

文章编号: 1006-6616(2009)02-0105-09

[编者按] 在汶川地震一周年之际,本刊发表一组有关汶川地震的论文,谨此纪念。这是我所广大科研人员怀着对祖国、对人民的无限深情,一年来辛勤耕耘取得的部分科研成果。汶川强震给我国人民带来深重灾难的同时,也给我们提出了不少新的研究课题。由于每个强震都有其自身独有的特点,只有不断深入地研究诸多强震的特点,才能深入理解强震发生机理及演化规律。就汶川地震而言,还有不少问题有待深入研究。做为大型综合性地学刊物,本刊欢迎各界提供这方面的稿件。

## 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟

王连捷<sup>1</sup>, 崔军文<sup>2</sup>, 周春景<sup>1</sup>, 孙东生<sup>1</sup>, 王 薇<sup>1</sup>, 唐哲民<sup>2</sup>, 钱华山<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;  
3. 北京超算科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 将围岩看成弹性体, 断层看成具有应变软化的弹塑性体, 断层和围岩组成统一的地质介质系统。在给定的地应力、孔隙压力及边界位移的作用下, 应力逐渐积累, 当达到断层强度时, 断层进入塑性状态, 应变随之软化, 应力突然下降, 能量突然释放, 形成地震。根据这个原理, 利用有限差分 FLAC 软件, 对汶川 5.12 地震的机理进行了模拟。模拟结果证实: 汶川 5.12 地震是在青藏高原侧向挤压, 四川盆地阻挡, 使龙门山断裂带受到缓慢增加的挤压应力场作用下形成的。计算结果给出了应力降、能量释放量、断层错动量、地震同震位移、震前位移、地震复发周期等重要参数, 结果与野外调查及其它资料给出的数据具有较好的一致性。

**关键词:** 汶川地震; 龙门山断裂带; 应变软化模型; 地震非稳定模型

中图分类号: P315.01

文献标识码: A

## 0 前言

2008 年 5 月 12 日在四川省龙门山断裂带发生了  $M_s 8.0$  级强烈破坏性大地震。这是世界内陆地区罕见的逆冲型强烈地震。滑坡、泥石流、堰塞湖等次生灾害严重<sup>[1-2]</sup>, 造成了严重的人员伤亡和财产损失。地震的特点是持续时间长, 破裂长度大。持续时间约 100s, 地震破裂由汶川映秀开始, 沿龙门山断裂带向 NE 方向扩展, 直到青川, 破裂带长度约 300km。震源机制比较复杂, 且随着时间和空间发生变化。在地震的开始阶段表现为逆冲为主, 后来向

收稿日期: 2009-05-10

基金项目: 国家科技支撑—汶川地震断裂带科学钻探中探测项目资助。

作者简介: 王连捷 (1933-), 男, 研究员, 从事地质灾害、地应力测量、应力场数值分析及应用研究。E-mail:

NE 方向逐渐转变为以走滑为主。汶川大地震引起了世界人民和专家学者的极大关注。很多专家学者震后第一时间赶赴现场考察,对其孕育和发生机理进行研究,取得了重要进展<sup>[3-14]</sup>,为汶川地震的深入研究奠定了基础。我们将从断层滑动软化的角度探讨汶川地震的孕育发生机理。

地震是断层的非稳定破坏过程,是断层和围岩介质组成的系统,在地应力作用下,应力达到断层的强度,断层软化而突然失稳滑动,储存在断层-围岩介质系统里的弹性能突然释放的结果<sup>[15-18]</sup>。因此,研究地震过程时,只考虑断层本身是不够的,还必须考虑断层周围的岩石介质及其所处的地应力环境。我们将断层和围岩看成一个完整系统进行研究,将围岩看成弹性介质,断层看成具有软化特性的弹塑性介质,利用应变软化(位移软化)模型模拟汶川地震的发生。

## 1 断层的本构方程

断层单元或节理单元首先由 Goodman 等提出<sup>[19]</sup>, Zienkiewicz 等进行了发展<sup>[20]</sup>。文献<sup>[21-23]</sup>在库仑屈服条件下,用增量理论进行了详细推导,建立了断层单元的本构方程,其表达式如下:

$$d\sigma = (D - D_p)du \quad (1)$$

$$D = \begin{bmatrix} k_t & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D_p = -\frac{1}{H+A} \begin{bmatrix} k_t \left(\frac{\tau_{zx}}{\tau}\right)^2 & k_t^2 \frac{\tau_{zy}\tau_{zx}}{\tau^2} & k_t k_n \frac{\tau_{zx}}{\tau} \mu \\ & k_t \left(\frac{\tau_{zy}}{\tau}\right)^2 & k_t k_n \frac{\tau_{zy}}{\tau} \mu \\ & & k_n^2 \mu^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d\sigma = \begin{Bmatrix} d\tau_{zx} \\ d\tau_{zy} \\ d\sigma_z \end{Bmatrix}; du = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix}; H = \mu^2 k_n + k_t; A = \frac{\mu}{b} (c' - \mu' \sigma_z)$$

式中:  $k_t, k_n$  为断层的切向和法向刚度;  $\tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau, d\tau_{zx}, d\tau_{zy}, d\sigma_z$  为沿断层面的剪应力和法向应力分量及增量;  $\tau = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2}$ ;  $u_x, u_y, u_z$  为断层面在  $x, y, z$  方向的位移间量;  $\mu$  为摩擦系数;  $c'$  和  $\mu'$  为内聚力和摩擦系数随塑性内变量的变化,表征介质的强化或软化特性;  $b$  为断层厚度。当考虑孔隙压力时,上式中的应力皆为有效应力。

## 2 断层非稳定滑动的能量准则

断层和围岩组成的地质系统,在断层失稳滑动前的时刻,断层处在非稳定平衡状态,一个小的扰动,如远场位移,应力,孔隙压力等的扰动,系统的弹性应变能发生改变,变化的能量,除了驱动断层滑动外,还能产生地震波的动能。下式表示断层非稳定滑动的能量准则<sup>[21]</sup>:

$$-\Delta U > \Delta E \tag{4}$$

当上式满足时，断层发生非稳定滑动。式中  $\Delta U$  是系统弹性应变能的变化， $\Delta E$  是系统的耗能能。即断层非稳定滑动时，系统弹性应变能的改变大于断层破坏滑动过程所需的能量，其中的差值用于产生地震波。

### 3 地震模拟剖面

我们选一剖面进行分析。剖面方向为北西向，与龙门山断裂带走向垂直。剖面穿过震中，长度 180km (图 1)，深度 30km。剖面宽度为 3km。断层倾向 NW50°，倾角 40°<sup>[24]</sup>。

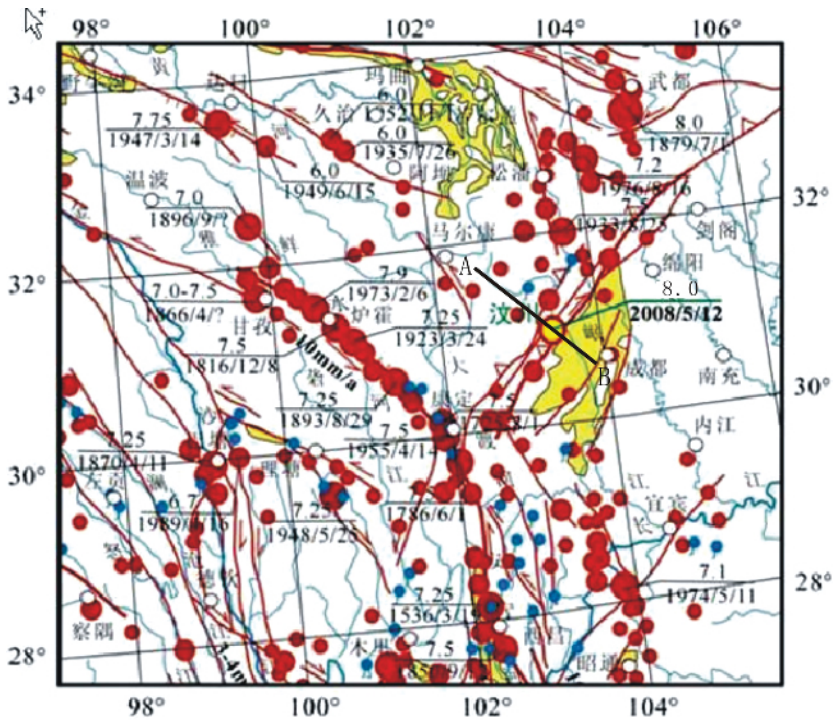


图 1 地震模拟剖面位置<sup>[3]</sup> (A-B 为地震模拟剖面)

Fig.1 Location of the simulated earthquake profile

### 4 地应力状态和约束条件

地震前龙门山断裂带附近进行多处地应力测量，结果显示，水平应力  $\sigma_H$  大于铅直应力  $\sigma_v$ <sup>[25]</sup>，水平应力  $\sigma_H = 1.35 \sim 2.1\sigma_v$ 。参考文献 [25] 的实测地应力数据建立模型浅部的应力状态，参考逆断层应力特点建立深部应力状态。

考虑到青藏高原物质向东南方向流动，受到稳定的四川盆地的阻挡，在龙门山断裂带地区形成垂直于断裂带走向的挤压应力场。GPS 观测结果显示，龙门山断裂带附近地区，模型的两侧位移速度差约为 2mm/a<sup>[26]</sup>。因此，在模型的西北边界作用有 2mm/a 水平位移速度 (图 2)；同时，作用有水平地应力，且水平地应力随深度线性增加，其表达式如下：

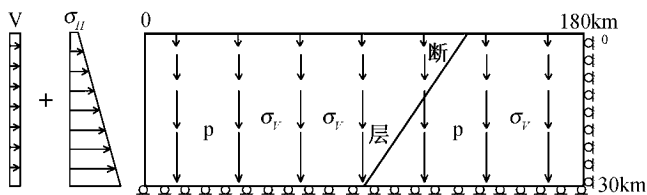


图 2 地震模拟剖面的边界应力、位移速度和约束条件

Fig.2 Boundary condition of the simulated earthquake  
(模型中考虑铅直应力、孔隙压力、水平地应力和位移速度)  
 $\sigma_H$ . 水平应力;  $\sigma_v$ . 铅直应力;  $P$ . 孔隙压力;  $V$ . 位移速度

水平地应力  $\sigma_H = 6.5 + 0.0354 H$

考虑重力和孔隙压力作用，孔隙压力和重力引起铅直应力同样随深度线性增加，他们的表达式如下：

孔隙压力（为静水压力） $p = 0.01 H$ ；铅直应力  $\sigma_H = \rho g H$ 。

式中  $H$  为深度，单位为  $m$ ， $\rho$  为岩石密度，密度为  $2.6 g/cm^3$ ， $g$  为重力加速度。式中应力和孔隙压力单位为  $MPa$ 。模型的东南边界在水平方向约束，底部垂向约束如（图 2）。水平应力、铅直应力和孔隙压力皆作为初始场，由于边界位移速度的作用，位移随时间不断增加，因而，应力不断增加，直到断层破裂，发生地震。

## 5 介质参数的选择

目前尚未得到龙门山断裂带摩擦系数的观测值，我们参考文献<sup>[21]</sup>模拟唐山地震和 1971 年圣费尔南多逆冲断裂地震时的摩擦系数和内聚力以及  $c$ 、 $\varphi$  值随塑性应变软化进行了选择如表 1。

表 1 断层和围岩参数

Tab.1 Parameters of faults and surrounding rocks

深度 /km	断层									围岩			
	$\epsilon_p \times 10^{-6}$			$c / (MPa)$			$\varphi / (^\circ)$			$K_t$	$K_n$	$K$	$G$
	$\epsilon_{p0}$	$\epsilon_{p1}$	$\epsilon_{p2}$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$\varphi_0$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	( $\times 10^9 Pa$ )	( $\times 10^9 Pa$ )	( $\times 10^9 Pa$ )	( $\times 10^9 Pa$ )
0~0.5	0	1	100	0.1	0	0	40	14.5	14.5	28	28	46.67	28.9
0.5~2.5	0	1	100	0.1	0	0	20	14.5	14.5	28	28	46.67	28.9
2.5~30	0	1	100	0.1	0	0	15	14.5	14.5	28	28	46.67	28.9

注： $\epsilon_p$ -塑性应变； $c$ -内聚力； $\varphi$ -内摩擦角； $K_t$ -断层切线刚度； $K_n$ -断层法向刚度； $K$ -围岩的体积模量； $G$ -围岩的剪切模量。当  $\epsilon_p = \epsilon_{p0}$  时， $c = c_0$ ， $\varphi = \varphi_0$ ；当  $\epsilon_p = \epsilon_{p1}$  时， $c = c_1$ ， $\varphi = \varphi_1$ ；当  $\epsilon_p = \epsilon_{p2}$  时， $c = c_2$ ， $\varphi = \varphi_2$ 。

## 6 模拟结果

### 6.1 地震应力降和能量释放

图 3 为汶川地震发震时的应力和应力降。由图 3 可以看出，随着远场位移的增加，应力

逐渐加大。当平均应力达到 539MPa 时，应力突然下降，能量突然释放，此时发生地震。地震造成的应力降为 1.9MPa。由水平应力降还可导出沿断层面的剪应力降等参数。应力降的大小与断层位错有关，断层错动量越大，应力降越大。地震时能量释放如图 4，可以看出释放的总应变能约为  $2.1 \times 10^{26}$  尔格。平均应力是指模型深度范围内的水平应力平均值，由下式得出：

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{H_0} \int_0^{H_0} \sigma_H dH \tag{5}$$

式中： $H_0$  为深度， $H_0 = 30\text{km}$ 。

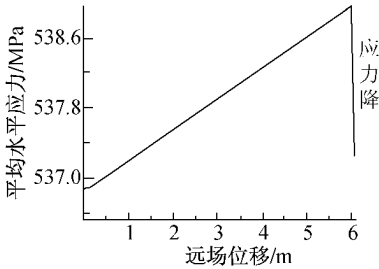


图 3 应力降

Fig.3 Diagram of stress drop

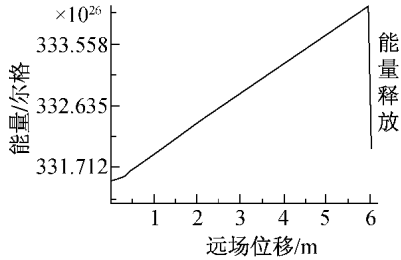


图 4 系统总能量曲线

Fig.4 Diagram of total energy

### 6.2 应力积累速度

由图 3 的应力-位移曲线可求得远场每单位位移引起的应力变化，而位移可由位移速度求出。当位移速度为 2mm/y，可求得应力积累速度为  $7.7 \times 10^{-4}$  MPa/y。可见，应力积累是非常缓慢的。

### 6.3 断层错动和地表位移

图 5 为上下盘沿断层面的相对错动。最深处断层端部错动最小，浅部错动变大，地表错动最大，可达 8.8m。

地震引起的同震位移分布如图 6。可以看出上下盘的位移是不对称的。上盘位移远大于下盘。上盘向上的位移可达 5.5m，下盘向下的位移不到 1m。可见上盘效应明显。图 7 给出了同震地表位移的分布曲线。可以看出，同震垂直位移在断层线处最大，为 5.5m。随着离开断层距离加大，位移变小。分布规律与文献 [12, 24] 相似。

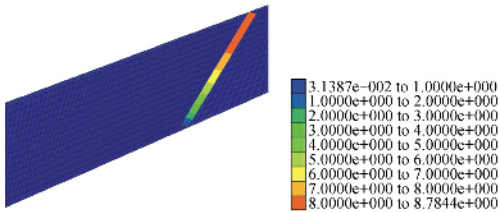


图 5 沿断层面位错分布（彩色条带为断层面）等值线单位/m

Fig.5 Distribution of displacement along fault

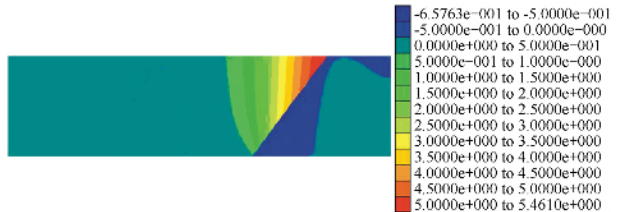


图 6 断层附近同震位移（铅直）分布等值线单位/m

Fig.6 Distribution of coseismic displacement near fault (vertical)

图 7 还给出了临震前和震前不同年代地表位移的分布。震前在断层上盘距断层约 10km 处位移最大，靠近断层线和离开断层越远位移越小。这与圣费尔南多地震位移的分布特征相

似<sup>[22]</sup>。由震前 500 年和 1000 年地表位移的分布可以看出地表隆升很早就开始了，其隆升的速度最大可达 0.3mm/y。

### 6.4 地震效率

我们将地震波的能量 ( $E_p$ ) 与系统总能量变化  $E$  之比称为地震效率  $\eta$ ：

$$\eta = \frac{E_p}{E} \quad (6)$$

由图 4 可找出系统释放的总能量  $E$ ，由下式计算出地震波的能量  $E_p$ <sup>[27]</sup>：

$$\log E_p = 11.8 + 1.5M_s \quad (7)$$

式中  $M_s$  为震级。然后利用式 (6) 计算地震效率。

也可利用下式计算地震效率<sup>[22]</sup>：

$$\eta = \frac{\Delta\tau}{2\tau} \quad (8)$$

式中： $\Delta\tau$  为应力降， $2\tau$  为应力下降之前和应力下降之后的应力之和。由图 3 可求出应力降  $\Delta\tau$  及应力下降前后的应力，进而由式 (8) 求出地震效率。我们用两种方法进行了计算，结果为 0.18% 和 0.3%。可见地震效率很低，大部分能量转换为断层摩擦热能和破碎功。地震效率与应力降及环境应力大小有关，应力降越小，环境应力越大，地震效率越低。

### 6.5 地震复发周期

在当前的应力状态和地层参数不变的情况下，应力增加 1.9MPa 后，地应力又达到临界状态，可再发生 8 级地震。若位移速度保持 1.5 ~ 2mm/y，则应力增加 1.9MPa 的时间为 2450 ~ 3260 年。即汶川 8 级地震复发周期为 2450 ~ 3260 年。与其他作者提出的 2000 ~ 13000 年的复发周期在数量级上相近<sup>[28-32]</sup>。

临界状态应力可理解为静摩擦应力强度，断层滑动停止时的应力状态可理解为动摩擦应力强度如图 8<sup>[27]</sup>。可见，应力积累达到静摩擦强度时，断层滑动，发生地震；当应力下降到动摩擦强度时，滑动停止；然后，应力开始积累直到下一次地震。由图 8 可以看出，应力的积累与断层错动和地震的关系。应力积累期间断层不滑动或者只有微小的蠕动，当断层滑动地震时，应力下降，断层的总滑动量是多次地震的结果。如果地层参数发生变化，这种规律性的重复将被改变而成为不规则的复发周期。

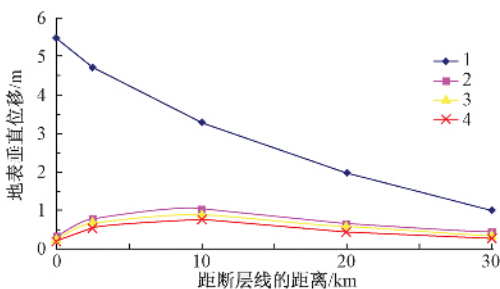


图 7 地表位移曲线 (垂直)

Fig.7 Curves of the earth surface displacement (vertical)

1. 同震位移; 2. 临震前; 3. 震前 500 年; 4. 震前 1000 年

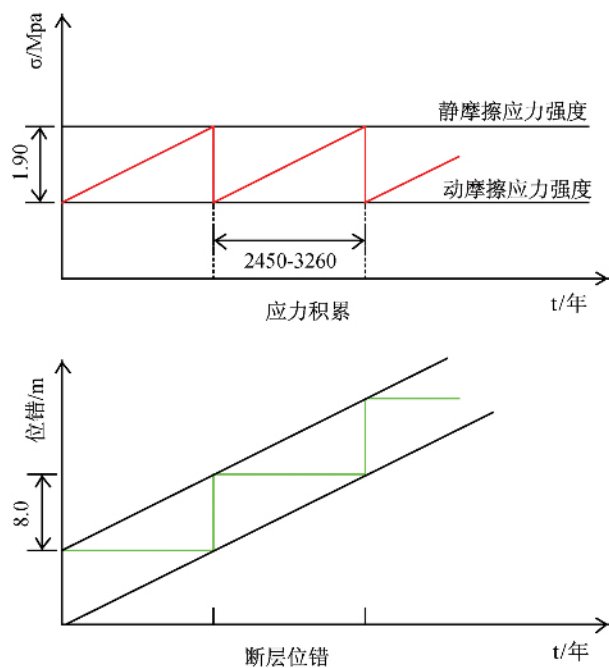


图 8 应力的积累与地震复发周期

Fig.8 Earthquake recurrence intervals

## 7 结论

1. 汶川地震是在重力、水平地应力和孔隙流体压力的环境下，青藏高原向东的侧向挤压，四川盆地阻挡，使龙门山断裂带的地应力以  $7.7 \times 10^{-4}$  MPa/y 的速度缓慢积累，当地应力达到临界状态时（平均水平应力 539MPa 时），断层失稳滑动，形成地震。

2. 地震的应力降为 1.9MPa，地震效率为 0.18 ~ 0.3%，绝大部分能量消耗在断层的摩擦及破碎功方面。

3. 当位移速度保持为每年 1.5 ~ 2mm/y 时，地震复发周期为 2450 ~ 3260 年。当位移速度改变或断层参数改变时，地震复发周期将改变。

4. 同震地表垂向位移为 5.5m。沿断层的相对错动最大为 8.8m。上盘位移量大，下盘位移量小，上盘效应明显。

5. 震前地表发生隆起，地表隆起随时间以 0.3mm/y 的速度缓慢增加，临震前断层上盘地表隆起，可达 1m；地表发生倾斜，距断层线约 10km 内，向断层方向倾斜，10km 外向相反方向倾斜，最大倾斜达 0.01 度；水平应变率约为  $1 \times 10^{-8}$ /y。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [ J ]. 地质力学学报, 2008, 14 ( 2 ): 109 ~ 116.  
ZHANG Yong-shuang, LEI Wei-zhi, SHI Ju-song, et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geo-hazards in Sichuan [ J ]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 ( 2 ): 109 ~ 116.
- [ 2 ] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [ J ]. 地质力学学报, 2009, 15 ( 2 ): 131 ~ 141.  
ZHANG Yong-shuang, SHI Ju-song, SUN Ping, et al. General manifestation of coupling processes between endogenic and exogenic geological processes in 5.12 Wenchuan earthquake [ J ]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 ( 2 ): 131 ~ 141.
- [ 3 ] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 四川汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂构造初步调查与发震背景分析 [ J ]. 地球学报, 2008, 29 ( 3 ): 392 ~ 396.  
DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, LONG Chang-xing, et al. Surface rupture investigation of the Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake of May 12<sup>th</sup>, 2008, west Sichuan, and analysis of its occurrence setting [ J ]. Acta Geoscientia Sinica, 2008, 29 ( 3 ): 392 ~ 396.
- [ 4 ] 吴珍汉, 张作辰. 四川汶川  $M_s8.0$  级地震的地表变形与同震位移 [ J ]. 地质通报, 2008, 27 ( 12 ): 2067 ~ 2075.  
WU Zhen-han, ZHANG Zuo-chen. Seismic deformation and co-seismic displacement of the  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake in Sichuan, China [ J ]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 ( 12 ): 2067 ~ 2075.
- [ 5 ] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带及其发展构造 [ J ]. 地震地质, 2008, 30 ( 3 ): 597 ~ 629.  
XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, et al. The  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [ J ]. Seismology and Geology, 2008, 30 ( 3 ): 597 ~ 629.
- [ 6 ] 何宏林, 孙昭民, 魏占玉, 等. 2008 汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带白沙河段破裂及其位移特征 [ J ]. 地震地质, 2008, 30 ( 3 ): 658 ~ 673.  
HE Hong-lin, SUN Zhao-min, WEI Zhan-yu, et al. Rupture of the  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake along Bashahe River [ J ]. Seismology and Geology, 2008, 30 ( 3 ): 658 ~ 673.
- [ 7 ] 杜义, 谢富仁, 张效亮, 等. 汶川  $M_s8.0$  级地震断层滑动机制研究 [ J ]. 地球物理学报, 2009, 52 ( 2 ): 464 ~ 473.  
DU Yi, XIE Fu-ren, ZHANG Xiao-liang, et al. The mechanics of fault slip of  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake [ J ]. Chinese

Journal of Geophysics, 2009, 52 (2): 464 ~ 473.

- [ 8 ] 陈祖安, 林邦慧, 白武明, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震孕震机理研究 [ J ]. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 408 ~ 417.  
CHEN Zu-an, LIN Bang-hui, BAI Wu-ming, et al. The mechanism of generation of May 12, 2008  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (2): 408 ~ 417.
- [ 9 ] 朱守彪, 张培震. 2008 年汶川  $M_s$ 8.0 地震发生过程的动力学机制研究 [ J ]. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 418 ~ 427.  
ZHU Shou-biao, ZHANG Pei-zhen. A study on the dynamical mechanisms of the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake, 2008 [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (2): 418 ~ 427.
- [ 10 ] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应 [ J ]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 97 ~ 108.  
PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress Monitoring Station [ J ]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 97 ~ 108.
- [ 11 ] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性 [ J ]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 114 ~ 130.  
PENG Hua, MA Xiumin, JIANG Jingjie. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains [ J ]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 114 ~ 130.
- [ 12 ] 王连捷, 周春景, 孙东生, 等. 汶川 5.12 地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [ J ]. 地质力学学报, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.  
WANG Lian-jie, ZHOU Chun-jing, SUN Dong-sheng, et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent area [ J ]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
- [ 13 ] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. “5.12”汶川  $M_s$ 8.0 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [ J ]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.  
TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WU Shu-ren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after 5.12 Wenchuan  $M_s$ 8.0 strong earthquake in China [ J ]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- [ 14 ] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点 [ J ]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.  
YAO Xin, ZHANG Yong-shuang. Co-seismic deformation of 5.12 Wenchuan earthquake based on D-InSAR [ J ]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
- [ 15 ] 陈. 地壳岩石的力学性能——理论基础与试验方法 [ M ]. 北京: 地震出版社, 1988.  
CHEN Yu. Mechanical properties of crust rock: Theoretical foundation and experimental methods [ M ]. Beijing: Seismological Press, 1988.
- [ 16 ] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础 [ M ]. 中国科学院工程力学研究所 (译). 北京: 地震出版, 1981.1 ~ 690.  
Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics [ M ]. Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Translated). Beijing: Seismological Press, 1981.1 ~ 690.
- [ 17 ] Rice J R. Theory of precursory processes in the inception of earthquake rupture [ J ]. Gerlands Beitrage zur Geophysik, 1979, 88: 91 ~ 127.
- [ 18 ] Stuart W D. Quasi-static earthquake mechanics [ J ]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1979, 17 (6): 1115 ~ 1120.
- [ 19 ] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock [ J ]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94 (3): 637 ~ 660.
- [ 20 ] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The finite element method ( fifth edition ) [ M ]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [ 21 ] 殷有泉, 张宏, 模拟地震的应变软化的数学模型 [ J ]. 地球物理学报, 1982, 25 (5): 414 ~ 423.  
YIN You-quan, ZHANG Hong. A mathematical model of strain softening in simulating earthquake [ J ]. Acta Geophysica Sinica, 1982, 25 (5): 414 ~ 423.
- [ 22 ] 殷有泉, 张宏, 断裂带内介质的软化特性和地震的非稳定模型 [ J ]. 地震学报, 1984, 6 (2): 135 ~ 145.  
YIN You-quan, ZHANG Hong. The softening behaviour of fault zone medium and an instability model of earthquakes [ J ]. Acta Seismologica Sinica, 1984, 6 (2): 135 ~ 145.
- [ 23 ] 殷有泉. 非线性有限元基础 [ M ]. 北京: 北京大学出版社, 2007.  
YIN You-quan. Non-linear finite element method [ M ]. Beijing: Peking University Press, 2007.
- [ 24 ] 陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告 [ R/OL ]. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>.



CHEN Yun-tai, XU Li-sheng, ZHANG Yong, et al. Report of the great Wenchuan earthquake source of May 12, 2008 [ R/OL]. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>.

- [ 25 ] 安其美, 丁立丰, 王海忠, 等. 龙门山断裂带的性质与活动性研究 [ J ]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24 ( 2 ): 115 ~ 119.
- AN Qi-mei, DING Li-feng, WANG Hai-zhong, et al. Research of property and activity of Longmen Mountain fault zone [ J ]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24 ( 2 ): 115 ~ 119.
- [ 26 ] 赖锡安, 黄立文. 中国大陆现今地壳运动 [ M ]. 北京: 地震出版社, 2004.
- LAI Xi-an, HUANG Li-wen. Current crustal movement in Chinese mainland [ M ]. Beijing: Seismological Press, 2004.
- [ 27 ] 笠原庆一. 地震力学 [ M ]. 赵仲和 ( 译 ). 北京: 地震出版社, 1984.
- Kasahara K. Earthquake mechanics [ M ]. ZHAO Zhong-he ( translated ). Beijing: Seismological Press, 1984.
- [ 28 ] 李海兵, 王宗秀, 付小方, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川地震 (  $M_s 8.0$  ) 地表破裂带的分布特征 [ J ]. 中国地质, 2008, 35 ( 5 ): 803 ~ 813.
- LI Hai-bing, WANG Zong-xiu, FU Xiao-fang, et al. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake (  $M_s 8.0$  ) happened on May 12<sup>th</sup>, 2008 [ J ]. Geology in China, 2008, 35 ( 5 ): 803 ~ 813.
- [ 29 ] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志 [ J ]. 第四纪研究, 2006, 26 ( 1 ): 40 ~ 51.
- LI Yong, ZHOU Rong-jun, Densmore A L, et al. Geomorphic evidence for the Late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen Mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [ J ]. Quaternary Sciences, 2006, 26 ( 1 ): 40 ~ 51.
- [ 30 ] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因 [ J ]. 地球物理学报, 2008, 51 ( 4 ): 1066 ~ 1073.
- ZHANG Pei-zhen, XU Xi-wei, WEN Xue-ze, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 ( 4 ): 1066 ~ 1073.
- [ 31 ] Densmore A L, Ellis M A, LI Yong, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau [ J ]. Tectonics, 2007, 26, doi: 10.1029/2006TC001987.
- [ 32 ] Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May, 2008, Sichuan, People's Republic of China [ J ]. GSA Today, 2008, 18 ( 7 ): 4 ~ 11. doi: 10.1130/GSATG18A. 1.

## NUMERICAL MODELING FOR WENCHUAN EARTHQUAKE MECHANISM

WANG Lian-jie<sup>1</sup>, CUI Jun-wen<sup>2</sup>, ZHOU Chun-jing<sup>1</sup>, SUN Dong-sheng<sup>1</sup>,

WANG Wei<sup>1</sup>, TANG Zhe-min<sup>2</sup>, QIAN Hua-shan<sup>3</sup>

( 1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China ;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China ;

3. Beijing Supcompute Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China )

**Abstract :** In this paper, strain softening model is used for modeling the Wenchuan earthquake. Results shows that this earthquake was caused by compressing of Qinghai-Tibet Plateau and block of Sichuan Basin. The stress drop, energy release amount, the magnitude of dislocation of fault, coseismic displacement, displacement before earthquake and earthquake recurrence intervals are given by the modeling. The modeling results are in good agreement with geologic and geomorphologic survey and others data.

**Key words :** Wenchuan earthquake ; Longmenshan fault ; strain-softening model ; unsteady model of earthquake