

日本秋田地震(1983年7.7级)引起我国 应力场的震时调整变化

张 昭 栋

(山东省地震局)

郑 金 涵

(国家地震局地球物理研究所)

冯 初 刚

(中国科学院上海天文台)

摘 要

本文通过水平分层承压含水层模型,推导出含水层的水头和含水层应力变化之间的定量关系。利用我国在日本秋田地震时有水位阶变的52口井孔的观测资料,通过水井水位的体应变固体潮系数,估算了震时引起我国应力场的调整变化。讨论了这种应力调整时应力增加区和降低区交替出现的可能原因。

关键词 秋田地震;承压含水层;水位阶变;固体潮系数;应力场

一、引 言

以前人们曾从地质观察、地壳形变测量、地震震源机制及实地应力测量(如水压致裂技术和应力解除技术)等途径来估算地壳应力场的调整变化。本文提出了一种估算地震引起应力场调整数量级的新方法,利用震时水井水位阶变和水井水位的体应变固体潮效应,来反演较大地震引起的大区域应力场的震时调整变化。

承压含水层内水井水位的变化,可以反映含水层孔隙压的变化,而含水层孔隙压的变化与含水层所受的应力状态有密切的关系。地壳内的应力变化有时可影响到含水层所受应力状态发生变化,从而导致含水层内水井水位也发生相应的变化。为了寻求承压水位与含水层的应力应变关系,许多科技工作者做了大量的观测研究工作^[1-3]。

用文献[3]给出的关系和地下水位资料反演震前应力场的变化时,把水井含水层系统作为水平承压含水层。由于含水层的某些参数实际还不知道,只好根据含水层的岩性取其一般平均值代之。这样无疑给估算结果增加了误差。为了减小这种误差,我们曾利用直接反映含水层水文地质性质的水井水位气压效应,来反演含水层所受应力状态的变

化^[13]。这样就比文献[3]的方法改进了一步,但是仍然存在一定的近似性,因为水井水位气压效应的理论,是建立在含水层垂直向单向压缩的基础上。为了再进一步减小估算误差,使估算理论更接近于含水层的实际情况,我们就选取了与含水层体应变有关的效应——水井水位的体应变固体潮效应——来反演含水层应力的震时调整变化。然后分析了我国应力场在日本秋田地震时,应力调整区出现增加区与降低区交替呈现的可能原因。

二、日本秋田地震引起我国水井水位的震时水位阶变

1983年5月26日在日本秋田发生了 $M_s = 7.7$ 的强烈地震。这次地震引起了我国许多水井水位发生了振荡,据不完全的统计,在我国20个省、市、自治区有94口水井记录到秋田地震引起的水震波。其中有65口井的水震图在震时出现了水位阶变,水位阶变的幅度在几毫米到几厘米之间。其中最大的是营口周家井孔,水位阶变幅度达12cm。表1给出了有水位阶变的65口井孔的概况¹⁾。卓明葆认为这些水位阶变有可能是岩层受

表1 记录到水位阶变的井孔概况

序号	井名	$\varphi_N(^{\circ})$	$\lambda_E(^{\circ})$	地面标高 (m)	井深 (m)	观测层		水位 (m)	水震波 水位阶变 (cm)
						时代	岩性		
1	蛟河	43.7	127.3	10	1343	K	砂岩	3.5	+0.1
2	八里卜	43.8	125.4		113	K	砂页岩	-6.9	+1
3	四平	43.2	124.4		100	K	砂岩	-19.7	+0.5
4	本溪 1	41.2	123.7	173	1213	Z	大理岩	20	+6
5	本溪 2	41.2	123.7	174	1722	Z	大理岩	2	+3
6	丹东变电	40.2	124.4	32	263	Z	伟晶岩	4.5	+2
7	丹东汤池	40.1	124.3	20	261	Z	变粒岩	6.8	+4
8	营口周家	40.6	122.7	290	436		片麻岩	5	+12
9	岫岩 1	40.3	123.3	89	250		花岗岩	-2	+0.5
10	温泉	40.1	116.2	54	298	O	灰岩	11	-2
11	大灰厂	39.8	116.2		99	Z	灰岩	13	+2
12	良乡	39.7	116.2	43	258	Z	灰岩	20	+1
13	高村	39.6	116.9		3402	$\epsilon-O$	灰岩	-3	-1
14	上古林 3	38.7	117.5		125	Q	细砂	-7.5	+0.6
15	山西水 2	38.6	118.2	23	286	O	灰岩	5	-1
16	万全	40.9	114.7	923	217	J	斑岩	25	-4.4
17	容 1	39.0	115.9		997	Z	灰岩	0.5	-0.1
18	雄县	39.0	116.1		1283	Z	白云岩	-0.5	-0.1
19	新泽	38.1	115.6	23	3304		灰岩	0.4	-0.1
20	完县	38.9	115.1	160	500	$\epsilon-O$	灰岩	5	-0.3
21	兴济	38.4	116.9		1735	$\epsilon-O$	白云岩	37	-0.2
22	永年	36.7	114.5		1034		玢岩	-3	-0.5
23	苏 01	34.5	119.1	4.4	499	Z	大理岩	-1.3	-0.2
24	苏 02	34.0	117.8	27.6	311	Z	大理岩	-4	-0.5
25	苏 04	33.8	118.1	18.5	99	Q	砂砾岩	-0.4	-0.5
26	苏 05	33.9	118.6	15	934	K	砂岩	-6	-0.3

1) 卓明葆, 秋田地震 ($M_s = 7.7$) 引起我国井水位变化的特征, 1984 年全国地震地下水动态清理攻关总结会 (昆明)。

表 1(续)

序号	井名	$\varphi_N(^{\circ})$	$\lambda_E(^{\circ})$	地面标高 (m)	井深 (m)	观测层		水位 (m)	水震波 水位阶变 (cm)
						时代	岩性		
27	苏 07	33.0	119.2	7.4	1585	E	砂岩	-7	+0.5
28	苏 12	32.1	120.8	3.8	689	K	大理岩	-8	-10
29	苏 15	32.1	118.8	10	736	J	砂岩	-3	+0.6
30	苏 17	32.1	119.3	60.4	329	燕山期	玢岩		-0.1
31	苏 21	31.4	121.0	4	676	Z ₂ ε	灰岩	-20	-0.3
32	苏 22	31.2	119.5	137	243	S	砂岩	7	-0.1
33	鲁 07	37.5	121.0	73	600	Pt	花岗岩	-5	-1
34	鲁 09	37.3	117.2	3.5	2836	O	灰岩	-2	-2
35	鲁 14	35.4	118.8	85	321	C	灰岩	3.6	-1.7
36	鲁 15	34.8	117.6	94	501	P	砂岩	-44	-0.2
37	鲁 10	36.7	117.1		217	ε-O	灰岩	-0.7	-6
38	豫 40	33.0	115.9	158	613	古生代	角闪岩	-9	-0.2
39	豫 49	35.9	115.5	46	2267	O	灰岩	-3	-1
40	泗县	33.8	118.5		100	K	砂岩	1.3	+0.3
41	蚌埠	32.9	117.4		168	元生代	花岗岩	-2	+0.1
42	临泉	32.7	115.5		118	Q	砂砾岩	-2	-0.3
43	马鞍山	31.7	118.5		278	中生代	花岗岩	-0.9	+2
44	含山	31.7	118.1		190	P, C, D	灰岩	3.2	-3.0
45	太原 2	37.7	112.4		765	ε-O	灰岩	-29	-1
46	晋 10-1	36.5	111.7		228	O	灰岩	-10	-2.3
47	浦源	29.1	111.6	37	300	ε	灰岩	-3	+3
48	龙岩	25.0	117.0		98	P	灰岩	-19	+2
49	永安	26.0	117.6		1000	K	砂岩	-8.3	-2
50	柱坑	24.5	115.9	190	381	J	玄武岩	18	+3.3
51	凤翔	34.6	107.3	1145	120	K	砂砾岩	-6	+0.3
52	石咀山	39.3	106.8	1124	98	Q	粗砂	42	-0.3
53	泸定	29.7	102.2	1285	150	前 Z	花岗岩	-33	+0.3
54	西昌	27.9	102.1	1566	765	Pt	辉长岩	3	-2
55	盐边	26.8	101.7	1406	584	T	砂岩	-1.3	-0.6
56	泸州	28.9	105.5	247	300	J	砂岩	-5.4	-0.2
57	个旧	23.4	103.2	1760	444	T	白云岩	-48	-3
58	曲靖	25.5	103.8	1863	298	D	灰岩	-29	-0.2
59	楚雄	25.0	101.5	1772	101	K	泥岩	-5.4	-0.1
60	普洱	23.0	101.1	1314	100	P	灰岩	-3.7	-2
61	保山	25.1	99.2	1659	148	E	砂岩	6.7	+0.1
62	乌 2	43.5	87.5		346	P	砂页岩	-32	+0.9
63	乌 10	43.5	87.5		32	P	砂砾岩	-5.5	+0.3
64	乌 11	43.8	87.5	820	145	P	砂页岩	-5.5	+0.1
65	舒兰	44.3	126.8	234	20	Q	砂砾岩	-12	+0.2

力后产生的应力应变所造成的。

在有水位阶变的 65 口井的水震图中,有 27 口井孔是水位上升型的水位阶变,有 38

水井孔是水位下降型的水位阶变(见图 1)。由水位和含水层的应力应变关系可知, 上升型的水位阶变, 是因为含水层所受的应力增大后体积被压缩造成的。与此相反, 下降型的水位阶变, 是因为含水层所受的应力降低后体积膨胀造成的。

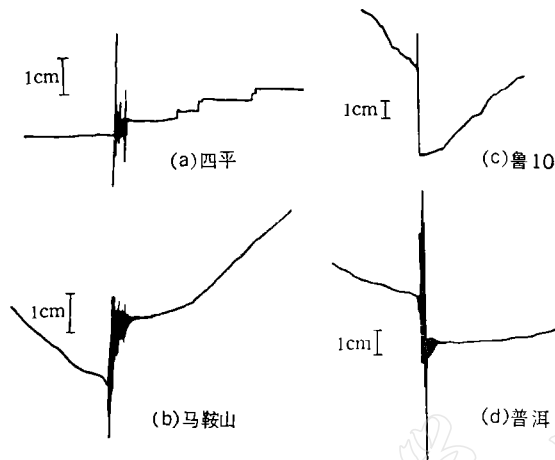


图 1 水位阶变的两种类型

(a), (b) 上升型水位阶变; (c), (d) 下降型水位阶变

三、水井水位的体应变固体潮效应

人们对穿过封闭含水层的水井水位能够反映地球固体潮的认识, 已有 100 多年的历史了, 由于井水响应的量值与含水层的弹性性质有关, 水文地质学家、地球物理学家和其他地球科学家, 都对含水层的弹性参数解释这种响应感兴趣, 也做了大量的观测研究工作^[4-8]。本文采用了水文地质中最典型的水平分层承压含水层模式, 即含水层是各向同性的均匀介质, 其上下都被不通水层挟持, 各层都是水平方向向四周无限延伸, 含水层内有一口井径不大的完整井。再假定各层在力学性质上是完全弹性介质。根据弹性理论和地下流体动力学理论, 可以建立体应变固体潮对承压含水层水位影响的偏微分方程^[8]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \nabla^2 H - \frac{K}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

其中 H 为含水层内承压水头, K 为含水层的渗透系数, ρ 为含水层内水的密度, g 为重力加速度常数, n 为含水层的孔隙度, α 为含水层固体骨架的体积压缩系数, β 为含水层内水的体积压缩系数, Θ 为固体潮体应变。

通过一定的边界条件, 可以求出方程(1)的简化解, 从而得到水井水头与体应变固体潮之间的关系为

$$\delta H_w = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \cdot \Theta \quad (2)$$

从上式可以看到, 对某个井孔来说, 其含水层系统的参数已确定不变时, 那么固体潮体应变引起水井水位的变化与固体潮体应变成正比。这个关系是我们利用水井的体应变固体潮效应, 反演含水层应力变化的重要依据之一。我们得出这个关系的前提是水平分

层承压含水层系统. 实际观测结果也证明了这个关系式是正确的^[8].

四、潮汐应力和体应变固体潮

假设地球为各向同性的均匀弹性球体, 选取右旋直角坐标系, 以地心为原点, 地球和月球的中心连线为 z 轴, x 轴在白道内, y 轴垂直于白道面. 仅用 2 阶起潮力位求解, 设地球表面为自由边界, 可以求得在球坐标下地球内部的潮汐应力的一般表达式为^[9]

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2(4\lambda + 3\mu)}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM\rho}{R^3} (a^2 - r^2)(3\cos^2\theta - 1) \\ \sigma_\theta &= -\frac{8\lambda + 6\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM\rho}{R^3} (a^2 - r^2)(3\cos^2\theta - 2) \\ &\quad + \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM\rho}{R^3} r^2 \\ \sigma_\varphi &= -\frac{8\lambda + 6\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM\rho}{R^3} (a^2 - r^2) \\ &\quad + \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM\rho}{R^3} r^2(3\cos^2\theta - 2) \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{6(4\lambda + 3\mu)}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM\rho}{R^3} (a^2 - r^2) \sin\theta \cdot \cos\theta \\ \tau_{r\varphi} &= 0 \\ \tau_{\theta\varphi} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中 σ_r 为径向潮汐正应力, σ_θ 和 σ_φ 分别为地面两个主方向的潮汐正应力, $\tau_{r\theta}$, $\tau_{r\varphi}$ 和 $\tau_{\theta\varphi}$ 为剪应力, λ 和 μ 为拉梅常数, G 是万有引力常数, M 为月球的质量, ρ 为地球的密度, R 为地心到月球质心的距离, a 为地球的平均半径, r 为地球到考察点的距离, θ 为月球对考察点的天顶距.

我们讨论的含水层距地表一般不超过 4km 这比起地球半径来是一个小量, 为了计算方便, 我们先考虑在地球表面潮汐应力的分布规律, 当 $r = a$, 由(3)式得出

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \tau_{r\theta} = \tau_{r\varphi} = \tau_{\theta\varphi} = 0 \\ \sigma_\theta &= \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GM\rho}{R^3} a^2 \\ \sigma_\varphi &= \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GM\rho}{R^3} a^2(3\cos^2\theta - 2) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

体应力的表达式为

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_\varphi = \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GM\rho}{R^3} a^2(3\cos^2\theta - 1) \quad (5)$$

如果只考虑近地球表面的潮汐应变, 则有

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\lambda}{2\mu(19\lambda + 14\mu)} \frac{GM\rho}{R^2} a^2(1 - 3\cos^2\theta) \\ \varepsilon_\theta &= \frac{3\lambda + 2\mu}{2\mu(19\lambda + 14\mu)} \frac{GM\rho a^2}{R^3} + \frac{\lambda}{3\mu(19\lambda + 14\mu)} \\ &\quad \cdot \frac{GM\rho a^2}{R^3} \times (1 - 3\cos^2\theta) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{\varphi} &= -\frac{3\lambda + 2\mu}{2\mu(19\lambda + 14\mu)} \frac{GM\rho a^2}{R^3} - \frac{\lambda + \mu}{\mu(19\lambda + 14\mu)} \\ &\quad \cdot \frac{GM\rho a^2}{R^3} \times (1 - 3\cos^2\theta) \\ \varepsilon_{r\varphi} &= \varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta\varphi} = 0. \end{aligned} \right.$$

因此可得体应变

$$\Theta = \varepsilon_r + \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GMP}{R^3} a^2(3\cos^2\theta - 1) \quad (7)$$

我们把以上求得的体应力和体应变相比

$$\frac{\sigma}{\Theta} = 3\lambda + 2\mu \quad (8)$$

对于某一给定的含水层来说,这个比值是一个常数.而对不同性质的含水层而言,这个比值是不同的.

Narasimhan 从另一个途径也推证出类同的结论^[9],即固体潮造成的平均主应力变化与固体潮产生的体应变有如下关系

$$\delta\sigma_m = k \cdot \Theta \quad (9)$$

这里 k 是含水层体积弹性模量的估计值.对于深部封闭含水层系统来说,一般取为 50GPa.

由式(2)和式(8)可以得到

$$\delta H_w = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta](3\lambda + 2\mu)} \cdot \delta\sigma \quad (10)$$

由此式可见,对于某一井孔含水层系统来说,由固体潮引起的承压水头的变化与引起它的潮汐平均主应力变化成正比.故可把(10)式写为

$$\delta H_w = k_w \delta\sigma \quad (11)$$

根据固体潮的理论,可以计算出处于不同纬度各井孔含水层的平均潮汐主应力的最大值 $\delta\sigma_{\max}$,由此引起的水井水位变化最大值 $\delta H_{w\max}$ 可以利用井孔水位观测资料计算出来,用这两个对应值可以从式(11)求出比例系数 k_w .当然,由于各井孔含水层的参数不同,所以其比例系数也不相同.

有了各井孔的比例系数 k_w ,就可以再利用(11)式来反演水位变化时对应的应力变化,也就是说,可以利用震时水井水位阶变来反演含水层的应力调整变化.

五、利用震时水位阶变资料反演秋田地震引起我国应力场的调整变化

日本秋田地震时,引起我国应力场的震时调整变化,这个变化又使得含水层内的孔隙压突然发生变化,从而引起井孔内水位突然变化,就是水井在记录到水振波的同时,也记录到震时水位阶变.

在秋田地震时,我国有 65 口水井记录到水位阶变,其中 52 口水井在 20 多个省、市、自治区的有关人员协助下计算出了它们的体应变固体潮系数.其计算方法一部分井孔是

用反复调和和分析的方法,先求出几个主要分潮波的体应变固体潮系数,然后取其各个分波系数的加权平均值为平均体应变固体潮系数^[14]。还有一部分是用田竹君给出的水位最大潮差与潮汐系数之间的关系式计算的(个人通信)。

在计算过程中,尽管理论模型计算是一维的,但并没有直接利用(10)式把各种理论参数代进去计算,为了避免因各个参数不准确造成误差,我们通过水井含水层对固体潮体应变的响应观测结果,计算出潮汐应力与水位的关系,然后再从水位阶变反演应力调整变化。计算结果见表2。表中“+”号表示应力增大,“-”号表示应力降低。

表2 各井孔含水层应力变化量

序号	井名	应力变化 (Pa)	序号	井名	应力变化 (Pa)	序号	井名	应力变化 (Pa)
1	蛟河	150	23	苏 01	-420	45	太原 2	-1300
2	八里卜		24	苏 02	-450	46	晋10-1	-9600
3	四平		25	苏 04	-16000	47	浦源	3300
4	本溪 1	7900	26	苏 05	-1800	48	龙岩	1700
5	本溪 2	1400	27	苏 07	620	49	永安	
6	丹东变电	3100	28	苏 12	-25000	50	柱坑	3400
7	丹东汤池	4700	29	苏 15	630	51	凤翔	490
8	营口周家	19000	30	苏 17	-550	52	石咀山	-940
9	岫岩 1	230	31	苏 21	-710	53	泸定	
10	温泉	1200	32	苏 22	-450	54	西昌	-1200
11	大灰厂		33	鲁 07	-930	55	盐边	-330
12	良乡		34	鲁 09	-1900	56	泸州	-400
13	高村	-420	35	鲁 14	-880	57	个旧	-4800
14	上古林 3	2800	36	鲁 15	-4900	58	曲靖	-320
15	山西水 2		37	鲁 10	-5800	59	楚雄	-190
16	万全		38	豫 40	-250	60	普洱	-5400
17	容 1	-87	39	豫 49	-890	61	保山	990
18	雄县	-140	40	泗县	4200	62	乌 2	
19	新泽	-140	41	蚌埠	1000	63	乌 10	
20	完县		42	临泉	-3000	64	乌 11	
21	兴济		43	马鞍山	2100	65	舒兰	450
22	永年	-500	44	含山	-2800			

六、讨 论

有人怀疑水井水位阶变可能是仪器造成的,认为浮标连接绳与记录滚筒之间在震时,因浮标快速运动产生打滑造成水位阶变。我们提出了一种对水位阶变是否是连接绳打滑引起的判别方法(地震报,1987年1月1日第二版),即从第二天的校测水位与记录水位是否相符来判别之。我们复查了部分井孔的观测记录资料,由上述判别方法分析了多次地震造成大于10mm的水位阶变,还没有发现一例是由于连接绳打滑引起的水位阶变。这可能是由于水震波振幅最大的是瑞雷波激起的,由于它引起的水位振动变化速度不快(周期一般在20秒左右),所以还不至于引起连接绳打滑。因而可以认为,在一般情况下震

时水位阶变不是由于仪器的连接绳打滑造成的。

秋田地震引起我国 52 个井孔应力调整变化分布如图 2 所示,这种调整变化并不是杂乱无章的,而是有一定的规律性的。从表 2 和图 2 可以看出,这种应力调整变化的量值在平面空间的分布不均匀,这可能是由于各井孔的水文地质构造不同造成的。其中令人注意的是,营口周家、苏 12 和苏 04 井孔的应力变化几乎比其它井孔要大一个数量级,说明了这几个井孔对应力应变的反应确实比较灵敏,很可能是由于这些井孔处在地震应力应变的“敏感点”上。而这些“敏感点”往往也是震前应力应变集中点,很可能对监测预报地震有很大帮助。

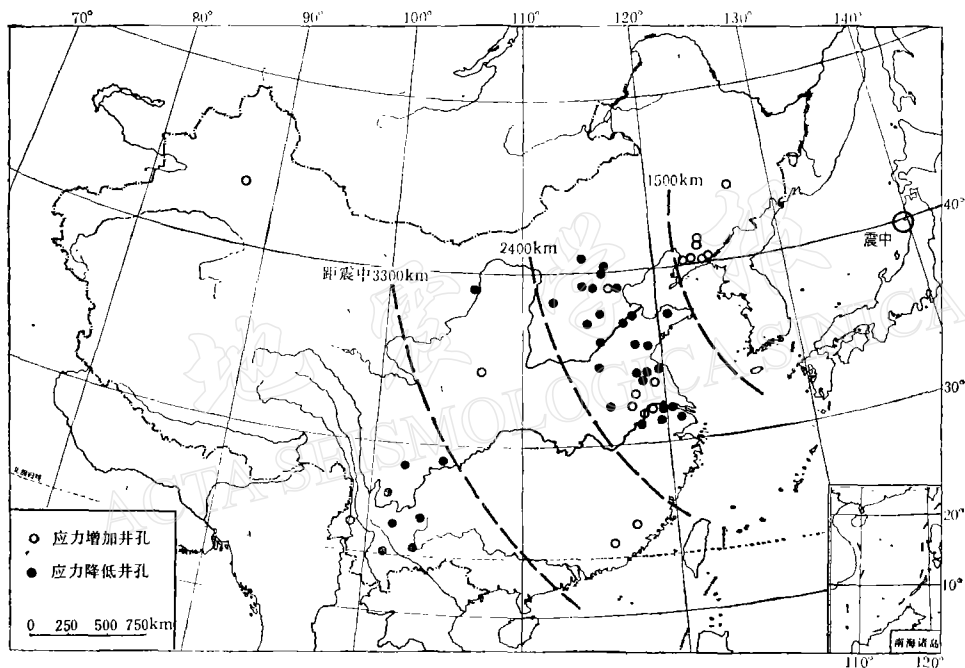


图 2 应力调整情况及井孔分布图

从图 2 和表 2 还可以看出,我国东北地区,因秋田地震引起的应力调整是应力普遍的增加,其中以营口周家井孔增加的最大(达 19000Pa)。华北和华东地区的应力调整主要是应力降低,其中以苏 10 井孔的应力降低值最大(达 25000Pa),在这个大区域内存在两个应力增加小区,一个是北京南面,有一个井孔应力增加;另一个在苏西皖东交界区,有五个井孔应力增加。华中和华东南地区的应力调整是应力增加。川滇地区的应力调整主要是应力降低。在新疆地区只有乌鲁木齐附近的一口井的资料,它的应力调整是应力增加。

以秋田地震震中为起点,沿西南方向贯穿中国大陆画一条直线,这条直线将依次经过应力增加区—应力降低区—应力增加区—应力降低区(见图 2),由震中向外呈现出应力增加和降低区交替出现的现象。这种交替现象的产生,可能是中国大陆地壳薄层在秋田地震时应力应变呈现交替现象的反映。地震力是构造应力长期缓慢积累的结果,较大地震的发生,其应力作用一般在空间的分布是较大尺度的。许绍燮从地壳为一层状结构的

基本事实出发,分析了地壳屈曲时应力分布规律,指出应力的方向及大小象正弦曲线一样交替出现^[11-12]。这和本文反演的结果有些类似。

目前纳入国家地震局井网的水井有 300 口,这些水井分布在全国各地。这不仅为探求地震前兆信息打下了广泛的基础,而且为利用震时水位阶变,通过水井固体潮效应反演震时大区域应力场的调整变化,开辟了广阔的前景。

七、小 结

1. 震时水井水位阶变可以通过水位校测来判别产生的原因,一般不是由仪器连接绳打滑造成的。

2. 日本秋田地震引起我国震时应力场的调整变化,不是杂乱无章的,而是有一定的规律的。在我国出现应力增加和降低区交替呈现,可能是与我国大陆应力分布有关,与地震力在地壳屈曲时的分布有关。

3. 利用水井水位阶变资料,通过水井的气压效应反演含水层应力变化的方法,比文献[3]的单纯理论方法更接近了实际情况。通过水井的体应变固体潮效应,比气压效应又改进了一步。因为气压效应只反映了含水层垂直向单向压缩的性质,而体应变固体潮效应反映了体应变(三维的)的性质,所以更加接近实际情况,反演结果的误差最小。

4. 利用震时水井水位阶变反演震时大区域应力场的调整变化,是一个简单易行的新方法。尽管它只是对应力变化做出量级的估计,但做为一种估算应力场的新方法,具有一定的研究参考价值,因为能定量地反演震时大区域应力场调整变化的方法还不多。

感谢顾功叙教授审阅了本文初稿并提出了宝贵意见,感谢卓明葆、董守玉、冯运才、刘宝恒、万登堡、王道、钱太仲、李正中、韩兆双、单修政、庄光国等同志对本工作热情地支持帮助并提供有关井孔的数据资料。

参 考 文 献

- [1] Johnson, A. G., Kovach, R. L., Nur, A., 1974. Fluid pressure variations and fault creep in central California. *Tectonophysics*, **23**, 257—266.
- [2] 汪成民、罗光伟、石锡钟, 1981. 地震前后地下水位异常动态与岩体裂隙演变. 地震科学研究, **4**: 1—7.
- [3] 李永善, 1979. 构造应力引起地下水位变化的主要特征. 西北地震学报, **1**, 1, 16—22.
- [4] Bredehoeft, J. D., 1967. Response of well-aquifer systems to earth tides. *J. Geophys. Res.*, **72**, 12, 3075—3087.
- [5] Narasimhan, T. N., Kanehiro, B. Y. and Witherspoon, P. A. 1984. Interpretation of earth tide response of three deep, confined aquifers. *J. Geophys. Res.*, **89**, B3, 1913—1924.
- [6] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1986. 气压对水井水位观测的影响. 地震, **1**: 42—46.
- [7] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1986. 水井水位的降水荷载效应. 地震学报, **8**, 增刊, 101—110.
- [8] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1986. 体膨胀固体潮对水井水位观测的影响. 地震研究, **4**, 465—472.
- [9] 张国民、杨军, 1983. 潮汐现象和地震前兆观测. 地震, **1**: 1—5.
- [10] 李方全、刘光勋, 1986. 地应力测量、地壳上部应力状态与地震. 中国地震, **2**, 1, 50—55.
- [11] 许绍燮, 1984. 地震活动性图象述评. 大陆地震活动和地震预报国际学术讨论会论文集, **3**—30. 地震出版社.
- [12] 苏刚、许绍燮, 1985. 地震前兆现象与地壳屈曲. 地震研究, **8**, 565—575.
- [13] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 1988. 一种估算地震引起应力场调整的新方法. 地震, **3**: 19—27.
- [14] 张昭栋、王宝银、冯运才、丁仁杰、李正中、刘宝恒、田竹君, 1988. 井水位固体潮分析. 地震监测与预报方法整理成果汇编, 地下水分册, 186—189. 地震出版社.

ADJUSTMENT VARIATION OF STRESS FIELD IN CHINA WITH THE AKITA EARTHQUAKE IN JAPAN IN 1983

ZHANG ZHAODONG

(Seismological Bureau of Shandong Province)

ZHENG JINHAN

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

FENG CHUGANG

(Shanghai Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper the quantitative relationship between water head in a model of horizontal multilayer aquifer and stress in aquifer has been deduced. Based on the observational data of co-seismic step variations of water level at 52 wells at the time of the Akita earthquake, Japan, the adjustment variation of co-seismic stress field in China has been calculated by means of the effect of bulk strain tide on water level in wells. The probable origin that areas of stress increment alternate with areas of stress decrement during the stress adjustment in China has also been discussed.