

荷重変化にともなう土地のひずみ・傾斜の観測

高田 理夫・竹本 修三・吉田 登

ON THE OBSERVATION OF GROUND-STRAIN AND GROUND-TILT CAUSED BY A SURFACE LOAD CHANGE

By *Michio* TAKADA, *Shuzo* TAKEMOTO, *Noboru* YOSHIDA

Synopsis

For the purpose of studying the deformation of foundation bed, the observations of ground-strain and ground-tilt using the extensometers and tiltmeters were carried out in under-ground galleries. By observing ground-strain and -tilt, some remarkable variations were observed which seemed to be the effects of change of the surface load due to the removal works of soil mass in the neighbourhood of these galleries.

It was tried to compare these observed data with the theoretical data obtained by use of Boussinesq's solution under various assumptions.

As a result, the observed data almost agree with the theoretically calculated data in respect of ground-tilt and the vertical component of ground-strain but disagree in respect of the horizontal components of ground-strain.

1. 緒 言

地下数十メートルのところにある観測坑道内に、伸縮計、傾斜計を設置し、地盤変動観測を約一年間にわたって行なった。この観測期間の終り近く、観測室上部付近の山腹の土砂を削り取るという土木工事が始められたが、この荷重変化の影響と思われる顕著な伸縮・傾斜変化が観測された。

表面荷重変化に伴う伸縮、傾斜変化が観測された例は数多く報告されているが、たとえば、海洋潮汐の負荷による伸縮、傾斜変化を論じたものとして、高橋¹⁾、萩原他²⁾など、またチリ地震の際の津波の負荷によるものとして、田中他³⁾、台風の際の高波によるものとして、W. Major 他⁴⁾、砂防ダムにたまった河水、土砂の負荷によるものとして、高田⁵⁾等の論文があるが、そのいずれもが、地殻を等方性半無限弾性体と考えその表面荷重による変形を弾性論の立場より、I. Boussinesq の与えた解によって取扱っている。

ここでもまず、地表の土砂を削り取ったことによる伸縮、傾斜変化を等方性半無限弾性体における Boussinesq の問題として考えてみた。その結果、傾斜変化については観測値と計算値がかなりよく似た傾向を示しているのに対して、伸縮変化については、垂直成分はともかく、水平成分は観測値と計算値が逆の傾向を示した。これらのことについての考察を行なってみた。

2. 観測所及び観測計器

観測が行なわれたのは敦賀半島の北部、福井県三方郡美浜町である。地震探査、ボーリングなどにより得られた付近の地下構造は、先に吉川他⁶⁾によって発表されているが、Fig. 1 に示すように約2メートルの表土の下、15メートルの厚さの真砂、その下に12メートルの厚さで風化花崗岩層が続き、さらにその下に花崗岩よりなる層がある。

観測計器を設置した横坑は地表下40メートルの花崗岩層の中にあり、この付近の花崗岩体は $N60^{\circ}E$ 方向に節理が発達している。また、北側の伸縮計を置いたほぼ中央付近、Fig. 5 で“F”で示したところに巾約30cmの粘土を夾んだ破碎帯が坑道を横切っている。

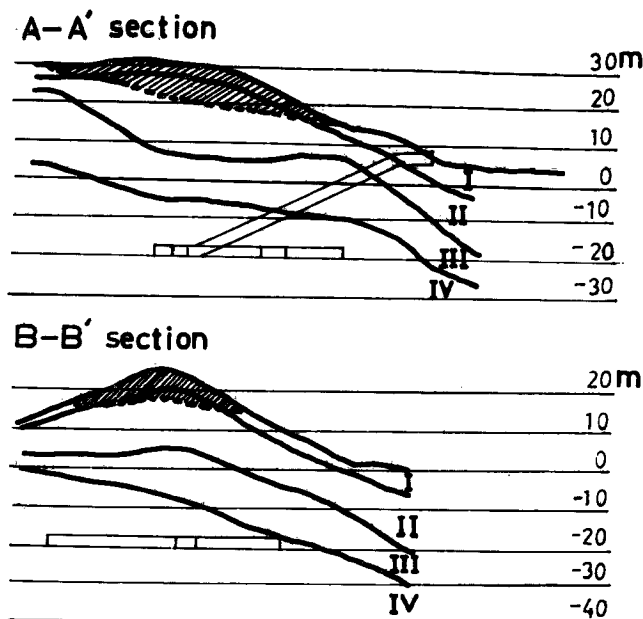


Fig. 1. Outline of geological structure in the neighbourhood of the observing stations and removal zone of soil mass. (after S. Yoshkaawa et al.)

I: Top soil, II: Granitic weatherring soil,
III: Granite (weathered), IV: Granite.

土砂を削り始めた7月15日から観測を終了した8月18日までに運び去られた土の量を Fig. 1 中に斜線で示した。(Fig. 6 参照)

観測に用いた計器は Super-Invar-Bar 伸縮計, 水平振子型傾斜計, 水管傾斜計であるが, 水管傾斜計については, 工事が始まると水面の擾乱が大きく, 今回の解析には使用しなかった。伸縮計, 水平振子型傾斜計の配置を, Fig. 2 に, また計器感度を Table 1 に示す。

Table 1 Sensitivity of observing instruments.

Extensometer		Tiltmeter	
S-X-5	$2.7 \times 10^{-8}/\text{mm}$	S-A	$1.9 \times 10^{-2''}/\text{mm}$
S-X-10	$1.6 \times 10^{-8}/\text{mm}$	S-B	$1.7 \times 10^{-2''}/\text{mm}$
S-Y	$5.7 \times 10^{-8}/\text{mm}$	N-A	$1.7 \times 10^{-2''}/\text{mm}$
S-Z	$6.0 \times 10^{-8}/\text{mm}$	N-B	$2.2 \times 10^{-2''}/\text{mm}$
N-X-4	$2.1 \times 10^{-8}/\text{mm}$		
N-X-6	$2.8 \times 10^{-8}/\text{mm}$		
N-X-10	$1.3 \times 10^{-8}/\text{mm}$		
N-Y	$45.8 \times 10^{-8}/\text{mm}$		
N-Z	$12.8 \times 10^{-8}/\text{mm}$		

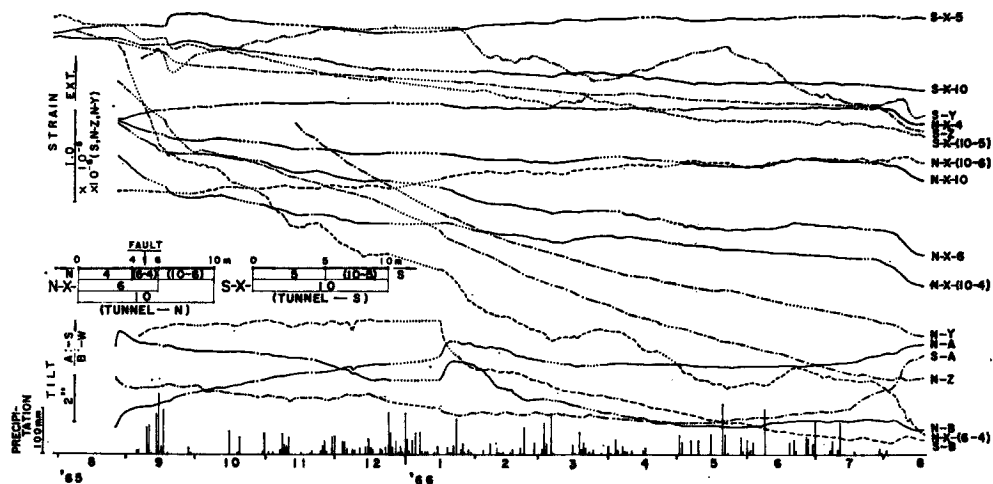


Fig. 3 Variations of ground-strain and ground-tilt.

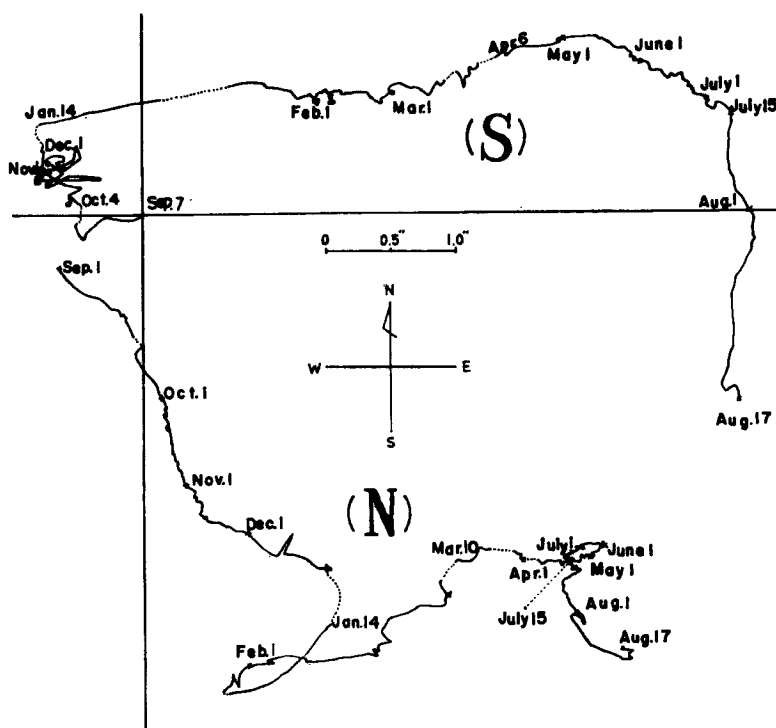


Fig. 4. Vector diagrams of ground-tilt.

る量は①点の傾斜計についてはS45°W方向に1.42'', ⑤点についてはS17°W方向に2.34'', となった。(Fig. 2 参照)

伸縮計については土砂を取り始めた直後には目立った変化は見られず, 8月5日になって急激な変化があらわれはじめた。その傾向のまま8月13日まで続き, その後18日の観測終了まではやや落ちついてきている。

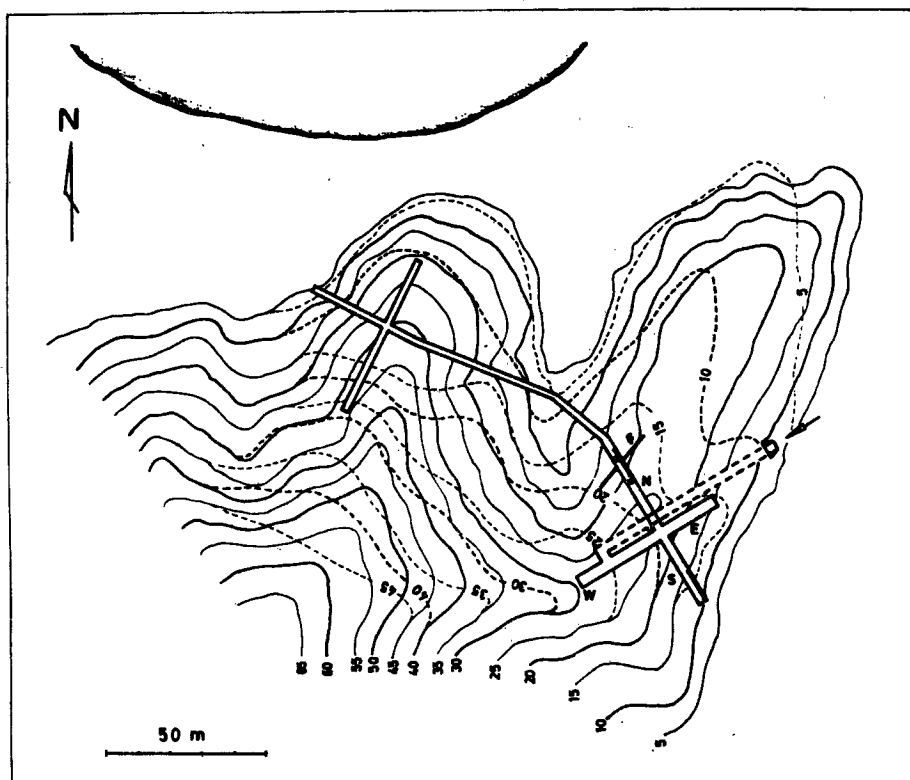


Fig. 5 Contour map in the neighbourhood of the observing room.
Solid line: before the removal works,
Dotted line: after the removal works.

Table 2 に 7 月 15 日～8 月 5 日, 8 月 5 日～8 月 13 日, 8 月 13 日～8 月 18 日及びこの全期間 7 月 15 日～8 月 18 日までの間の伸縮, 傾斜量の観測値とこの観測値から secular な変化分を引きさった補正值を示す。

その結果, 土砂を削り取ったことにより, 伸縮変化の水平成分は北坑では 10^{-6} , 南坑では 10^{-7} 程度の“縮み”の変化を示している。垂直成分については北坑は secular 分を引くと 10^{-5} 程度の“伸び”を示し, 南坑は同程度の“縮み”を示すが, 南坑の垂直成分は 8 月にはいつても何回も記録に不連続なトビが見られ, 真の伸縮変化を示しているとは思えないので, 一応解析から除外することにした。坑道と直角な向きの水平成分については北坑は, 荷重変化により 10^{-8} の“縮み”を示すが, 南坑は secular な変化量がはっきりわからないので, 荷重変化の影響項のみをとり出すことができなかった。

4. 等方性半無限弾性体の表面荷重による変形としての取扱い

前節で述べたように 7 月 15 日頃からの伸縮量, 傾斜量の異常な変化は排土によるものと考えられる。そこでまず簡単なモデルを考え, 地盤を等方性半無限弾性体と仮定し, その表面にかかっていた荷重がとりさられたことによる変形を求めることにする。

いま, 等方性半無限弾性体の表面に P なる荷重が働いていたものとし, その下向きを正にとった垂直成分を P_1 水平力の x 成分及び y 成分をそれぞれ P_2, P_3 とする。そこで, この P なる荷重が除去された場合, 各成分の減少量は, 排土面の傾むき $\partial h / \partial x, \partial h / \partial y$ を考慮すれば次のようにあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} -P_1 &= -\frac{\rho g \Delta h}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \\ -P_2 &= -\frac{\rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial x}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \\ -P_3 &= -\frac{\rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

但し、 ρ は地表の土砂の密度、 g は重力の加速度である。ここで $(\partial h/\partial x)^2$, $(\partial h/\partial y)^2$ が省略可能 (Fig. 2 から $\partial h/\partial x$, $\partial h/\partial y$ が小さいことがわかるから) であれば、(1) は、

$$-P_1 = -\rho g \Delta h, \quad -P_2 = \rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial x}, \quad -P_3 = \rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial y} \dots\dots\dots (2)$$

と書ける。

等方性半無限弾性体の表面の原点に $-P_1$, $-P_2$, $-P_3$ が働いた時の変位にそれぞれ 1, 2 及び 3 というサフィックスをつけると変位は弾性論により次のように与えられる。ここに u, v 及び w はそれぞれ x, y 及び z 方向の変位である。

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{zx}{R^3} + \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{x}{R(R+z)} \\ v_1 &= -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{zy}{R^3} + \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{y}{R(R+z)} \\ w_1 &= -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{z^2}{R^3} - \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{1}{R} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{x^2}{R^3} \right\} - \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{1}{R+z} - \frac{x^2}{R(R+z)^2} \right\} \\ v_2 &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{xy}{R^3} + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{xy}{R(R+z)^2} \\ w_2 &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{zx}{R^3} - \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{x}{R(R+z)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= -\frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{xy}{R^3} + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{xy}{R(R+z)^2} \\ v_3 &= -\frac{P_3}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{y^2}{R^3} \right\} - \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{1}{R+z} - \frac{y^2}{R(R+z)^2} \right\} \\ w_3 &= -\frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{yz}{R^3} - \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{y}{R(R+z)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

但し $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$

上式より各成分の直線ひずみ、傾斜を計算すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial x} &= -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{z(R^2 - 3x^2)}{R^5} + \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\} \\ \frac{\partial v_1}{\partial y} &= -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{z(R^2 - 3y^2)}{R^5} + \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{1}{R(R+z)} - \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\} \\ \frac{\partial w_1}{\partial z} &= -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{2zR^2 - 3z^3}{R^5} + \frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \frac{z}{R^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6) \cdot$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial x} &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{x(R^2-3x^2)}{R^5} + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{3x}{R(R+z)^2} - \frac{x^2(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right\} \\ \frac{\partial v_2}{\partial y} &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{x(R^2-3y^2)}{R^5} + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{x}{R(R+z)^2} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right\} \\ \frac{\partial w_2}{\partial z} &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{x(R^2-3z^2)}{R^5} + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{x}{R^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_3}{\partial x} &= -\frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{y(R^2-3x^2)}{R^5} + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{y}{R(R+z)^2} - \frac{yx^2(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right\} \\ \frac{\partial v_3}{\partial y} &= -\frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{y(R^2-3y^2)}{R^5} + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{3y}{R(R+z)^2} - \frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right\} \\ \frac{\partial w_3}{\partial z} &= -\frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{y(R^2-3z^2)}{R^5} + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{y}{R^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w_1}{\partial x} &= \frac{3P_1}{4\pi\mu} \frac{z^2x}{R^5} + \frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \frac{x}{R^3} \\ \frac{\partial w_1}{\partial y} &= \frac{3P_1}{4\pi\mu} \frac{z^2y}{R^5} + \frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \frac{y}{R^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w_2}{\partial x} &= -\frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{z(R^2-3x^2)}{R^5} - \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\} \\ \frac{\partial w_2}{\partial y} &= \frac{3P_2}{4\pi\mu} \frac{xyz}{R^5} + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w_3}{\partial x} &= \frac{3P_3}{4\pi\mu} \frac{xyz}{R^5} + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \\ \frac{\partial w_3}{\partial y} &= -\frac{3P_3}{4\pi\mu} \frac{z(R^2-3y^2)}{R^5} - \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \left\{ \frac{1}{R(R+z)} - \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

かくして表面の一点に作用していた力を取り除かれた時の直線ひずみ、傾斜変化が計算できるからこれらを実際の地形について積分して、観測点におけるそれらの量を求めればよい。

ここでは実際の地形を10メートル四方のメッシュに分け、その各々のメッシュの中で荷重が中央の一点に作用したものととしてそれぞれの成分の summation を求めた。

なお、諸常数のうち取り除かれた表層の土砂の密度を1.8と仮定し、地盤の弾性定数 λ , μ は吉川他⁵⁾ によって行なわれた弾性波調査で求められたP波、S波速度を用い、さらに花崗岩の密度を2.4とおくことにより次のように定めた。

$$\lambda = 2.3 \times 10^{11}, \quad \mu = 4.9 \times 10^{10}$$

これによって得られた計算結果を Table 3 に示す。但し、直線ひずみの正は“伸び”をあらわす。また x の正方向は坑道方向 (E63°S) に平行に北坑から南坑にむけてとる。 y はそれと直角方向 (N63°E) を示す。

Table 3 The values of strain and tilting of which obtained by theoretical method.

Linear strain	Tilt
N	①
$\frac{\partial u}{\partial x} = 8.2 \times 10^{-8}$	$\frac{\partial w}{\partial x} = 16.4 \times 10^{-2}''$
$\frac{\partial v}{\partial y} = 34.7 \quad "$	$\frac{\partial w}{\partial y} = 19.8 \quad "$
$\frac{\partial w}{\partial z} = 31.1 \quad "$	(0.26'', S24°W)

S	⑤
$\frac{\partial u}{\partial x} = 12.6 \times 10^{-8}$	$\frac{\partial w}{\partial x} = 19.9 \times 10^{-2}$
$\frac{\partial v}{\partial y} = 18.0 \quad //$	$\frac{dw}{dy} = 16.7 \quad //$
$\frac{\partial w}{\partial z} = 3.6 \quad //$	(0.26'', S13°W)

8. 結果の吟味

得られた理論的な計算値と観測値を比べてみると、傾斜変化については、Fig. 2の中にそれぞれの大きさと方向を示してあるが、⑩点については観測値が S45°W 方向に1.42秒角傾斜したのに対して、計算値は S24°W 方向に0.26秒角となり、一方、⑤点では、観測値が S17°W 方向に2.34秒角であるのに対して、計算値は S13°W 方向に0.26秒角となった。従って観測値の方が計算値より大きい、方向についてはかなりよく一致している。量的には λ, μ の値をもっと小さいと仮定すれば理論的な計算値は大きくなり、観測値に近くなる。

一方、伸縮計については、記録の悪い S—Z 成分と、差し引くべき secular な量のはっきりしない S—Y 成分とは除外し、残りの各成分について観測値と計算値を比べてみる。

Table 2 及び Table 3 からわかるように、計算値の方は直線ひずみの x, y 及び z の全ての成分が伸びとなっているが、観測値の方は N—Z だけが“伸び”の変化を示し、他は全て“縮み”の変化を示している。なお、坑道方向を向いた水平成分の変化についてさらに詳しくながめてみると、同じ“縮み”の変化にしても、S—X—5, S—X—10, S—X—(10~5), N—X—(10~6) の破砕帯の南側にある成分については secular な変化量と見わけがつきにくい程小さな量であるのに対して、N—X—4, N—X—6, N—X—10, N—X—(6~4) など破砕帯を含む成分と破砕帯の北側にある成分は secular な変化量を引いても、なおはっきりと“縮み”とわかる変化を示している。このことは、例えばこの現場のように破砕帯が坑道を横切っており、節理が発達しているようなところでは、地盤を等方性半無限弾性体として取り扱うのが無理であり、特に水平成分の変化については局所的な異方性が大きくきいてくるものと思われる。いずれ稿を改めて、この種の問題を別の角度からながめてみたい。

なお、本観測を行なうにあたって、終始御助言と御鞭撻をいただいた京都大学防災研究所の吉川宗治教授に感謝の意を表します。また、関西電力 K. K. の宮越、安福両氏にも、なみなみならぬお世話になった。ここに厚く御礼申し上げます。

終りに、この報告における計算は東京大学大型計算機センターを通じて行なったものであることを付記致します。

参 考 文 献

- 1) R. Takahashi: Tilting Motion of the Earth Crust Caused by Tidal Loading, Bull. Earthq. Res. Inst. Vol. 6, 1929, pp. 85—108.
- 2) T. Hagiwara, T. Rikitake, K. Kasahara, and J. Yamada: Observations of the Deformation of the Earth's Surface at Aburatsubo, Miura Peninsula Part III, Bull. Earthq. Res. Inst. Vol. 27, 1949, pp. 39—44.
- 3) 田中豊, 田中寅夫: チリ地震津波による土地の傾斜及び伸縮変化, 京都大学防災研究所年報, 第4号, 1961, pp. 45—60
- 4) Maurice W. Major, George H. Sutton, Jack Oliver, and Robert Metsger: On Elastic Strain of the Earth in the Period Range 5 Seconds to 100 Hours, Bull. Seis. Soc. Amer, Vol. 54, No. 1, 1964, pp. 295—346.

- 5) 高田理夫：砂防堰堤満水・貯砂による付近の歪について，
新砂防，Vol. 28, 1958, pp. 1—9.
- 6) 吉川宗治，島通保，入倉孝次郎：自然地震と人為加振による地盤の振動特性について，
京都大学防災研究所年報，第 9 号，1966, pp. 119—136.