

文章编号: 1006-6616 (2011) 01-0001-14

WFSD 地应力台应变特征及其同震效应分析 ——以日本 M_w 9.0 级特大地震为例

彭 华^{1,2}, 马秀敏^{1,2}, 姜景捷^{1,2}, 彭立国¹

(1. 国土资源部 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 2011 年 3 月 11 日在日本东北部海域发生 M_w 9.0 级强烈地震, 汶川地震断裂带科学钻探 (WFSD) 项目设在陕西汉中地区的体应变仪记录到了完整的应变数据。通过采集数据的分析, 探讨了日本 M_w 9.0 级特大地震发生时的同震变化以及地震前后固体潮异常变化过程, 分析了地震孕育、发生过程中应变固体潮的趋势性异常及畸变等各种异常现象, 并针对这些应变异常进行分析, 以期成果能为中国未来地震趋势的预测研究有所帮助。

关键词: 日本 M_w 9.0 级特大地震; WFSD; 体应变观测; 应变特征; 同震效应

中图分类号: P315

文献标识码: A

0 引言

众所周知, 日本是一个地震频发的国家, 历史上造成重大伤亡的地震不计其数。2011 年 3 月 11 日 14 时 46 分 23 秒 (北京时间 13 时 46 分), 在日本本州东北地区的东海岸附近海域发生 M_w 9.0 级特大地震, 震中位于宫城县以东太平洋海域, 距最近的海岸城市仙台 130 km, 震源深度 24.4 km (见图 1), 地震引发 23 m 高的海啸, 席卷了仙台沿岸的许多地区, 造成大量人员伤亡和巨额财产损失。

日本列岛位于太平洋板块与欧亚板块、菲律宾板块的交接带上, 太平洋板块以 80 mm/a 的速度向西呈水平移动 (见图 2), 俯冲到相邻的欧亚板块之下。当欧亚板块与太平洋板块发生碰撞、挤压时, 两大板块交界处的岩层便出现变形、断裂等运动, 随即产生地震 (见图 3)。这次 M_w 9.0 级地震就发生在太平洋板块向北美板块俯冲的消减带上 (见图 4)。

大多数地震发生在板块和地块的边界, 由于板块或地块相互运动不协调而在边界上产生变形, 积累应力—应变和积聚应变能, 地震就是应变能突发释放的结果。用钻孔观测地壳的应力—应变变化是进行地震与地质灾害预测的有效手段。由于地球是数十亿年前形成的天体, 历经数十亿年的演化其结构已非常稳定, 杨国华等^[1]、王琪等^[2]通过现代 GPS 观测结

收稿日期: 2011-03-31

基金项目: 科技支撑计划项目“汶川地震断裂带科学钻探”——“井中科学探测”课题“地震断裂带的应力环境、应变能的分布及其与地震关系”课题和地调项目 (1212010916064) 联合资助。

作者简介: 彭华 (1964-), 男, 研究员, 主要从事地震地质、地应力测量及相关测量仪器研制、地壳稳定性调查与评价、地质灾害、围岩稳定性、岩石力学与工程施工等方面的研究工作。E-mail: ph8486797@yahoo.com.cn

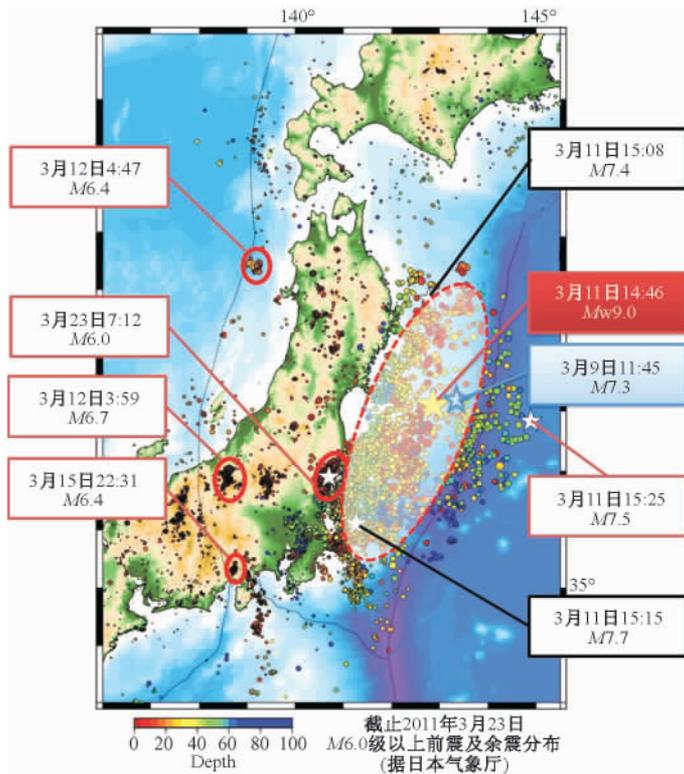


图 1 日本 M_w 9.0 级地震前震、主震及余震的时空分布 (据日本气象厅)

Fig. 1 Temporal and spatial distribution of foreshocks, main shock and aftershocks of M_w 9.0 earthquake in Japan

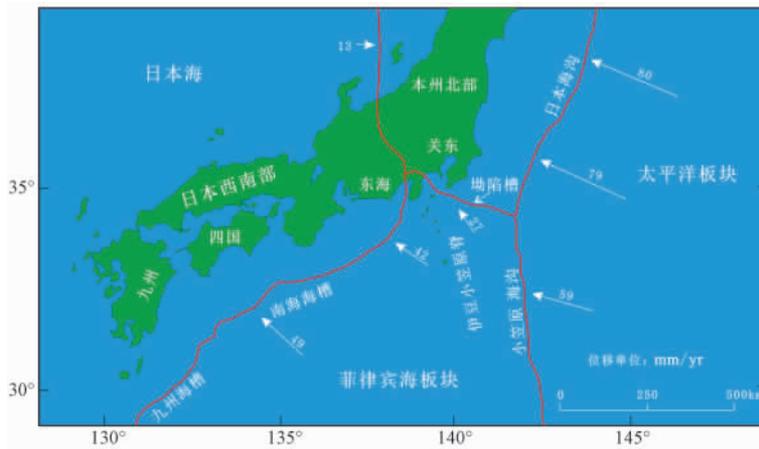


图 2 板块边界与 GPS 测得的板块运动示意图 (据日本东京大学地震研究所)

Fig. 2 Plate boundary and measured plate movement by GPS

果验证, 即使在现代地壳最活动的青藏高原, 其年变形量也只有大约 $3.8 \times 10^{-8} \text{ } \epsilon/a$, 与太阳月亮引起的应变固体潮日变幅差 (约 $n \times 10^{-8} \text{ } \epsilon/d$, $n = 0 \sim 6$) 量级相当。虽然潮汐应力比构造应力的数量级要小得多, 但是潮汐应力的变化速率要比构造应力的平均积累速率大两

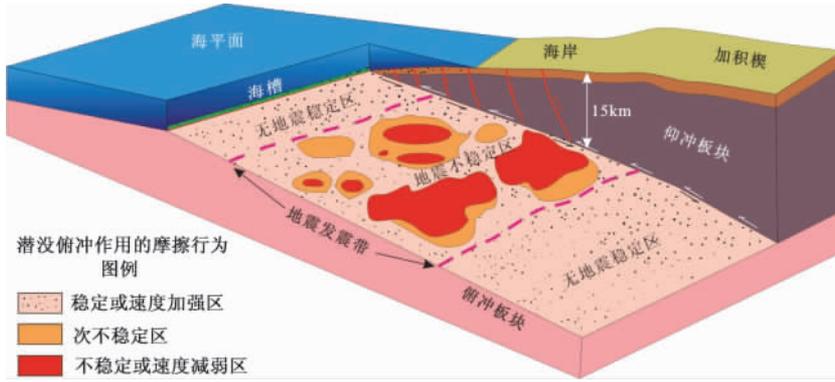


图 3 日本大地震发生机理

Fig. 3 Mechanism of large earthquakes in Japan

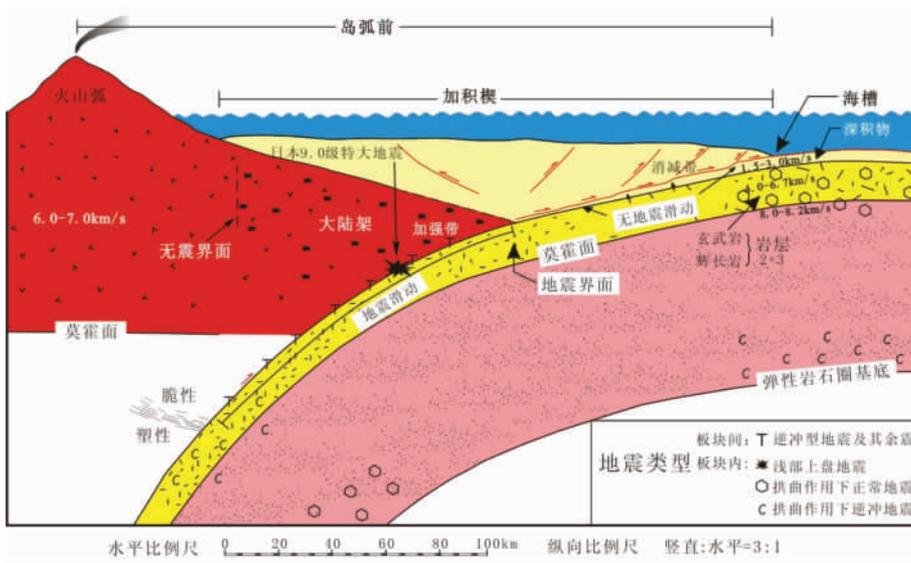


图 4 日本 M_w 9.0 级特大地震发生机理示意图

Fig. 4 Mechanism of M_w 9.0 large earthquake in Japan

个数量级^[3]。因此，面向地球动力学的应力—应变观测仪器精度要求非常苛刻，其应变分辨率应该达到 $10^{-9} \epsilon$ 以上，电容分量式应变仪对线长度变化测量的分辨率必须达到 0.1 nm 以上。由于仪器动态范围限制和不能直接检定或标定，大多采用相对变化测量（即相对应应变观测），又由于测量的量值非常微小，无一例外都采用应变观测而非直接测量应力。当然，能够达到这种分辨率的仪器必定能观测到固体潮。经过国内外专家几十年的探索^[4-10]，以地壳运动观测为目标，研制出了能够观测到地壳应变本底、地球应变固体潮以及应变地震波的高精密钻孔应变观测仪器。澳大利亚的 Gladwin 研制成功三分量张量应变仪^[11]；日本的研究人员也在研究发展多油腔三分量应变仪^①；同时，中国也研制成功了多种钻孔式应变仪^[4,10]。经过数十年的发展和改进，这些钻孔应变仪的记录灵敏度达到了 $10^{-10} \sim 10^{-11} \epsilon$ ，

① 石井紘. 新钻孔地壳活动综合观测装置的开发和观测 [R]. 东浓地震科学研究所报告, 2001, (6): 5 ~ 10.

成为地球科学研究中重要的观测仪器^[12-19]。20世纪60年代中期,李四光首先倡导将钻孔式应力—应变观测方法应用于地震预报研究,成为中国钻孔应变观测技术发展的先驱者,在中国地震研究方面做出了卓越贡献。目前钻孔应变仪已广泛应用在地震活动、板块运动、断层活动、火山活动等自然现象的观测方面,将为板块和地块边缘变形的演化、地震的孕育等科学难题的解答提供观测数据。

1 WFS D 地应力监测台概况

2008年5.12汶川8.0级地震后,众多地质学家针对此次地震进行了多方面的研究^[20-27],汶川地震断裂带科学钻探(WFS D)项目正是在这种环境下启动的。地应力监测台网是汶川地震断裂带科学钻探项目设立的以监测断层活动为目的的地应力监测台阵,其中代家坝地应力监测台站位于陕西省宁强县代家坝镇(N 33.05°, E 106.13°, 海拔 595.97 m)。该台站的台基位于秦岭南坡青川断裂带中段下盘,岩性为元古界绿片岩,岩石结构致密完整。台站受地形条件限制,距居民点较近;钻孔打入基岩,地应力监测台安装 TJ-21A 型体积式应变仪一台,安装深度 30 m,钻孔自然水位 0.5 m,且水位长期稳定,变化不大。为了加强地震观测,在该台站还安装了 FSS-3M 型短周期地震仪。为排除各种干扰,台站还安装了大气压、钻孔水位、水温、岩石孔隙压力等辅助观测仪器,井上和井下仪器采用 RS485 总线结构,通过 GPRS 和 CDMA 两种无线通讯传输方式工作。台站内各种设备均用网卡连接形成星形结构局域网,与中国地质科学院地质力学研究所地应力测量实验室的中心端服务器组成 VPN 专用网络,实现了数据实时传输。数据采集系统时钟采用 GPS 及互联网校时,15 s 进行一次校时,时间同步精度分别达到 1 μ s 和 10 ms,满足了台网计时的需要。

钻孔应变仪采用液压式封闭结构,可动的机械元件较少,耐振动,频带较宽,其低频和高频特性好。由于将 24 位 AD 转换置于探头顶端的仪器舱中,其工作环境稳定,避免了外界干扰,记录动态范围大,信息不失真,既能记录地应力的长期变化,也能较好地观测地震波,测量范围在数百赫兹—数千秒,是宽频—超宽频地震仪发展的一个方向。应变仪安装时采用膨胀水泥将其与井壁岩石固结在一起,通过膨胀水泥的膨胀作用来提供探头工作所需的 0.05~0.10 MPa 的初始压力。探头测量膨胀应力大小,通过探头内部的调压装置能够控制探头在稳定、安全的压力之下工作。由于水泥固结要经历初期的发热升温、膨胀剂持续的膨胀和自然降温过程,因此在探头安装初期需要一个自身的调整过程。当探头、固结体与基岩温度均一化,固结体膨胀与探头变形、岩石变形互相协调一致时,探头压力读数就达到了稳定状态。

另外,笔者在北京的地应力测量实验室(地下室)安装了新研制成功的气泡式倾斜仪,以替代老式的电容摆式倾斜仪。新型气泡式倾斜仪采用了新一代高精度水准泡和更加精密的驱动和解调电路,克服了电容摆量程小、易超量程的缺点,同时也不需安装时对孔斜 3° 的限制,大大提高了强震倾斜数据记录的能力。

体应变仪能很好地记录 P 波、S 波、瑞雷波,勒夫波由于不能产生体积应变,不会引起体应变仪腔室体积的变化,因而不能被记录。如果将倾斜仪与体应变仪组合在一起,就可以很好地记录和区分各种不同的波。

1.1 体应变测量探头参数

型号: TJ-21A (中国地质科学院地质力学研究所研制),该探头长约 1200 mm,口径为

$\phi 91$ mm, 内设两组传感器, 其中一组为备用传感器。其技术参数如下:

灵敏度: 优于 $1 \times 10^{-11} \varepsilon$;

输出信号: ± 8388608 ;

频带宽度: $0 \sim 20$ Hz;

恒流源标定电流: 10 mA, 通电 5 s, 应变幅度为 $1 \times 10^{-8} \varepsilon$;

电源: 直流 12 V, 直流功耗小于 1.0 W;

工作环境: 孔深 20 ~ 2000 m, 井下温度小于 80 °C 的条件下连续工作。

1.2 倾斜仪测量探头参数

型号: QJ-21 (中国地质科学院地质力学研究所研制), 该探头长约 400 mm, 口径为 $\phi 91$ mm, 内设两组传感器, 互呈 90° 安装。其技术参数如下:

灵敏度: 优于 $1 \times 10^{-4} \varepsilon$;

输出信号: ± 8388608 ;

频带宽度: $0 \sim 20$ Hz;

电机自动调零范围: $\pm 20^\circ$, 一次可调整到小于 $\pm 1 \times 10^{-2} \varepsilon$;

电源: 直流 12 V, 直流功耗小于 0.5 W;

工作环境: 孔深 20 ~ 2000 m, 钻孔倾斜小于 $\pm 20^\circ$, 井下温度小于 80 °C 的条件下连续工作。

1.3 体应变辅助测量仪参数

型号: QSW-31 型台站综合环境测量仪 (中国地质科学院地质力学研究所研制), 集气压计、钻孔水位计、室温温度计于一体;

气压计量程: 400 ~ 1033 HPa, 灵敏系数为 0.1 HPa/count;

钻孔水位计量程: 0 ~ 10 m, 灵敏系数为 1.0 mm;

室内温度计量程: $-50 \sim +50$ °C, 灵敏系数为 0.01 °C/count;

工作电源: 直流 12 V, 直流功耗小于 2.0 W;

工作环境: 室温 5 ~ 40 °C, 相对湿度 $\leq 85\%$ 的条件下连续工作。

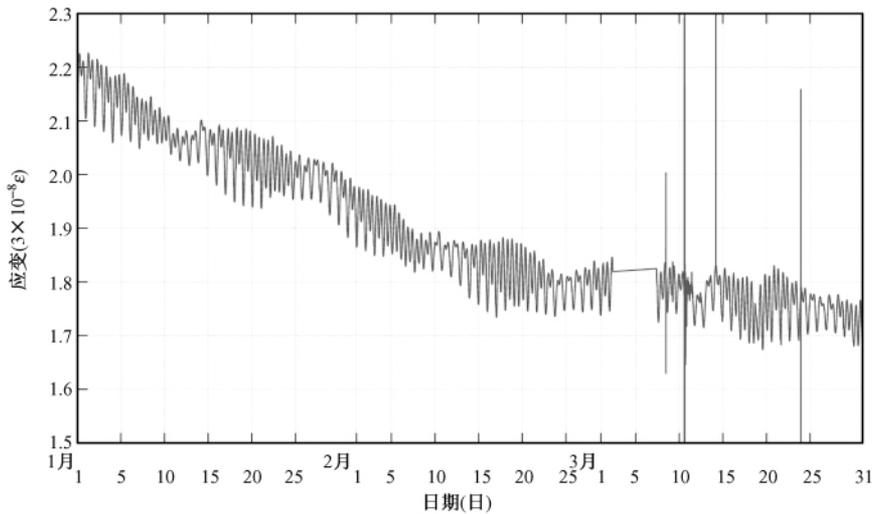
2 应变固体潮及其变化趋势

固体潮是指由月亮和太阳的引力而引起的地球弹性变形现象。受固体潮的影响地表每天不断垂直变化, 日变幅差最大为 50 cm 左右, 在固体地球内部产生周期性的应力和应变变化。由于这些变化由月球和太阳起潮所致, 而月球的引潮力位是太阳的 3 倍, 因此, 地震与月球运行之间的关系倍受关注。

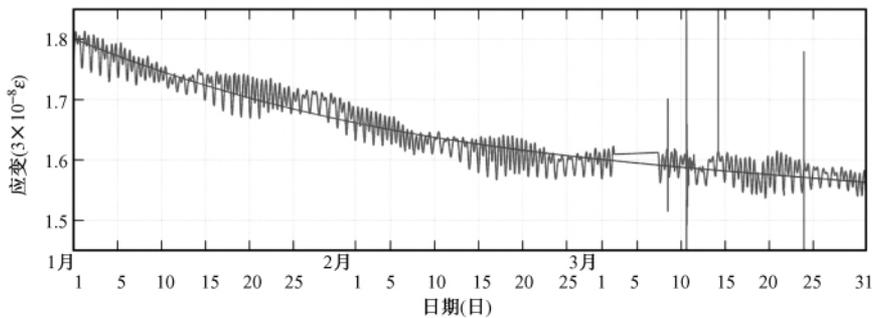
地震孕育过程要经过应变能线性积累、非线性积累和断层岩石破裂滑动 3 个阶段。岩石破裂试验和理论研究表明, 断层粘滑前会出现预滑移, 其位错量相当于同震位错量的 5%。同样, 震后断层因为粘弹性和应力的进一步释放, 以慢地震和余震的形式继续滑移一段时间, 称之为震后滑移。通常震后滑移位错量相当于同震位错量的 10%, 甚至更多。而震前常表现为趋势异常、体应变固体潮波形畸变、波形抖动、振幅异常及反相变化^[28-30]。

代家坝台站建于 2008 年 7 月中旬, 8 月初仪器趋于稳定开始观测, 可清晰地记录到幅值高达 1200 个单位的应变固体潮, 通过与理论固体潮数据对比标定, 表明仪器分辨率可达 $10^{-11} \varepsilon$ 。本文选取日本地震前后的数据来研究应变固体潮及其变化趋势。

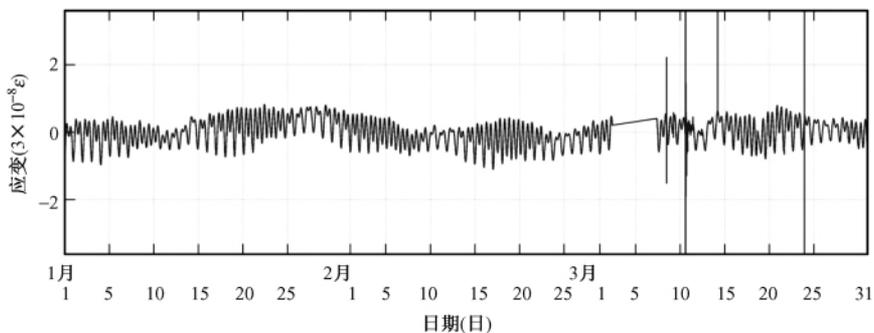
以代家坝台站为例, 仪器有效采样率 5 次/s, 从 2011 年 1 月 1 日至 3 月 31 日中心服务器共获得来自台站的 43794720 条应变数值记录, 经 1/8 降频重采样后, 绘制出幅度随时间变化曲线 (见图 5a)。利用数据处理软件对应变数据进行分析发现, 3 月 5 日至 3 月 7 日由于台站通讯故障造成数据缺失, 2011 年前 3 个月数据完整率达 97.725%; 3 月 14 日有 1 个数据点解析异常, 是通讯造成的误码, 误码率为 0.046×10^{-6} (见图 5b)。通过数据采集、传输和解析, 并将漂移剔除后, 固体潮幅值稳定, 固体潮最大日变幅差为 $5 \times 10^{-8} \varepsilon$, 表明台站各系统工作正常, 数据较为可靠 (见图 5c)。



(a) 代家坝地应力台站2011年1—3月原始数据曲线做出的正常固体潮连续曲线图



(b) 代家坝地应力台站2011年1—3月体积应变固体潮长期变化趋势



(c) 代家坝地应力台站2011年1—3月减去长期变化趋势的体积应变曲线

图 5 体应变仪原始数据应变固体潮与体应变信号分离

Fig. 5 Separation of tidal strain and volume strain signal among the raw data of volume strain meter

2011 年 1 月 1 日至 3 月 31 日较长时间应变观测资料反映出正常稳定的固体潮, 其全日波、半日波和 1/3 日波清晰可见, 上年和本年 1~2 月应变固体潮处于长期稳定的下降漂移趋势, 平均日漂移率为 $8 \times 10^{-10} \text{ } \varepsilon/\text{d}$ (见图 5a); 2 月 24 日应变曲线漂移变缓出现拐点, 其长期稳定的下降漂移趋势突然消失, 应变固体潮不再漂移或很少漂移; 到 3 月 25 日余震后应变恢复以 $0.1 \text{ n}\varepsilon/\text{d}$ 的漂移速度下降, 3 月 25 日至 3 月 31 日, 应变固体潮增加到以 $0.7 \text{ n}\varepsilon/\text{d}$ 的漂移速度下降, 表明 3 月 11 日日本东海 M_w 9.0 级特大地震前 15 天开始, 台站所在的代家坝地区趋势应变发生了改变, 表现为主震前、主震和余震期间趋势应变发生改变, 余震减弱后, 这种影响也减弱, 固体潮也恢复到先前的变化趋势 (见图 5c), 证实了日本“3.11”地震影响到了台站地区的固体潮长期变化趋势。

另外, 余震发生的频度与固体潮也有联系。笔者研究了“3.11”地震 3 级以上余震与固体潮的相关性。统计了 3 月 11 日到 3 月 31 日的余震, 其余震随时间发生的频度在不断减少, 在 3 月 26 日至 27 日的固体潮小潮期间, 3 级以上地震频度也减少 (见图 6), 小潮期后, 余震频度明显增加, 反映他们之间有某种对应关系。

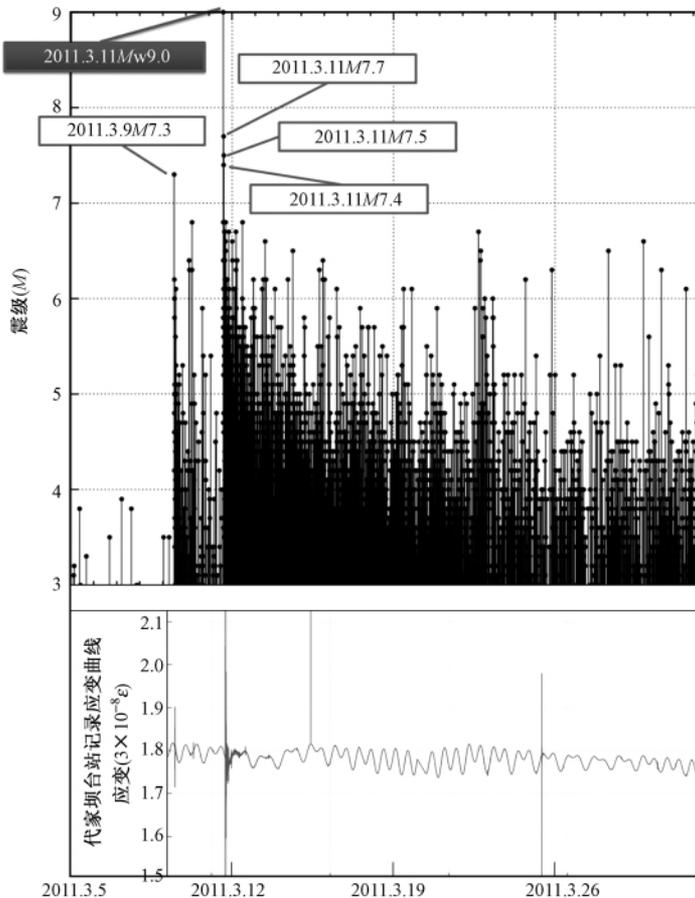


图 6 代家坝地应力台站 2011 年 3 月份地震发生震级—频度与体积应变固体潮关系
(震级—频度资料来源于日本气象厅)

Fig. 6 Magnitude-frequency relation of the volumetric strain and solid tide of the recorded earthquakes by Daijiaba stress station, from January to March, 2011

3 日本 M_w 9.0 级地震同震应变异常分析

2011年3月11日日本 M_w 9.0 级地震后,代家坝台站体应变仪记录到应变波。P波到达时间为 13:53:33,为负跳。代家坝台站体应变仪记录到最大应变波波幅为 $3.8350 \times 10^{-8} \varepsilon$,约为应变固体潮日变幅差的40倍(见图7)。由于日本 M_w 9.0 级地震后,震中距较大,约3296 km,属于地震远场范围,应变波没有明显的应变阶。同震波持续55 min后,地震同震应变主波基本结束;随后持续160 min的体波,波幅在 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7} \varepsilon$,这些波来自于地球内部各个反射和折射面的地震波的混合波。直到1800~2000 min后,体应变观测值才逐渐恢复正常,能明显观测到地球自由震荡长周期波,这种震荡波持续时间长,数日后仍然能测到地球自由震荡波的存在。

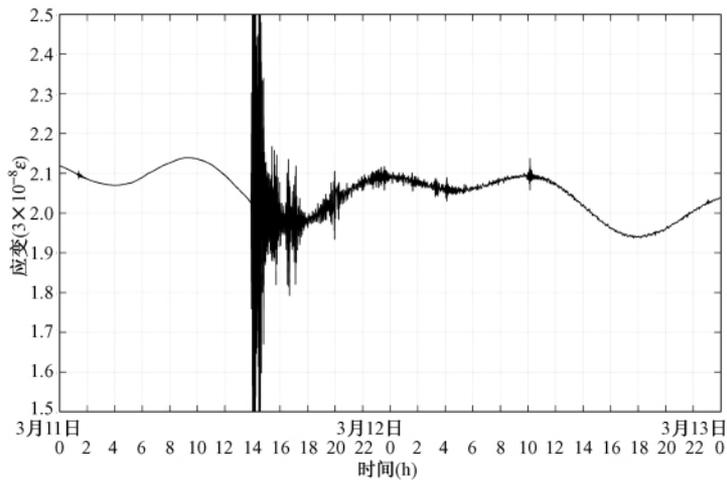


图7 代家坝地应力监测台站记录到日本 M_w 9.0 级特大地震的同震应变
(2011年3月11日至12日)

Fig. 7 Co-seismic strain of the recorded M_w 9.0 earthquake in Japan by Daijiaba stress stations (2011.3.11-12)

日本 M_w 9.0 级特大地震应变波形经过放大后也看不到明显的应变阶,持续30~40 h体应变观测值才逐渐恢复正常(见图8)。

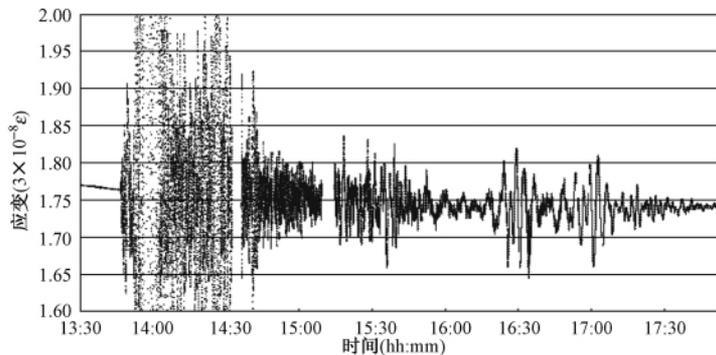


图8 代家坝地应力监测台站记录到日本 M_w 9.0 级特大地震的同震应变 (除去固体潮)

Fig. 8 Co-seismic strain of the recorded M_w 9.0 earthquake in Japan by Daijiaba stress stations (Remove the tidal)

2011 年 3 月 11 日日本 M_w 9.0 级特大地震后, 12 ~ 14 日应变固体潮出现连续 3 天的畸变, 形成“凹”型, 畸变幅度达 $5 \times 10^{-8} \epsilon$; 此固体潮“凹”型畸变在 18 日重复出现。反映了台站附近的基岩应力水平发生了改变, 12 日开始降低, 13 日达到 $0.035 n\epsilon$ 的最低点, 14 日上升并在 15 日趋于正常 (见图 9)。

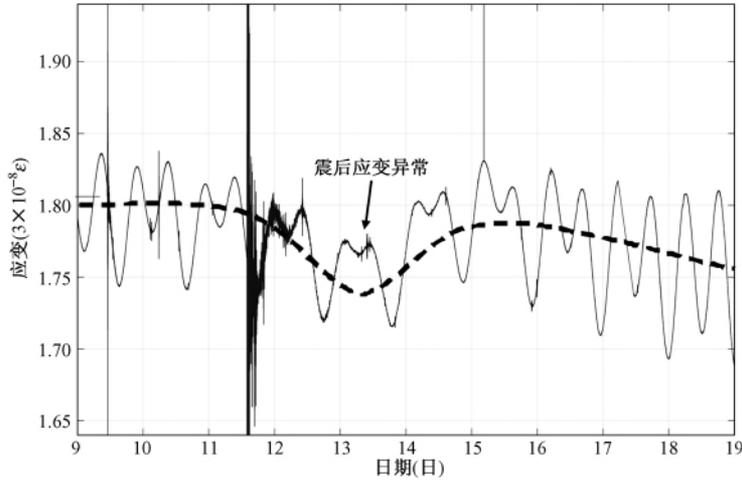


图 9 日本 M_w 9.0 级地震引起了 2011 年 3 月 12 ~ 14 日固体潮异常

Fig. 9 The caused tidal anomalies by M_w 9.0 magnitude earthquake in Japan, on March 9 ~ 19, 2011

4 前震与余震同震应变异常分析

日本 M_w 9.0 级特大地震主要起因于板块的彼此相对移动产生的应力累积、破裂。当滑动带应力积累到一定程度, 在一定区域范围内发生破裂而形成一系列地震。一个地震序列中最强的地震称为主震; 主震前在同一震区发生的较小地震称为前震, 主震后在同一震区陆续发生的较小地震称为余震。日本东海 M_w 9.0 级特大地震是典型的前震—主震—余震型地震序列, 主震的震级高, 十分突出, 其释放的能量占全地震序列的 90% 以上。

2011 年 3 月 9 日 M_w 7.3 级地震是 3 月 11 日 M_w 9.0 级特大地震的前震 (见图 10), 其特点是都没有见到同震阶跃, 只有同震应变波。而在北京的高精度气泡式倾斜仪, 由于震中

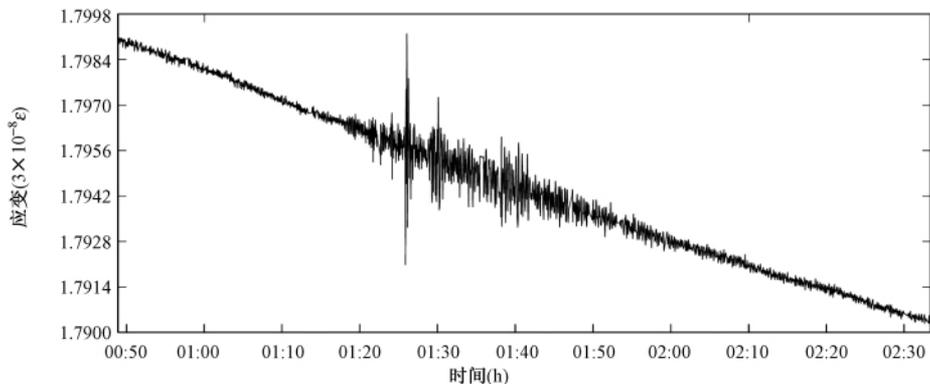


图 10 2011 年 3 月 9 日 M_w 7.3 级地震是 M_w 9.0 级特大地震的前震同震应变

Fig. 10 Co-seismic strain of the M_w 7.3 foreshock of the M_w 9.0 main earthquake on March 9, 2011

距较近 (2256 km), 可能进入了地震近场范围, 不仅记录到了多次不同性质的应变阶跃, 还记录到了长时间的倾斜变形“凹”型异常, 数十分钟后才恢复, 与主震震后数日的应变异常形式相似, 只是幅度和持续时间没有主震长 (见图 11)。

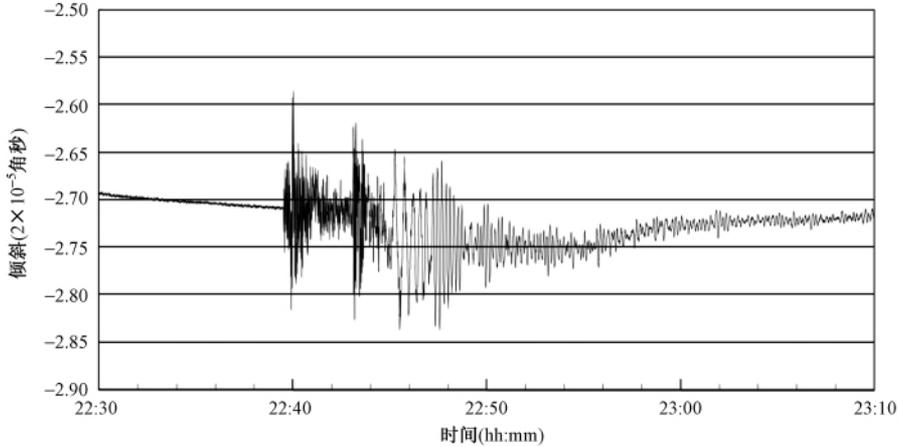


图 11 北京地下室气泡式倾斜仪记录到 2011 年 3 月 9 日
日本 M_w 7.3 级余震同震倾斜曲线

Fig. 11 Tilt curve of the recorded M_w 7.3 aftershock of Japan by the bubble tiltmeter
at basement in Beijing on March 9, 2011

5 地震后地球自由振荡

大地震发生时, 地球局部受到激发, 会使地球整体以一些固定的频率产生连续性振动, 这种现象称为地球自由振荡。地球自由振荡不一定是由地震产生的, 海潮海浪、核试验、滑坡、山崩甚至风暴都有可能引起持续时间较长、周期数百秒至数千秒的地球自由振荡。地球的自由振荡会引起地壳岩石的应力周期性波动, 其影响范围极其广泛, 其物理过程值得进一步研究。Lamb 从理论上推论出了地球自由振荡的存在, 并且认为它包括球型振荡和环型振荡两种类型。1961 年, Benioff 用应变地震仪和摆式地震仪两种仪器准确观测到了智利大地震激发的长周期地球自由振荡^[31]。邱泽华等用钻孔应变仪观测资料提取到了 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊地震激发的地球的球型以及环型自由振荡^[32]。万永革等利用中国数字地震台网数据提取了昆仑山口西地震的球型自由振荡^[33]。2008 年 5 月 12 日汶川地震时山丹台也获取了大量的由地震激发的振荡周期在 600 ~ 1200 s 的地球自由振荡数据^[4]。日本 M_w 9.0 级特大地震也引发了大规模的地球自由振荡 (见图 12)。

为考察地球自由振荡随时间的变化, 笔者用 5 天的 432000 个数据进行谱分析, 以一定的时间间隔进行滑动进行功率谱分析。首先, 给台站的数据加了窗函数 (hanning 窗), 然后进行离散傅氏变换, 用振幅谱平方代表功率谱。由于所做的功率谱分布极不均匀, 周期在 296 s 以下的低频分布密度较大, 故对功率谱取对数, 重新形成功率谱 (见图 13)。由图 13 可见, 台站观测到比较明显的球型振荡, 在高频部分 (2.5 ~ 3.4 mHz, 290 ~ 400 s) 各振型能量比较小, 在中频部分 (1.67 ~ 2.50 mHz, 400 ~ 600 s) 能量明显比较大, 低频部分 (0.46 ~ 1.67 mHz, 600 ~ 2200 s) 的能量是主体, 从总体趋势上看, 频率低的振型要比频率

高的振型的能量大得多。

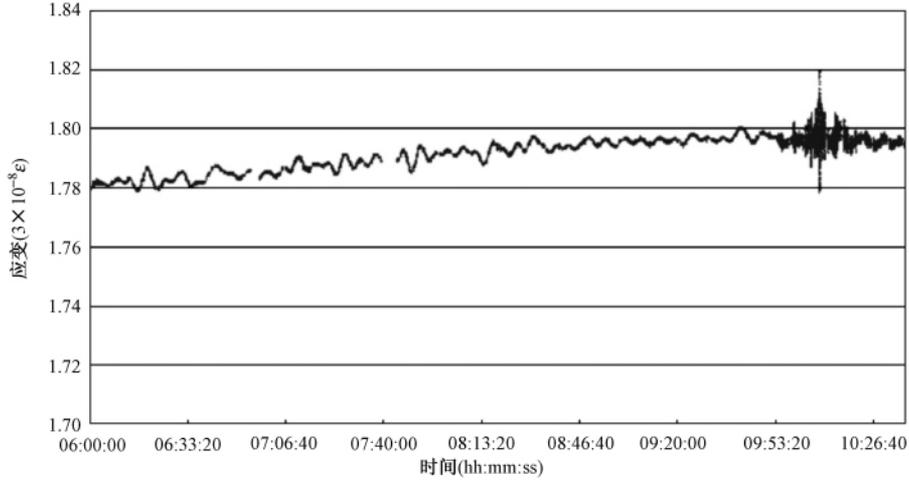


图 12 日本本州东海岸 M_w 9.0 级地震引发的长时间自由振荡现象 (2011 年 3 月 12 日)

Fig. 12 The triggered long time free oscillation by M_w 9.0 earthquake at the east coast of Honshu , Japan on March 12 , 2011

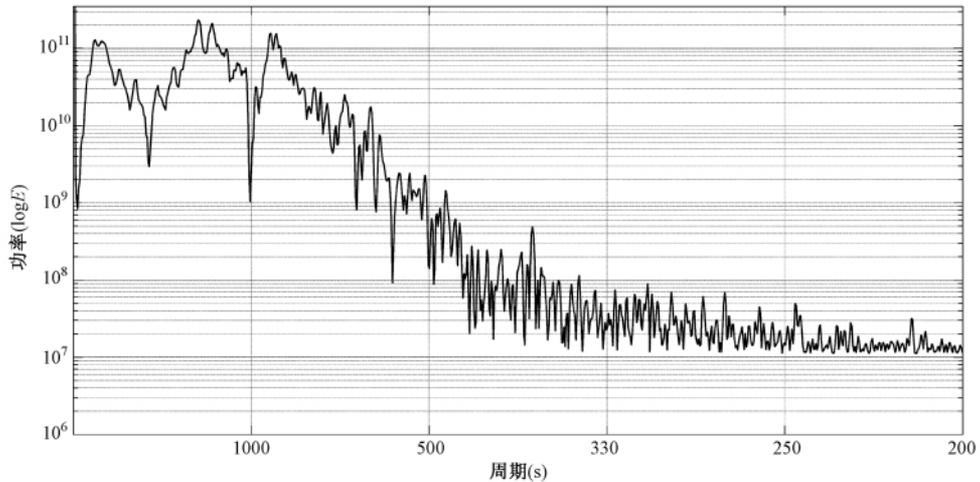


图 13 代家坝台站钻孔体应变仪观测的日本 M_w 9.0 级地震的功率谱

Fig. 13 Power spectrum of the Japan M_w 9.0 earthquake recorded by the borehole volume strain meter of Daijiaba station in China

6 结论

(1) WFS 地应力监测台网映震能力较强，日本 M_w 9.0 级特大地震的 M_s 5.0 级以上余震波信息均能记录到。

(2) 日本 M_w 9.0 级特大地震也引发了大规模的地球自由震荡，其震荡周期主要是 500 ~ 2000 s 之间，且持续数日。

(3) 余震发生的频度与固体潮月相之间有明显的对应关系。

(4) 地震影响到了台站的固体潮长期变化趋势,震前数日至数十日,变化趋势发生明显的改变。

(5) 以往大震震前都有明显的应变阶跃现象,震中距 3296 km 的代家坝体应变仪在这次地震震前和震后都没有记录到明显的阶跃,但位于北京的震中距较近 (2256 km) 的倾斜仪能记录到明显阶跃和震后应变异常现象。

(6) 同震能引起滞后主震的应变异常,多在震后数十分钟至数日出现,持续数十分钟到数日,而后恢复正常,往往引起固体潮的畸变,呈“凹”型,其形成原因及变化幅度的大小,与震级、震中距、震源深度,乃至震源及钻孔周围的地质构造之间关系等因素相关,是否是因为岩石圈的粘弹性特征产生的粘滞效应,还需进一步深入研究和总结。

参 考 文 献

- [1] 杨国华,李延兴,韩月萍,等. 由 GPS 观测结果推导中国大陆现今水平应变场 [J]. 地震学报,2002,24 (4): 337 ~ 347.
YANG Guo-hua, LI Yan-xing, HAN Yue-ping, et al. Current horizontal strain field in Chinese Mainland derived from GPS data [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24 (4): 337 ~ 347.
- [2] 王琪,张培震,牛之俊,等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形 [J]. 中国科学: D 辑,2001,31 (7): 529 ~ 536.
WANG Qi, ZHANG Pei-zhen, NIU Zhi-jun, et al. Current crustal movement and tectonic deformation in China [J]. Science in China: Series D, 2001, 31 (7): 529 ~ 536.
- [3] 高锡铭,殷志山,王威中,等. 固体潮应力张量对地震的触发作用 [J]. 地震学报,1981,3 (3): 264 ~ 275.
GAO Xi-ming, YIN Zhi-shan, WANG Wei-zhong, et al. Triggering of earthquakes by the tidal stress tensor [J]. Acta Seismologica Sinica, 1981, 3 (3): 264 ~ 275.
- [4] 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.
- [5] Lowry A R, Hamburger M W, Meertens C M, et al. GPS monitoring of crustal deformation at Taal Volcano, Philippines [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2001, 105 (1~2): 35 ~ 47.
- [6] Langbein J. Computer algorithm for analyzing and processing borehole strain meter data [J]. Computers & Geosciences, 2010, 36 (5): 611 ~ 619.
- [7] Bernard P, Boudin F, Sacks S, et al. Continuous strain and tilt monitoring on the Trizonia Island, Rift of Corinth, Greece Mesures continues de déformation et d'inclinaison dans l'île de Trizonia (golfe de Corinthe, Grèce) [J]. Comptes Rendus Geosciences, 2004, 36 (4~5): 313 ~ 323.
- [8] Karmaleeva R M, Latynina L A. Tectonic crustal movements based on strain data [J]. Journal of Geodynamics, 1992, 15 (3~4): 201 ~ 207.
- [9] Vadim Milyukov, Alexander Kopaev, Vladimir Zharov, et al. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strain meter and the GPS/GLONASS network [J]. Journal of Geodynamics, 2010, 49 (3~4): 216 ~ 223.
- [10] 彭华,吴珍汉,马秀敏. 青藏铁路无人值守地应力综合监测站 [J]. 地质力学学报,2006,12 (1): 96 ~ 104.
PENG Hua, WU Zhen-han, MA Xiu-min. Unmanned in situ stress monitoring stations along the Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12 (1): 96 ~ 104.
- [11] Gladwin M T. High precision multi-component borehole deformation monitoring [J]. Review of Scientific Instruments, 1984, 55 (12): 2011 ~ 2016.

- [12] Moro G D, Garavaglia M, Zadro M. Tilt-strain measurements in the NE Italy seismic area: Precursor analysis and atmospheric noise effects [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2000, 25 (3): 271 ~ 276.
- [13] Moro G D, Zadro M. Remarkable tilt-strain anomalies preceding two seismic events in Friuli (NE Italy): Their interpretation as precursors [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170 (1~2): 119 ~ 129.
- [14] Johnston M J S, Linde A T, Agnew D C. Continuous borehole strain in the San Andreas Fault zone before, during, and after the 28 June 1992, M_w 7.3 Landers, California, earthquake [J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1994, 84 (3): 799 ~ 805.
- [15] Zadro M, Braitenberg C. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas [J]. *Earth-Science Reviews*, 1999, 47 (3~4): 151 ~ 187.
- [16] Gouly N R. Strainmeters and tiltmeters in geophysics [J]. *Tectonophysics*, 1976, 34 (3~4): 245 ~ 256.
- [17] Okubo M, Ishii H, Yamauchi T. The 2003 Yocachioki Earthquake, observed by borehole strainmeter array: Comparison with broad band seismogram, Zisi 2 [J]. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 2004, 57: 105 ~ 113.
- [18] Bilham R G, Beavan R J. Strains and tilts on crustal blocks [J]. *Tectonophysics*, 1979, 52 (1~4): 121 ~ 138.
- [19] Seiichi Shimada, Shoji Sakata, Shin'ichi Noguchi. Co-seismic strain steps observed by three-component borehole strainmeters [J]. *Tectonophysics*, 1987, 144 (1~3): 207 ~ 214.
- [20] 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 Xiu-min, JIANG Jing-jie. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 114 ~ 130.
- [21] 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 M_s 8.0 Wenchuan strong earthquake in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- [22] 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.
- [23] 王连捷, 崔军文, 周春景, 等. 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.
WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHOU Chun-jing, et al. Numerical modeling for Wenchuan earthquake mechanism [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.
- [24] 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 汶川地震和科学钻探 [J]. *地质学报*, 2008, 82 (12): 1613 ~ 1622.
XU Zhi-qin, LI Hai-bing, WU Zhong-liang. Wenchuan earthquake and scientific drilling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (12): 1613 ~ 1622.
- [25] 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.
- [26] 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): 110 ~ 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): 110 ~ 116.
- [27] 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. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 131 ~ 141.
- [28] 卢双苓, 李峰, 王强. 泰安地震台钻孔应变固体潮畸变的分析探讨 [J]. *华北地震科学*, 2008, 26 (2): 49 ~

- 64.
- LU Shuang-ling, LI Feng, WANG Qiang. Analysis on the aberrance of solid tide from borehole strain in Taian Seismostation [J]. North China Earthquake Sciences, 2008, 26 (2): 49 ~ 64.
- [29] 苏其辉, 段燕飞, 胡毅力. 固体潮观测资料平滑处理方法的研究 [J]. 地壳形变与地震, 1993, 13 (4): 41 ~ 44.
- SU Qi-hui, DUAN Yan-fei, HU Yi-li. Method to smooth earth tide observation [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1993, 13 (4): 41 ~ 44.
- [30] 王梅, 牛安福, 刘希强. 日本 7 级以上双震前泰安台伸缩仪固体潮畸变 [J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26 (4): 69 ~ 74.
- WANG Mei, NIU An-fu, LIU Xi-qiang. Earth tide distortion recorded by tens meter at Tai-an seismostation before strong double earthquakes in Japan [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26 (4): 69 ~ 74.
- [31] Benioff H, Press F, Smith S. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes [J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66 (2): 605 ~ 619.
- [32] 邱泽华, 马瑾, 池顺良, 等. 钻孔差应变仪观测的苏门答腊大地震激发的地球环型自由振荡 [J]. 地球物理学报, 2007, 50 (3): 797 ~ 805.
- QIU Ze-Hua, MA Jin, CHI Shun-Liang, et al. Earth's free torsional oscillations of the great Sumatra earthquake observed with borehole shear strainmeter [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50 (3): 797 ~ 805.
- [33] 万永革, 周公威, 郭燕平. 中国数字地震台网记录的昆仑山口西地震的球型自由振荡 [J]. 地震, 2005, 25 (1): 31 ~ 40.
- WAN Yong-ge, ZHOU Gong-wei, GUO Yan-ping. Spherical mode of the earth free oscillation excited by the earthquake in the west to the Kunlun mountain pass recorded by China digital seismograph network [J]. Earthquake, 2005, 25 (1): 31 ~ 40.

STRAIN CHARACTERISTICS OF WFS D STRESS STATIONS AND ITS CO-SEISMIC EFFECTS ANALYSIS: A CASE STUDY UPON M_w 9.0 EARTHQUAKE IN JAPAN

PENG Hua^{1,2}, MA Xiu-min^{1,2}, JIANG Jing-jie^{1,2}, PENG Li-guo²

(1. Key Lab of Neotectonic Movement and Geohazards, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The M_w 9.0 earthquake occurred in the northeastern Sea of Japan, on March 11, 2011. The volume strain meter in Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling (WFS D) recorded a complete response waveform at Hanzhong Prefecture, Shaanxi Province. By analyzing acquired data, some issues are studied and discussed by authors that including co-seismic changes of the whole process of M_w 9.0 mega-earthquake in Japan, the abnormal strain changes of solid tide prior to that earthquake and after, and the emerging process of that earthquake. Per this paper, the strain anomalies of the M_w 9.0 earthquake in Japan are analyzed in order to contribute to better forecast earthquake trends in China the future.

Key words: M_w 9.0 large earthquake in Japan; Wenchuan earthquake Fault Science Drilling (WFS D); volume strain observations; strain characteristics; co-seismic effects