

六甲断層破碎帯における地殻変動の連続観測（序報）

田中 豊・林 守孝・加藤 正明
小泉 誠・藤田 和夫

CONTINUOUS OBSERVATION OF CRUSTAL DEFORMATIONS IN A FRACTURE ZONE OF ROKKO FAULT SYSTEM (PRELIMINARY REPORT)

By Yutaka TANAKA, Moritaka HAYASHI, Masaaki KATO,
Makoto KOIZUMI and Kazuo HUZITA

Synopsis

For the purpose of detecting characteristics of fault movements and ground deformations in and nearby a fracture zone of an active fault, many kind of instruments were arranged systematically in tunnels crossed the Ootsuki fault. The main tunnel had been dug for a drainage work at Tsurukabuto Incline leading into the Rokko tunnel of New-Sanyo Line.

Changes of linear strain are continuously observed in the three azimuths at both sides of the fault and across it. Further, shearmeters and water-tube tiltmeters will be settled all over the tunnels. Thus, strain and tilt distributions, and their changes will be made clear in relation to the active fault.

1. 緒 言

国鉄新幹線六甲トンネルの構築工事のため、大阪新幹線工事局御影工事区（神戸市灘区）に鶴甲斜坑が掘削された。六甲山地は著名な断層地帯であり、難工事が予想されたが、斜坑坑口から260m掘進した地点で、危惧された通り大月断層に遭遇し、崩壊と出水に見舞われた。そのため斜坑から水平に断層破碎帯に向け水抜き坑を作り、また薬液注入による凝固工法を用いようやくこれを突破した。この大月断層やそれに平行する五助橋、芦屋、甲陽などの六甲地域の断層群はいずれも活断層と目されており、御影工事区はもっとも著しい断層破碎地域である。これらの断層の運動や破碎帯の存在は、トンネルの覆工にも大きな被害を与えることが考えられ、断層の変位の定量的な測定と覆工に及ぼす影響の調査は、六甲トンネルに限らず、今後のトンネル工事や、地上、地中の構築物を対象とした災害予防の見地から、また一方断層運動と地震活動という、地震予知と震災防止の研究の面からもきわめて重要な問題である。大阪新幹線工事局もこれを重視し、大阪市立大学理学部に、「山陽新幹線六甲ずい道中に現われる新期断層の変位測定調査」を委託する運びとなった（1971年3月まで）。目的とされる断層の変位の定量的な測定には、解明されねばならぬ困難な基礎的問題が多数含まれており、しかも長期の観測を必要とするため、断層の運動のみならず、その近傍の地盤運動の観測を併わせて、斬新な計画と、綿密な準備の後、1970年6月、前記水抜き坑の一つで観測が開始された。その後1年余りで六甲トンネルは竣工したが、この間の観測により予想以上に興味深い現象が続出したため、今後少なくとも10年の観測継続に必要な便宜を工事局に依頼し、認められて観測坑の補強工事も1971年内に完了した。そのため観測は中断されたが、1972年8月より観測再開の予定である。国鉄の委託調査として発足した研究であるが、観測上必要な計器設備、とくに坑道の拡張と補強に、研究者側の意向を受入れて頂いた工事局ならびに鉄道技術研究所関係者御一同の御配慮に対し感謝の意を表する次第である。

2. 六甲地域の Neotectonics 概観

近畿北西部の第四紀地殻変動の研究、とくに活断層の地形学的地質学的調査が進むにつれて、中部地方も含めてこの地域に顕著な活断層が規則的に配列し、しかも系統的な動きの跡を示していることがわかってきた^{1), 2)}。山崎、三峠両断層は北西—南東系のとくに顕著な左ずれ断層であり、これに対して六甲地域の断層系は、東西性の特徴的な六甲断層なども存在するが、山崎断層系と共役な北東—南西系の断層が支配的で、五助橋、芦屋、甲陽断層などがほぼ平行に六甲山地の東部を走っている (Fig. 1 参照)。これらの断層は、圧縮による剪断面を境として、西方への傾動を伴った地塊の隆起運動により、最近の約30万年に数100 mにお

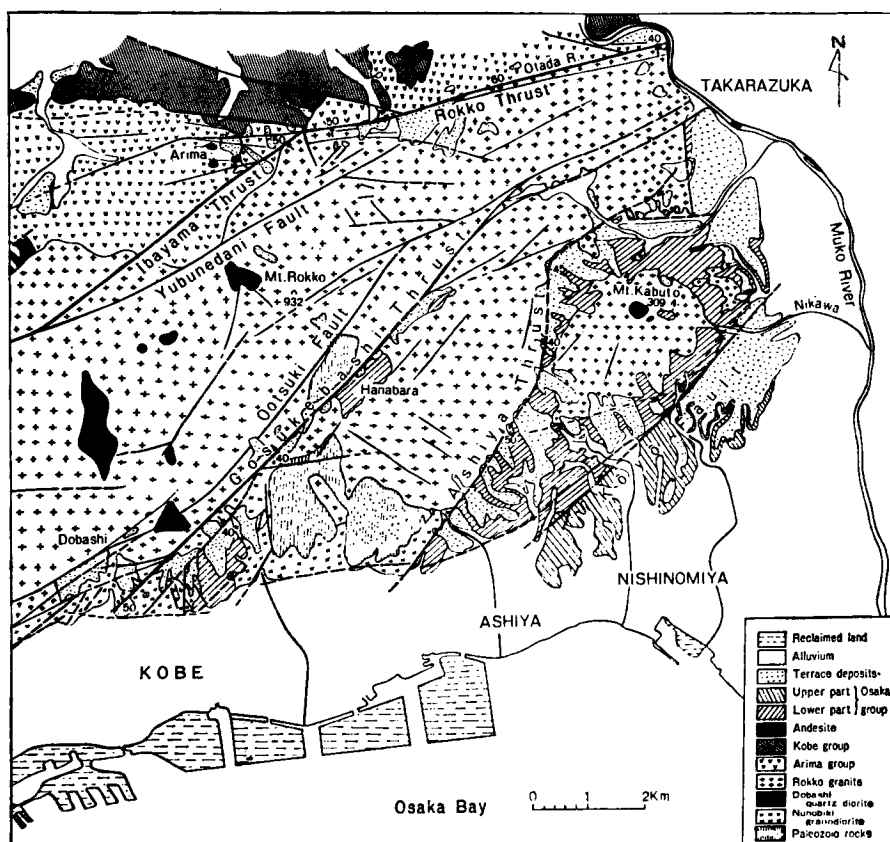


Fig. 1 Geologic map of the eastern part of the Rokko range. (after Huzita and Kasama) ▲ : Rokko observation station

よ鉛直ずれを生じた高角度の逆断層の性質を持ち、また同時に、幾つかの調査事例が示すように右横ずれの成分を含むものと考えられる。以上のような断層系の配列や運動から推論すれば、この地域の第四紀の構造運動は東西性の圧縮応力によって説明できる。一方、地震活動、とくに微小地震の発生は主としてこれら活断層付近に集中しており、発震機構からみて主応力はほぼ東西方向であると考えられていて⁴⁾、東西性の圧縮力の存在はこれらの事実を総合的によく説明できる。このようにこの地域の調査研究がますます進展するにつれて、いわゆる六甲変動^{1), 2)}は現在も続いており、むしろその活動度を増していると考えられるようになった。断層の調査では、比較的最近に動いた形跡を示す事実も多く、他方、市街地の調査による構造物破断の事例の分布をみれば、先にのべた断層群の各延長上にある推定断層線に集中度が高いということもわ

かってきて（津田景三）、これが直ちに活断層の動きを示す証拠ではないとしても、断層破砕帯付近での地盤の運動は、災害防止の面からも大いに注目をあびつつある。

今回連続観測を開始した大月断層は新しい地層を切った露頭や構築物の破断などの事例もあり、地形的にも新鮮な活断層であるが、先の顕著な五助橋断層とほぼ平行に走っており、その副断層と考えられる。断層面はほとんど鉛直に近く、鉛直ずれと同時に右横ずれ運動も期待されている。五助橋断層との距離はわずか500 m 位であり、さらにその南隣りには分岐断層である渦ヶ森断層も併走し、この付近の破砕度はとくに著しい。

3. 観 測 計 画

観測の目的意義を含めて観測の計画をのべる。大阪新幹線工事局から委託された調査内容は次の通りである。i) 断層をはさむ両側の地盤の相対的垂直・水平変位及び付近のひずみの分布測定 ii) 地山中の断層の挙動とそれがずい道覆工に及ぼす影響 iii) その他。これらは、トンネル工学上および保線上の問題また断層付近の地表・地山内の構築物の経年的変形と破断に対する保全のため、地震災害を含めて重要な問題である。一方断層の運動そのものは、地球物理学・構造地質学などの総合的課題である Neotectonics の上でも最近とくに焦点となっている分野である。いわゆる活断層というものが、かなり大きな地震の発生のときに動くのか。あるいは、近畿北西部では断層線上に微小地震が集中して発生し両者の関連性が大きいと考えられるがその活動期に動くのか、静穏期に動くのか。それともまた地震とは無関係に常に滑動しているのか。他の自然現象に関係しているのか。現在まったく動きが見られず単なる地盤変動の境界の役目を果しているにすぎないのか、それとも将来動く可能性があるのか。現在の移動量が過去の平均変位量に比較して増加しているのか、地震断層の変位量と比べてどうなのか。どのような応力分布あるいは時間的変化の様相を経て動くのか。まったく未解決の問題ばかりである。有名な San Andreas 断層の運動は、変位量が大きいので各種の測地測量のみならず現場における簡単な測量あるいは地表の計器測定でその動きがとらえられているが、これは大断層の特異例であって、日本では A 級の活断層でもそのような大きな動きはなく、現在の運動を知る手がかりとしては、数年前から各地で開始された Geodimeter による光波測量の結果があるのみで、測量回数も少ないのでまだ十分な成果は得られていない。今後が期待されるわけであるが、欠点は微細過程を知ることができない点である。

一方、目的のような連続観測を行うとしても、ここにも坑道、計器設置台の変形、計器の drift、気象擾乱など未解決の難問題があって、断層をまたいで両側に簡単に計器をとりつけてその変位を測定するだけでは、断層面での相対変位なのか、単なる歪であるのか、一義的には定まらない。これらの問題を解決すると同時に、今回は単に大月断層という特定の断層の変位を調査するというのではなく、他の類似の断層にも適用できるような普遍的な問題について少しでも解決の糸口を見出したいという趣旨で、かなり大がかりな観測計画を立てた。

観測内容は次の通りである。

- i) 断層の相対的変位の測定
- ii) 断層の両側および断層をまたいで変動諸量（歪、傾斜）の空間的分布とその時間的変化の測定
- iii) 断層の両側における歪主軸、最大傾斜の方向と量の差、およびその変化様式
- iv) 断層の両側における地球潮汐変化の差（地盤の弾性、ブロック運動、断層運動の影響などの検証）

以上はいずれも互に関連のあることでたとえば相対的変位としては、歪量、傾斜量などの空間的分布の中に不連続な変位と断定できる有意な差を見出すことが必要なのである。そのためには、伸縮計、水管傾斜計、ずれ歪計などの多数の計器を配置する必要があるが、とくに水管傾斜計は破砕帯の特徴をとらえるため多数の測定点を設けて、Potential 面に対する面変形としてとらえることを意図している。水管傾斜計の台を利用して、坑内で精密な各種測量も年1回程度行う予定である。計器は現在光学記録方式であるが、順次、差動トランスによるペン打点式記録方式に変える計画である。

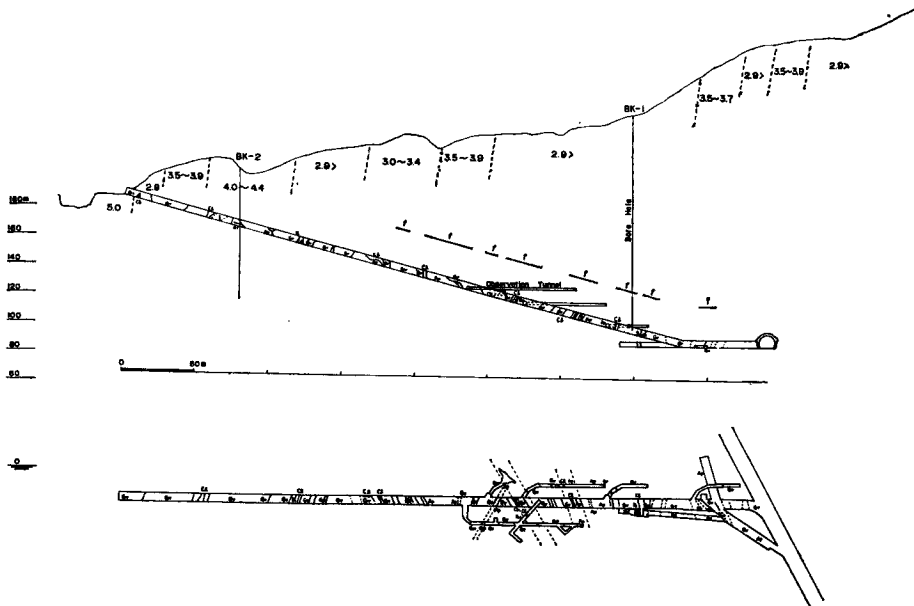


Fig. 3 Vertical and horizontal projection of the Tsurukabuto Incline and geological condition. Numerals indicate P-wave velocities.

5. 観測室の環境

i) 室内の気温・地下水温

この観測室の地表面からの深度を見てもわかるように室内温の日変化は認められない。予備観測中、斜坑内は本トンネル工事の各種機械の排気ガスで数度に及ぶ不規則な温度変化があり、風向はしばしば数時間の間に逆転していたが、この影響は観測坑の入口から 10 m 程度のところでおさまっている。坑内の気温の測定はバイメタルによる光学記録方式と気象用自記温度計で記録させている他、隔月程度に棒状温度計によって測定を行った。掘削工事の排気ガスのためか、観測坑内はやや高温で、Fig. 4 に見られるように奥半分の気温はほとんど変化しておらず、40 m について 0.6°C の勾配でほぼ安定している。これは、奥部に地下水の滲出がなくその影響を受けないこと、奥部の床面が中央部より 70 cm ほど高く空気の混合が悪いためと考えられる。一方、中央部より入口までの気温は上昇下降を繰り返しているようである。これは、滲出地下水温が 20°C 前後であるためその影響を受けて室温は水温の level まで下降しつつある一方、時によって斜坑の空気の流入があるためと想像される。工事完了後は斜坑坑口と坑底に扉がとりつけられ、いずれ水温の level (20°C 以下) まで下降して安定するものと考えられる。観測記録には外気温による日変化は認められない。年変化については現在のところ議論できない。おそらくないものと思われる。

ii) 降雨量と地下水量

Fig. 5 の上方に、御影工事区で測定された週間総雨量（棒線）と月総雨量（折線）を示す。Fig. 5 下図は、東の鍵状坑道の滴水を中央部に集めて雨量計で測定した結果であって、明瞭な年変化を示している。雨の影響は平均化されて 1, 2 カ月の遅れをもって地下水量の変化となってあらわれるようである。なお、伸縮・傾斜の記録には降雨の直接の擾乱は全くあらわれない。

地下水の滲出部分は Fig. 6 に示すが、中央の断層粘土層の北側は全く滲出がなく、床面の破碎物は湿気を含むのは当然として、水は全く存在しない。粘土層は完全に不透水層の役を果たしていて、南側が滞水層である。Fig. 3 に BK-1 と記されたものはボーリング坑で、ここで地下水位が測定されていた。工事開始直

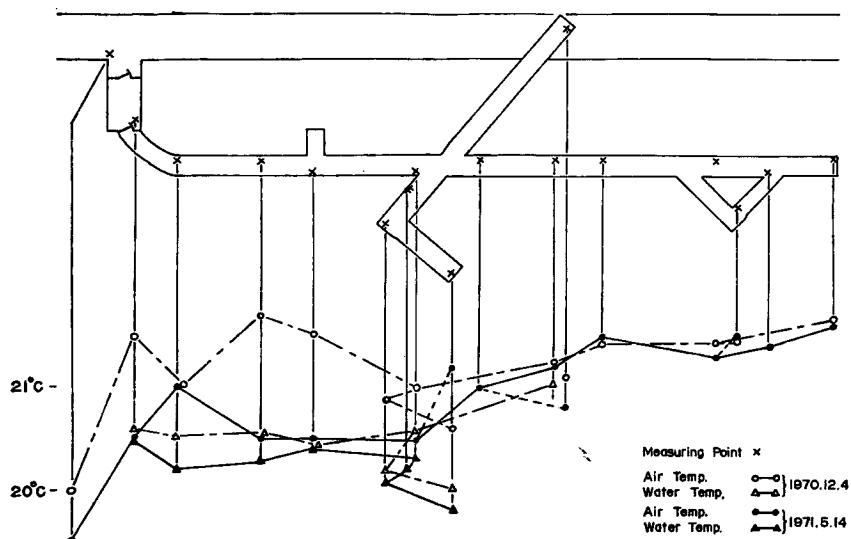


Fig. 4 Distribution of air and water temperatures in the observation tunnel.

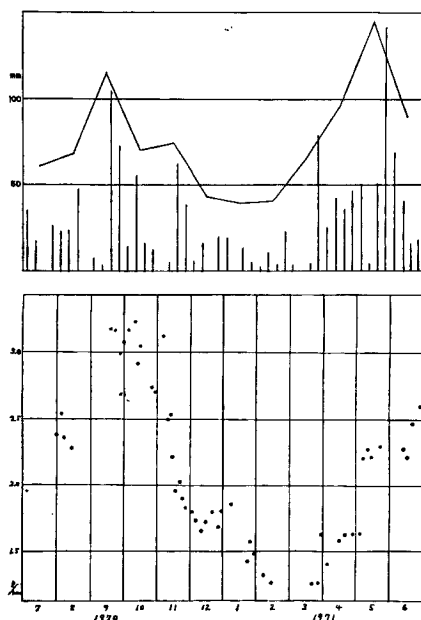


Fig. 5 Upper : precipitation per week and its seasonal change around the Tsurukabuto Incline.
Lower : annual change of amount of seeping water in the observation tunnel.

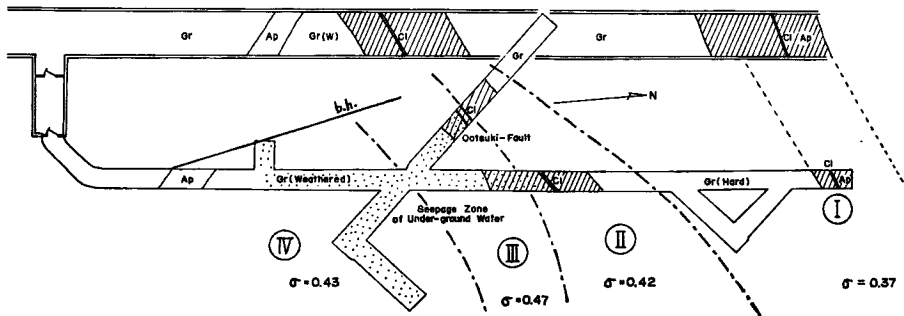


Fig. 6 Mechanical and geological situation of rocks around the observation tunnel.

後、水位は地表近くまでであったものが、出水のたびに低下し、現在では地表下 140 m、観測坑の下 25 m の level にまで下っている。現在断層の北盤の上下にどのような滞水層があるかは不明である。

坑内の地下水はさらにもう一カ所で測定されている。入口から 10 m 付近に掘削時の 60 mm ボーリング孔が残っており、水平に 25 m のびて断層近くの滞水層に達している (Fig. 6 の bore hole 参照)。現在残った Casing tube から水が流れ出しているが、これを 1 l の転倒升で受け滲出量を連続測定している。その結果にはかなり明瞭な半日周期に近い増減が見られ潮汐変化とも考えられる。これについては第一報でのべる。

iii) 岩盤の特性

記述は前後するが、観測の結果、断層の北側と南側とで地球潮汐の振巾と位相に異常な差違が見出された。このような現象は従来の常識ではとうてい考えられぬ程度のものであって、設置場所の特異性と考える以外にない。しかも、永年変化の異常と潮汐の異常、傾斜の異常と伸縮の異常に系統性があり、やはり、断層や地盤の異方性が考えられた。潮汐歪がどの程度断層の影響を受けるかは、今後の断層付近の歪の分布を調べる上でも必要であり、各伸縮計の設置場所の特徴をとらえておくことも重要である。

1971年7月、本トンネル工事完了を間近にひかえて補強工事を行うことになり、予備観測を中止して計器を取りはずすことにした。この機会に、京大地球物理学教室 狐崎長琅氏(現秋田大学)、竹内文朗氏、および同防災研究所地震動部門 後藤典俊氏に、坑内の地震探査による坑付近の地山の弾性波速度の分布の調査を依頼した。詳しくは狐崎等の測定報告⁵⁾があるのでそれを参照して頂きたい。測定結果から弾性常数を計算して Table 1 に示す。これによれば、弾性波速度は異常に小さく地表面に近い値であって、およそ4つの

Table 1 Results of seismic prospecting⁵⁾.

		V_p	V_s	σ	$\rho=2.5$	
					λ	μ
I	P	3.3 km/s	1.5 km/s	0.37	1.60×10^{11}	0.56×10^{11}
	R	2.7	1.2	0.38	1.10	0.36
	M	3.0	1.4	0.37	1.33	0.46
II	R	1.6	0.6	0.42	0.46	0.09
III		3.1	0.7	0.47	2.16	0.12
IV		3.1	1.1	0.43	1.80	0.30

P : parallel to the strike of fault

R : rectangular to the strike of fault

M: mean of P and R

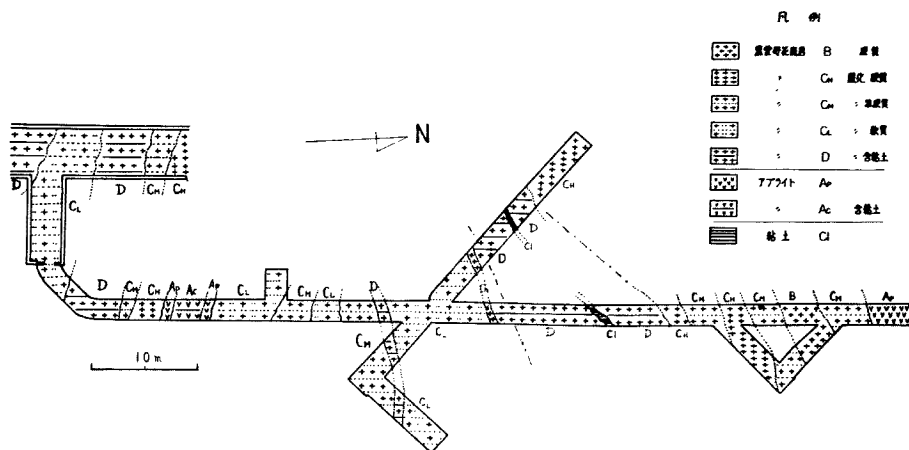


Fig. 7 Characteristics of rocks around the observation tunnel.

帯に分けられるとのことである。これをそれぞれ I, II, III, IV, 層とする (Fig. 6 参照)。この測定結果により、地球潮汐の振巾・位相のずれの解釈に定量的な推論を行えることになり、満足すべき結果を得た。これについては第一報でのべる。なお、参考までに坑内の地質調査 (熊谷組による) 結果を岩質の特性によって分類し編集したもの (上賀茂地学観測所, 東敏博技官作成) を, Fig. 7 にかかげる。特性の分類は田中⁶⁾によるものを用いた。なお, Fig. 3 には工事前に地表でなされた弾性波探査による縦波速度の分布が示されている。

6. 予 備 観 測

計器の設置は1970年6月初めに行い6月末から観測を開始した。設置した計器は全計画中の約半数である。計器の感度、測定方位などは Table 2 に示す。計器の記号のうち, E は伸縮計, T は傾斜計, B は Bow-

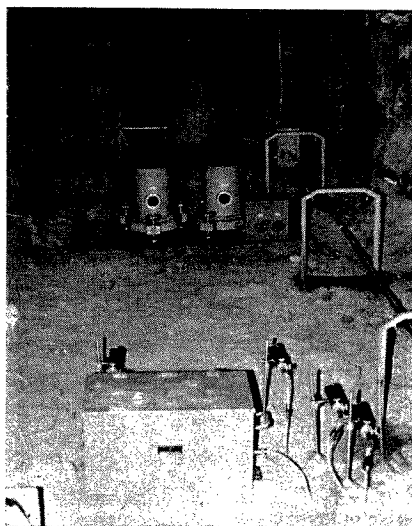


Photo. 1 Observational instruments in the tunnel.

Table 2 Observational instruments.

Extensometer	Azimuth	Type of Instrument	Length	Sensitivity
EBNE-10	N45°E	Bow-string	8 m	$0.64 \times 10^{-8}/\text{mm}$
ERNE-11	"	Roller	4	3.1
EBNW-10	N45°W	Bow-string	8	0.85
ERNW-11	"	Roller	4	3.6
EBN-20	N	Bow-string	12	0.33
ERN-21	"	Roller	4	1.8
ERN-22	"	"	8	1.1
ERN-31	"	"	4	3.0
ERN-30	"	"	8	1.5
ERN-40	"	"	8	1.5
ERN-41	"	"	4	3.9
EBNE-20	N45°E	Bow-string	8	1.36
ERNE-21	"	Roller	4	3.6
EBNW-20	N45°W	Bow-string	8	1.36
ERNW-21	"	Roller	4	3.3
EBN-60	N	Bow-string	12	0.49
Tiltmeter			Period	
TPSE-1	S45°E	Horizontal pendulum	30 sec	$0.01 \text{ } ^{\circ}/\text{mm}$
TPNE-1	N45°E	"	25	0.02
TPSE-2	S45°E	"	25	0.02
TPNE-2	N45°E	"	20	0.03
TPSE-3	S45°E	"	25	0.02
TPNE-3	N45°E	"	30	0.01

string-type, R は Roller-type, P は水平振り子型を示す。NEWS は測定方位である。坑内岩盤は破砕部が多く、設置場所により歪量に差のあることが予想されたので、伸縮計には 4 m 間隔に中間測定点を取りつけている。記号の最後の数字は 1 本の伸縮計の先端からの番号で、0, 1, 2 と表示し、1, 2 はいずれも中間測定点を意味する。この他、温度計 (T)、気圧計 (P) が坑内 3 カ所と斜坑に面した第一扉の外にあり、また、先に述べたように、地下水の滲出量を 2 カ所で測定している。観測記録の一例は **Photo. 2** と **Photo. 3** に示す。**Photo. 3** は中間測定点の Roller 式の伸縮計の記録である (RV, RH は記録装置の種類を示す)。記録を見てわかるように、地球潮汐はかなり明瞭に観測される。**Photo. 2** 最下の 2 枚の記録は送り速度が少し異なるが、断層の北側と南側にある南北方向の 2 つの伸縮計の記録である。ここに特筆しなければならないのは、写真を見てもわかるように、同じ時刻にほとんど伸縮逆の地球潮汐を記録していることである (EBN-20 は記録紙の上方が縮であることに注意)。

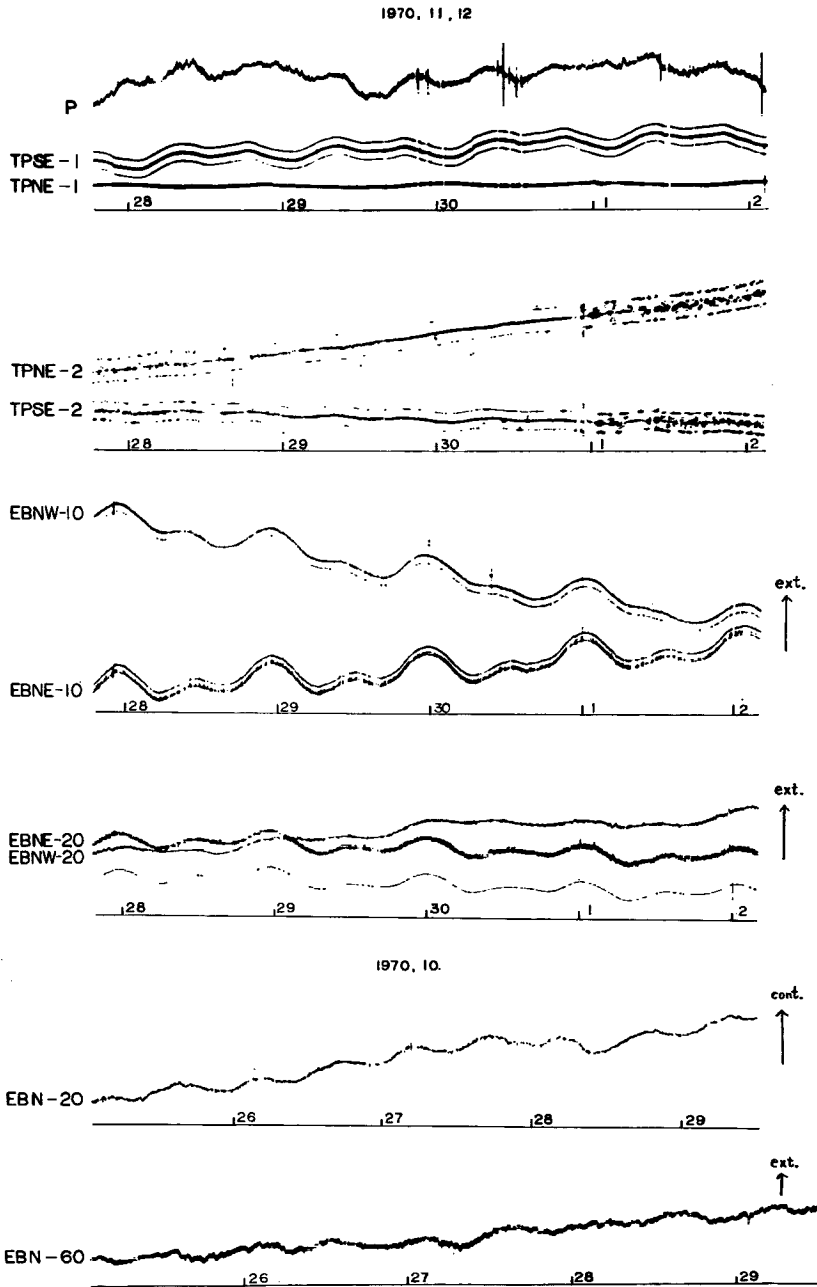


Photo. 2 Observed records by tiltmeters (Horizontal pendulum type) and extensometers (Bow-string type).

なお、TP-3 の傾斜計は設置場所が斜坑にもっとも近く、前にのべたように斜坑内の比較的短期間の不規則な温度変化にともなうコンクリートの膨張による傾斜変化があらわれていて、斜坑の温度変化と全く対応する（観測室にはこの異常温度変化は現われない）。斜坑に一番近い EBN-60 の伸縮計にも幾分影響を与え

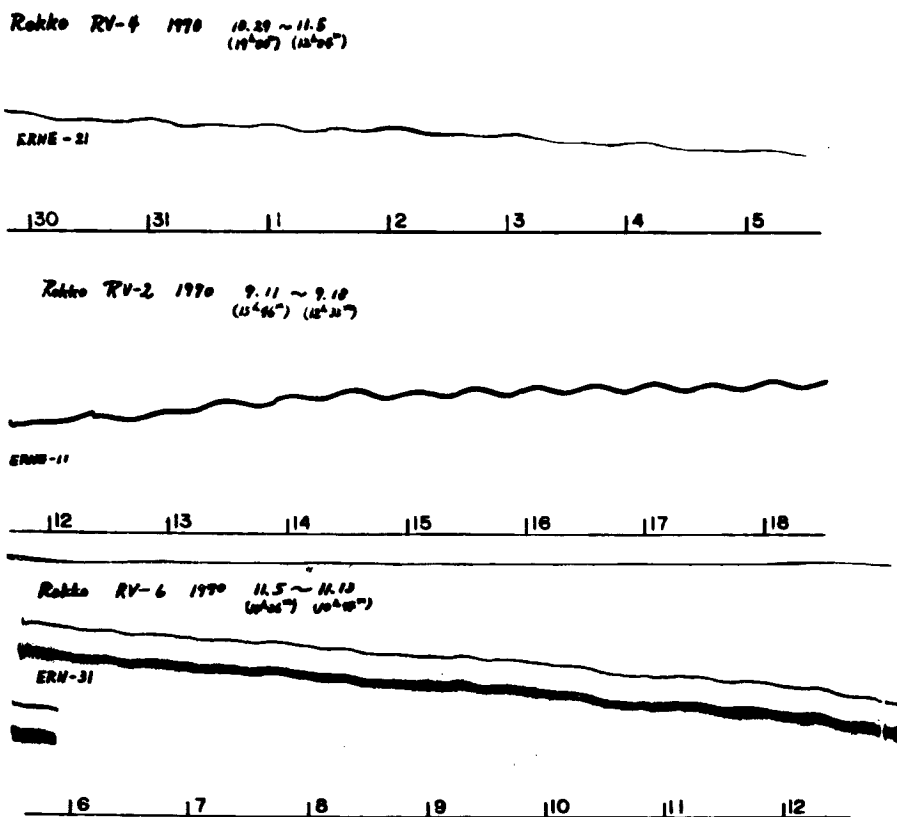


Photo. 3 Observed records by extensometers (Roller type).

て記録が乱れていることが **Photo. 2** にもうかがわれる。これはトンネル内の大きな温度変化が地山に及ぼす影響として興味ある問題で、いずれこの問題を別に扱う予定である。

予備観測期間中は本トンネルの工事中であって、斜坑を巻上げ運搬車が上下し、その振動の影響を受けて入口に近い伸縮計はやや不調であった。また、計器が多数であって調整と記録取替にかなりの労力を必要とすること、斜坑の排気ガスのため空気が悪く一時酸素が不足するような事態になったこと、天盤から落石が多く計器が破損すること、かびやくもの巣、小さな虫のために計器が不調になるなどの多くの悪条件のため、主要計器の記録継続に重点をおき、中間測点はしばしば観測を中止している。工事の完了と鉄矢板で補強されたこと、斜坑の上下端に扉ができて斜坑の煙突効果がなくなったことにより、本観測では条件は大巾によくなるものと期待している。

観測結果は **Fig. 8**, **Fig. 9**, **Fig. 10** に示す。TPNE-2 の傾斜計は、上部から滴水があって計器台が完全に固化していないため、drift が異常に大きくて解析に耐えない。同じく TPSE-2 もその傾向があるが、変化の様子は TPSE-1 とよく似ている。

Fig. 8 は伸縮計による観測結果である。中間測点は観測の中断が多いが、記録されている範囲では伸縮計本体の記録とよく一致している。とくに NE 成分は断層の両盤で大差がない。NW 成分は断層の南と北とで様子を異にする。

Fig. 9 は直線上に配列した N 成分を位置順に並べたものである。N-21 はやや不調のようであるが、伸縮量が北から順次変わっていて両端で伸縮が逆になっているが、全般的に変化の様子はどの計器も似ているこ

とが特徴的である。これは坑内の温度が徐々に低下しているためかも知れない。N-31 がきわめて異常であるが、これは計器に異常があったのか、あるいは断層の北盤と断層破砕帯にまたがっているため横ずれ変位を記録したのであろうか。これについての結論はまだ出せない。

すべての器械を通じて、雨、日変化の影響はなく、また年変化と断定される変化傾向もない。計器は8月

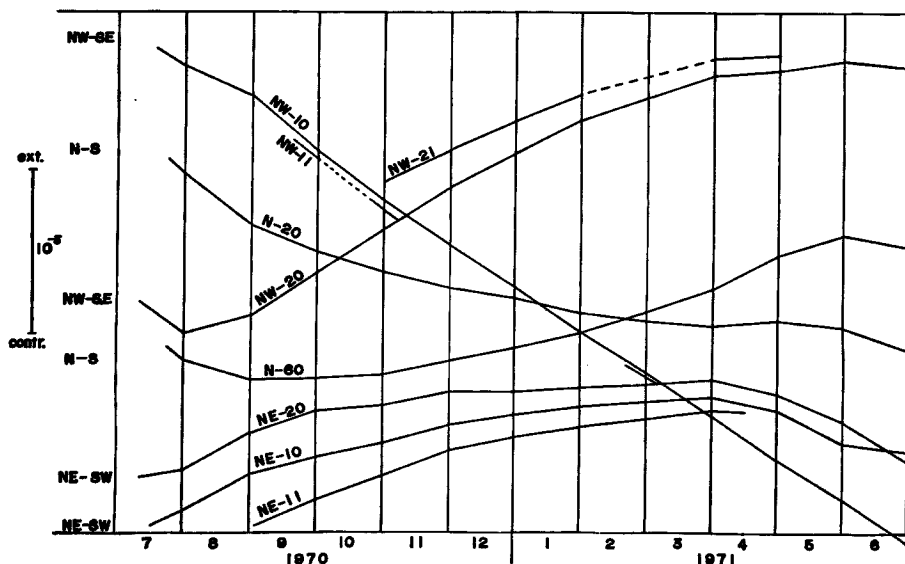


Fig. 8 Secular change of ground strains observed at the north and south sides of the Ootsuki fault.

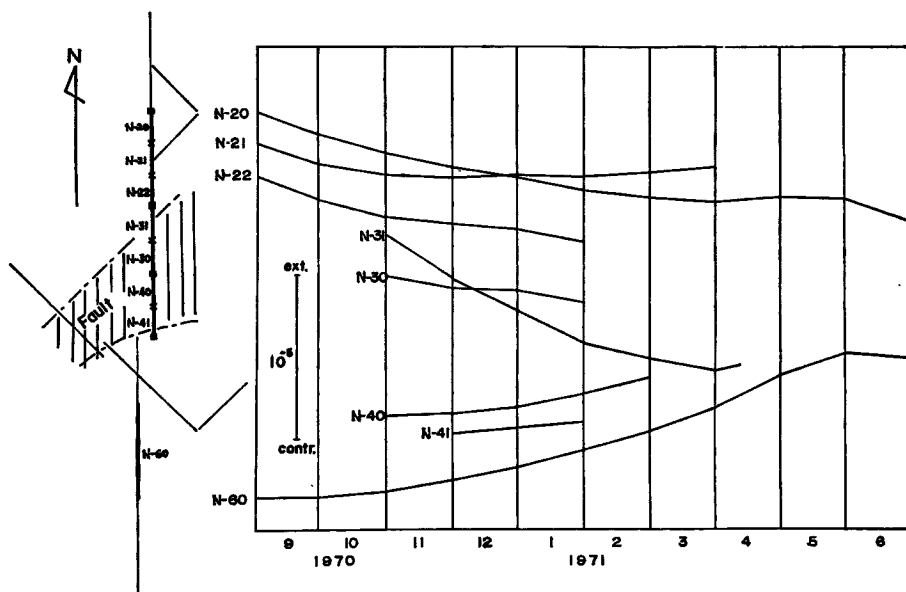


Fig. 9 Secular change of ground strains observed in the N-S direction.

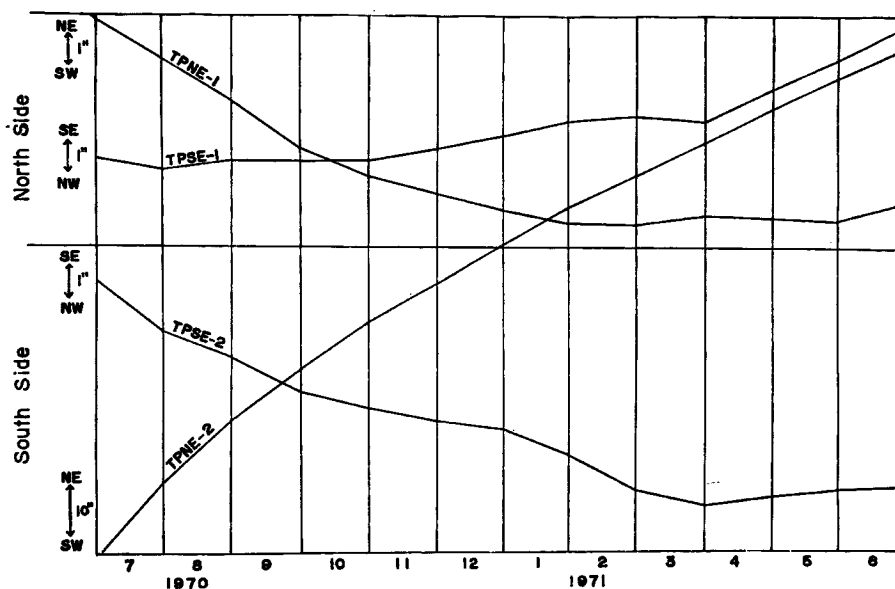


Fig. 10 Secular change of ground tilts observed at the north and south sides of the Ootsuki fault.

末までの2カ月間でほぼ安定したようである。また、ほとんどの計器が1971年6月に異常を示している。この原因は不明である。今後、条件は良くなると考えられるから、本観測の見通しはきわめて良好である。その他興味ある多くの観測結果を得て、予想以上の好成績をおさめたが、これは第一報¹⁾に詳述する。

7. 結 語

本序報では、今後の報告の参考資料として、観測状況の記述と予備観測の結果をまとめておくことにとどめた。解析結果は第一報以下にのべる。1971年7月で坑内補強工事のため観測は一時中止し計器を取りはずした。1972年8月観測再開の予定である。

この観測の計画と実施に関しては、大阪新幹線工事局とくに線増第一課および御影工事区、神戸工事区ならびに鉄道技術研究所、熊谷組六甲作業所の関係者御一同の御高配と御援助に負っている。深く感謝の意を表する次第である。また観測については京大防災研究所地かく変動部門および京大理学部地球物理学教室地殻物理学講座、ならびに大阪市立大学理学部地学教室の技官、学生諸兄の御助力を頂いた。以上のように、この観測は大勢の方々のお協力のもとになったもので、一人一人御名を挙げるができないが厚く御礼を申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) Huzita, K.: Tectonic Development of Southwest Japan in the Quaternary Period, Jour. Geosciences, Osaka City Univ., 12, 1969, pp. 53-70.
- 2) Huzita, K., T. Kasama, M. Hirano, T. Shinoda and M. Tanaka-Yamashita: Geology and Geomorphology of the Rokko Area, Kinki District, Japan with Special Reference to Quaternary Tectonics, ibid. 14., 1971, pp. 71-124.
- 3) Ikebe, N., K. Ichikawa and K. Huzita (edit.): Geologic Guide for Excursion to Several Areas to Quaternary Tectonics, ibid. 14, 1971, pp. 79-130.

- 4) 岸本兆方・橋爪道郎・西田良平：近畿地方北半部における最近の微小地震活動，京都大学防災研究所年報，第 11 号 A，昭和 43. 3，pp. 75-89.
- 5) 狐崎長琅・後藤典俊・竹内文朗：六甲地殻変動観測坑における，地震探査による弾性波速度分布の測定，同，第 15 号 B，昭和 47. 4，pp. 7-13.
- 6) Tanaka, H. : Geology of the Dam and the Treatment of its Foundation, Technical Report (Central Res. Inst. of Electric Power Industry), C-6203, 1963, p. 25.
- 7) 田中 豊・林 守孝・加藤正明・藤田和夫：六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測（第一報），京都大学防災研究所年報，第 15 号 B，昭和 47. 4，pp. 29-41.