

# Crack をもつ半円形トンネル周辺の応力状態について

桑 原 孝 雄

(農学部 構築工学研究室)

## On the Stress State around a Semicircular Tunnel with a few Cracks

Takao KUWABARA

Laboratory of Construction Engineering, Faculty of Agriculture

### Abstract

This report describes of the stress states around a semicircular tunnel with a few cracks by the photoelastic method. It is assumed that the rock foundation is completely elastic.

From the results, it is found that the stress states around the tunnel are considerably influenced by the cracks; some cracks at the upper center of the tunnel are related to the "Yamayurumi" and the others at the side wall of the tunnel are related to the "Yamahane".

### ま え が き

近年、我国のトンネル技術の進展は目ざましいものがあり、非常に過酷な条件下においても、充分安全な地下構造物が構築されつつある。しかしながら、地盤の性状、特に構造物との相互作用に関しては、まだ未解決の問題が多い。

周知のごとく、地盤はそれを構成する物質およびその構造により実に様々の物理的特性を示すものだけに、その地盤内に構築される構造物形態によっても、その相互作用は実に複雑である。そこで、本報告においては、地盤特に岩盤（弾性体とみなせる岩盤）地盤内に半円形トンネルが掘削された場合のトンネル周辺の応力状態が、トンネル周辺に特殊な条件（クラック）が存在するとどのように影響されるかについて報告する。

従来、岩盤地盤内の応力解析における理論的解析<sup>1)</sup>には、岩盤を、

- 1) 完全弾性岩盤
- 2) 異方性弾性岩盤
- 3) 層状弾性岩盤
- 4) 塑性変形を起こす岩盤
- 5) 粘弾性変形を起こす岩盤

といった分類に従って、取り扱われており、それぞれの岩盤地盤内に種々の形状をもつトンネルに対して、応力および変形の解析がおこなわれている。

ここでは、上記 1) の分類の岩盤内に、次節に述べるような特殊な条件の存在する場合について、光弾性実験法により解析する。

ここであつかう例は、トンネル周辺に、節理あるいは断層その他の不連続面が存在する場合のトンネル周辺地盤応力状態を説明するのはもとより、トンネル掘削時の地盤のゆるみや、山はね現象を岩盤応力状態から類推することにより、実際にこのような場合に近い状況に直面した場合の基礎知識として、その設計および施工に帰与するがためのものである。

### 実験方法および実験材料について

先にも述べたように、ここでは岩盤地盤を完全弾性体と仮定し、その中に半円形トンネルが存在し、トンネル周辺に Fig. 1 に示すような特殊な条件の存在する場合のトンネル周辺の応力状態を二次元光弾性実験法により解析する。荷重としては、トンネル中央上部より 7 cm のところに 58.3 kg の集中荷重を載荷した。

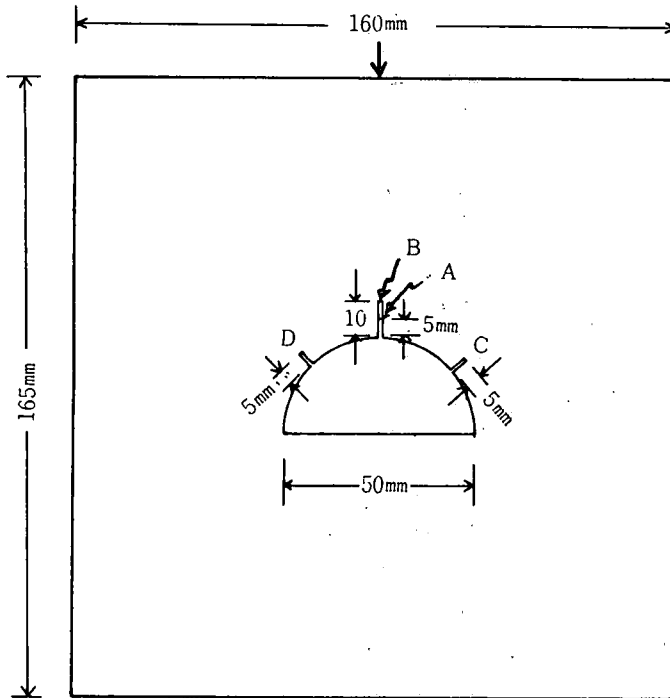


Fig. 1. Model Plate

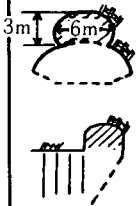
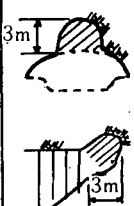
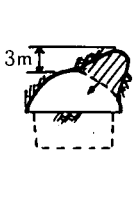

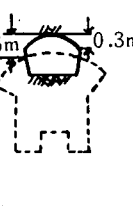
解析は次の5つの場合について行なった。

- I. クラックの無い場合
- II. クラックAが存在する場合
- III. クラックBが存在する場合
- IV. クラックBとCが存在する場合
- V. クラックBとCとDが存在する場合

このような位置にクラックを設定した理由は、実存したトンネルにおいて、Table 1. に示すような崩壊例<sup>2)</sup>が多くみられるため、特に崩壊部付近の応力状態をみるためである。

次に、光弾性実験法において、不可欠なことは、光弾性材料特性を知ることである。ここで使用した材料は、等傾線観測用のアクリル樹脂板(厚さ 6.3 mm)と、等色線観測用のエポキシ樹脂板(厚さ: 6.3 mm, 光弾性感度: 0.982 mm/kg, フリンジ応力: 1.012 kg/mm)であった。この材料特性の検定は円板の圧縮による検定法にて実施した。その検定曲線を Fig. 2 に示す。

Table 1. Examples of Tunnel collapses<sup>2)</sup>

種別	トンネル名	蒲原 T	興津 T	石部 T	石部 T	丹那 T
崩壊の高さ(m)		3	3	3	2	0.3
崩壊の延長(m)		2	3	4	3	0.6
地質		蒲原れき層	粘土をふくむきれつ多き破碎帯	玄武岩	玄武岩 (節理多く) (粘土をはさむ)	砂質凝灰岩
ゆう水の状況		滞水層あり	ゆう水なし	ゆう水なし	ゆう水なし	ゆう水なし
工法		底設導坑先進 上部半断面掘削	上部半断面掘削	上部半断面掘削	上部半断面掘削	底設導坑先進 上部半断面掘削
土かぶり(m)		8	約20	約25	約20	約150
発生年月日		37.8.30	36.10.28	37.12.26	38.2.20	35.2.29
略図						
発破後経過時間		ピック掘り 前支保建込み後 6時間	ピック掘り 前支保建込み後 3時間	2時間	4時間	ピック掘り 前支保建込み後 3時間

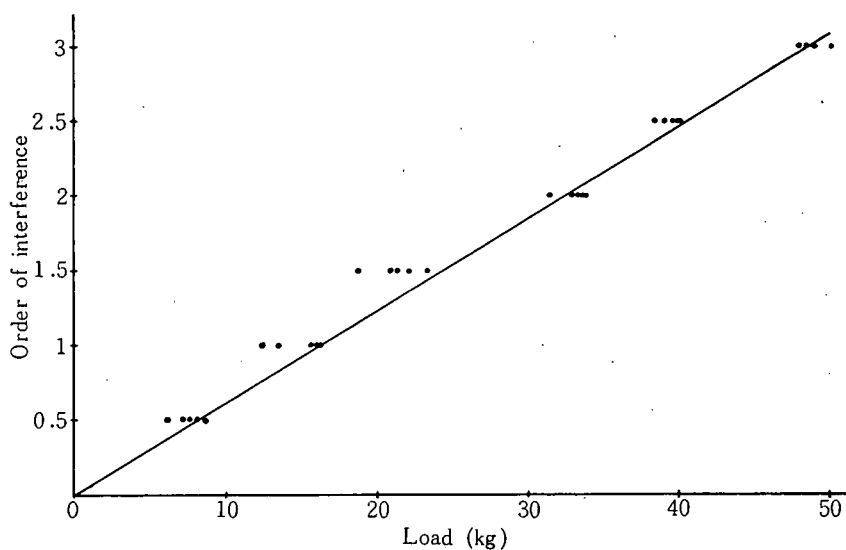


Fig. 2 The calibration curve for the circular plate: the thickness of 0.63 cm.

解析方法<sup>3)</sup>

ここでは、等色線観測用エポキシ樹脂板より得られる  $\sigma_1 - \sigma_2$  ( $\sigma_1, \sigma_2$  は主応力) に関するデータと、等傾線観測用アクリル樹脂板より得られる主応力  $\sigma_1$  の方向に関するデータをもとに図式

積分法により各部の  $\sigma_1, \sigma_2$  の値を求めた。すなわち, Fig. 3 (a) のような座標系を考え,  $x$  方向の垂直応力を  $\sigma_x$ ,  $y$  方向のそれを  $\sigma_y$  とし, セン断応力を  $\tau$  とする。ただし,  $\sigma_x, \sigma_y$  は, エレメントに対して張力の場合を正とする。次に, このエレメントをその点における主応力  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  の方向まで傾斜した場合を考えると Fig. 3 (b) のようになり, 両主応力  $\sigma_1, \sigma_2$  のうち代数学的に大なる方を  $\sigma_1$  ととり,  $\sigma_1$  と  $x$  軸とのなす角を  $\phi$  とすれば, これらの応力の間には次の関係がある。

$$\sigma_x = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi \quad \dots\dots(1)$$

$$\sigma_y = \sigma_1 \sin^2 \phi + \sigma_2 \cos^2 \phi \quad \dots\dots(2)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2) \times \cos 2\phi = \sigma_x - \sigma_y \quad \dots\dots(3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\phi = 2\tau \quad \dots\dots(4)$$

実験からは,  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  および  $\phi$  が直接求められることになり, 結局  $(\sigma_x - \sigma_y)$  および  $\tau$  が計算できる。また, 二次元における弾性体の平衡式は

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(6)$$

であり, これを積分して

$$\sigma_x = \sigma_{x_0} - \int_{x_0}^x \frac{\partial \tau}{\partial y} dx = \sigma_{x_0} - \sum_i \frac{\Delta \tau_i}{\Delta y_i} \Delta x_i \quad \dots\dots(7)$$

$$\sigma_y = \sigma_{y_0} - \int_{y_0}^y \frac{\partial \tau}{\partial x} dy = \sigma_{y_0} - \sum_i \frac{\Delta \tau_i}{\Delta x_i} \Delta y_i \quad \dots\dots(8)$$

が得られる。ここに,  $\sigma_{x_0}, \sigma_{y_0}$  は  $x=x_0, y=y_0$  のときの  $\sigma_x, \sigma_y$  の値であって, 自由周辺等で実験より直接求められる。また,  $\Delta \tau_i$  は相隣る2点間のセン断応力差であり,  $\Delta x_i, \Delta y_i$  は相隣る2点間の  $x$  軸および  $y$  軸方向の距離である。

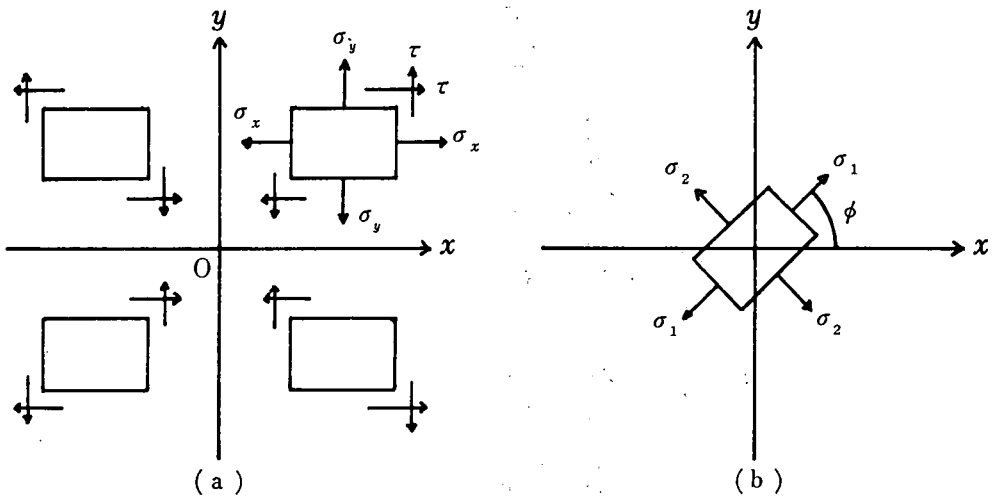


Fig. 3 Stress in a Two Dimensional System

## 結果と考察

先に述べてきた実験法ならびに解析法によりもとめた結果のうち、荷重点下 2.0~2.5 cm 付近の  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  の分布を Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 にそれぞれ示す。

まず、 $\sigma_x$  の分布をみると、どの場合にも中央付近では、引張応力値を示し、その左右では圧縮応力値を示している。次に、 $\sigma_y$  の分布をみると、この場合は全体に圧縮応力値を示し、荷重点下方で最大圧縮応力値を示している。さらに、 $\tau_{xy}$  の分布をみると、中央付近を境にして、点対称な分布を示している。

以上のことから、トンネル中央上部より、トンネルの半径以上では、トンネル周辺のクラックによる応力分布状態への影響は著しいものが無いものと思われる。

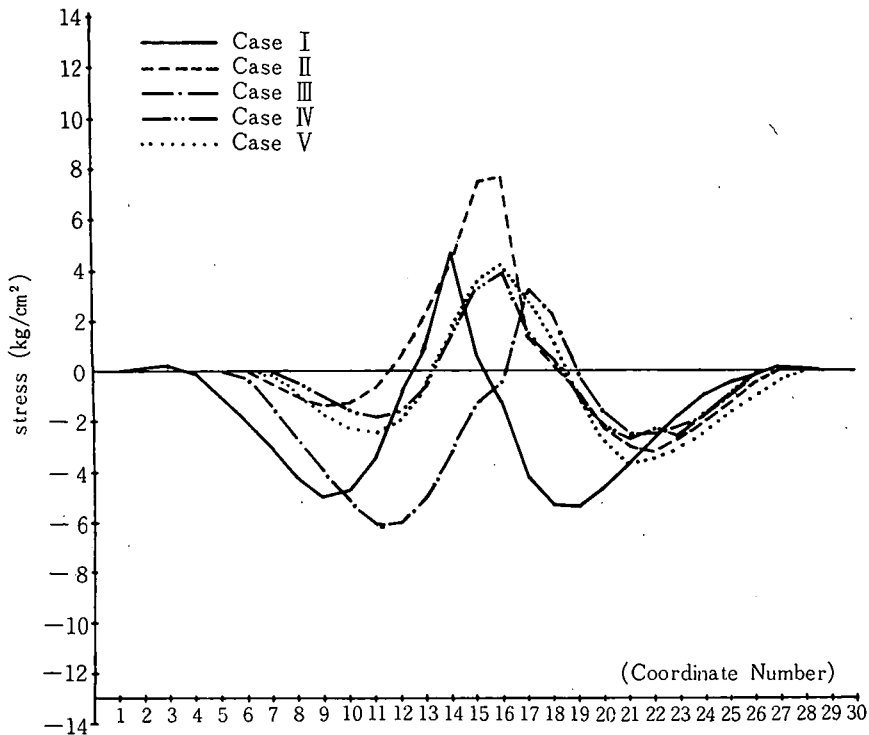


Fig. 4  $\sigma_x$ -Distribution upper the tunnel of each Test

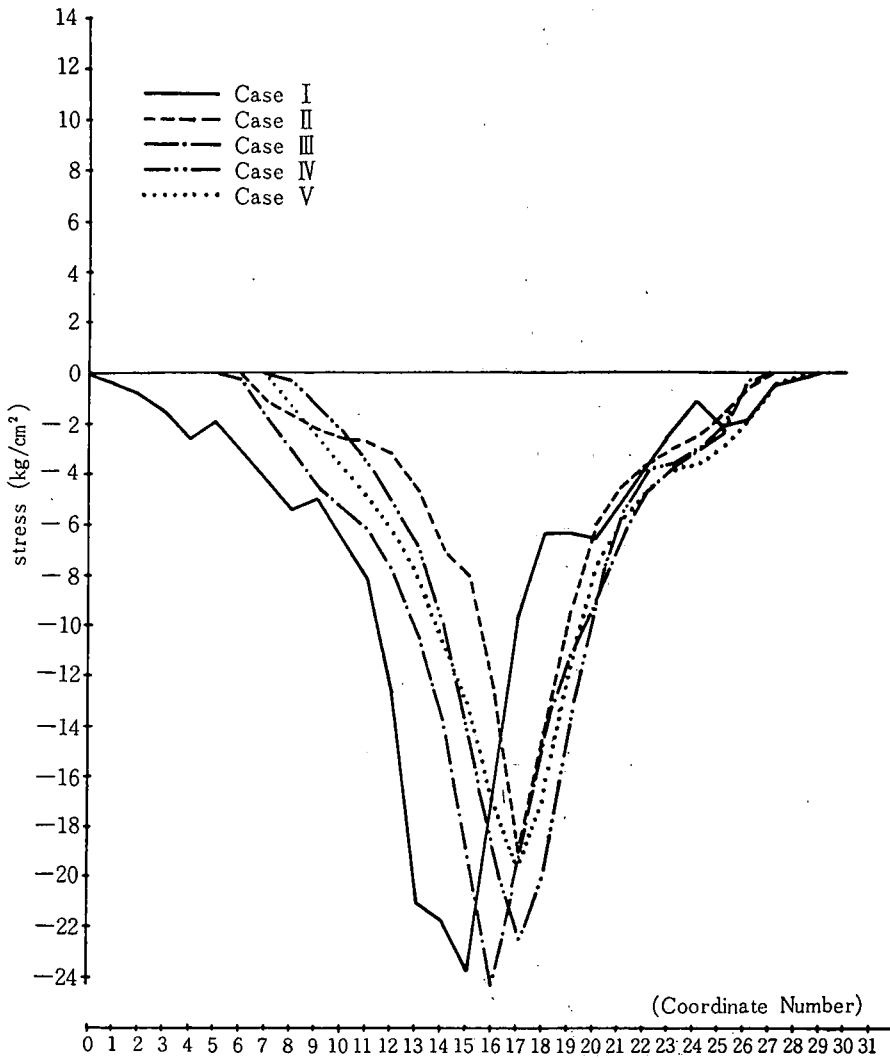
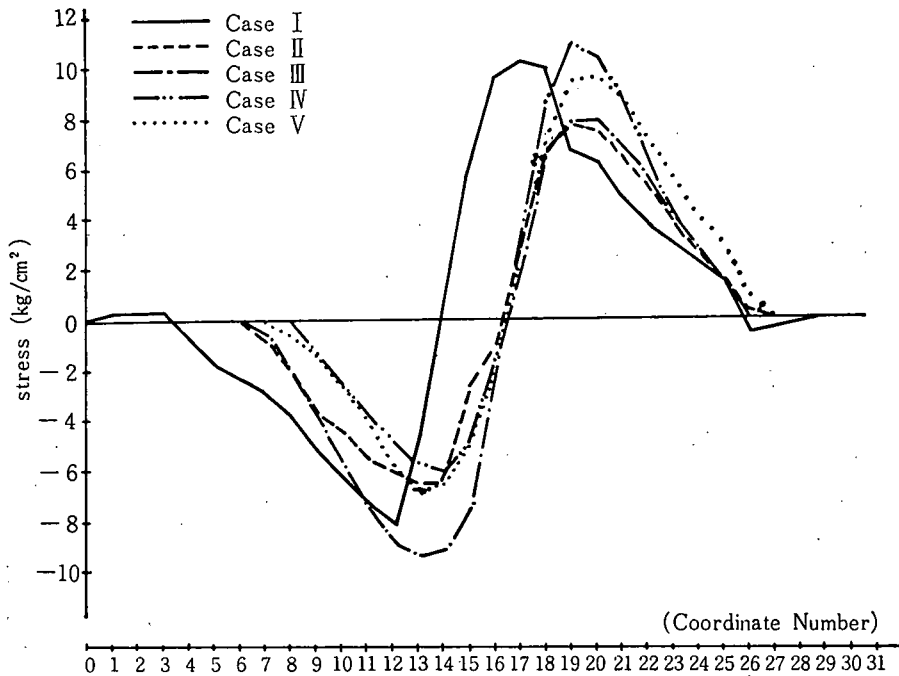


Fig. 5  $\sigma_v$ -Distribution upper the tunnel of each Test

Fig. 6  $\tau_{xy}$ -Distribution upper the tunnel of each Test

次に各 Case についての主応力分布についてみる。

### 1. Case I の場合 (Fig. 7 に示す.)

これは、半円形トンネル周辺にクラックの無い場合であり、載荷点直下を起点として、ほぼ放射状に主応力 ( $\sigma_1$ ) が分布しているのがみられる。そして、トンネル中央上部付近に引張応力値を示す領域がみられる。

岩盤の引張応力は、圧縮応力に比して著しく小さいため、この部分の岩盤が、除々に引張力により破壊され、いわゆる山ゆるみ現象<sup>4)</sup> に結びつくものと考えられる。この山ゆるみ現象については、Willmann や Kommerell の直感的な免圧帯説<sup>5)</sup> や、Fenner の説<sup>6)</sup> などがあるが、まだ、未解決な点がある。

トンネル側面には、圧縮応力領域が存在し、特に底面両端部で、応力の集中がみられる。さらに、トンネル底面下では引張応力がみられるが、これらは、従来から行なわれている種々の解析結果<sup>7)</sup> とほぼ同じ傾向にある。

以上のトンネル周辺応力状態に新たなクラックが存在した場合について以下のべる。

### 2. Case II の場合 (Fig. 8 に示す.)

この場合は、先に述べたいわゆる山ゆるみを生ずる部分に、実際にクラックが入った場合に相当するのであるが、トンネル上部付近の分布状態は先の場合とあまり変化はみられない。なお、この場合トンネル左側壁に大きな引張応力値がみられるが、これは解析上のミスと思われる。

### 3. Case III の場合 (Fig. 9 に示す.)

この場合は、Case II のクラックがさらに大きく上方に伸びた場合のものである。この状態では、クラック先端に大きな引張応力 (約  $10 \text{ kg/cm}^2$ ) が生じ、さらにこのクラックが大きくなる傾向がみられる。それとともに、トンネル側壁付近の圧縮応力値の大きなもの ( $10 \text{ kg/cm}^2$  以上) が、側壁に沿って上部へ移動している様子がみられる。そして、トンネル底側部にみられた応力集中が、やや緩和され、底面下の引張応力値もやや小さくなっている。このことは、トンネル掘

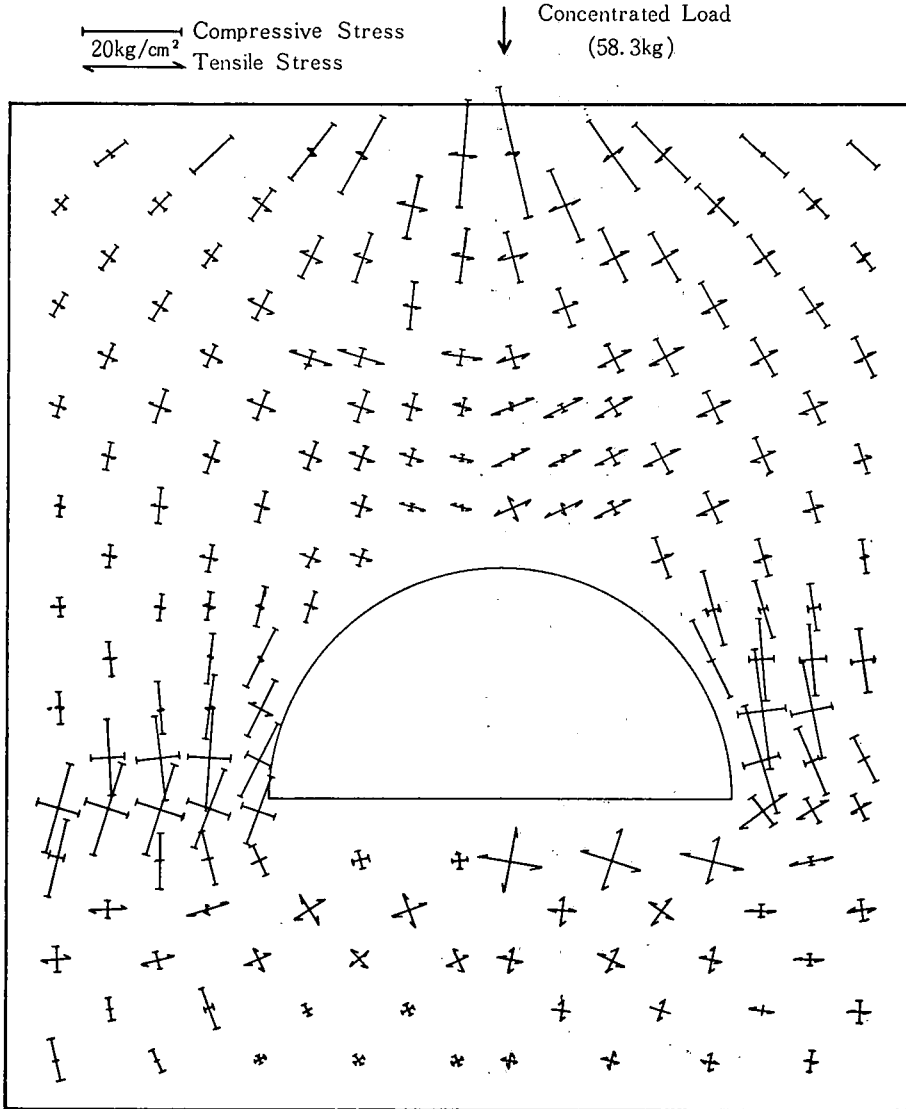


Fig. 7 Principal Stresses ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) Distribution for Case I



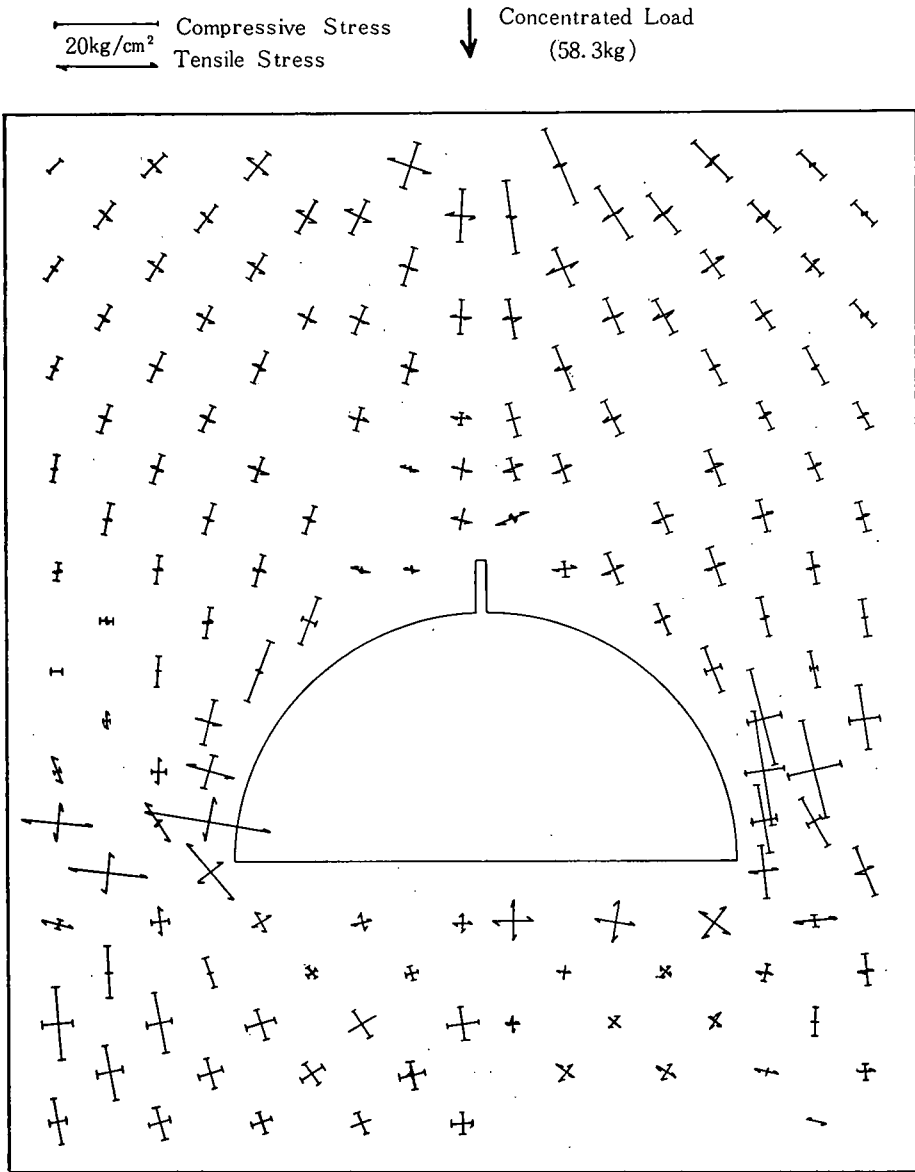


Fig. 8 Principal Stresses ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) Distribution for Case II

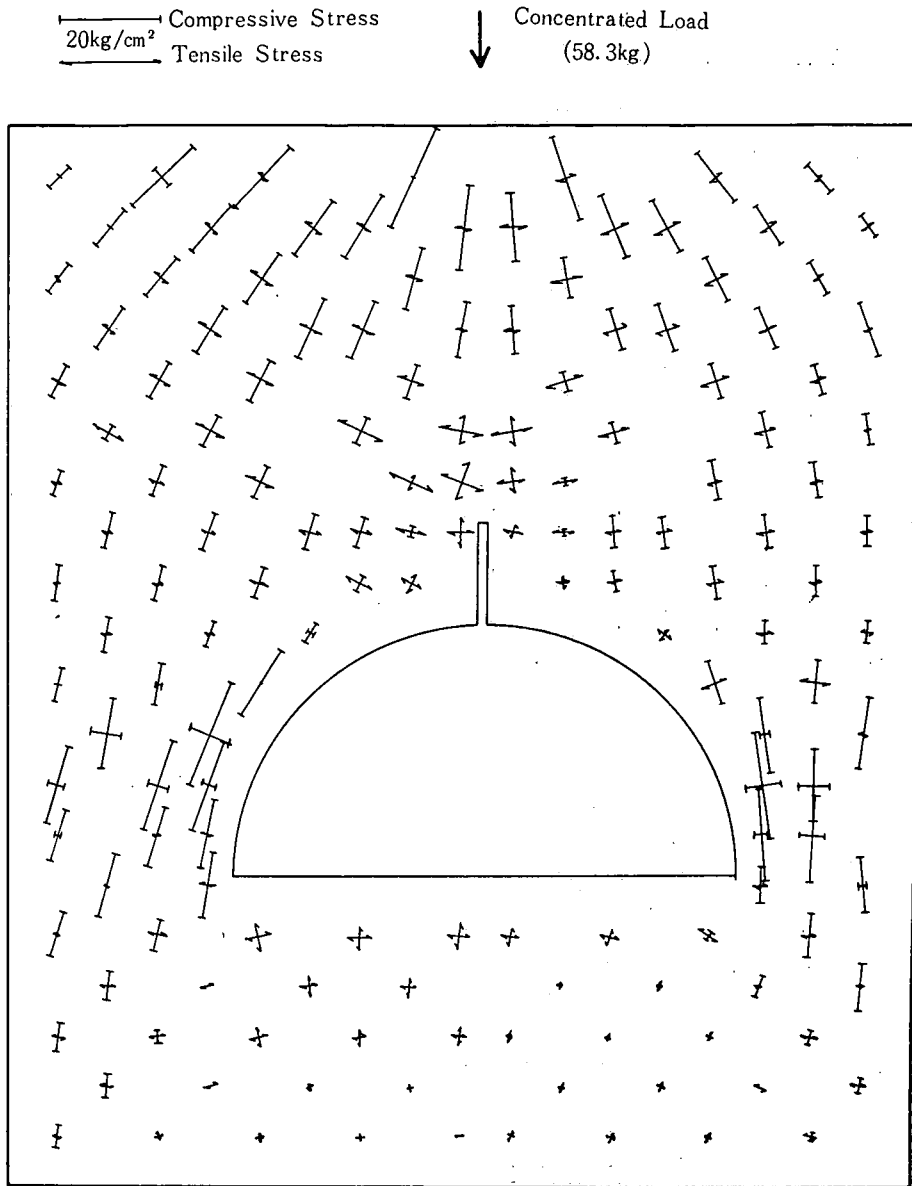


Fig. 9 Principal Stresses ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) Distribution for Case III

削後、時間が経つにつれ、上部山ゆるみが進行すると同時に側壁の圧縮応力値が増加し、側壁掘削時に注意しなければならないことがわかる。

4. Case IV の場合 (Fig. 10 に示す.)

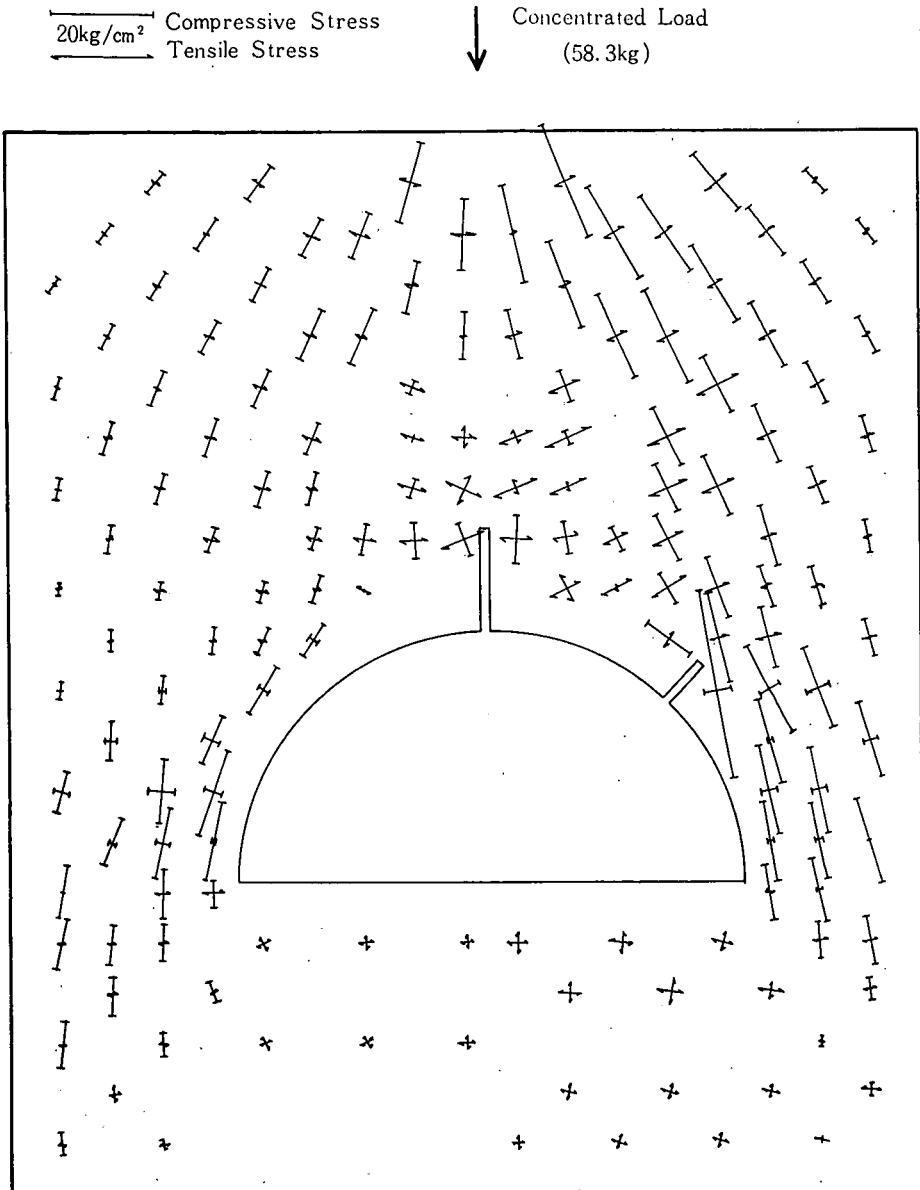


Fig. 10 Principal Stresses ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) Distribution for Case IV

この場合は、Case III の場合にさらに側壁中央部にクラックが入った場合のものであるが、Case III の場合と異なる点は、先にものべた側壁の圧縮応力状態が、側壁クラックの存在によりさらに著しい圧縮応力集中を生じている点である。このことは、トンネル掘削時にみられる山はね現象<sup>6)</sup>に結びつくものであり、側壁付近の圧縮応力により貯えられていたエネルギーが、逐次的な岩盤破壊によらず爆発的に岩盤破壊が生ずるためにみられるもので、ここでみられたような最大の圧縮応力値 (約  $40 \text{ kg/cm}^2$ ) への急な変化がその原因と結びつくものと思われる。実際のトンネル掘削時

の場合のこの現象のきっかけになる可能性のある場合としては、火薬発破が広く認められているが、その他応力状態の変化、温度、気圧の変化、水の影響なども考えられている<sup>8)</sup>。

また、ここでは、クラックの無い側面の圧縮応力値は、先の場合のものより小さくなり、全体に、クラックのある側面とは異なる分布状態がみられる。

5. Case V の場合 (Fig. 11 に示す.)

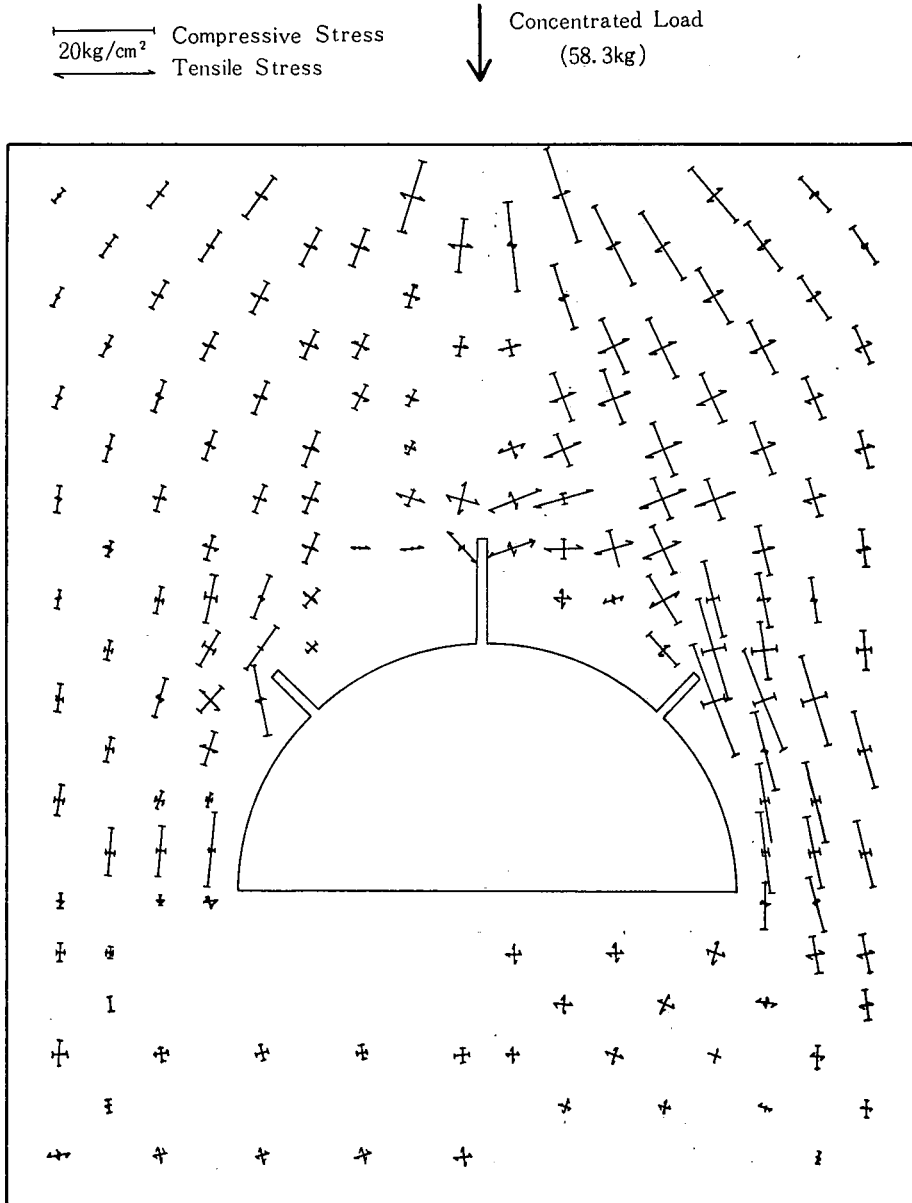


Fig. 11 Principal Stresses ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) Distribution for Case V

この場合は、先の Case IV にさらに他側面にクラックの存在する場合のもので、それぞれのクラックの先端付近に応力集中がみられる。しかし、先の場合よりも、集中圧縮応力値は小さく、全体に左右の応力分布状態が似かよってきている。このことから、実際のトンネル掘削はできるだけ左右対称に行なわれるのが望ましいことが推測できる。

## 結 論

以上、実際のトンネル崩壊例をもとに、崩壊部分の応力分布状態を、光弾性実験法によるモデルテストにより、調べてきたが、その結果以下のことが明らかとなった。

1) 岩盤を弾性体と考えた場合の周囲にクラックの無いトンネル周辺の応力状態は、従来行なわれている解析結果とほぼ同じ結果が得られた。

2) 山ゆりみ現象に結びつく、トンネル上部の応力状態の変化をみることができた。

3) 山はね現象に結びつく、トンネル側壁付近の応力状態の変化をみることができた。

4) トンネルの掘削は、応力状態が、トンネル断面左右対称に行なわれるのが望ましいことがわかった。

なお、ここでの解析は、岩盤を完全弾性体と仮定しているので、今後は、さらに複雑な要素を加味した実験ならびに解析が必要と思われる。

## あ と が き

未筆ながら、光弾性実験装置をお貸し下さった防災林学研究室ならびに、昭和45年度、農業工学科4回生、広瀬幹雄、平賀完治両君の多大のご協力に対し謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 土木学会：土木技術者のための岩盤力学，土木学会（1968）p. 183～207.
- 2) 同 上 p. 360.
- 3) 辻 二郎・河田幸三：光弾性実験法，理研計器株式会社（1960）p. 44～48.
- 4) 1) と同じ p. 354.
- 5) 1) と同じ p. 354～355.
- 6) 1) と同じ p. 355～356.
- 7) Stagg Zienkiewicz: Rock Mechanics in Engineering Practice, JOHN WILEY & SONS (1968). p. 257～265.
- 8) 1) と同じ p. 357～359.

(昭和46年9月9日 受理)

