

寒天を用いたトンネル模型実験に関する研究

安 井 将 文*

Experimental Study on the Tunnel Model using the Agar-agar Materials

Masahumi Yasui

I 研究の目的

新オーストリア・トンネル掘削工法 (New Austrian Tunnelling Method, NATM と略称) は現在我国で最も注目されているトンネル掘削工法である。この工法は従来の鋼アーチ支保工を用いた担式工法と異なり、ロックボルトと吹付けコンクリートを用いることによりトンネルを補強する工法である。この工法は施工後トンネル壁面の変位やボルトの応力等を測定し、トンネルの安定状態を調査し、トンネル安定に必要なロックボルト及び吹付けコンクリートの補強工を定める工法である。

補強工を設計するにはロックボルト長、径、断面内のロックボルトのパターン、軸方向ピッチ等を定めねばならぬ。ヨーロッパにおける当初の設計は経験に基づくものであった。その後、適用地山に種々の仮定を設けた実験及び理論研究が行なわれ、以下に示すロックボルトの作用効果に関する理論が提案された^{1)~9)}。

1. 岩盤補強アーチの形成
2. 層の縫い合わせ効果
3. つり下げ効果
4. キーストン効果

これらの研究はいづれも岩盤または砂質地山を対象としたものであり、岩盤または砂質地山に対するロックボルトの作用効果はほぼ定まっている。しかしながら、粘性地山または粘土を対象としたロックボルトに関する研究は未だ残された研究分野であり、その作用効果についても定見のない状態である。

これら実験による研究や理論的研究とともに、電子計算機を使用した有限要素法による弾塑性応力解析をトンネル地山とロックボルトに適用し、ロックボルトの効果を求める研究が行なわれている。有限要素法を用いる計算の場合にはロックボルトの実際の現象を説明できるロックボルトの正しいモデル化が必要であり、かつ、その計算結果を厳密解と比較検討せねばならぬ。しかしながら、ロックボルトを施工する場合のトンネル問題の厳密解は、(1) ボルトの不連続性、(2) 地山の不均一性、(3) 亀裂の存在、などの理由により求められない。また、種々の仮定を設定した計算によってもトンネルの実測値 (実測値自体にも問題を含む) をほぼ説明することが可能なため、ロックボルトのモデル化の是非を検討することが困難である。厳密解を得るためには複雑なトンネルとロックボルトの条件を単純化したモデルに置き換え、モデルに対する厳密解と計算値の比較が重要である。トンネルのモデル実験の重要性が指摘される理由はここにあると言えよう。

筆者はかかる観点から粘性土を対象としたトンネル模型実験の確立を試み、(1) 粘性地

* 理工学部土木学科助教授

山のトンネル土圧, (2) 粘性地山にロックボルトを施工した場合のロックボルトの効果, (3) 粘性地山の破壊領域の解析, などを解明するため各種のトンネル模型実験を行ない, 重要な結果を得たのでここに報告する。

以下に実験の概要とその考察について述べる。

II 実験とその考察

粘性地山を対象としたトンネルの模型実験用材料は, (1) 粘着抵抗を有し, (2) 摩擦抵抗を有さず, (3) 強制圧密により強度が増加する, などの性質を具備すべきである。寒天は上述の (1), (2) の性質を有しており, 多糖類が酸化されてできたポリウロン酸を主成分とする。寒天の基本的特性を調査するため各種の試験を行なった後, さらに

- (1) 2軸圧縮を受ける円形素掘りトンネルの模型実験
- (2) 寒天中のボルト付き落し戸の実験
- (3) 1軸圧縮を受ける円形素掘りトンネルのモデル破壊実験

を行なった。(1) はモデル材料の適性を調査するための実験であり, (2) は粘性地山中に施工されるロックボルトの効果を定性的に論ずるたの実験であり, (3) は破壊領域 (塑性領域) の進展を調査するための基礎実験である。

以下, 基礎実験および (1), (2), (3) の順に, 実験の方法とその結果ならびに結果の考察について述べる。

1. 基礎実験

(1) 試験の方法とその結果

寒天のようなゲル状物質は一般に摩擦抵抗は少なく粘性抵抗のみを有する材料である。モデル粘土に適する寒天の濃度を決定するため $6 \times 6 \times 6$ cm の大きさの, 各種濃度を有する寒天を製作した。写真-1 はこれを示したもので, 寒天の濃度は左から 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2% である。0.8% 濃度の寒天は脱型後数分で自重により底面から亀裂が発生し, 破壊するため, モデル材として不適である。

これらの状態を観察し, モデルに使用する寒天の濃度は 1% を採用した。

寒天のヤング係数を求めるため断面 100×100 , 高さ 150mm の供試体に垂直荷重を加え, 荷重と変形を測

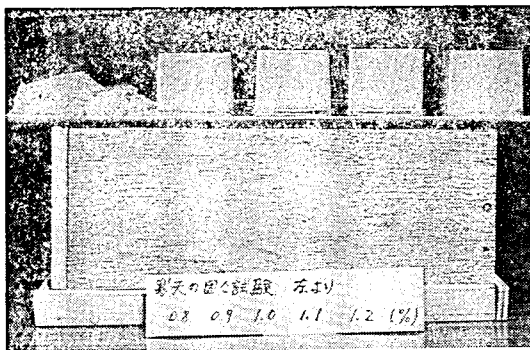


写真-1 寒天の濃度と自立の状態

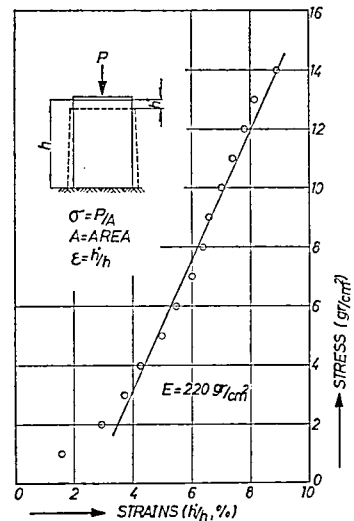


図-1. Stress-Strain Diagram of Agar-agar



写真-2 寒天のせん断試験による破壊面

定した。図-1 は 1% 寒天の応力-歪曲線の 1 例である。これらの結果から 1% 濃度の寒天のヤング係数は 220 gr/cm^2 である。なお、ゲル状物質のポアソン比は約 0.5 であることから、寒天についても 0.5 とした。

寒天の粘着力を求めるため $100 \times 100 \text{ mm}$ のせん断面積を有する 1 面せん断試験を行なった。粘着力 C は破壊時のせん断力をせん断面積で除した値とした。写真-2 に寒天のせん断破壊を示す。また、図-2 は図中に示した荷重 P と変位の測定結果であり、せん断強さ(粘着抵抗 c)は $c = P/A = 3000 \text{ gr}/100 \text{ cm}^2 = 30 \text{ gr/cm}^2$ であった。

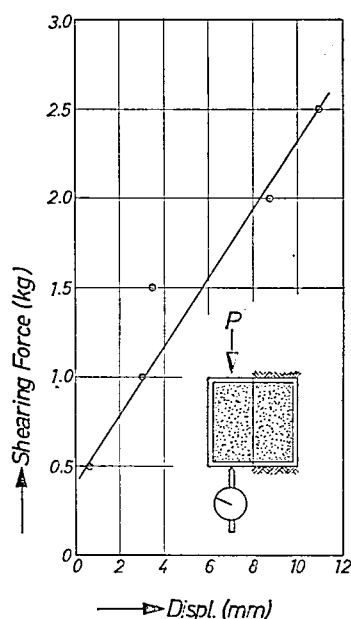


図-2. Results of Shearing Tests for Agar-agar

2. 2軸圧縮を受ける円形素掘りトンネルの模型実験

2-1 実験の方法とその結果

円形素掘りトンネルの存在する場合のトンネルの変形と破壊の状態を調査し、理論と比較した。実験は円形トンネルの内壁に圧力の作用する場合としない場合の2種類について行なった。実験装置を写真-3に示す。実験は圧縮荷重を 1 kg ずつ増加させ 20 kg まで載荷し、各荷重作用後に空洞周辺の写真撮影を行ない、円形空洞の直径の変化を測定した。

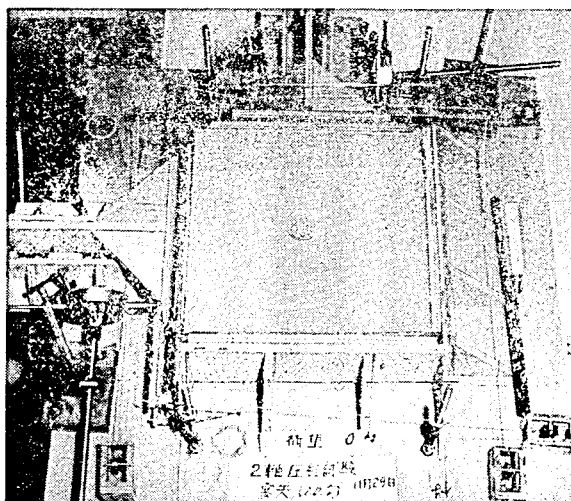


写真-3 円形空洞を有する寒天の2軸圧縮実験の装置

写真-4 は各荷重 (1, 5, 10, 20 kg) 載荷後のトンネル周辺の写真である。

これらの結果から

- (1) 円形空洞の内壁に圧力の作用する場合には空洞

は全く変形せず、 $p=20\text{ kg}$ で直径の変化は約 $0.5\sim 1\text{ mm}$ であった。

(2) 内壁に圧力の作用しない場合には空洞周辺の寒天が同心円状にある領域で破壊(塑性化)していることが確認できた。

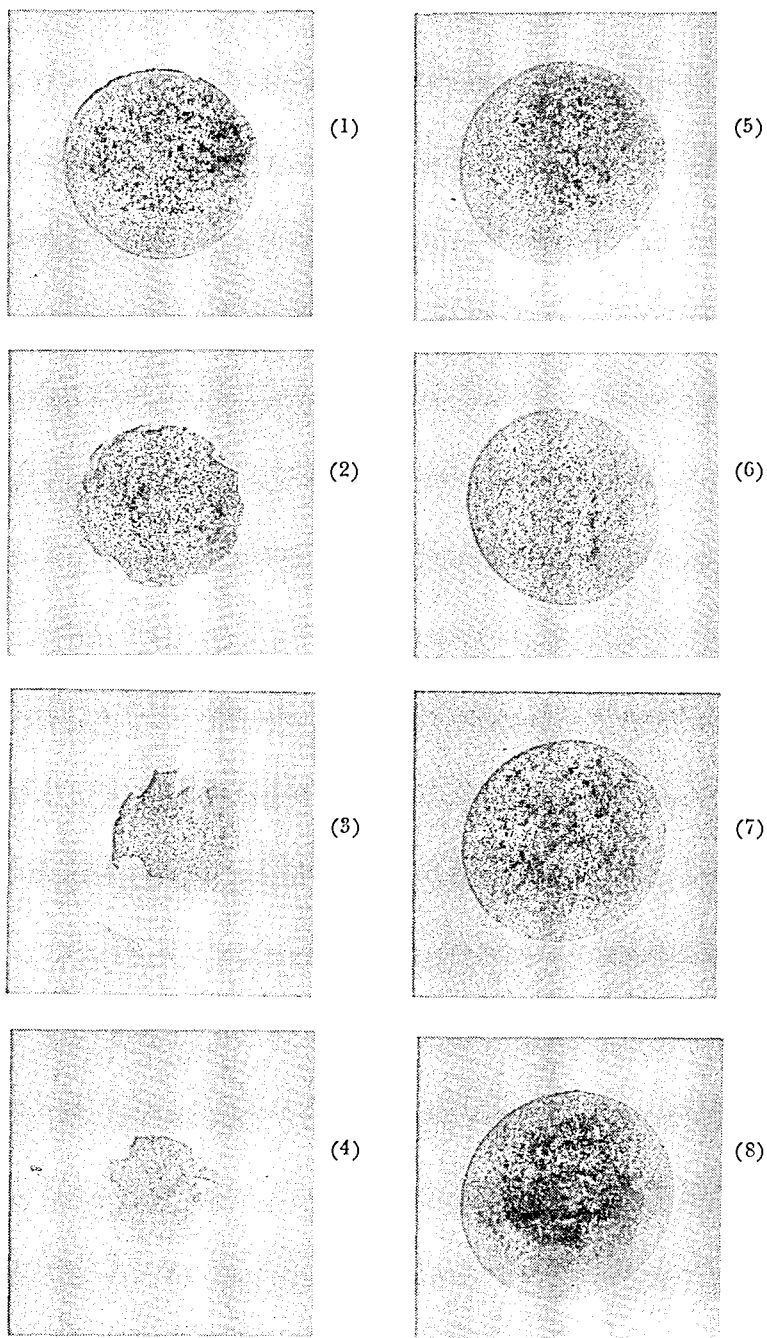


写真-4 円形空洞の変形の状態 ((1)~(4)-空気圧あり, (5)~(8) 空気圧なし)

2-2 試験結果の考察

(i) 内圧を受ける円形空洞の変位：

一様な圧縮力を受ける円形弾性空洞の半径方向変位は次式で与えられる。

$$(u)_{r=r_a} = \frac{r_a}{2\mu} (p_0 - \sigma_{ra}) + \frac{p_0}{2(\lambda + \mu)} \quad (1)$$

但し、 λ, μ ：ラーメの定数、 $\lambda = \infty$,

$$\mu = 73.3 \text{ g/cm}^2$$

r_a ：トンネル内壁の半径 (cm)

σ_{ra} ：内壁に作用する空気圧 (gr/cm²)

p_0 ：寒天に作用する一様な圧力 (gr/cm²)

$\lambda = \infty$ から (1) 式は (2) 式で与えられる。

$$(u_r)_{r=r_a} = \frac{r_a}{2\mu} (p_0 - \sigma_{ra}) \quad (2)$$

(2)式から外圧 p_0 と内圧 σ_{ra} が等しい場合にはトンネルの内壁は変形しない。 $P=20 \text{ kg}$ ($p_0=66.7 \text{ gr/cm}^2$) の場合の直径変化はほとんど生ぜず、ほぼ内圧と外圧が等しいと考えられる。内圧は空洞内に封入された空気圧によって生ずる。外圧 p_0 に等しい内圧を発生させるための空洞の直径の変化をボイル・シャルルの法則を適用して求めると $r_a'=1.94 \text{ cm}$ であり、直径の変化は 1.4 mm になる。これは実測値 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ の値をほぼ説明できる値であり寒天のトンネル模型としての適性をうかがわせるものといえる。

また、内圧のない場合との比較により、内圧はトンネルの破壊及び変形に対して大きな効果を有することが明らかになり、圧気シールド工法における内圧の効果を実証したものといえる。

(ii) 内圧を受けない場合の破壊について

写真-4-7 から $P=8 \sim 10 \text{ kg}$ のとき空洞の周辺の寒天が破壊し始めた。この場合 ($P=10 \text{ kg}$) の空洞周辺の直応力 σ_r は $2p_0$ で与えられる。寒天に作用する一様な外圧 p_0 は p_0

$$= \frac{10 \text{ kg}}{300 \text{ cm}^2} = 33.3 \text{ gr/cm}^2 \text{ であるから寒天の}$$

周辺直応力 $\sigma_r = 2 \times 33 = 66 \text{ gr/cm}^2$ になる。

一方、寒天の粘着抵抗は約 30 gr/cm^2 であり、その1軸圧縮強度は $2 \times 30 = 60 \text{ gr/cm}^2$

である。従って周辺の寒天の圧縮応力が寒天の1軸圧縮強度に達した時、破壊が始まったことを示している。これは実験の精度を保証する1例といえる。

なお、写真-4-(7) に見られる同心円状の破壊領域（塑性領域）の解析を検討中で

あり、現在までに得られた解析について述べると以下のごとくである。

図-3 の記号を用いて摩擦抵抗のない場

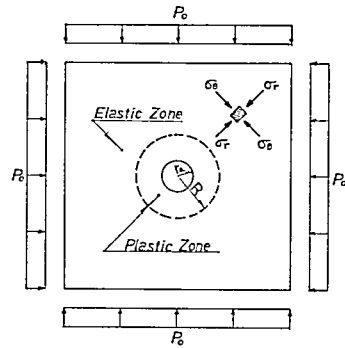


図-3. Elastic and Plastic Analysis of Tunnel Problems

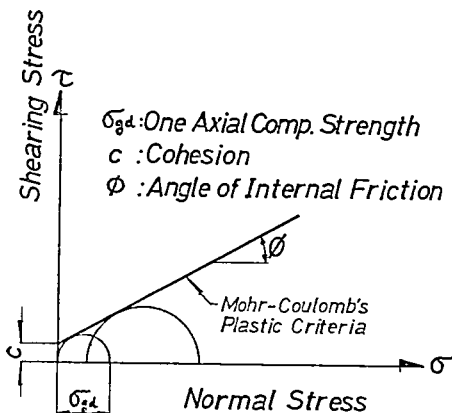


図-4. モーラー・クーロンの破壊規準

合 ($\varphi=0^\circ$) の円形トンネルの塑性領域を求める。図-4 のモール・クーロンの破壊規準は次式の関係を満足する。

$$\sigma_\theta - \xi \cdot \sigma_r - \sigma_{gd} = 0 \quad (4)$$

但し、

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

σ_r, σ_θ : それぞれトンネル半径及び接線方向の直応力

σ_{gd} : 地山の 1 軸圧縮強度

φ : 地山の内部摩擦角

この実験は軸対称問題であり、応力、変位ともに軸対称になる。塑性領域内の応力を求めるため、応力の塑性条件(4)式、さらに応力の釣合い条件を満足する応力関数 F ((5)式)を導入し、応力関数 F の満足すべき微分方程式 (6) 式を得る。これを境界条件 (7) 式を用いて解けば、応力関数の特解は (8) 式で与えられる。従って塑性領域内の応力は (9) 式で与えられる。

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2}, \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \quad (5)$$

$$\frac{d^2 F}{dr^2} - \xi \cdot \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} - \sigma_{gd} = 0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} r=r_0 \text{ で } \sigma_r=0, \tau_{r\theta}=0 \\ r=\infty \text{ で } \sigma_r=p_0, \tau_{r\theta}=0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$F = \left\{ \sigma_{ra} + \frac{\sigma_{gd}}{\xi-1} \right\} r_a^{1-\xi} \cdot \frac{r^{\xi+1}}{\xi+1} - \frac{\sigma_{gd}}{\xi-1} \frac{r^2}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_{rp} = \frac{\sigma_{gd}}{\xi-1} \left\{ \left(\frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right\}, \quad \sigma_{\theta p} = \frac{\sigma_{gd}}{\xi-1} \left\{ \left(\frac{r}{r_a} \right)^{\xi-1} \cdot \xi - 1 \right\} \quad (9)$$

(9)式から弾塑性境界上の応力は

$$(\sigma_{rp})_{r=R} = \frac{\sigma_{gd}}{\xi-1} \left\{ \left(\frac{R}{r_a} \right)^{\xi-1} - 1 \right\}, \quad (\sigma_{\theta p})_{r=R} = \frac{\sigma_{gd}}{\xi-1} \left\{ \left(\frac{R}{r_a} \right)^{\xi-1} \cdot \xi - 1 \right\} \quad (10)$$

次に弾性領域内の応力 $\sigma_{re}, \sigma_{\theta e}$ と変位を求めるには、弾塑性境界上で $(\sigma_{rp})_{r=R}, (\tau_{r\theta})_{r=R} = 0, (\sigma_{\theta p})_{r=R}$ 、無限遠点 ($r=\infty$) で $\sigma_{re} = \sigma_{\theta e} = p_0, \tau_{r\theta} = 0$ なる境界条件を用い、さらに弾性条件式 (11) に歪-変位関係式 (12) を代入し、変位で表わした応力をつり合い条件式 (13) に代入することにより、変位に関する微分方程式 (14) を得る。この一般解は (15) 式で与えられる。境界条件を用いて得られた弾性領域内の応力 $\sigma_{re}, \sigma_{\theta e}$ を式 (16) に示す。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{re} = \lambda (\epsilon_{re} + \epsilon_{\theta e}) - 2\mu \cdot \epsilon_{re} \\ \sigma_{\theta e} = \lambda (\epsilon_{re} + \epsilon_{\theta e}) + 2\mu \cdot \epsilon_{\theta e} \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_{\theta e} = \frac{u}{r}, \quad \gamma_{r\theta} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_{re}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{re} - \sigma_{\theta e}}{r} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (14)$$

$$u = \frac{c_1}{r} + c_2 r + c_3 \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{re} &= p_0 - \left\{ p_0 - (\sigma_{rp})_{r=R} \right\} \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_{ee} &= p_0 + \left\{ p_0 - (\sigma_{rp})_{r=R} \right\} \cdot \frac{R^2}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

弾塑性境界における $(\sigma_{ee})_{r=R}$ は

$$(\sigma_{ee})_{r=R} = p_0 + \left\{ p_0 - (\sigma_{rp})_{r=R} \right\} \cdot 1 = 2p_0 - (\sigma_{rp})_{r=R} \quad (17)$$

弾性境界上の応力 $(\sigma_{ee})_{r=p}$ と $(\sigma_{rp})_{r=R}$ は寒天の降伏条件(4)を満足せねばならぬ。従って

$$(\sigma_{ee})_{r=R} = \xi \cdot (\sigma_{rp})_{r=R} + \sigma_{gd} \quad (18)$$

が成立する。また、弾塑性境界上では応力の連続条件から $(\sigma_{ee})_{r=p} = (\sigma_{ee})_{r=R}$ が成立するから、(17)、(18)式を用いれば弾塑性境界上の半径方向直応力 $(\sigma_{rp})_{r=R}$ は次式で与えられる。

$$(\sigma_{rp})_{r=R} = \frac{2p_0 - \sigma_{gd}}{1 + \xi} \quad (19)$$

(19)式と(10)式に $r=R$ を代入した値が等しい条件から弾塑領域 R は次式で定まる。

$$\frac{R}{r_a} = \left\{ \frac{2}{1 + \xi} \cdot \frac{\sigma_{gd} + p_0(\xi - 1)}{\sigma_{gd} + \sigma_{ra}(\xi - 1)} \right\}^{\frac{1}{\xi - 1}} \quad (20)$$

以上の展開は内部摩擦角 $\varphi \neq 0$ の場合であるが、粘土の場合には $\varphi = 0$ 即ち $\xi = \frac{1 + \sin 0^\circ}{1 - \sin 0^\circ} = 1.0$ の場合である。粘土の破壊領域を求めるため、弾塑性境界 R を式(20)を用いて求めると次式になる。

$$R = \exp \left\{ \frac{2p_0 - \sigma_{gd}}{2\sigma_{gd}} \cdot r_a \right\} \quad (21)$$

筆者の誘導した粘土の弾塑性境界 R について考察すれば、周辺の応力が寒天の1軸圧縮強度 σ_{gd} に等しくなった場合に空洞周辺から降伏が始まることを意味しており、この事実は既に述べた通り、実験で確認されている。

塑性領域の進展に関する理論については未だ研究の余地があるとはいえ、破壊に関する理論をモデル実験により実証した例である。これはトンネル地山の破壊現象を扱う分野に新たな実験手段を提供したものといえる。

3. 寒天中のボルト付き落し戸の実験⁶⁾

3-1 実験の方法とその結果

所定の方法で寒天の溶液を製作し、図-5に示す如く、 $50 \times 50 \times 40$ cm の試験槽の底に直径 10 cm のアクリル板の落し戸をセットし、漏れ止めを行なった後、寒天を流し込み、温度 10°C 、湿度 95% 以上で3日間養生し、4日目に測定を行なう。

養生終了後、落し戸受台、ロードセル、ジャッキ、ダイヤルゲージ等をセットし、受台

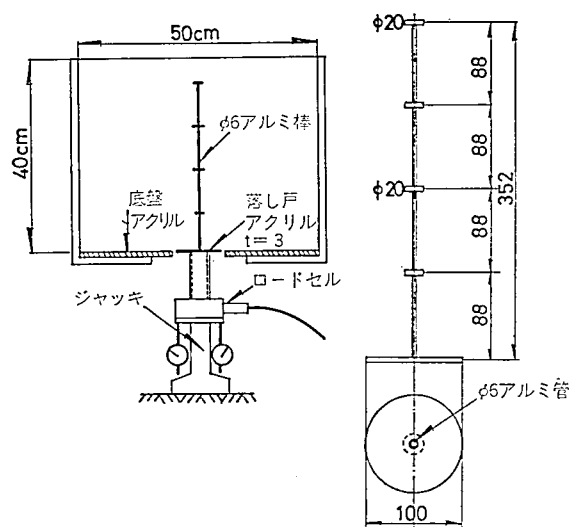


図-5 ボルト付き落し戸の実験装置とボルトの詳細図

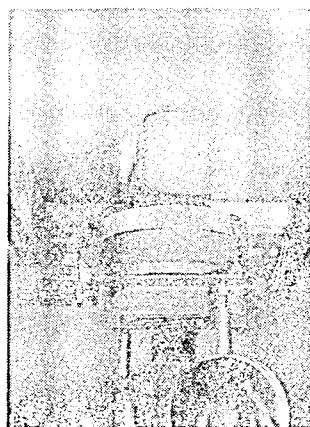


写真-5 落し戸，ロードセル，ジャッキ頭部

が落し戸に接した状態を初期状態とする。漏れ止めと落し戸支え金具を取りはずし、荷重を受け台を介してロードセルに伝え、これを測定する。

落し戸の垂直変位はジャッキの頭部を強制的に降下させることにより与え、降下速度を1秒・1/100 mmとした(写真-5 参照)。

表-1 落し戸の実験の実施例

落し戸の種類	実験の種類と数	
	1% 濃度寒天	2% 濃度寒天
ボルトなし	2例	2例
ボルトあり	2例	2例(鍔直径 2 cm)
		2例(鍔直径 5 cm)

実験は濃度 1%，2% の寒天についてボルト付き落し戸，ボルトなし落し戸の場合をそれぞれ 2 回ずつ行なった。これらの実験の種類を表-1 に示す。

これらの実験により得られた落し戸に作用する圧力と落し戸の垂直変位の関係を 図-6 にまとめて示す。また、鍔付きボルトの引抜き抵抗力を求めるため、落し戸の実験に先立ち、上面に設置した引抜き用ボルトに引抜き荷重を作用させ、引抜き試験を行なった。荷重とボルトの垂直上方への変位の関係を 図-7 に示す。

本実験においては寒天を大量(100 l)に使用するため、II-1 基礎実験で述べた寒天の製法と多少異り、これら寒天の性質を調査するため 3 軸せん断試験(UU)を行なった。写真-6 はせん断試験のモデルである。試験結果を表-2 にまとめて示す。これらの結果から 1%，2%濃度の寒天はともに内部摩擦角がほぼ零度であることが確認できた。

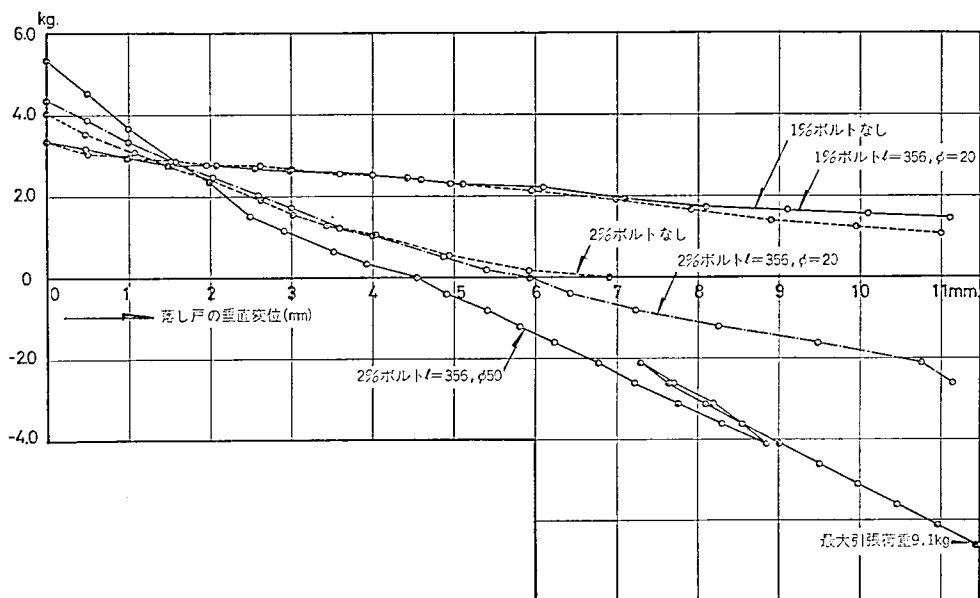


図-6 落下戸に作用する圧力と落下戸の垂直変位の関係



写真-6 3軸せん断試験の様子

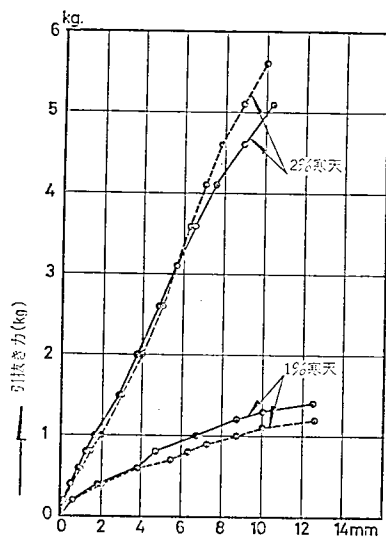


図-7 ボルトの引抜き曲線

表-2 寒天の3軸せん断試験結果 (UU)

	STRESS (1.0%)		STRESS (2.0%)	
	σ_1 (kg/cm ²)	σ_3 (")	σ_1 (kg/cm ²)	σ_3 (")
1	0.305	0.2	0.329	0.2
2	0.515	0.4	0.516	0.4
3	0.708	0.6	0.696	0.6
4	0.911	0.8	0.898	0.8
5	—	—	1.097	1.0
	$c=0.05$ $\sim 0.06 \text{ kg/cm}^2$ $\phi=0^\circ$		$c=0.05$ $\sim 0.07 \text{ kg/cm}^2$ $\phi=0^\circ$	

3-2 実験結果の考察

図-6 の 1% 濃度のボルト有り, 無しの結果から寒天が軟らかく亀裂の発生し易い場合には落とし戸はボルトの有無に拘らず自立できず, 落とし戸に作用する圧力も同じ値を示す。これは寒天自体が圧潰し流動化することに原因がある。従って地山が水を多く含み流動化し易いトンネル地山は強度自体が小さいものと考えられ, このような状態は 1% 寒天の場合に相当し, かかる地山にロックボルトを施工してもロックボルトの効果を期待できないことを実証したものである。

2% 濃度寒天のボルト有り, 無しの実験結果から, ボルトの自立に要する垂直変位はボルトなしの場合 7 mm, $\phi 20$ mm の鍍付きボルトの場合 6 mm, $\phi 50$ mm の鍍付きボルトの場合 4.5 mm であり, さらに, 自立後の変位と引張荷重はほぼ直線的であり, 引抜き荷重は $\phi 20$ mm 鍍付きボルトの場合 2.5 kg, $\phi 50$ mm 鍍付きボルトの場合 8~9 kg であった。さらに荷重の増減に対しても寒天の支持能力が変化しないことを示している。

2% 寒天の実験結果はボルトの粘着抵抗を増大させることによりトンネル安定に必要なトンネル内壁の変形を減少させ, ゆるみを防止する効果が期待できることを意味している。さらに, 自立後のボルトの引抜き耐力も増加する。従って寒天中のボルト付き落とし戸の実験から, ある程度の粘着抵抗を有し, 流動化する恐れのない粘性地山中にロックボルトを施工する場合のロックボルトの有効性を定性的に示すことができた。

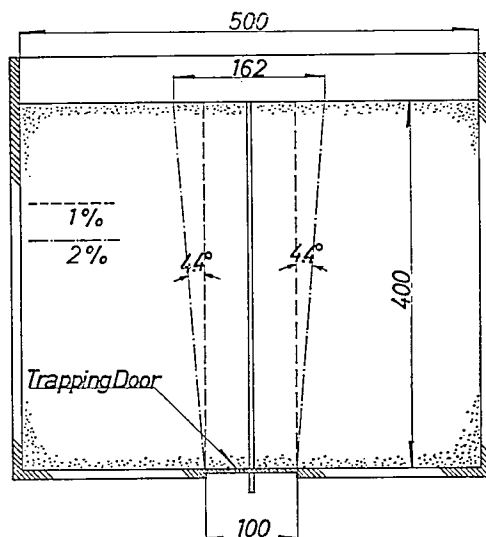


図-8. Regions acting of Agar-agar Pressure

図-6 に示した 1% 濃度の寒天に関する落とし戸の実験結果から, ボルト有り落とし戸, ボルト無し落とし戸に作用する圧力の初期値 (垂直変位零の場合) はともに 3.4 kg である。この値は直径 10 cm の落とし戸の上の寒天の全重量 ($40 \times \frac{\pi \times 10^2}{4} \times 1.01 = 3,170$ gr) にほぼ一致する (図-8 参照)。この例は濃度 1% 程度の軟弱な寒天の場合には落とし戸に作用する圧力が静水圧の状態に近いことを実証した例といえる。また 2% 濃度寒天に関する落とし戸に作

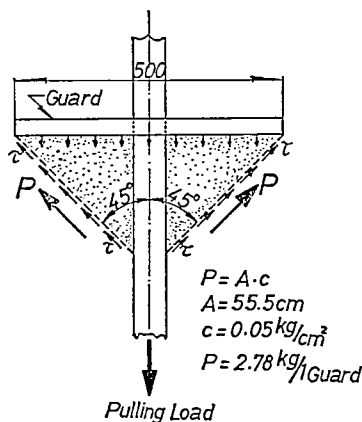


図-9. Hypothesis of Shearing Resistance

用する圧力の初期値は 3.9~5.5 kg であり, ボルト有り, 無しのいずれの場合も 1% 濃度の場合の実測値よりも大きな値である。1 例として初期値 5.5 kg の場合には, 落し戸に圧力を及ぼす寒天の範囲は 図-8 の鎖線に示すような上方に拡大したものになる。この事実は局部的応力集中による流動現象の発生しない一様で均質な粘性地山においては局部的に軟弱な個所(落し戸の存在がこれに相当)が存在する場合には, その部分に応力集中が発生することを示したものである。

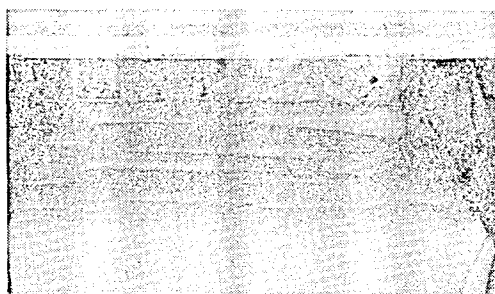


写真-7 ボルト引抜き破壊後の鋳付近の寒天の破壊状態

2% 濃度寒天の場合のボルトの自立後の引抜き荷重を推定するため, 鋳付きボルトの引抜きによる寒天のせん断破壊面を写真-6 を参照して 図-9 の如く想定し試算を行なった。その結果, 鋳直径 50 mm の場合には引抜き耐力 7.9 kg, 直径 20 mm の場合には 1.3 kg を得た。いずれの計算値も実測値を良く説明しており, 寒天中のボルトの引抜きによる破壊状態の考え方が妥当なことを実証したものである。

4. 1 軸圧縮を受ける円形素掘りトンネルのモデル破壊実験

円形空洞を有する粘性地山が 1 軸方向に圧縮される場合の破壊状態を調査するため 図-10 に示す実験装置を用いて, 中心に直径 150 mm の円形空洞を有する寒天の破壊実験を行なった。寒天の寸法は $1,000 \times 1,000 \times 100$ (100 l) mm であり, 装置は水平面内で寒天を圧縮するようになっており, また, 寒天の変形が平面歪の状態になるよう空洞軸に直角な上・下面を拘束してある。

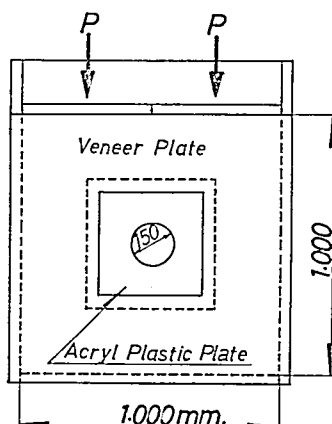


図-10. Experimental Equip.

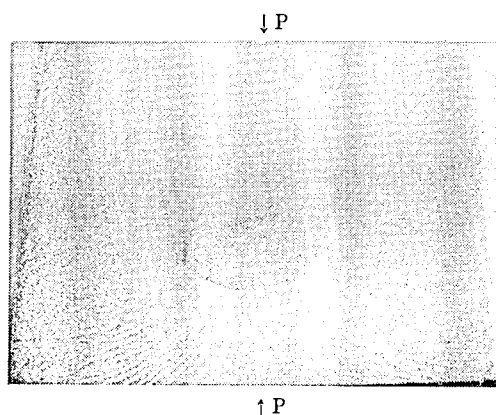


写真-8 円形空洞の破壊状態
(側壁の楔形破壊領域に注意)

円形空洞の破壊の状態を写真-8に示す。圧縮方向に対して直交する空洞の周辺部（側壁部）が楔状に押し出される状態で破壊する。この結果は具体的な破壊の形状をモデル実験により得たものであり、貴重なものである。しかしながら、本実験は数も少なく、未処理の問題も存在するため、現段階における言及はこの程度に止める。

III 結 論

トンネルのモデル実験を確立するため、筆者はトンネル地山を粘性地山に限定し、地山を寒天にモデル化したモデル実験法を提案し各種の実験を行ない、その結果を考察した。

II-2：一様な圧縮を受ける円形トンネルの実験においては、寒天は地山が弾性領域内にある場合のトンネル模型実験に適した材料であるばかりか、粘性地山の破壊現象を扱うモデル実験としても適性を有することが確認された。即ち、破壊現象をモデル実験により求める実験分野の拡大を行なった。

II-3：寒天中のボルト付き落し戸に関する実験においては、粘性地山中のロックボルトの効果を定量的に説明し、流動化の恐れのある粘性地山においてはロックボルトの効果は全く期待できないこと、また2%寒天濃度の結果から粘性抵抗の大きな地山においてはロックボルトと地山のせん断抵抗の増加に工夫を行なえばロックボルトの効果が期待できることなどを示すことができた。さらに、軟弱地山や均質で安定な粘性地山中のトンネル土圧に対する考察も行なった。

これらの考察をまとめると、寒天を用いた粘性地山を対象としたトンネルのモデル実験法は地山の破壊現象まで含めたトンネルの問題を扱う実験法として適性を有していることが確認できた。これはモデル実験法の拡大を意味する。

国土の狭い我国にあっては国土の有効利用の観点から、軟弱な地盤中に大断面トンネルを掘削する工事が今後増加することは明らかである。かかるトンネル掘削の種々の問題を解析するために本実験の適用が期待される。

謝 辞

本研究は昭和52年度53年度明星大学・理工学部・土木工学科の卒業研究として行なわれた実験の資料をまとめたものである。実験データは、佐藤滋行、矢部利行、山口利治、岡山秀夫、飯田清、本木久之君等の努力の成果であり、改めて感謝致します。

土木工学科・森満雄教授には種々土に関して御意見を頂き、また寒天のせん断試験に御好意頂いた阿部道雄助手に心から感謝致します。

参考文献

- 1) Rabcewicz, L. v. "Bolted Support for Tunnels" Water Power April and May, 1954.
- 2) Panck, I. A., "Principles of Reinforcing Bedded Mine Roof with Bolts" U.S. Bur. Mines Report, Invest., 5156, 1956.
- 3) Lang, T. A. "Rock Behaviour and Rock Bolts Support in Large Excavations" Sym-

- posium on Underground Power Station, ASCE Power Division, Oct., 1957, New York.
- 4) Rabcewicz, L. v. "Stability of Tunnels under Rock Road" Water Power, June, July and Aug., 1969.
 - 5) Feder, G. "Zur Wirkungsweise der Systemankerung von Hohlraumbauten in Isotropem Festem Gabcirge" Berg-und Huttenmannische Monatshefte, Heft 6, 1976.
 - 6) Egger, P "トンネル支保工に及ぼす破壊後の岩盤の影響" 海峽線鉄道の技術に関する文献資料調査報告書, 日本トンネル技術協会, 1978.
 - 7) 山本 稔 "ロックボルトの作用効果について" 土木学会論文報告集第 227 号 1978 年 9 月
 - 8) 安井将文 "寒天中のボルト付き落し戸に作用する圧力の測定" 昭和 54 年度第 34 回土木学会年次学術講演会講演概要集 No. 3
 - 9) 安井将文 "ロックボルトを有する粘土の変形特性に関する研究" 昭和 54 年度土木学会関東支部年次学術講演会講演概要集