

# 光弾性実験による斜面アンカーボルトの 応力分布

安井 将文\*・大山 勇治\*\*

## 1. 実験の概要

トンネルの施工法に用いられるロックボルト、吹付けコンクリートによるトンネル壁面の安定化工法が不安定な切り取り斜面や自然傾斜地の保護のため、傾面安定化工法の一方法として応用される場合がある。この場合のアンカーボルト、アンカーヘッド、吹付けコンクリート、初期締付力等の各要素の関係を明確にすることはロックボルトを使用する場合の基本にかかる問題である。誤まった考え方による使用は斜面の崩壊やトンネル掘削事故につながる危険性が多いにあると考える。

現在のトンネル施工法におけるロックボルト、吹付けコンクリート工法についてはその設計の考え方、また計測値と計算値との対応等の問題が主に論じられているが、その基本となる地山の性状とロックボルト、吹付けコンクリート、ベアリングプレート、締付力等の個々の問題に関する詳細な検討が不足のように考えられる。

筆者らはこれらの個々の要素の関係を明確にし、ロックボルト、吹付けコンクリート工法における施工上重要な問題についてこれまで報告したが、さらにその重要性を考慮し、地山と一体となったモデルを製作し、地山とロックボルト等の関係を詳しく求める実験を考えた。ここに報告するのはその基本的な実験例の一部である。対象とする地山は粘性地山であり、単一ボルトを粘性地山に設置した場合の地山のせん断抵抗の変化を求め、ロックボルトの軸力を測定する。モデルは粘性地山を理想化した摩擦抵抗のないゼラチンを用い、二次元平面モデルで行なった。

## 2. 実験の方法

### 2-1 光弾性実験による応力の測定

光弾性実験はより得られる等色線縞次数と応力の関係は光弾性法則により次式で与えられる。

$$N = \alpha \cdot t \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \dots\dots (1)$$

ここに  $N$  : 等色線縞次数

$\alpha$  : 光弾性感度 (cm/g)

$\sigma_1, \sigma_2$  : 最大, 最小主応力 (g/cm<sup>2</sup>)

$t$  : モデルの厚さ (cm)

また主応力  $\sigma_1, \sigma_2$  と最大せん断応力度  $\tau_{\max}$  の関係は次式で与えられる。

---

\* 理工学部土木工学科教授 応用力学

\*\* 理工学部土木工学科助手 橋梁工学

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \dots\dots(2)$$

(2) 式を (1) 式に代入し、ある点の最大せん断応力度  $\tau_{\max}$  と繰回数  $N$  の関係は (3) 式で与えられる。

$$\tau_{\max} = \frac{N}{2 \cdot \alpha \cdot t} \quad \dots\dots(3)$$

従って、ボルト周辺の縞写真から地山のせん断抵抗を求めることができる。但し、ボルト周辺の主応力  $\sigma_1, \sigma_2$  の方向を別途求める必要があるが、その結果からボルト周辺では最大せん断応力度の方向がボルトの軸と平行であることが確認されている。

写真-1は一連の実験結果の一例で、ボルト周辺の等色線縞を拡大したものであり、図中の数字は繰回数を表わしており、(3) 式よりボルト周辺の最大せん断応力度  $\tau_{\max}$  の値が連続的に求められる。

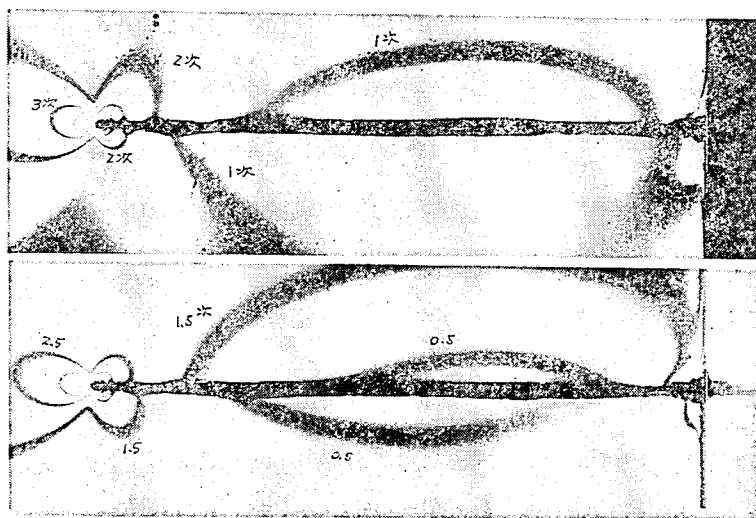


写真-1 ベアリングプレートなし  $p=50 \text{ gr}$  の例,  $l=8.0 \text{ cm}$

## 2-2 モデルの製作法

モデルに使用するゼラチンは高純度食用ゼラチン（野洲化学工業：「ゼラチンリーフ」）を重量濃度15%で使用する。均質で初期歪のないゼラチンモデルを製作するため、型枠を2槽にし、外・内型枠の間にはパラフィンを注入し硬める。このパラフィンは内型枠の変形防止と内型枠内のゼラチンの温度の急変を防止するのに役立つ。

写真-2-1は外型枠、写真-2-3は外型枠と内型枠である。ゼラチン液は供試体の上面（内型枠の上面）より数 cm 上まで流し込み、気泡が混入していないのを確認してから供試体の上面となる上ブタをゼラチン溶液中に設置する。

ゼラチン溶液は板状ゼラチンを細片にし、少量の水に十分浸した後（約2時間）所要の水を加え、70°C 迄加熱させ完全に溶解し製作する。溶液の注型温度は 50°C、その後外型枠にふたをし、1時間放冷（室温 15°C）させる。ゼラチン温度 38~35°C より除冷し、10°C で18時間養生する。

写真-2-5は養生後の内型枠付きのモデル、写真-2-6は実験中のモデルである。ゼラチンモデルは脱型後1時間以上経過すると乾燥、変質等により等色線縞に影響が現われるため

実験は手速く行い必要がある。

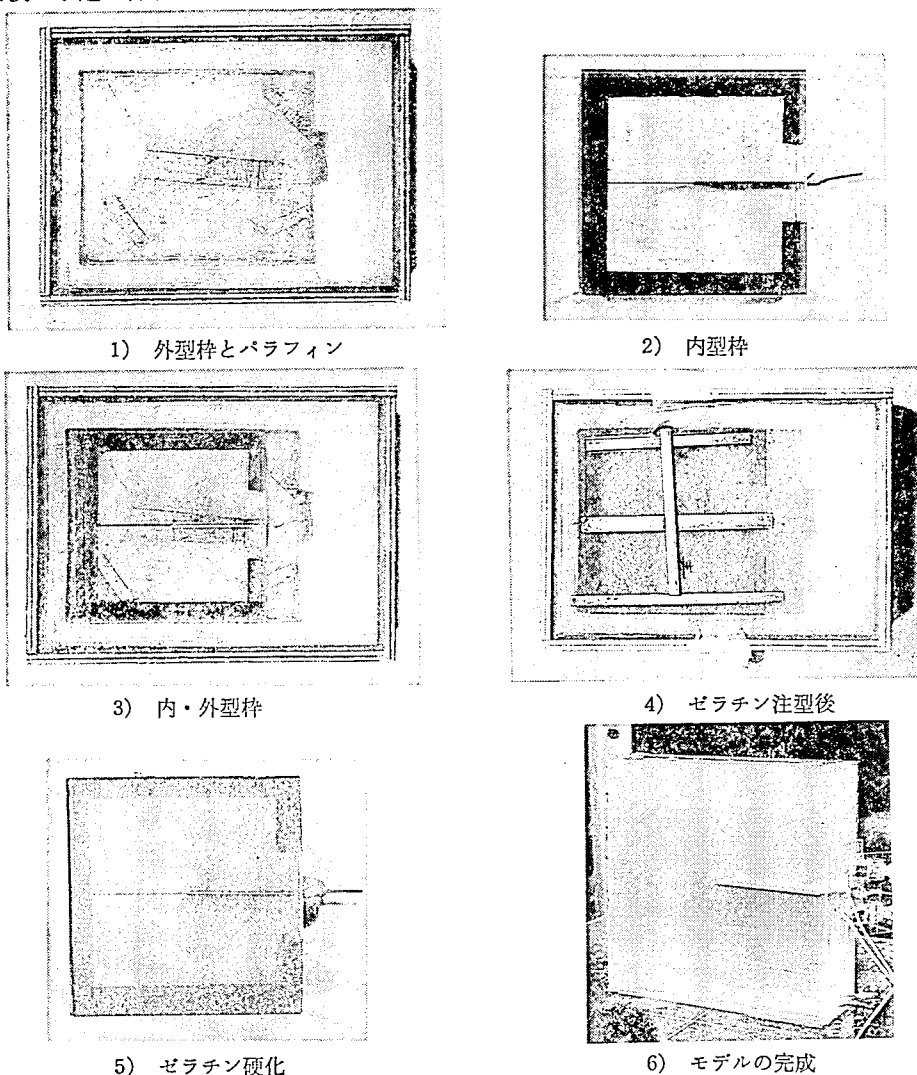


写真-2 ゼラチンモデルの製法

### 2-3 締付力の導入

図-1に示す装置によりボルトに締付力を導入する。締付力は2枚の板の間のリングに貼付した歪ゲージにより測定する。締付力は2枚の板のゼラチンに接する側の板からゼラチンによって支えられる。ボルト (50×80 mm 厚さ 1 mm) とゼラチン側の板はあらかじめモデル製作時にゼラチンと一体となっているが計測用の2個のリングと締付力導入に必要なボルト、ナット類は実験時に設置する。

## 3. 実験の結果

### 3-1 実験例

モデルは 160×160×50 の直方体の1側面に水平な板からなるボルトを挿入した場合を

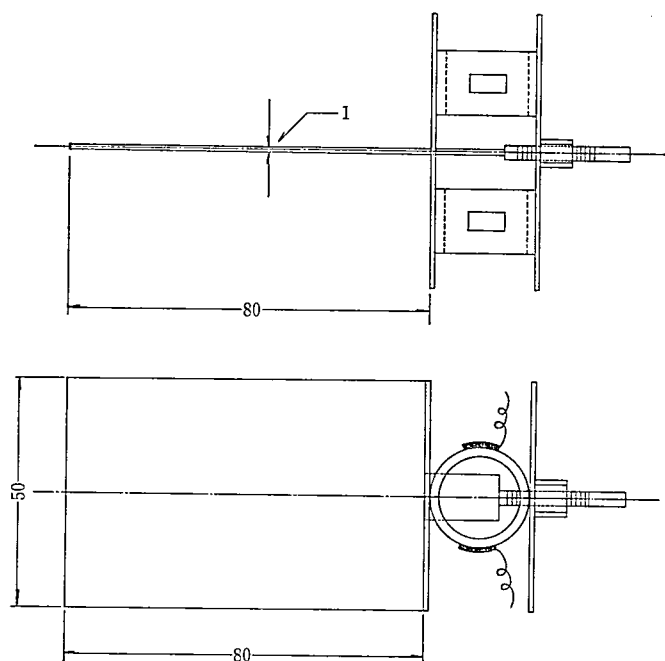


図-1 ボルトモデルと計測装置

基本とし、

- (ア) 地山をボルトで補強し、地山の上載荷重が増加した場合
- (イ) 地山をボルトで補強し、その壁面も同時に垂直なボルトと一体となった状態で補強し上載荷重が増加する場合
- (ウ) 地山と垂直壁面を同時に補強し、更にボルトに締付力を導入した場合
- (エ) (ウ)の場合で上載荷重が増加する場合

の4種類について実験を行なった。(ア)～(エ)に対応したモデルを A, B, C, C' と称することにし、これらモデルの概要を図-2に示す。

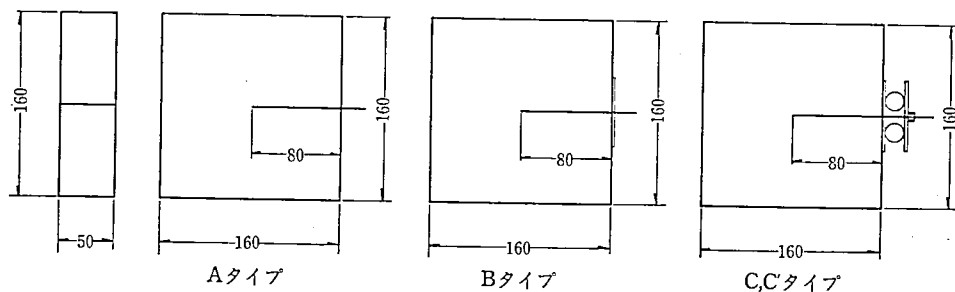
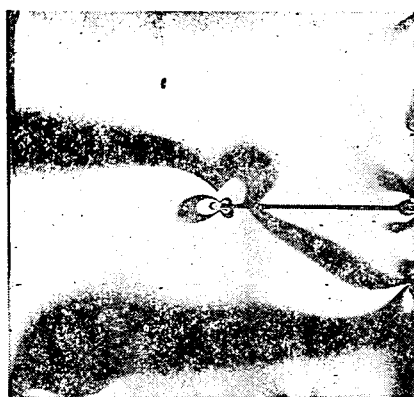
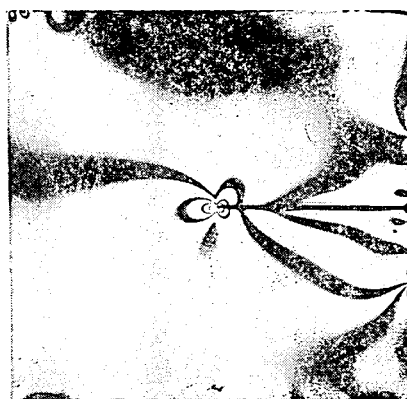
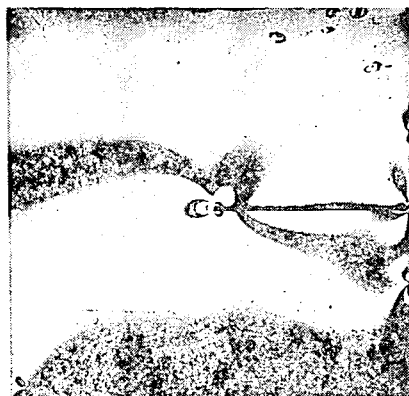
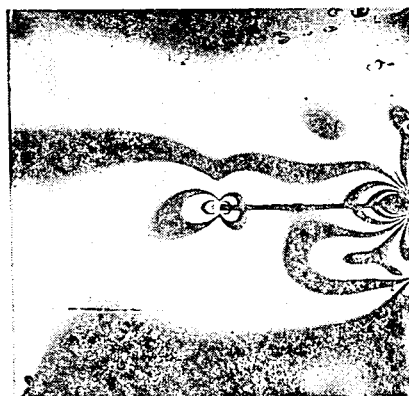


図-2 光弾性実験モデル

4種類の実験結果の一部を写真-3に示す。写真-3の等色線のデータをもとにボルト周辺に作用するせん断力を求める。実験(ウ)、(エ)については初期締付力を別途歪ゲージで測定し、ボルトに作用する力の状態を図-3(a)～(d)に示す。これらの結果から各場合についてのボルト軸力分布を計算できる。これらの結果を図-4(a)～(d)に示す。

3-3-(a)  $p=0$ , 締付力 30 gr3-3-(b)  $p=480$  gr, 締付力 379 gr

3-4-(a) 締付力 0



3-4-(b) 締付力 995 gr

写真-3-(A) 実験結果の一例

#### 4. 結果の考察

図-3-(a), 図-3-(b)の比較からベアリングプレートが存在により壁面変位を拘束する地山のせん断抵抗が増加するとともに, その領域が増大することがわかる。等色線縞の零次が壁側へ移動する。この場合のボルト軸力分布は図-4-(a), 図-4-(b)の比較によりその分布の状態に明確な相異があることがわかる。たとえば上載荷重  $p=320$  gr の場合のそれぞれの最大ボルト軸力は 160 gr と 210 gr に対応し, 約 1.3 倍の軸力が発生している。また上載荷重  $p=0$  の場合には同様に最大ボルト軸力 108 gr と 153 gr に対応し, 約 1.4 倍である。いずれの場合もアンカーヘッドを設置することによりボルトに生ずる最大軸力が 1.3~1.4 倍に増大する。

さらに図-3-(c)の結果からボルトに初期締付力を加えた場合, 自重により生ずる地山のせん断抵抗は図-3-(a), 図-3-(b)のいずれの場合よりも増大し, しかもボルト全長にわたって地山の変位を拘束する方向に働いていることがわかる。この場合のボルト軸力の最大値はボルトヘッド(壁面の位置)に発生する。さらに締付力導入後, 上載荷重  $P$ を加えると締付力  $T$ が増大することも示すことができた。

また図-3-(c)中にボルトとベアリングプレートに作用する力の状態を模式的に示してあ

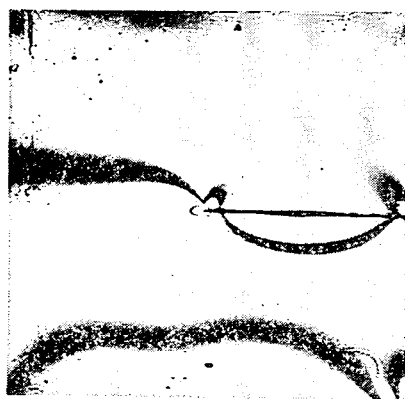
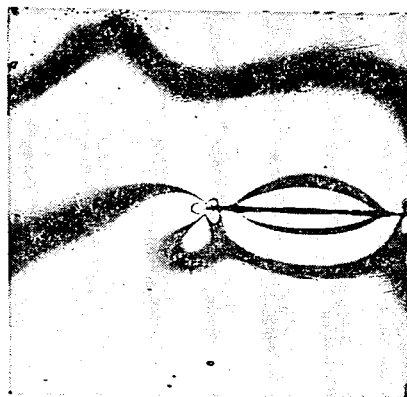
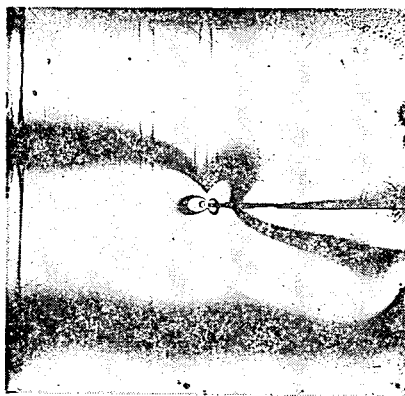
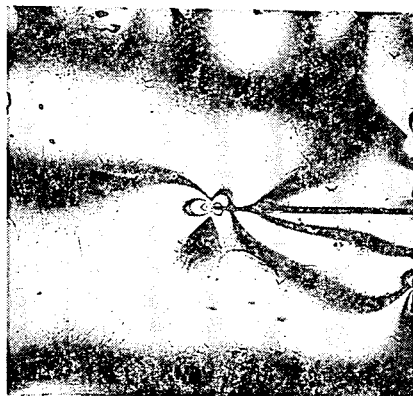
3-1-(a)  $p=0$ 3-1-(b)  $p=320 \text{ gr}$ 3-2-(a)  $p=0$ 3-2-(b)  $p=320 \text{ gr}$ 

写真-3-(B) 実験結果の一例

るが、たとえば初期締付力  $T=309 \text{ gr}$  にさらに荷重  $p=480 \text{ gr}$  を載せた場合には締付力  $T$  は  $379 \text{ gr}$  に増大し、ボルトに作用する地山のせん断抵抗の合計が  $384 \text{ gr}$  であり、この場合のボルトに作用する力のつり合いの状態を良く説明した実験と言える。

図-3-(d)はボルトに締付力 ( $T=995 \text{ gr}$ ) を加えた場合の地山のせん断抵抗で、先端とヘッド部の急激なせん断応力の変化が顕著に現われている。図-4-(d)は締付力  $T=0, 747, 1345 \text{ gr}$  の各場合のボルト軸力の分布を示す。ボルト頭部の軸力が引張力にほぼ一致した値を示しているのは地山のせん断力を積分した値とボルトの引張力とが一致したことであり、力に関してボルトと地山の関係を正確に説明した実験といえる。

図-3-(d)からボルトの引抜き試験を行なう場合のベアリングプレートの構造、反力の取り方等により、ボルト軸力が大きく変化することは容易に想像できる。即ち、引抜き試験を行なう場合には吹付けコンクリートとボルトを完全に縁切りし、かつ、ボルトの引抜き力の反力を吹付けコンクリート (ボルトから数十センチ離れた) に取らせる。

以上の実験結果からゼラチンモデルを使用する光弾性実験によりボルトと地山の挙動を地山の応力状態の変化から明らかにすることが可能と考える。地山の対象を極端に軟弱な粘性地山に仮定したモデル実験であるが、この様な地盤は都市部の沖積堆積平野に多く存

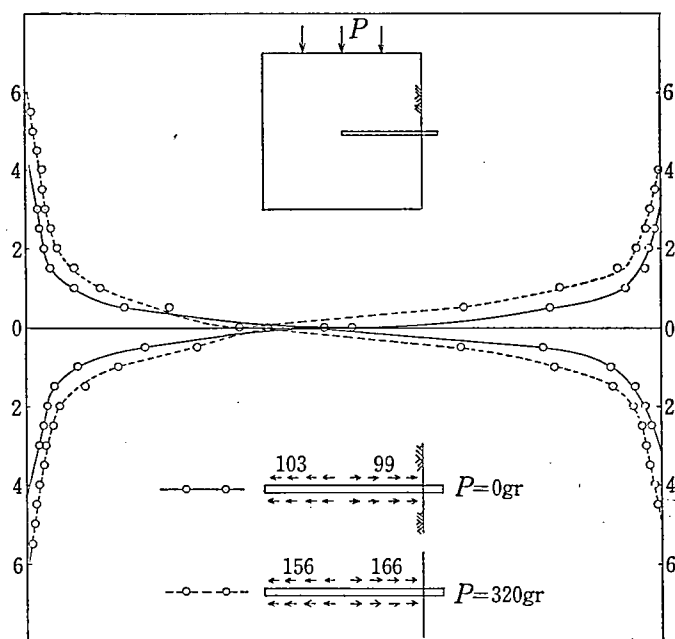


図-3(a) ボルトに作用するせん断応力度分布 (ベアリングプレートなし)

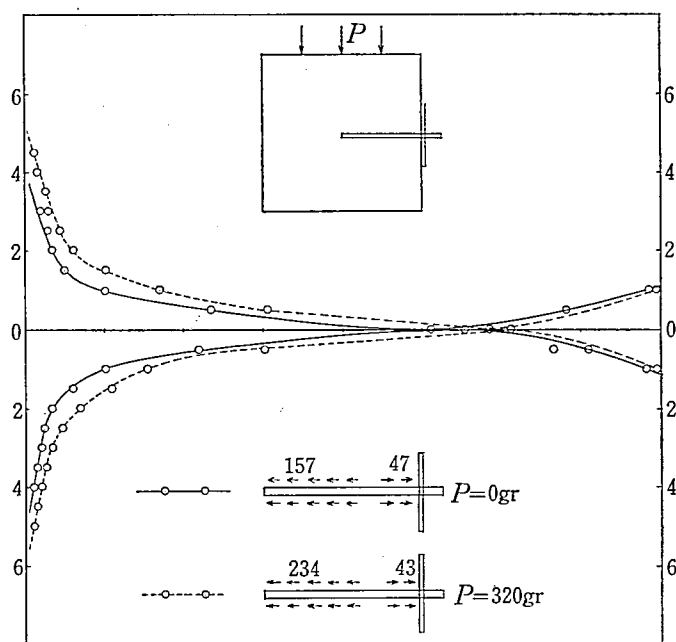


図-3(b) ボルトに作用するせん断応力度分布 (ベアリングプレートあり)

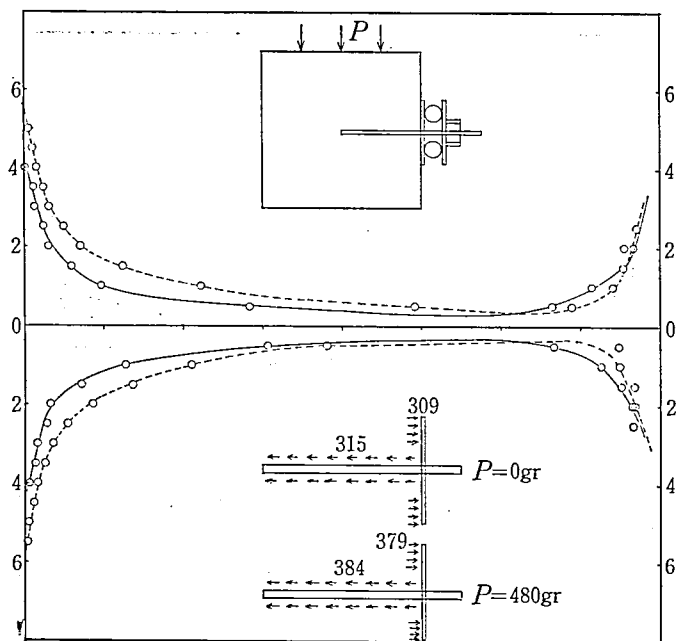


図-3(c) ボルトのせん断応力度分布：初期締付のある場合 ( $T=309 \text{ gr}$ )

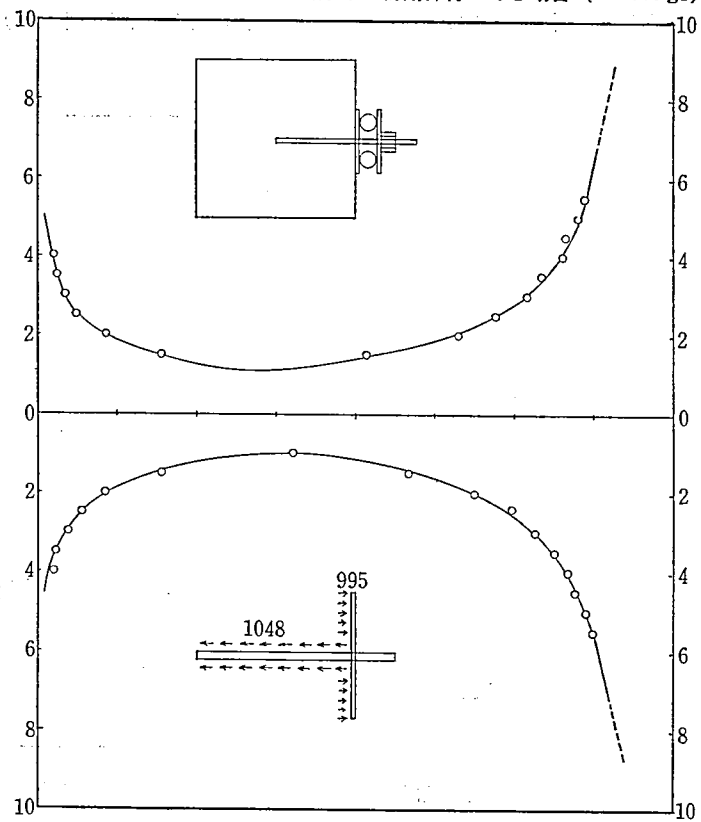


図-3(d) ボルトのせん断応力度分布：初期締付けのある場合 ( $T=995 \text{ gr}$ )



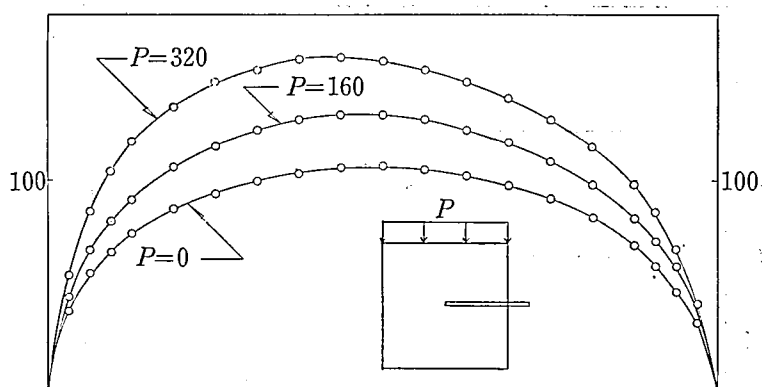


図-4(a) 壁面拘束のない場合のボルト軸力

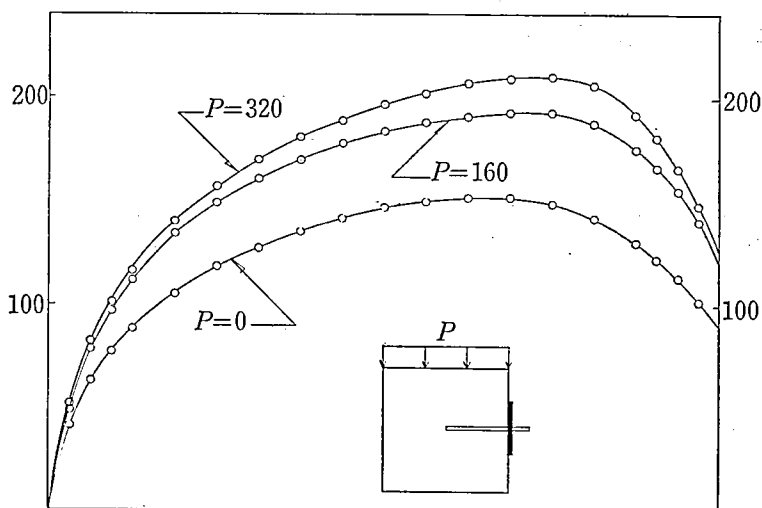


図-4(b) 壁面拘束のある場合のボルト軸力

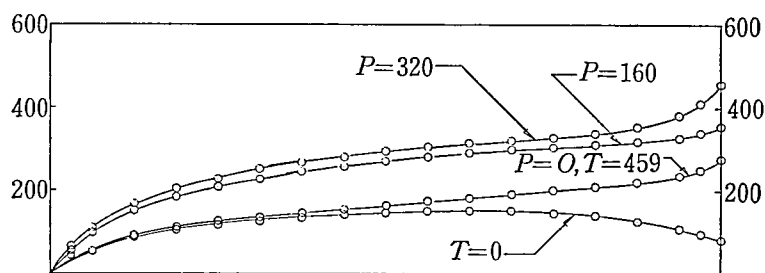


図-4(c) 初期締付 ( $T=459$  gr) 後, 上載荷重 ( $P$ ) によるボルト軸力の変化

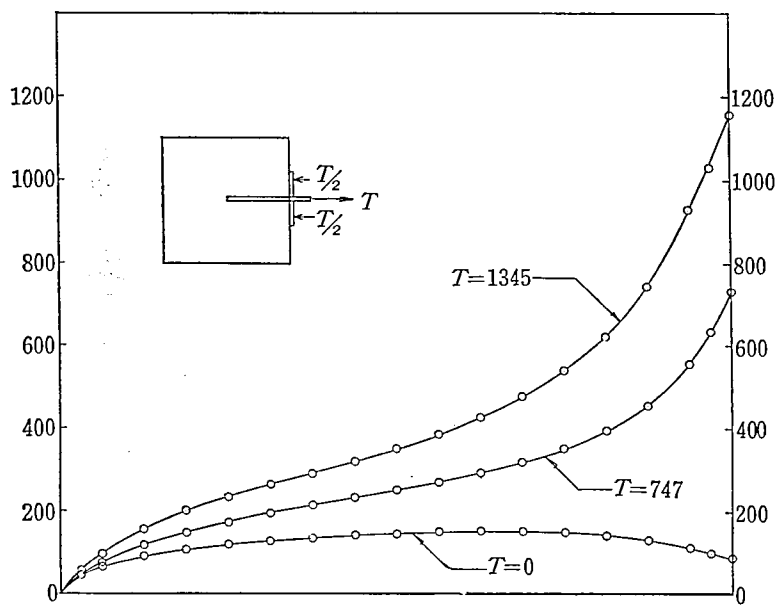


図-4(d) 初期締付力とボルト軸力の変化

在し，例えばシールド発進立坑をロックボルト，吹付けコンクリート工法で施工する場合等のモデル実験に応用可能と考える。