京都市近傍の地震前後の 地殻のひずみの観測

京都大学理学部地球物理学教室 小 沢 泉 夫

(昭和 41 年 7 月 18 日受理)

On the Observations of the Crustal Strains before and after the Earthquake near the City of Kyoto

Izuo OZAWA

Department of Geophysics, Kyoto University

(Received July 18, 1966)

The continuous records of the crustal deformations have been got with extensometers, horizontal pendulum type tiltmeters and water tube tiltmeter at Osakayama Observatory before and after the earthquake near the city of Kyoto. The seismic intensity was 3 (rather strong), and its epicentral distance was 12.7 km.

In this paper, using the abrupt changes of the strains in the time of the earthquake, we calculate the radius of the earthquake volume, the total change of the elastic energy and the seismic magnitude. The elastic afterworking of the earthquake region has been observed with the high-sensitive and high speed's recording extensometers. According to the record, the relaxation time of the afterworking is 57 minutes, and then the solid viscosity in the seismic area is esteemed as 10^{14} c.g.s..

§ 1. 序

昭和 41 年 3 月 10 日, 逢坂山観測所では震度 3 の地震を感じた. この地震の震央距離は 12.7 km で, この震央附近ではその前後数日の間に数回の有感地震が起こった. 同年 3 月上旬は降雨も多く, 地殻のひずみの観測曲線には, 降雨の影響と思われる経日変化が大きく現われ, 地震前後の異常変化を研究するのに 不利な状況にあつた. しかしこの地震の時にも震度の大きい, あるいは規模の大きい地震の時現われる組織的な突然変化 (Ozawa, I. (1965 a)) が明瞭に観測され, さらに高感度, 高速度記録のひずみ曲線には, 突然変化に続いて明瞭な塑性的変化が観測された.

§ 2. 地震の時の変化

この地震の発震時は昭和 41 年 3 月 10 日 12 時 48 分頃で, その震央は東経 135.8 度, 北緯 35.1 度, 京都市の北東部, 坂原附近で震源の深さは約 10 km と発表されている. したがって

昭和 41 年 5 月 26 日 地震学会で発表

震央距離は 12.7 km, 震源距離は約 16 km である。震度は逢坂山で 3, この震央附近ではその後, 3 月 18 日 09 時 24 分頃に京都で震度 1, 同日 12 時 18 分頃, 震度 2 の地震があつた。逢坂山観測所は東経 135 度 51.5 分, 北緯 34 度 59.6 分に位し, 観測点は坑道の入口からは

Fig. 1.

Fig. 2.

遠いが、地表からの深さは最深 150 m で多量の降雨による影響は免れ得ないので、同一成分のひずみを、数 10 m から 100 m 余り離れた、2, 3 点で同時観測をして、局所的な影響を除くことに努めている (小沢泉夫, (1962)).

Fig. 1 は $N 38^{\circ} E-S 38^{\circ} W$ 方向の伸びを坑道の大津側入口から約 500 m の距離にある、H-59-B 型伸縮計 (Ozawa, I. (1965, b)) L_2 と約 420 m の距離にある、H-59-D 型伸縮計, L_4 と約 370 m の距離にある、佐々式伸縮計, W_1 とローラー型伸縮計, R_1 (Ozawa, I. (1961)) と約 320 m の距離にある H-59-B 型伸縮計, L_3 (1965 年 4 月よりこの地点に移転) とで観測

Fig. 3.

Photo. 1.

Table 1. The Abrupt Changes and Constants of the Instruments.

Component	Symbol	Type of Instruments	Sensitivity per mm.	Abrupt Change
N 38° E-S 38° W extension	L ₂	H-59-B	0.021×10^{-8}	0.30×10^{-1}
"	L ₄	H-59-D	0.089 "	1.05 "
"	L ₃	H-59-B	0.040 "	0.55 "
"	R ₁	Roller	1.34 "	0.94 "
"	W ₁	Sassa	1.20 "	0.53 "
N-S extension	N ₁	H-59-C	0.409 "	-0.24 "
E-W extension	E ₁	H-59-C	0.368 "	-0.48 "
"	E ₃	H-59-B	0.239 "	-0.86 "
Vertical extension	V ₃	V-59-B	0.663 "	- ?
"	V ₅	V-59-D	0.305 "	-3.42 "
W-tilt	A ₂	horizontal pendulum	0.1 "	≈0
N- "	B ₂	"	0.1 "	-0.08 "
W- "	A ₁	"	0.0075 "	-0.020 "
N- "	B ₁	"	0.0075 "	-0.002 "
W- "	A ₃	"	0.0073 "	-0.007 "
N- "	B ₃	"	0.0073 "	-0.007 "
N 38° E- "	Wt	Water-tube	0.002 "	-0.003 "

した地震前後のひずみ曲線を示す。記録速度は W_1 , R_1 は 1 日 4 cm, L_2 は 1 日 10 cm, L_3 は 1 日 32 cm, L_4 は 1 日 40 cm である。同様に Fig. 2 は E-W 方向の伸びを大津入口から 170 m の所にある, H-59-B 型伸縮計 E_3 で, 同じく 310 m の所にある H-59-C 型伸縮計, E_1 で観測した曲線, また E_1 と同じ場所で同型の伸縮計 N_1 で観測した N-S 方向の伸びと, 垂直方向の伸びを入口から約 140 m の所にある井戸で V-59-D 型伸縮計, V_5 で観測したものと, 入口から約 170 m の所で, V-59-B 型伸縮計, V_3 で観測した曲線を示している。 V_3 は垂直方向の伸びというよりは坑道の直径の縦方向の伸びに当る量であろう。Fig. 3 は大津入口から 100 m から 160 m の所にある水管傾斜計 (江頭庸夫, (1965)) の自記曲線を示し, これは上の方が N 38° E 方向の傾斜を示す。また, A_1 , B_1 は入口から約 370 m の所で観測した, それぞれ西および北方向の傾斜を, A_3 , B_3 は約 510 m の所のそれぞれの曲線を示す。

3 月上旬は 2 日から 8 日までの間に京都では 129 mm の降雨があつたので, 地震のあつた 10 日には, 所によつてその降雨の影響はなお大きく残っている時であつた。Fig. 2 が示すように, E_1 は降雨によつて生じた局所的縮みが 9 日午後から伸びに大きく回復している時で, E_3 は降雨の影響と思われる変化がまだ縮み方向に進行中で, この変化は 12 日から回復の伸びに転じた。しかし, 地震の時は E_1 , E_3 とともに突然の縮み変化を示した。この型の伸縮計は拡

大装置に水平振子を使っているので、地震動による振動加速度、土地の傾斜などの影響を考えなければならないが、この効果を検定するために、特に E_3 では拡大装置を測線の西端に、 E_3 では東端に取付けてあるので、地震動や、土地傾斜の影響ならば、記録される突然変化の方向は互に逆向きであるはずであるが、この場合同じ向きの突然変化が記録されているから、測線の方の縮みに相当するものを記録していることはまちがいない。なお E_1 曲線には午前 7 時頃急激な伸びの変化が見られるが、これは P-S 時約 25 秒の遠くの地震の時発生した模様で、この真偽は現在確認できていない。同じことは Fig. 1 の L_4 と L_2 および L_3 について、Fig. 2 の V_5 と V_3 についても言える。またこの階段状の突然変化は H-59, V-59 型特有のものでないことは、Fig. 1 の W_1, R_1 にも認められ、E-W および N-S 方向は縮み方向を示しているのに対して、N 38° E-S 39° W 方向はどれも突然の伸びの変化を示している。垂直成分 V_5 は地震の前後を通じて経日変化は小さく、地震の時約 3×10^{-8} の突然の縮み変化をしている。 V_3 は 10 日の正午頃まで急速な伸び変化を示しており地震の 2~3 時間前に記録紙からはずれたが、地震の時急激に縮んで、記録紙上に戻り、後 10 時間余り複雑な酔歩的变化をして、翌 11 日午前から急速な縮み方向に転じた。Fig. 3 の傾斜変化曲線にも同様に、水平振子型傾斜計では東南方向の突然傾斜を、水管傾斜計の記録からは西南側への突然傾斜が認められる。Table 1 にこれらの観測計器の感度と、これらで観測した突然変化の量を示す。

Table 1 からこの突然ひずみの成分を求めると、地表に原点をおき、 x 軸を南に、 y 軸を東に、 z 軸を上方に向けると、

$$e_{xx} = (-0.26 \pm 0.25) \times 10^{-8},$$

$$e_{yy} = (-0.67 \pm 0.14) \times 10^{-8},$$

$$e_{xy} = (4.66 \pm 0.71) \times 10^{-8},$$

$$e_{zz} = -0.34 \times 10^{-8}$$

主な水平ひずみ e_1, e_2 の大いさと方向は、

$$e_1 = (-2.81 \pm 0.39) \times 10^{-8}; 133^\circ \pm 2^\circ,$$

$$e_2 = (1.88 \pm 0.39) \times 10^{-8}; 43^\circ \pm 2^\circ$$

また水平最大剪断ひずみ $\phi_{\max}$ は、

$$\phi_{\max} = \pm(4.68 \pm 0.75) \times 10^{-8}$$

これらから、ひずみの方位角分布を求めて、Fig. 4 (a) に示す。中央の EW 軸から左は NE-SW 方向を、右は SE-NW 方向を、両端は NS 方向を示す、この図から震央方向では縮みが最大に近いことがわかる。また逢坂山は初動が引きの象限にある。震央方向の突然ひずみの伸縮と観測点の初動の押し、引きの関係は、大台ヶ原、北美濃、越前岬沖地震などと同じ関係

Fig. 4.

にあつた. Fig. 4 (b) に N 133° E, N 43° E 方向の突然ひずみの仰角分布を示す. 図中, 中央の z 軸は垂直方向のひずみで, 両側はそれぞれ N 133° E および N 43° E 方向の水平ひずみを示す.

次にこの突然ひずみを用いて, 地震体積の半径, 地震エネルギー, マグニチュードを求める (Ozawa, I. (1965 a)). 今単位体積当りの突然ひずみの弾性エネルギーを

$$E = 10^{12} |e|_{\text{mean}}^2 \text{ erg.}$$

ここに, $|e|_{\text{mean}}$ は水平方向の観測された突然ひずみの平均値で, 0.62×10^{-8} と求められるから,

$$E = 0.384 \times 10^{-4} \text{ erg./cm}^3$$

この地震の震源距離 r は 16km であるから,

$$E = k' r^{-4}$$

と考えると,

$$k' = 2.52 \times 10^{20} \text{ erg.} \cdot \text{cm}^4$$

$|e|_{\text{mean}}$ が地殻の破壊の極限值, 約 10^{-4} (Tusboi, C. (1965)) になる距離, すなわち地震体積の半径 r_0 は,

$$r_0 = 0.1^4 \sqrt{k'} = 120 \text{ m}$$

と求められ, 地震の全エネルギーは,

$$E_t = 4 \frac{2}{3} \pi r_0^3 H_0 = 2.5 \times 10^{17} \text{ erg.}$$

となる. ここに E_0 は 10^4 erg./cm^3 である. また, 地震のマグニチュード M から求められる, 地震動のエネルギー, E_M が E_t にほぼ等しいと考えると, Gutenberg-Richter の関係式 (1956)

$$\log_{10} E_M = 11.8 + 1.5M$$

を用いて, 逆に M を求めると,

$$M_t = 3.7$$

が得られる. 今, もし垂直ひずみ V_s が信頼できると考えて, $|e|_{\text{mean}} = 0.62 \times 10^{-8}$ の代りに 3×10^{-8} を用いると

$$E \approx 0.9 \times 10^{-8} \text{ erg./cm}^3,$$

$$k' \approx 5.9 \times 10^{21} \text{ erg.} \cdot \text{cm}^4,$$

$$r_0 \approx 280 \text{ m},$$

$$E_t \approx 3.2 \times 10^{18} \text{ erg.},$$

$$M_t \approx 4.5$$

が得られる.

§ 3. 地震後の変化

特に, 高感度で高速度記録観測を行なっている, L_4 , L_8 には地震時の突然変化に続いて塑性体の変形などによく見られる典型的な Afterworking 的变化が見られる. 今, 震源領域が Kelvin 固体として取扱いできるような状態にあると考えると, その弾性余効ひずみ ϵ_0 は

$$\epsilon_0 = \sigma_0 e^{-t/\tau/2G}$$

ここに, σ_0 は地震により解放された応力, τ は遅延時間, t は応力解放時からの経過時間, G

は剛性率, で与えられる. Fig. 1 の L_4 の曲線から遅延時間として, 57 分 (3.42×10^3 sec.) と見積り, 震源領域の剛性率として, $G \approx 10^{11}$ C.G.S. と見積ると,

$$\tau = \eta/G$$

の関係から, 固体粘性率 η は,

$$\eta \approx 10^{14} \text{ C.G.S.}$$

が得られる.

この弾性余効曲線については計測器自体の影響も考えなければならないが, この日常観測は高感度のために, 記録の取替毎に調整を行なうのが普通であるが, Photo. 1 でわかるように, その影響はほとんど認められない. また機械のいろいろな部分, たとえば定尺の支持方法の改修などを行なった後でもその余効の遅延時間は大抵は 10 分以内, 最長 10 数分で (この場合の影響の多くは温度変化によると考えている) 約 1 時間にも及ぶことはなかつた. したがってこの余効の原因は地殻にあると考えるのが妥当である.

§ 4. 結 び

昭和 41 年 3 月 10 日, 京都市東北部に起こつた顕著地震のとき, 逢坂山観測所で突然ひずみを観測した. 当日は 3 月上旬の多量の降水のため局所的な変化が大きい所があつたが, 地震のとき現われた突然ひずみは, 各成分ごとに観測場所は違つても, その伸縮方向は同一であつた. これらの突然ひずみから, そのひずみの方位角および伏角分布を求めた. 逢坂山は初動“引き”の象限にあつたが, 震央方向は突然ひずみ最大の方に近かつた. この関係は越前岬沖地震 (1963) などの場合と同様であつた.

このひずみからさらに, 地震体積の半径として 120 m ないし 280 m, 地震エネルギーとして 2.5×10^{17} erg. ないし 3.2×10^{18} erg., マグニチュードとして 3.7 ないし 4.5 を求めた.

また, 高感, 高速度記録の伸縮計の記録には弾性余効の変化が認められ, その遅延時間約 57 分から震源領域の固体粘性率として 10^{14} を求めた.

未筆ながら, この研究を発表するに当つて佐々憲三博士には貴重な議論をして頂いた. またこの研究の計算の一部は木村千恵嬢に検算して頂き, また地震, 降雨などに関する資料は京都気象台から頂いた. ここにこれらの方々から心から御礼申し上げます.

文 献

- 江頭庸夫, 1965, 自記水管傾斜計, 京都大学防災研究所年報, 8, 59~69.
 Gutenberg, B. and Richter, C. F. 1956, The Energy of Earthquakes. Journal of Geological Society of London, 112, 1~14.

- 小沢泉夫, 1961, 棒型伸縮計と線型伸縮計による比較観測, 測地学会誌, **7**, 1~6.
- 小沢泉夫, 1962, 地殻変動の近距離多点観測 (逢坂山), 地震 **2**, **15**, 157~168.
- Ozawa, I. 1965 a, On the Observations of the Abrupt Change of the Elastic Energy in the Crust in Remarkable Earthquakes. Special Contributions Geophysical Institute, Kyoto University, **5**, 125~137.
- Ozawa, I. 1965 b, On the Extensometer Whose Magnifier is a Zöllner Suspension Type Tiltmeter, and the Observation of the Earth's Strain by Means of the Instruments. Annali di Geofisica, **18**, 263~278.
- Tsuboi, C. 1956, Earthquake Energy, Earthquake Volume, After-Shock Area, and Strength of the Earth's Crust, J. Phys. Earth, **4**, 63~66.