利用震源峰值参数估算的 τ_0 的相对偏差,对公式(5) - (7)两边微分,分别求出利用峰值加速度、峰值速度、峰值位移估算 τ_0 的最大相对误差:

$$\frac{\delta \tau_0}{\tau_0} = 0.5 \delta(\lg a_p) \quad (14)$$

$$\frac{\delta \tau_0}{\tau_0} = \left\{ \left[\frac{4}{9} \delta(\lg M_0) \right]^2 + \left[\frac{4}{3} \delta(\lg v_p) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\frac{\delta \tau_0}{\tau_0} = \left\{ \left[\delta(\lg M_0) \right]^2 + \left[\frac{3}{2} \delta(\lg d_p) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

同样假设 $\delta M_L = 0.3$, $\delta \lg M_0 = 0.3$, $\delta \lg a_p = \delta \lg v_p =$

$\delta \lg d_p = 0.1 \sim 0.3$, 则由公式(14) - (16)可得 $\delta \tau_0/\tau_0$ 分别为 5% ~ 15%、19% ~ 42%、34% ~ 54%。显然,在峰值速度、峰值加速度以及峰值位移测量误差相等的条件下,随着引入的观测变量的增加 τ_{05} 、 τ_{06} 、 τ_{07} 的误差依次增大。从理论上讲,本文所研究的 5 种估算 τ_0 的方法中以公式(5) (即利用震源处峰值加速度估算 τ_0) 的相对偏差最小。

(2) 由表 1 的相关系数计算可见,5 种方法中除了公式(7) (即利用震源处峰值位移),其余 4 种方法相互间的相关性(图 1(a))均通过了置信水平为 99% 的相关性检验(样本个数为 60 时, $r_\alpha = 0.325$)。本文的拐角频率、地震波辐射能量以及震源峰值参数是由不同的模式得到,对比不同模式求得的结果, τ_{05} 、 τ_{06} 、 τ_{07} 与 τ_{03} 、 τ_{04} 的相关性是依次降低的(表 1、图 1(b)、(c)、(d))。与上述相对偏差分析结果比较,存在这样一种趋势:相对偏差小的方法,与其他方法的相关性高,而相对偏差较大的方法,与其他方法的相关性较低。相对偏差大的方法相对来说其计算结果偏离于实际值更多,而相对偏差小的方法其计算结果更接近于实际情况,相关性在一定程度上造成取决于方法本身的相对偏差。理论上由峰值加速度估算的 τ_{05} 相对偏差最小,本文实际计算结果表明 τ_{05} 与其他方法的整体相关性是最高的,本文的计算结果与初步的理论分析是相符合的。

(3) 对比公式(1) - (7),除峰值加速度外,震源处的各种参数不仅依赖于环境剪应力 τ_0 ,而且不同程度依赖于震源尺度地震矩 M_0 ,峰值加速度这种与震源尺度无关,而非常强烈地依赖于 τ_0 (τ_0 的 2 次方)的现象,陈培善给出的解释是:峰值加速度的优势频率 f_m 对大小地震是不同的, $M_w = 6$ 的地震, f_m 为 4 Hz 左右;而较小地震 f_m 可达很高。发生在相同应力环境下的不同大小的地震,可以有一样大小的峰值加速度^[14]。基于这样的认识,利用峰值加速度进行 τ_0 计算时可避免繁琐的地震矩 M_0 的求解,而对于数字化地震波资料,峰值加速度的求解比其他震源参数更为简便、快捷,可直接在记录到的地震波速度资料经计算机程序换算,进行场地、台站校正后求得,无需过多人工干预可由计算机实现快速计算。更为重要的是,与其他方法相比,由峰值速度推导的 τ_0 其相对误差是最小的,因此利用峰值加速度进

① 闻则刚,叶秀薇,等. 广东地区求解环境剪应力场不同方法中常数的确定.(待发表).

表1 不同方法的环境剪应力值

序号	发震日期	时间	φ/N°	λE°	h/km	M_L	环境剪应力/MPa				
							τ_{03}	τ_{04}	τ_{05}	τ_{06}	τ_{07}
1	2000-04-12	23:08	23.70	114.68	8	3.1	4.5	5.5	5.6	2.2	3.8
2	2000-04-23	17:32	22.12	112.22	9	3.1	3.9	6.1	6.4	3.7	4.8
3	2000-04-24	11:45	25.39	117.15	7	3.6	8.2	8.2	4.8	1.7	3.5
4	2000-05-02	17:06	23.48	115.28	10	3.5	6.5	8.7	5.5	1.6	2.2
5	2000-05-06	12:59	21.80	111.95	7	2.5	1.8	3.0	3.8	1.5	8.2
6	2000-05-15	5:52	23.87	114.50	10	2.7	2.9	4.3	5.4	2.3	16.8
7	2000-05-27	2:30	23.81	117.98	8	4.7	16.5	5.8	5.9	1.7	0.8
8	2000-05-31	5:42	23.76	114.57	10	2.9	3.8	4.3	4.7	2.2	4.5
9	2000-06-02	17:55	23.85	114.51	10	2.8	3.1	4.3	4.7	2.5	8.8
10	2000-06-04	18:43	23.63	113.09	10	2.5	2.8	3.0	4.4	2.8	10.3
11	2000-07-07	8:04	23.27	114.17	8	3.1	4.6	6.3	5.7	2.1	7.0
12	2000-07-09	20:00	21.80	111.82	7	3.8	7.4	5.2	5.6	1.9	4.3
13	2000-07-23	1:29	21.85	111.83	7	3.3	4.8	4.3	5.9	2.3	6.3
14	2000-08-06	0:22	23.22	117.23	10	3.1	5.0	3.2	4.3	1.8	5.3
15	2000-08-12	17:34	22.67	109.77	5	3.0	3.9	2.3	4.3	1.1	4.3
16	2000-08-17	19:01	22.82	115.18	9	2.6	3.7	5.0	5.5	4.2	12.9
17	2000-08-23	22:56	22.83	115.19	8	2.8	4.4	6.1	6.5	5.8	12.2
18	2000-09-18	12:46	23.71	114.66	13	2.8	3.9	3.0	4.1	1.6	5.1
19	2000-09-21	16:27	23.71	114.71	11	2.6	2.6	5.2	5.7	5.4	15.1
20	2000-09-23	13:18	23.42	116.53	10	3.3	6.5	8.7	6.3	3.0	11.2
21	2000-09-30	10:44	22.65	111.60	9	3.5	6.2	5.0	5.9	2.4	4.82
22	2000-10-03	22:29	24.89	115.49	12	3.1	5.1	8.1	6.0	2.7	6.0
23	2000-10-04	5:12	24.4	1116.08	10	2.8	4.0	6.9	5.6	2.1	11.0
24	2000-10-27	12:41	22.54	111.96	8	2.9	3.8	5.2	6.1	3.3	18.7
25	2000-11-29	10:43	22.10	112.23	9	3.0	4.0	5.7	6.0	2.8	6.6
26	2000-12-19	11:43	24.70	114.77	9	3.0	4.5	2.7	4.7	1.7	6.7
27	2001-02-06	7:34	23.69	114.66	10	2.8	3.8	5.0	4.6	1.7	6.6
28	2001-04-10	0:11	21.80	111.82	6	3.4	5.8	4.7	7.5	5.4	0.7
29	2001-04-22	1:52	21.83	111.73	10	4.7	14.4	10.2	18.1	11.5	0.1
30	2001-05-16	21:20	25.34	117.23	8	3.3	7.2	6.1	5.2	2.1	3.1
31	2001-06-10	19:58	23.71	114.78	9	2.9	3.9	7.2	5.9	5.6	8.1
32	2001-06-22	9:15	23.70	114.65	12	2.7	4.0	6.7	5.1	2.6	6.9
33	2001-08-04	1:00	24.67	116.98	11	3.0	4.8	4.7	5.2	2.1	6.7
34	2001-08-10	7:58	21.48	109.50	6	3.7	8.6	12.4	8.3	2.6	4.2
35	2001-08-22	18:03	23.18	117.28	11	3.0	5.0	10.7	7.0	2.4	22.9
36	2001-09-23	23:23	23.91	116.32	9	2.7	3.7	7.6	5.3	3.9	10.8
37	2001-10-28	0:27	21.82	111.75	9	2.8	3.3	3.4	5.2	2.6	22.4
38	2002-03-01	14:54	23.86	114.52	8	2.7	3.2	2.5	3.4	1.2	0.6
39	2002-03-11	2:05	23.70	114.68	8	3.8	8.0	8.3	10.4	13.9	0.8
40	2002-03-28	8:36	23.70	114.66	10	2.8	3.8	3.3	4.1	2.6	0.9
41	2002-04-04	22:09	23.62	116.65	1	3.0	4.4	6.7	5.1	3.2	1.0
42	2002-04-05	0:20	21.80	111.80	11	3.3	6.7	5.2	6.5	4.7	4.0
43	2002-05-03	23:55	23.71	114.70	5	2.7	4.0	5.3	5.0	7.5	9.2
44	2002-05-09	23:45	24.73	113.20	8	2.7	4.8	4.3	3.4	2.6	2.6
45	2002-05-15	3:18	22.87	114.74	10	2.8	1.7	1.2	5.3	1.4	0.5
46	2002-05-18	12:29	22.27	112.34	11	3.0	5.1	4.8	5.2	2.7	2.7
47	2002-05-18	13:13	22.26	112.35	9	2.9	4.9	4.8	4.5	2.2	1.2
48	2002-05-26	3:13	24.75	113.20	7	3.0	5.8	4.5	3.5	2.3	1.0
49	2002-06-09	7:04	24.75	113.20	10	3.1	5.4	3.3	3.6	1.9	0.5
50	2002-09-26	12:21	23.86	114.52	13	2.7	3.9	3.0	4.1	2.1	1.0
51	2002-12-13	6:05	23.68	114.75	10	4.0	9.4	5.3	7.9	6.8	0.3
52	2002-12-15	1:59	23.70	114.73	9	3.1	4.8	6.3	5.9	3.7	0.7
53	2002-12-16	0:02	23.51	114.71	8	2.8	4.1	4.5	4.7	3.3	1.1
54	2003-02-24	9:21	24.22	113.95	9	2.6	3.0	7.1	4.7	3.0	1.8
55	2003-03-19	10:35	24.45	116.30	9	3.0	4.5	6.6	6.1	3.4	0.9
56	2003-04-05	9:12	23.73	114.63	10	3.4	6.6	6.4	5.9	4.3	0.5
57	2003-04-12	6:54	23.67	114.67	11	2.8	3.7	3.4	4.0	2.1	0.7
58	2003-04-28	13:35	24.06	116.37	7	3.1	4.6	9.0	5.9	4.0	0.7
59	2003-06-05	20:43	22.30	111.99	6	3.4	4.6	6.1	6.3	2.3	0.2
60	2003-06-07	1:38	22.34	111.96	8	3.3	5.0	4.8	5.0	1.5	0.2
							τ_{03}				
							-	0.451	0.606	0.348	-0.323
							τ_{04}				
							0.451	-	0.577	0.379	0.075
							τ_{05}				
							0.606	0.577	-	0.743	-0.045
							τ_{06}				
							0.348	0.379	0.743	-	-0.046
							τ_{07}				
							-0.323	0.075	-0.045	-0.046	-
							相关系数				

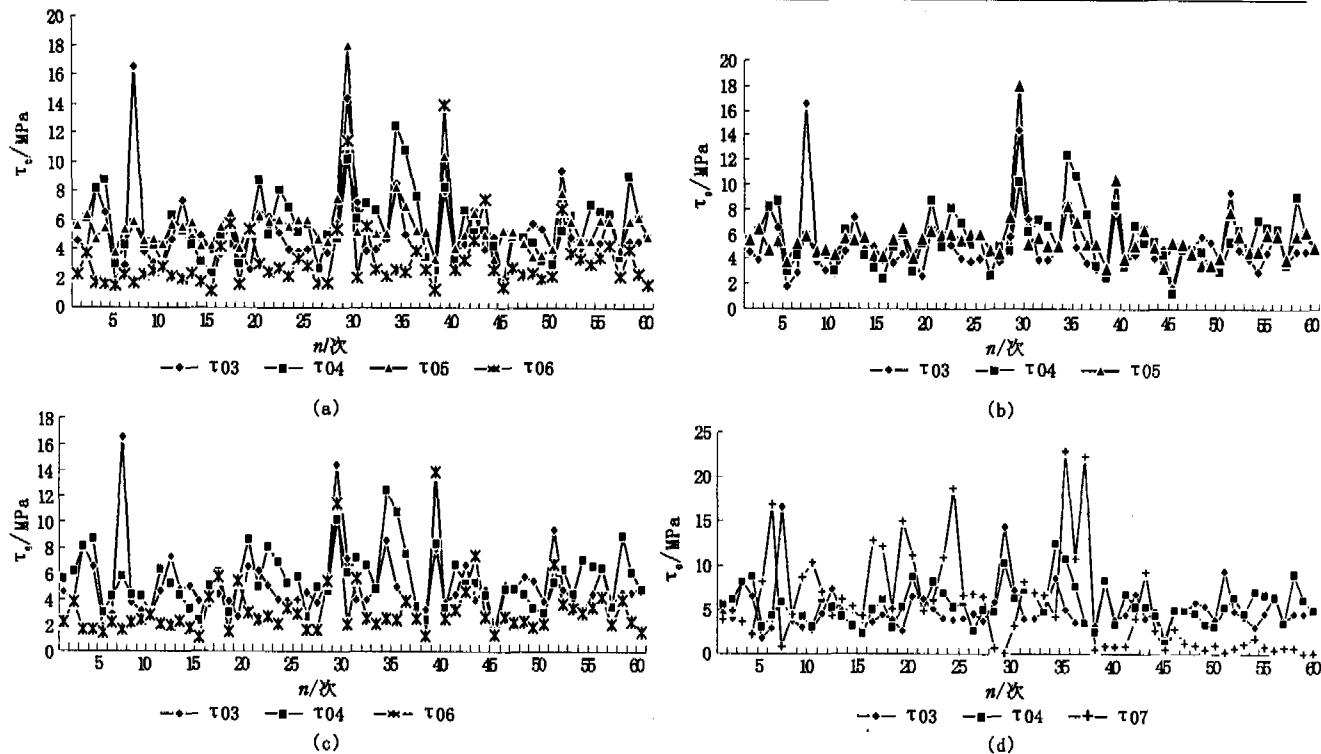


图1 不同算法计算出的环境剪应力值

Fig. 1 The results of ambient shear stress based on different formulae.

行环境剪应力场的估算更适合在日常分析预测工作中推广应用。

【参考文献】

[1] 陈培善,谷继成,李文香. 从断裂学观点研究地震的破裂过程和地震预报[J]. 地球物理学报,1977,20(3):185-202.
 [2] 陈培善,陈海通. 由二维破裂模式导出的地震定标律[J]. 地震学报,1989,11(4):337-350.
 [3] 陈培善,白彤霞. 震源参数之间的定量关系[J]. 地震学报,1991,13(4):401-411.
 [4] 陈培善,S J Duda. 峰值速度和加速度对环境剪应力的依赖性[J]. 地球物理学报,1993,36(2):185-194.
 [5] Moya A, J Aguirre, K Irikura. Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records using Genetic Algorithms[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000,90:977-992.
 [6] 刘杰,郑斯华,黄玉龙. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 地震学报,2003,25(2):211-218.
 [7] 康英,郑斯华,刘杰,等. 中小地震震源参数的求解及其相似关系[J]. 华南地震,2004,24(2):11-21.
 [8] 喂水清,苏燕,贾建喜,等. 山西地区非弹性衰减系数、场地响

应和几种震源参数的研究[J]. 地震学报,2004,26(4):369-378.

[9] Zoback M, Tsukahara H, Hiclman S. Stress measurement at dept in the vicinity of the san andeas fault: Implication for the magnitude of shear stress at depth[J]. J. Geophys. Res., 1980,85(B11):6157-6173.
 [10] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic waves from earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1970,75:4997-5009.
 [11] 闻则刚,胡秀敏,何琳琳,等. 应用数字地震台网资料求解广东地区的环境剪应力场[J]. 华南地震,2000,20(4):54-59.
 [12] 闻则刚. ART算法的改进及其实际应用--面波Q值反演[J]. 华南地震,1998,18(2):37-41.
 [13] Chen Peishan, S J Duda. Variation of ambient shear in earthquake sequence [A]. in:Selected papers of the second international conference on continental earthquakes, IASPEI publication series for the IDNDR vol. 3 [C]. Beijing: Seismological Press, 1993.
 [14] 陈培善,肖磊,白彤霞,等. 唐山地震序列的环境应力场[J]. 地震学报,1994,16(4):440-447.