

粘性地山を対象とした NATM の モデル実験とその考察

安井将文*

The model experiments for NATM in the case of soil ground and
its consideration

by Masafumi YASUI

1. まえがき

筆者は粘性地山中のロックボルトの作用効果を求めるため簡単な実験による粘土中のボルト軸力の測定を行い、ボルト軸力に及ぼすベアリングプレートの効果、ボルトの初期締付け効果等について実証的研究を行った¹⁾。この研究はボルト要素のみを取り出して行ったモデル実験であり、ロックボルト周囲の地山の変形に対する仮定や、単一ボルトによる実験等、種々の問題が存在することは事実である。この解決にはロックボルト、吹付コンクリート、トンネル地山の一体化されたトンネルモデル実験が必要となる。しかしながらこのモデル実験には、(i)地山材料のモデル化、(ii)载荷の方法、等により一般に大規模な実験設備が要求される。これらの問題を解決し、小規模実験装置を開発するため筆者は自重により破壊する粘性地山のモデルに寒天を選び、基礎的研究^{2,3)}を行い、先に粘性地山のトンネル周辺の破壊に関する研究実験を行い報告⁴⁾した。

これらの研究成果を踏まえ筆者は土被りが大きく軟弱な粘性地山中のトンネルにおけるロックボルトと吹付コンクリートの有効な施工及び設計を確立するため、対象となる地山中にトンネル掘削を行った場合のトンネル周辺の破壊の状態やロックボルトと吹付コンクリートを施工した場合の空洞の変形、ボルト軸力、吹付コンクリートに作用する地山の圧力等を測定する実験を行った。

以下に実験の概要と開発した寒天モデルの性質、実験の方法、結果と考察について述べ、最後に筆者の提案する設計法の考え方とその計算例を示す。

2. ロックボルトと吹付コンクリートのモデル実験に対する考察

直径 4 m 程度の円形トンネルにロックボルトと吹付コンクリートを施工したトンネルのモデル実験を行うためロックボルトと吹付コンクリートの応力及び変形状態をまず考察しなければならぬ。図-1 は円形トンネルにおけるクラウンとスプリングラインの半径方向変位 $(u_r)_{r=R}$ と切り羽の位置との関係を示している⁵⁾。図によれば切り羽におけるクラウ

* 理工学部土木工学科教授 応用力学

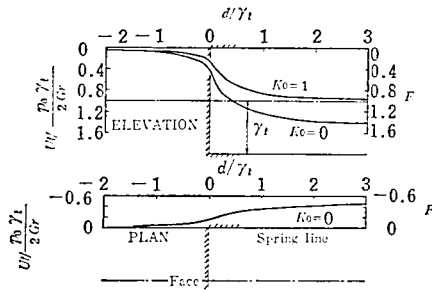


図-1 トンネル掘削と円形空洞の変形⁵⁾ (W. H. Ward による)

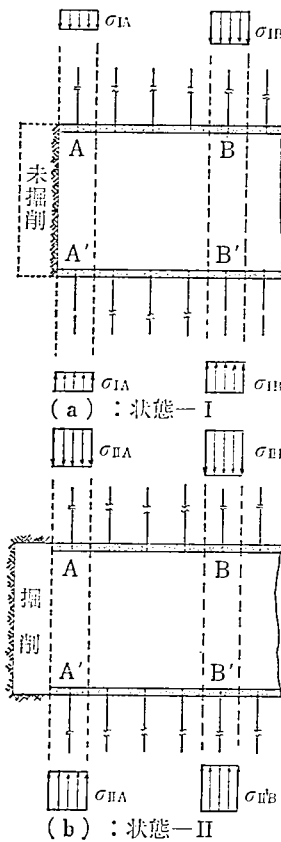


図-2 ロックボルトと吹付コンクリート施工したトンネルの掘削と土圧の関係

ンの変位は切り羽が進行した場合 (図の横軸で3.0付近) の変位の約3割である。残り7割は切り羽の進行により発生する (この割合は側圧係数 $\lambda = \text{水平圧力 } P_h / \text{鉛直圧力 } P_v$ により変化する)。図-2は吹付コンクリートとロックボルトを施工した円形トンネルの縦断面図で、地山の応力状態を示している。AA'区間掘削直後の地山の応力状態を σ_I , 変位状

態を δ_I とし、掘削直後に施工したロックボルトと吹付コンクリートの応力状態を零と仮定する。掘削による切り羽の進行とともにロックボルトと吹付コンクリートの変形，応力が発生するのは切り羽の進行とともに図-2の AA' 区間（または BB' 区間）の地山の応力，変位状態が変化し，地山と一体化しているロックボルトと吹付コンクリートに変形を強制するためである。

ロックボルトと吹付コンクリートのメカニズムに対する以上の考察を基にしてロックボルトと吹付コンクリート及び地山のメカニズムを次のように区分整理して考えることとする。（図-3は図-2の横断方向の応力状態の説明図である。）

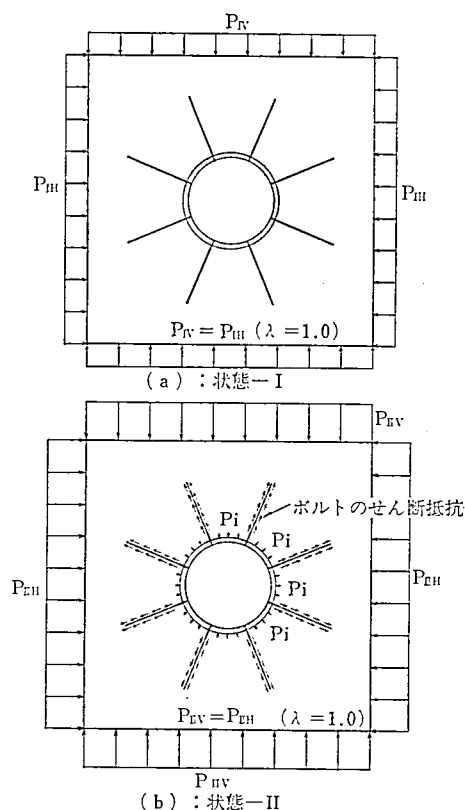


図-3 ロックボルトと吹付コンクリート施工したトンネルの横断面とそのメカニズム

- ①状態-I ; AA' 区間（または BB' 区間）の掘削直後ロックボルト吹付コンクリートを施工し，次の掘削開始まで地山の応力状態 σ_I は変化しない。従ってロックボルトと吹付コンクリートの応力は零である。この場合のトンネル周辺の変位と応力の状態を δ_I, σ_I とする。

②状態一Ⅱ；切り羽の進行により AA' (BB') 区間のトンネル周辺の変位と応力は変化し、それぞれ δ_{II} , σ_{II} になる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{II} &= \sigma_I + \Delta\sigma \\ \delta_{II} &= \delta_I + \Delta\delta \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

以上の区分整理した状態に対応するモデル実験を行うため、次の仮定を設ける。

(ア)状態一Ⅰのトンネル周辺地山の変位及び応力状態 δ_I , σ_I を零とする。

(イ)軟弱な粘性地山で土被りは大きい。ポアソン比 $\nu=0.5$, 側圧係数 $\lambda=1.0$ とする。

以上の仮定によりモデル実験は簡単化される。即ち状態一Ⅰは寒天モデルを水平な状態で製作しロックボルトと吹付コンクリートモデルを設置することにより実現でき、式(2.1)は式(2.2)になる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{II} &= \Delta\sigma \\ \delta_{II} &= \Delta\delta \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

$\Delta\sigma$, $\Delta\delta$ は付加的応力と変位である。

状態一Ⅱは水平な寒天モデルを回転し鉛直な状態にすることにより式(2.2)で与えられる付加の変位と応力状態を実現できる。

上記(ア), (イ)の仮定を設けたモデル実験において筆者は下記(a), (b)のモデルについて状態一Ⅰ, 状態一Ⅱの測定を行い、(a), (b)の変形, ボルト軸力, 破壊等を求め、

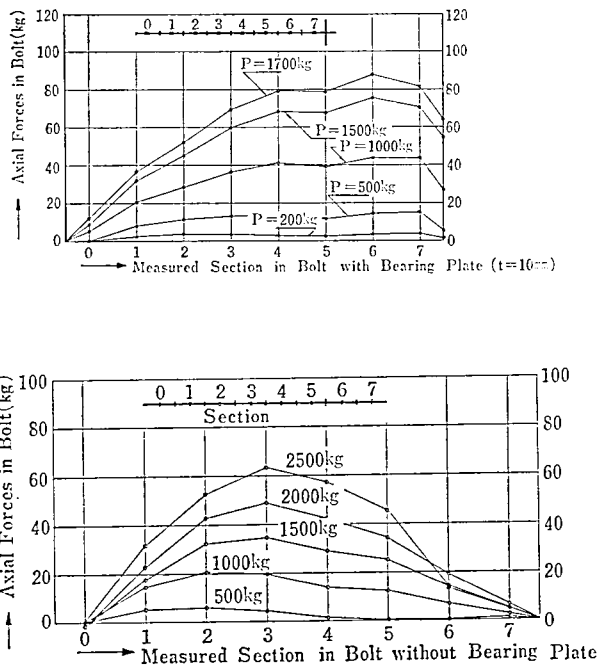


図-4 (a) ベアリングプレートあり, なしの場合のロックボルト軸力の分布

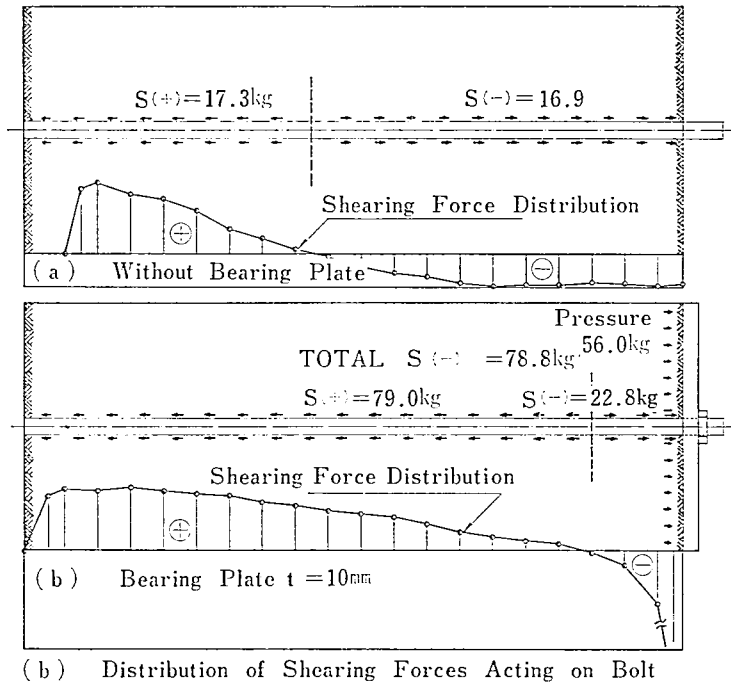


図-4 粘土中のロックボルト軸力の測定結果と粘土のロックボルトの関係¹⁾

表-1 実験の種類

種類	材料の性質	実験の条件	
I	粉末寒天のみ (1.5%濃度) $q_u = 130 \text{ gr/cm}^2$ $c = 60 \text{ gr/cm}^2$ $\theta = 0^\circ$	1	未補強空洞 (側圧の測定, 変形の写真撮影)
		2	ロックボルトと吹付コンクリートで補強 (側圧の測定, ロックボルト軸力, 地山の圧力の測定, 写真撮影)
II	おがくず (5%) 入り寒天 $q_u = 90 \text{ gr/cm}^2$ $c = 40 \text{ gr/cm}^2$ $\theta = 2^\circ$	1	Iの1に同じ
		2	Iの2に同じ

ロックボルトと吹付コンクリートに対する考察を行った。

(a) 円形素掘りトンネル

(b) ロックボルトと吹付コンクリートにより補強された円形トンネル

図-3 (b) は図-2 の AA' (または BB') 区間の3次元的状态を2次元平面歪モデルに理想化した場合の地山の応力状態とロックボルト, 吹付コンクリートの応力状態の概念図である。図-4は文献1)の一部であるが, その研究結果によればロックボルトと吹付コンクリートが完全に一体化した構造の場合には吹付コンクリートが地山の变形を拘束するため, 吹付コンクリートには大きな圧力が発生する。この研究成果を基にするとロックボルトと吹付コンクリートと粘性地山の力の関係を図-3 (b)のごとく示すことができる。

筆者の提案するロックボルトと吹付コンクリートを内圧に換算する方法はロックボルト

と吹付コンクリートの効果のうち、図-3 (b) の概念図で示した吹付コンクリートに作用する地山の圧力（または地山の变形を拘束する圧力）のみの効果に着目したもので、ロックボルトと吹付コンクリートの存在によりトンネル周辺の地山の応力状態が3次元応力状態に移行し、地山の破壊強度及び残留強度が増加する効果は存在しないと考える。

本実験はロックボルトと吹付コンクリートの効果を空洞周辺の地山変形の拘束圧に換算する考え方の妥当性を追究するため行ったものである。表-1は本研究において行った実験の種類をまとめたものであり、実験は図-3 (b) の成立するようすべて軸対称の状態で行い考察の単純化を図った。

3. モデルの製作法と計測の概要

3.1 モデルの製作と実験法

写真-1は本実験用に製作した $1,090 \times 1,050 \times 100$ の供試体製作用型枠であり、また実験用枠でもある。寒天濃度 1.5%（重量比，粉末伊那寒天）に相当する粉末寒天（以後寒天と称する）を所要の水に加え、加熱、攪拌し、 90°C で10分間煮沸する。完全に溶解した

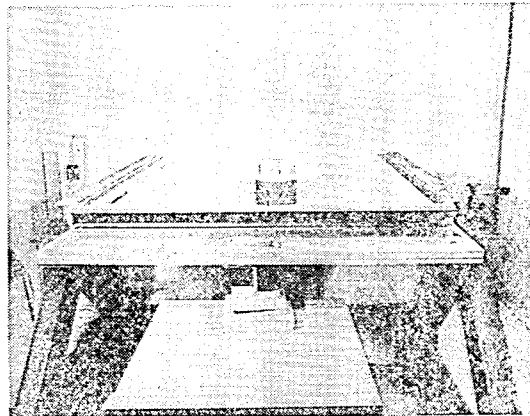


写真-1 型枠と空洞モデル

寒天溶液を冷却し液温 $50 \sim 55^{\circ}\text{C}$ で型枠に流し込む。流し込み完了後上面にアクリル板をセットしアングルで補強し2日間室温 15°C で養生させる。おがくず（ 1.7mm ふるい通過、 0.6mm ふるいに残るもの）入り寒天の場合には液温 $50 \sim 55^{\circ}\text{C}$ の寒天溶液におがくずを混入し、攪拌し約 $46 \sim 48^{\circ}\text{C}$ で流し込む。

硬化後寒天モデルの表面に円形空洞周辺の変形計測用 2cm メッシュを描き、さらに寒天モデルのほぼ中央に設置した円形空洞用型枠（ロックボルトと吹付コンクリートで補強するモデルの場合にはこの型枠に一体としてあらかじめ設置し、寒天中に埋め込む）である外径 166mm の塩化ビニルパイプを取り除く。次にボルト軸力、円形空洞周辺地山の圧力の測定用計器を設置し、最後に寒天モデルの側面の水平方向圧力（側圧）の測定装置を設置し、実験の準備を終了する（写真-2参照）。写真-3は準備の完了したモデルを実験用型枠とともに水平な状態から徐々に回転し鉛直な状態にし実験を行っている状態である。型枠は直立状態において寒天モデルの自重の圧力により変形しないようその前後両面

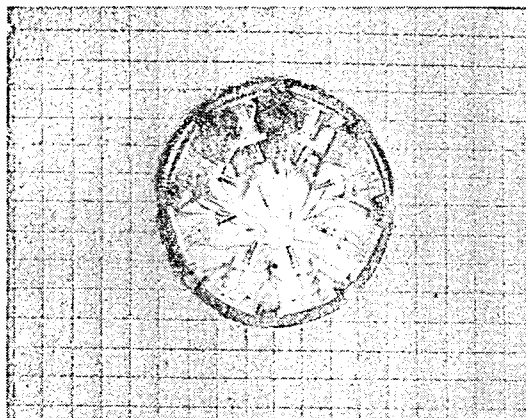


写真-2 準備の終了した寒天モデル

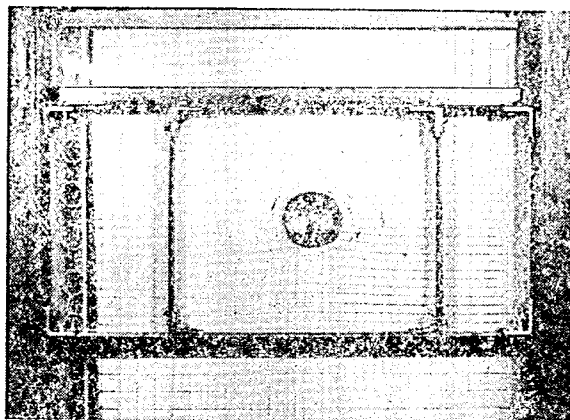


写真-3 実験の様子 (左端は側圧測定装置)

をアングルで補強されている。

実験時モデルの粘着力により型枠とモデルの間に粘着抵抗が発生する。これを除去または減少させるため、寒天モデルと型枠の間に薄いブリキ板をあらかじめ設置し、硬化後この板を引抜きながら水を注入し寒天モデルと型枠の間に水膜を作る方法を採用し効果を得た。さらにおがくず入り寒天の場合にはおがくず自体の有する粘性物質を除去するため、あらかじめ煮沸し炉乾燥後使用する。これらの準備と工夫により後に示すようにほとんど粘性抵抗のない状態で実験可能となった。

実験中は側圧、ロックボルト軸力、吹付コンクリートに作用する圧力、トンネル空洞内に密閉した空気圧等の測定と同時に6×7カメラによる写真撮影及び変形の連続記録のためのビデオ撮影を行う。ここにいうトンネル空洞内に密閉した空気圧とは寒天モデルを水平から鉛直に回転する場合の空洞の急激な変形と破壊を防止するために採用した方法で、円形空洞の変形に伴う空洞体積の減少を利用し空気圧を発生させることにより空洞境界の保護に利用し大いに効果がある。また、直立時に発生する空気圧が大きな場合にはこれを数段階に分けて減少させ各段階ごとの変形を測定することによりトンネル空洞周辺の外力

と変形との関係を与えるデータを多く得る手段にも利用することができる。

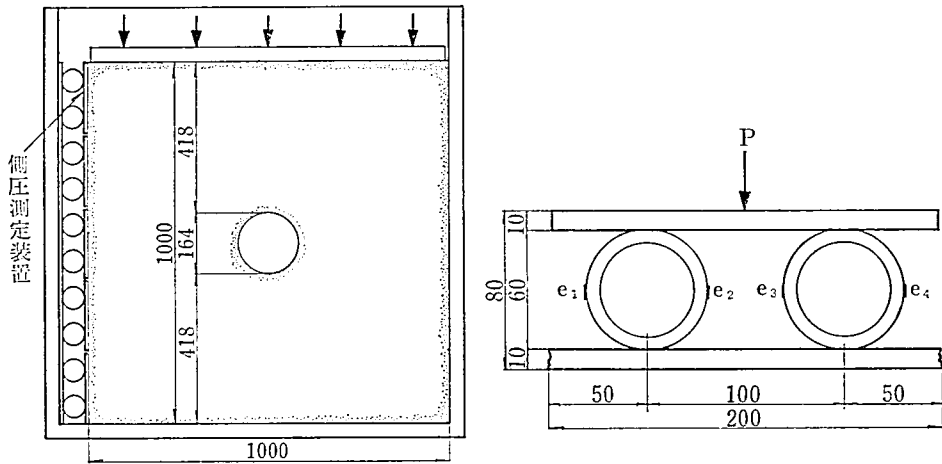
3.2 計測法

3.2.1 側圧測定装置

モデル実験実施上の仮定で前述したように本実験においては円形トンネルと側圧係数 1 を仮定している。理想的な実験は側圧係数 $\lambda=1$ の状態を外力の境界条件として実際に与えるよう 2 軸載荷実験を行うべきであるが、この場合には装置が大型化する欠点がある。本実験においては寒天モデルを鉛直に設置し寒天モデルの自重による鉛直土圧 P_v を発生させ、寒天モデルの両側面の拘束圧を水平方向圧力 P_h とし、その大きさは測定し定めた⁴⁾。

図-7 は文献 4) の結果の一例である。寒天モデルのポアソン比 ν が 0.5、また側圧が静水圧分布を示している。

図-5 の側圧測定装置は塩化ビニルパイプ 2 個と受圧板から成る測定装置で、これを 5 個連続させ高さ 100 cm の寒天モデルの側圧を測定する。受圧板に作用する圧力 P と 2 個のリングの出力歪の関係をおらかじめ行う較正試験により求め、実験時には歪を測定し側



(a) 寒天モデルの型枠と側圧測定装置

(b) 側圧測定装置の詳細

図-5 寒天モデル実験装置と側圧測定装置

圧を求める。図-6、図-7 はその較正試験結果と寒天モデル実験の実測結果の一例である。

3.2.2 空洞周辺圧力の測定

図-3 (b) に示した吹付コンクリートに作用する地山の半径方向圧力を測定するため吹付コンクリートモデルであるラバーの地山側に受圧装置を挿入する。受圧装置は超小型荷重変換器 2 個を組み合せ製作したものである (図-8 参照)。計測位置はボルトとラバーの定着部付近で計測点数は 8 ヶ所である。

図-9 は 1.5% 寒天のみの場合における計測結果である。圧力分布はほぼ一様であり、しかも No. 5 測定装置付近の吹付コンクリートモデルが $P=20 \text{ kg}$ で座屈したことを明確に示している (圧力の急激な減少)。

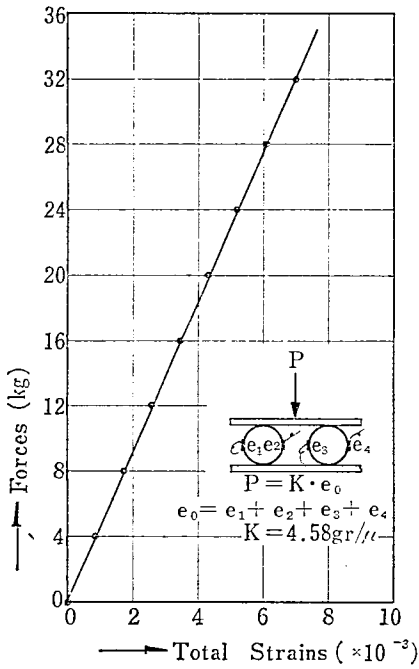


図-6 側圧測定装置の較正試験結果の一例

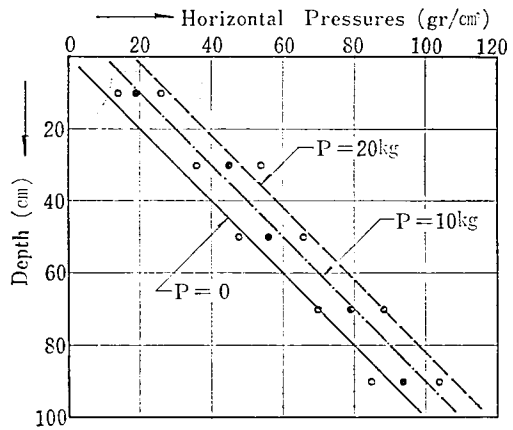


図-7 側圧測定結果の一例

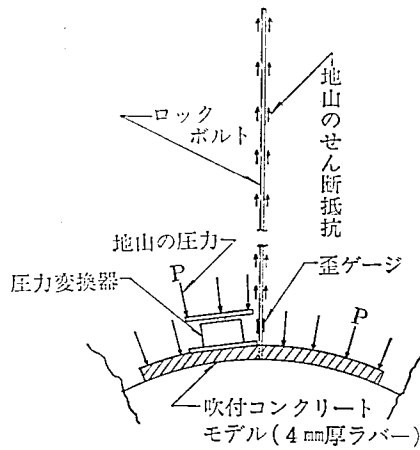


図-8 地山の圧力の測定装置

3.2.3 ボルト軸力の測定

ボルト軸力の測定は2種類の方法により行った。寒天のみの場合には図-10に示す方法により測定した。この方法は吹付コンクリートに作用する圧力が測定用リングを通りボルトに伝達される仕組みのため、ボルトの軸力の測定であると同時に吹付コンクリートに作用する地山圧力の測定ともいえる。他の方法はこの両者を別々に測定する方法である。図-11は前者の方法で計測したボルト軸力の分布の一例であり、軸力は一様な分布を示し

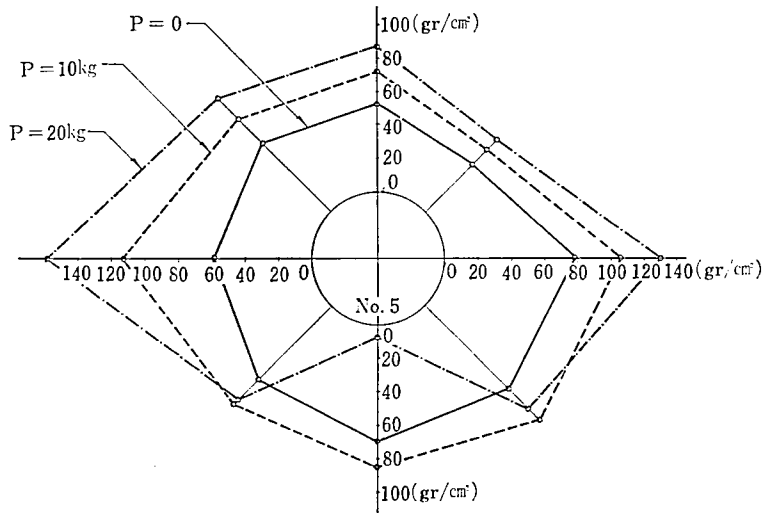


図-9 吹付コンクリートに作用する地山圧力の測定結果

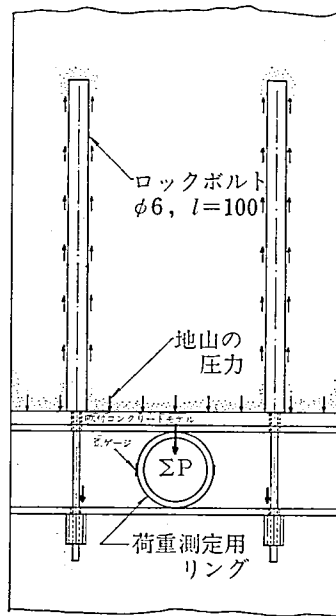


図-10 ボルト軸力の測定装置

ている。

おがくず入り寒天の場合は後者の方法で測定しボルト軸力の測定は錨付ボルトと吹付コンクリートモデルの定着部付近の地山側のボルトに直接歪ゲージを接着し測定した。この場合には各断面2本、8断面、合計16本のボルト軸力を測定する。その結果は4.1.2, 4.2.2の試験結果に示す。

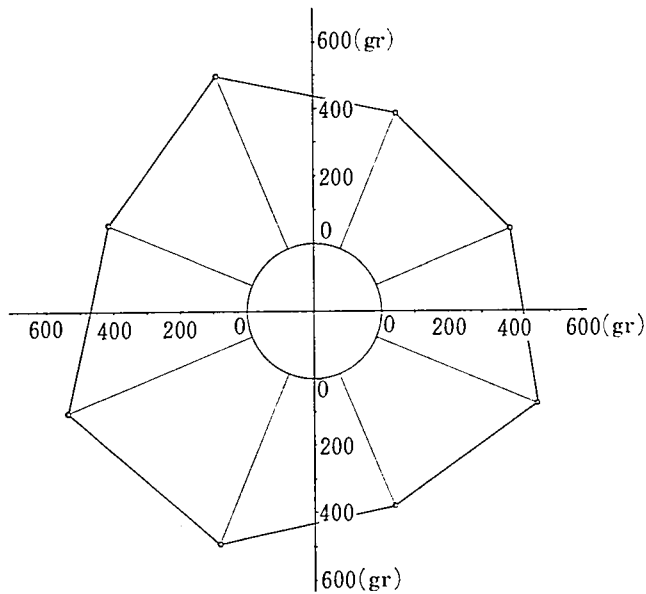


図-11 ボルト軸力の測定結果

3.3 寒天モデルの材料特性

下記①～⑤に示す寒天モデルについてその材料特性を調査するため一軸圧縮試験，三軸せん断試験（UU）等を行った。その結果を表-2に示す。円形空洞のモデル実験に使用した寒天モデルは下記②と⑤である。

- ① 濃度 1.0% のつらら寒天
- ② 濃度 1.0% の粉末寒天
- ③ 濃度 1.5% の粉末寒天
- ④ 濃度 1.5% の粉末寒天+おがくず (1.0%)
- ⑤ 濃度 1.5% の粉末寒天+おがくず (5.0%)

図-12は③と⑤の一軸圧縮試験により得られた応力ひずみ曲線である。図のごとく実際の粘性地山の示す応力ひずみ曲線とほぼ同一であり，弾性定数はある幅を有するがほぼ弾性体ということができる。表-2によれば寒天におがくずを混入すると，弾性定数は増加す

表-2 各種寒天モデルの材料特性

種 類	ヤング係数 E (gr/cm ²)	一軸圧縮強度 q_u (gr/cm ²)	粘着抵抗 c (gr/cm ²)	内部摩擦角 θ (度)
①	400～ 900	130	60	0
②	350～ 800	130	60	0
③	500～ 900	130	60	0
④	550～ 900	110	50	1
⑤	700～1,000	90	40	2

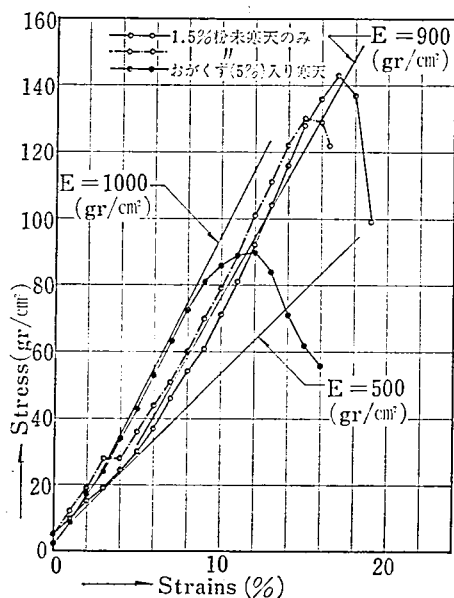
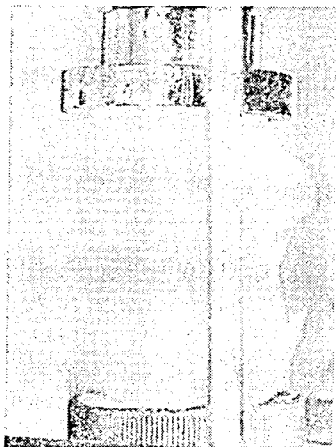


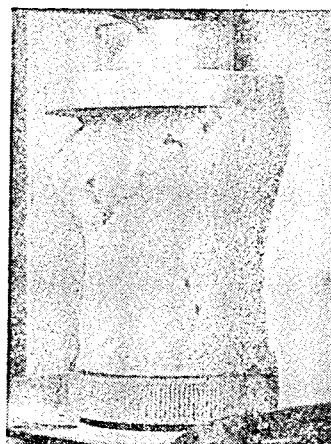
図-12 寒天モデルの一軸圧縮試験結果

るが一軸圧縮強度は減少する。

写真-4 (a), (b) にそれぞれ③と④の寒天モデルの一軸圧縮試験時の破壊の状態を示す。(a) に示すように③の材料は試験片の軸方向に引張亀裂が発生し破壊する。これは軸方向圧縮変形に対する横方向引張変形によるものである。一方④のおがくず入り寒天の場合には傾斜面上のすべりにより破壊が発生している。これはおがくずを混入することにより一軸圧縮強度従って粘着抵抗が減少し、引張強度よりも小さくなったためと考えられる。材料④のおがくずの量を増加させた⑤材料を試作し、そのすべり破壊の状態を調査し



(a) 粉末寒天



(b) おがくず(1%)入り寒天

写真-4 寒天モデルの一軸圧縮試験の破壊状態

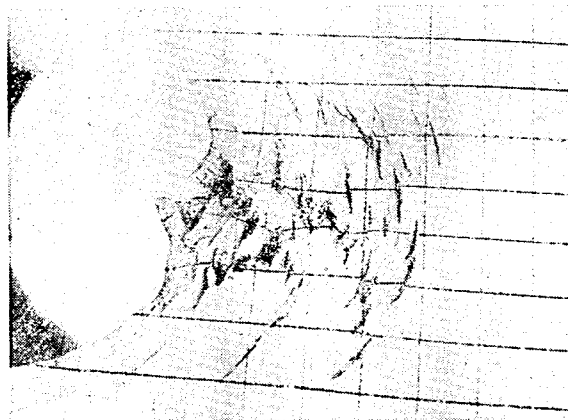


写真-5 おがくず（5%）入りのせん断破壊の一例（空洞の側壁部）

た結果、せん断すべりによって破壊する寒天モデルを開発することができた。

写真-5は⑥の材料による実験結果の一例であり、未補強円形空洞の周辺のせん断すべり破壊の様子を明確に示している。これは⑥の材料が地盤中のすべり破壊を呈する現象のモデル実験材料としての適性を確認したものである。

4. 実験結果と考察

4.1 1.5%寒天のみの場合

4.1.1 円形未補強空洞の場合

実験は水平な状態で描線、側圧測定装置の設置完了後、寒天モデルを徐々に回転し鉛直な状態に移して行われる。この場合寒天モデルの急激な変形を防止するため空洞内の空気を密閉し空洞の変形により発生する空気圧を利用する。直立後空気圧を数段階に分けて下げ各段階の空気圧及び側圧を測定し同時に円形空洞周辺の変形状態の写真撮影を行う。

写真-6は実験により得られた円形空洞の変形状態であり (a), (b), (c) はそれぞれ空気圧は 11.2, 6.3, 0 gr/cm² のである。円形空洞内の下部の水はトンネル空洞付近の寒天モデルの圧縮変形により寒天モデル中の自由水が絞り出された結果である。

図-13は側圧の測定結果である。図は側圧 P_h がほぼ直線分布し、しかもその勾配はほぼ 45° を示している。これは寒天のように軟弱な材料（比重 1.0 gr/cm³）の場合には側圧 P_h が鉛直圧力 P_v に等しくしかも静水圧分布を示すことを裏付けた資料である。また型枠と寒天モデルの粘着抵抗がほとんど存在しないことを証明した資料とも解釈できる。この結果、このモデル実験は $P_v = P_h = p_0$ 、側圧係数 $\lambda = 1$ の軸対称の条件を満足していることを実証できた。

円形空洞を有する寒天モデルの外力条件は鉛直圧力 P_v 、側圧 P_h 、さらに円形空洞内の空気圧 P_a で与えられる。 $P_v = P_h = p_0$ 、内圧 $P_a = p_i$ を受ける半径 R （直径 D ）の円形空洞の半径方向変位 $(u_r)_{r=R}$ は (4.1) 式で、変形後の空洞直径 D' は (4.2) 式で与えられる。

$$(u_r)_{r=R} = \frac{R}{2\mu} \times (p_0 - p_i) \quad (4.1)$$

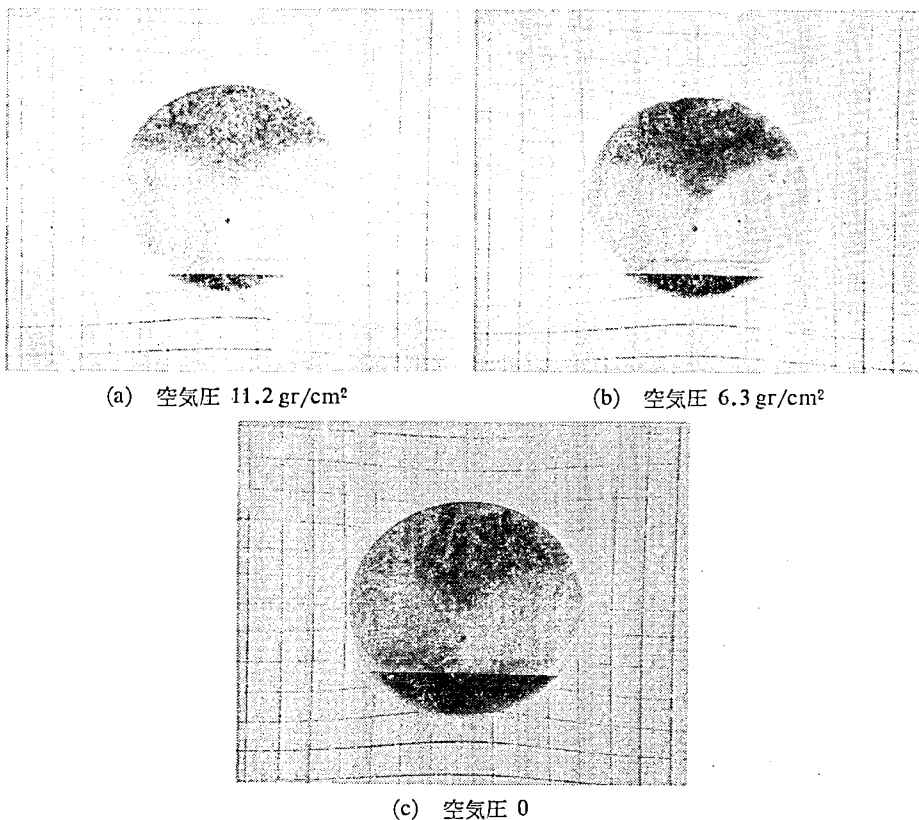


写真-6 円形未補強空洞の変形 (寒天のみの場合)

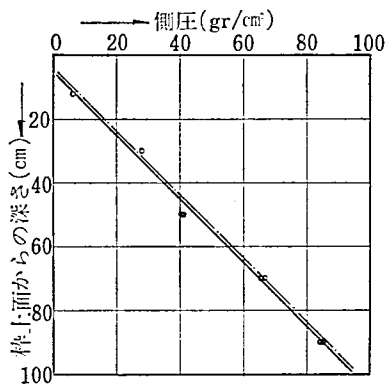


図-13 側圧分布の測定結果 (寒天のみ, 未補強の場合)

$$D' = D - 2(u_r)_{r=R} = D_0 - \frac{R}{\mu} (p_0 - p_i) \tag{4.2}$$

但し $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$, E, ν はそれぞれ寒天モデルのヤング係数とポアソン比
 表-3に (4.1), (4.2) 式による計算結果と実測値を示す。

表-3 空洞の変形計算と実測値

	外圧 p_0 (gr/cm ²)	内圧 p_i (gr/cm ²)	理論値 (cm)		実測値 (cm)	
			$(u_r)_{r=R}$	D'	$(u_r)_{r=R}$	D'
1	50	11.2	0.74	15.1	0.80	15.0
2	50	9.4	0.78	15.0	0.82	15.0
3	50	7.9	0.81	15.0	0.87	14.9
4	50	6.3	0.86	14.9	0.87	14.9
5	50	5.1	0.86	14.9	0.90	14.8
6	50	0	0.96	14.7	1.07	14.5

図-14は縦軸 $(u_r)_{r=R}$ 、横軸 $(p_0 - p_i)$ とする座標軸上に実測値をプロットしたものである。図から寒天モデルの見かけのヤング係数は約 650 gr/cm² である。この値は一軸圧縮試験結果の値にほぼ等しい。

本実験は 1.5% 寒天モデルの見かけのヤング係数の測定と実験法の妥当性を検討する目的で行われた実験である。その結果、見かけのヤング係数は一軸圧縮試験結果にほぼ等しく、寒天モデルはほぼ弾性的挙動を示すこと、また自重場に寒天モデルを置くことにより、モデルの応力条件は $P_v = P_h$ の静水圧分布と軸対称の条件を完全に満足していること、などにより本実験法の仮定の妥当なことを示すことができた。

4.1.2 ロックボルトと吹付コンクリートで補強した場合

ロックボルトと吹付コンクリートで補強した場合の補強効果を求めるため、写真-7に示

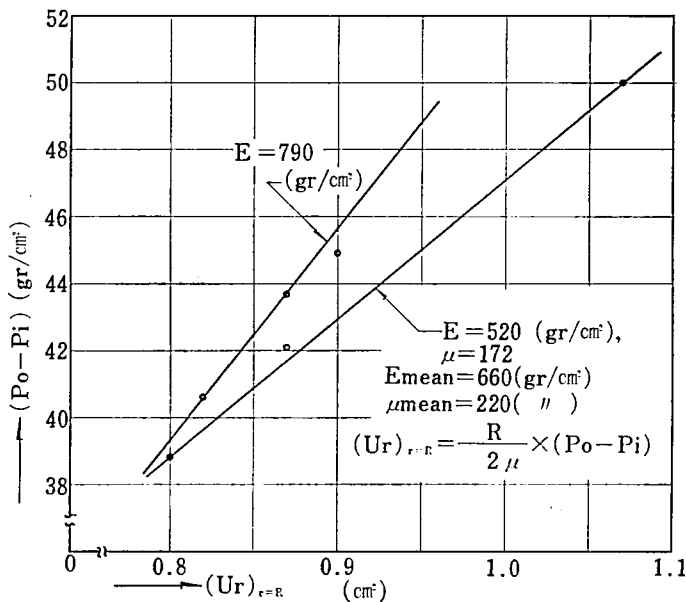


図-14 円形空洞の変形と $p_0 - p_i$ の実測値の関係

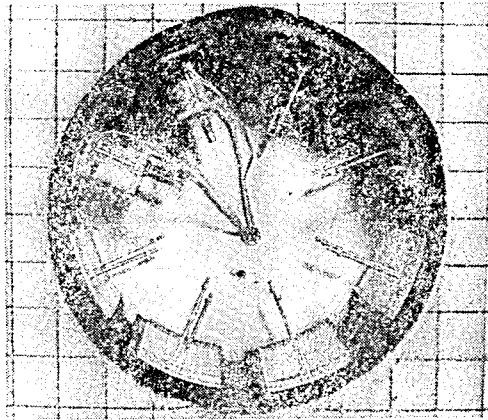


写真-7 分割された吹付コンクリートモデルと
ロックボルト軸力測定装置

すよりに吹付コンクリートを中心角 45° を成す8断面に分割し、各吹付コンクリートモデル1個に2本ずつ $\phi 6\text{ mm}$ ($l=10\text{ cm}$)のボルトを設けた。ボルトはアルミパイプの表面に細砂を接着したもので、あらかじめ型枠に設置し寒天を流し込む。各断面2本のボルト軸力を測定するためリング製荷重変換器を設置する(図-10参照)。この構造の場合は4 mm厚のラバーに作用する空洞境界上の圧力がリングを通してボルトに伝達される。ボルトと寒天のせん断抵抗がラバーに作用する圧力につり合い、これがボルト軸力になる。従ってここにいうボルトの軸力測定は間接的にはラバーに作用する空洞境界上の圧力(吹付コンクリートに作用する圧力)の測定でもある。

寒天モデルの空洞周辺の大変形を可能にするため吹付コンクリートモデルは円周方向で8個に分割され、各吹付モデルの間に可縮部を設ける。2本のロックボルトで補強された吹付コンクリートモデルに注目すれば筆者の先に発表した実験報告¹⁾に対応したモデルと考えることができる。実験の方法は密閉した空気圧の利用も含めて4.1.1の場合と同一で

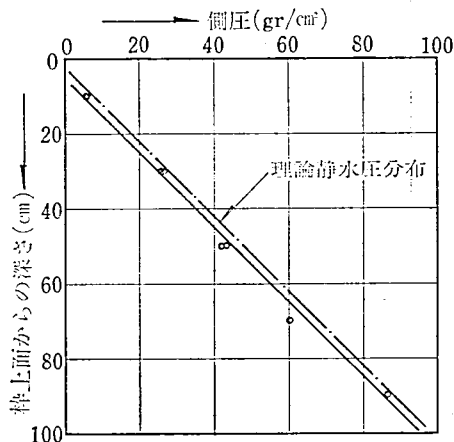
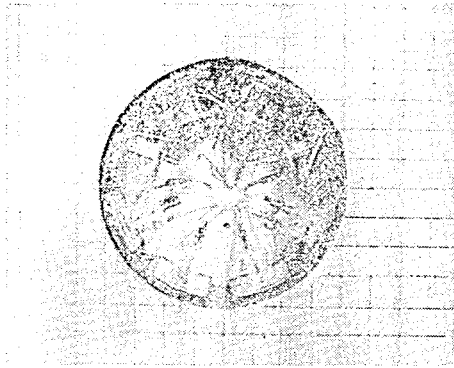
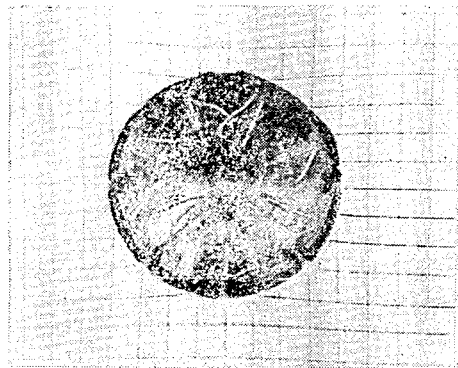
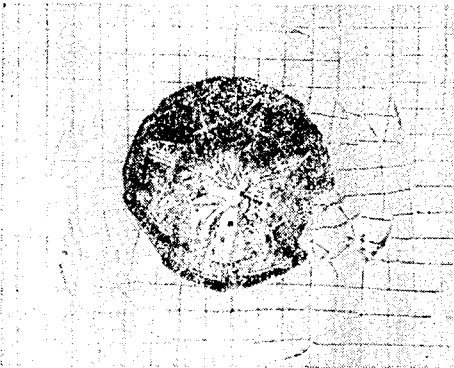


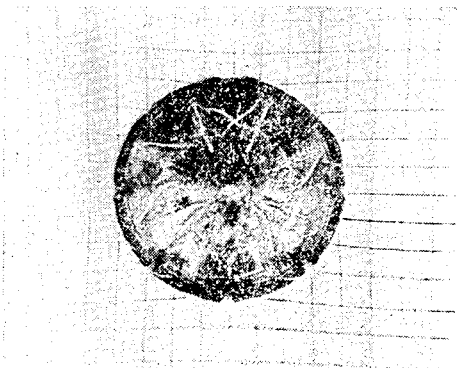
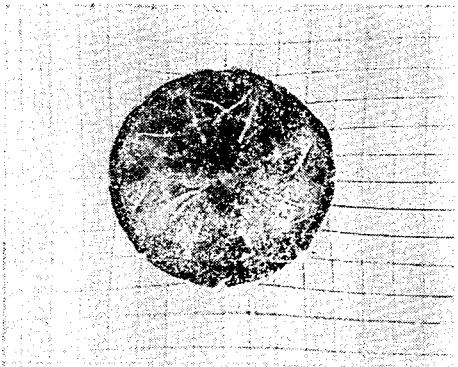
図-15 側圧分布の測定結果 (寒天のみ、ロックボルトと
吹付コンクリートで補強した場合)



(a) 準備終了の寒天モデル

(b) 空気圧 5.2 gr/cm²

(e) 実験終了後の破壊の様子

(c) 空気圧 7.5 gr/cm²

(d) 空気圧 0

写真-8 ロックボルトと吹付コンクリートで補強された円形空洞の変形
(寒天のみの場合)

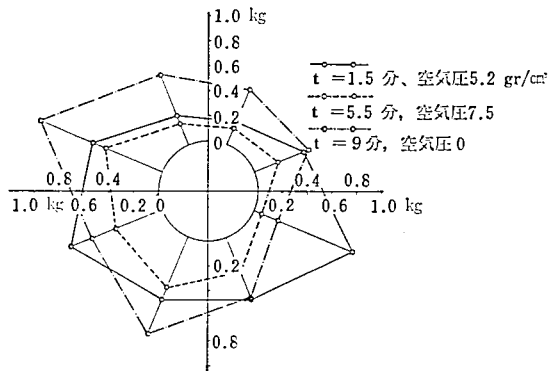


図-16 ボルト軸力の測定結果 (寒天のみ、ロックボルトと吹付コンクリートにより補強した場合)

ある。

写真-8 (a) は準備の終了したモデルであり、(b), (c), (d) はそれぞれ空気圧 5.2, 7.5, 0 gr/cm² の場合、(e) は実験終了後水平な位置にもどした場合の破壊の状態である。図-15に示すようにこの場合にもモデルの側圧係数 λ はほぼ 1 であり、寒天モデルは軸対称条件を満足している。

図-16はモデルの水平状態を基準とした各段階のボルト軸力の分布である。この結果からボルト軸力の分布がほぼ一様であり、解析において軸対称の条件の適用が可能であることを示す。

実験結果の考察のため筆者はボルト軸力を内圧に換算し、内圧 (空気圧+換算内圧) を受ける円形素掘空洞の変形計算を行い、実測値と比較し、計算法の妥当性を論ずる。表-4 は 4.1.1 で定められたヤング係数を用いて計算した、補強された円形空洞の変形の値と実測値である。但し、この場合の内圧はボルト軸力の換算内圧を加算するため (4.1), (4.2) 式は次式で与えられる。

$$(u_r)_{r=R} = \frac{R}{2\mu} \left\{ p_0 - \left(p_i + \frac{\sum N}{A} \right) \right\} \quad (4.3)$$

$$D' = D - 2(u_r)_{r=R} = D - \frac{R}{\mu} \left\{ p_0 - \left(p_i + \frac{\sum N}{A} \right) \right\} \quad (4.4)$$

但し、 p_0, p_i はモデルの外圧と空洞内の空気圧、

$\sum N$ はボルト軸力の合計、

A は空洞の表面積で $10 \times \pi \times 16.5 = 518 \text{ cm}^2$

表-4の結果はロックボルトと吹付コンクリートの効果を内圧に換算する計算法の妥当性を示す。

表-4 空洞の変形計算と実測値

	ボルト軸力合計 $\sum N$ (gr)	換算内圧 (gr/cm ²)	実測空気圧 (gr/cm ²)	D' (理論値)* (cm)	D' (実測値) (cm)
1	7,400	14.28	5.2	15.5	15.4
2	5,450	10.51	7.8	15.3	15.3
3	7,970	15.38	0	15.2	15.0

* $E=650, p_0=50 \text{ gr/cm}^2, D=16.5 \text{ cm}$

これまでボルト軸力を内圧に換算した場合には空洞の変形を説明できないと一般に言われているが、これは問題を本質的に混同した結果であると筆者は考える。即ち、ロックボルトと吹付コンクリートの作用効果の重要なものとして、補強された薄肉パイプ構造の軸方向曲げ剛性がある。即ち薄肉パイプの3次元効果である。この効果を考慮せず2次元歪状態のままロックボルトと吹付コンクリートの効果を内圧に換算し実際の変形を説明することは現象を正しく把握しないものと言える。しかしながら、この効果はパイプ構造の解析により評価し得るから、2次元歪状態のロックボルトと吹付コンクリートの効果にパイプ構造の効果を重ね合わせればよいことになる。従って2次元歪状態のロックボルトと吹付コンクリートの効果を内圧に換算する考え方に何ら矛盾は存在しないし、またこの実験例のように変形を説明する有力な手段になり得る。

筆者はここに NATM の効果を2次元歪状態の効果と3次元パイプ構造の効果に分離して考える設計法を提案し、まづ2次元歪状態における NATM の効果を説明するためロックボルトと吹付コンクリートの効果を内圧の効果に換算する方法の妥当性を本実験により実証した。平面歪状態とは切り羽からある程度離れた断面における効果ということもできる。

4.2 おがくず（5%）入り寒天（濃度1.5%）の場合

濃度1.5%の寒天のみの場合には引張亀裂により破壊が発生し、実際の粘性地盤の破壊と異なるため、せん断すべり破壊するモデル材料を製作し基礎的実験を行った結果、引張破壊せずせん断すべり破壊する材料が得られた。開発されたモデル材料を用いて4.1と同様な実験を行った。この実験モデルの材料特性を再記する。

- 一軸圧縮張度 $q_u = 90 \text{ gr/cm}^2$
- せん断強度 $\tau_c = 40 \text{ gr/cm}^2$
- ヤング係数 $E = 7.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^3 \text{ gr/cm}^2$
- 内部摩擦角 $\theta \cong 2^\circ$, ポアソン比 $\nu = 0.5$
- 単位体積重量 $\rho = 1.0 \text{ gr/cm}^3$

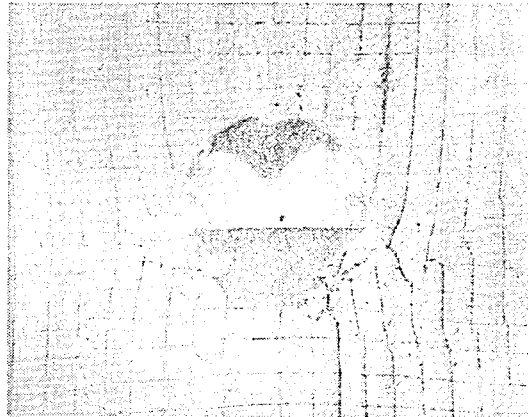
おがくず入り寒天の場合にはおがくずと寒天の比重の相違によりおがくずが液中に沈殿するため、流し込み後硬化開始直前まで攪拌しおがくずの沈殿を防止する。

水平な状態で描線し、各種計測装置のセットを行い準備の終了したモデルを回転し実験を行う。おがくず入り寒天モデルの変形は寒天のみの場合より小さく、また引張破壊が発生しないため、寒天モデルの上表面に10, 20, 30 kg（それぞれ寒天の土被り高さ10, 20, 30 cmに相当）の載荷を行う。この実験の場合にも空気圧を利用しモデルの急激な破壊を防止する。空気圧の発生後は段階的に減少させ各段階ごとに写真撮影と測定を行う。空気圧の開放後10, 20, 30 kg 載荷し測定を行う。

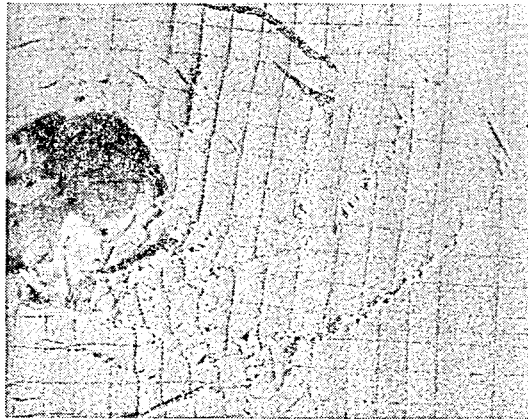
4.2.1 未補強空洞の場合

写真-9 (a), (b) はそれぞれ30 kg 載荷時と実験終了後モデルを水平にもどした場合の破壊の様子である。(a)の両側壁部は楔状のブロックが空洞内へ押し出すような破壊を示しており、この楔形の境界となる破壊面はせん断すべり破壊である。さらに(b)は地山内へのせん断すべり破壊の進行が螺旋状を呈することを示している。

モデル実験によりこのように明確なすべり破壊線を示す研究は少なく、その意味においてもせん断破壊するモデル材料を開発した意義の大きさが理解できよう。



(a) $P=30\text{ kg}$ 載荷時



(b) 実験終了後、水平な状態で撮影

写真-9 円形未補強空洞周辺のせん断破壊の状態
(おがくず (5%) 入りの場合)

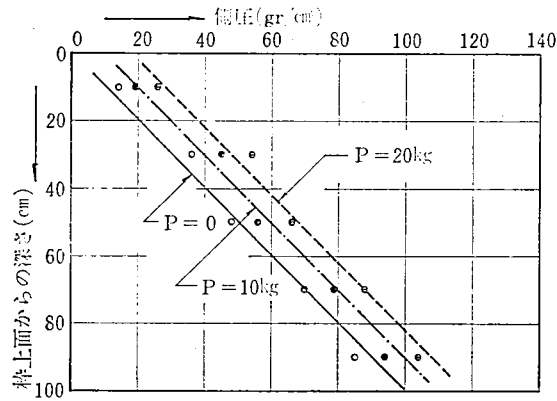


図-17 側圧の測定結果 (おがくず入り寒天、未補強の場合)

図-17は側圧の測定結果であり、荷重 $P=0$ の場合の側圧係数 $\lambda_0 \approx 1$ であり、さらに $P=10, 20 \text{ kg}$ 載荷後の側圧係数も同様に1である。この結果は4.1の結果と同様ポアソン比 $\nu=0.5$ であり、また、載荷時にもこれが成立することは材料がほぼ弾性的挙動を示すことを明らかにしたものといえる。これらの資料は理論をモデル実験により実証した例であり貴重な資料と評価できる。

写真-10 (a)~(d) はおのおの上載荷重 $P=0, 10, 20, 30 \text{ kg}$ の場合の空洞周辺の変形状態である。但し (a) の場合は空気圧 $P_a=20.8 \text{ gr/cm}^2$ であり、他は零である。

$P=0, 10, 20 \text{ kg}$ に対する空洞の変形の実測値と理論値を比較し考察を行う。

図-18は縦軸を外圧-内圧 (p_0-p_i)、横軸を (u_r) $_{r=R}$ とする座標軸上に実測値をプロットしたものである。図中の実測値から得られる直線が (4.1) 式を満足するものと仮定すると、おがくず入り寒天のみかけのヤング係数 E は 750 gr/cm^2 程度と考えられる。この値は表-2の一軸圧縮試験結果 ($E=7.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^3 \text{ gr/cm}^2$) の値をよく説明するものである。

4.2.2 ロックボルトと吹付コンクリートで補強した場合

おがくず入り寒天の円形空洞をロックボルトと吹付コンクリートで補強した場合のボルト軸力、吹付コンクリートに作用する地山の圧力、空洞の変形、側圧等を測定し、ロックボルトと吹付コンクリートの作用効果を求め、4.1.2の考察で述べたロックボルトと吹付

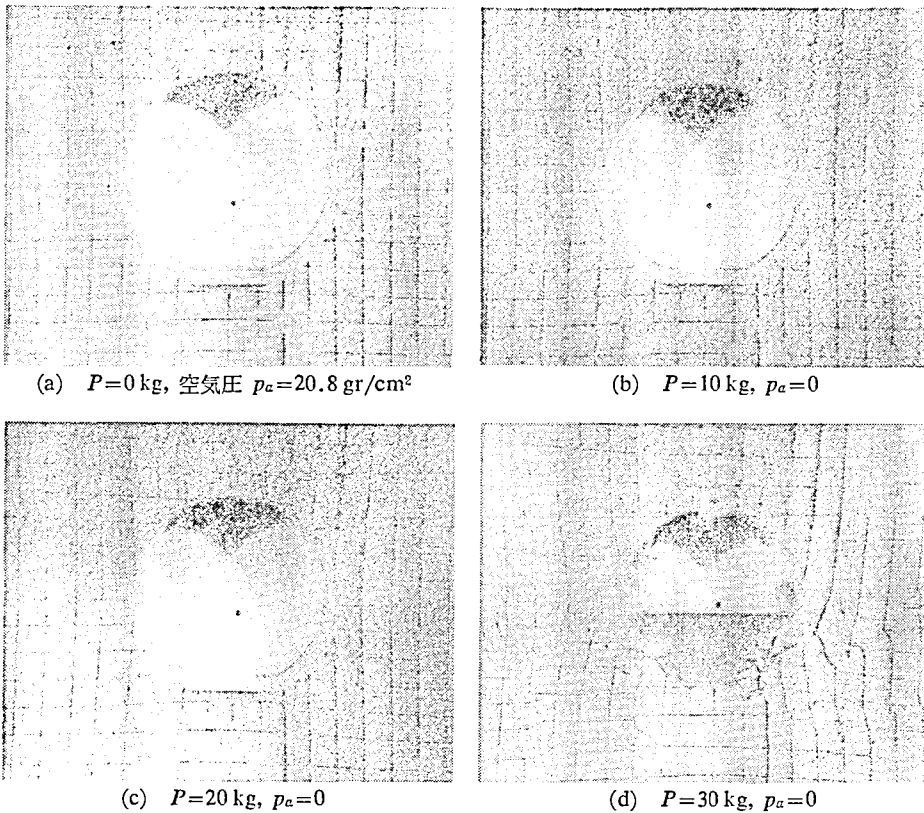


写真-10 未補強円形空洞周辺の変形と破壊の状態 (おがくず (5%) 入りの場合)

コンクリートの効果を内圧に換算する設計法をこれに適用し、その妥当性を考察する。

写真-11は寒天流し込み時に型枠にあらかじめ設置するロックボルトと吹付コンクリートのモデルである。吹付コンクリートのモデルは4mm厚の硬質ラバー、ロックボルトは鍍付きアクリル板である。4.1.2と同様ラバーは8個に分割されており、各ラバーは2

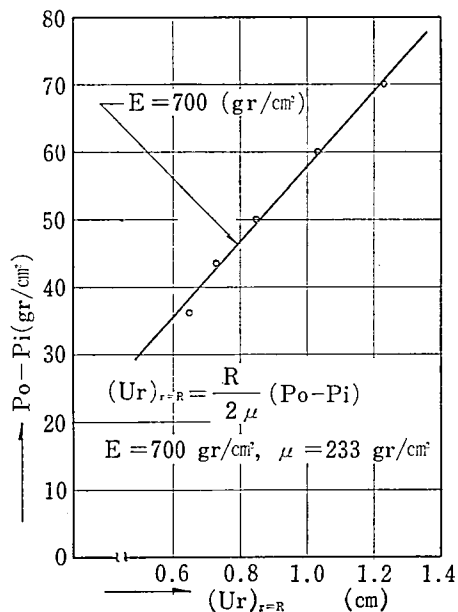


図-18 円形空洞の変形と $(p_o - p_i)$ の関係 (おがくず入り寒天、未補強の場合)

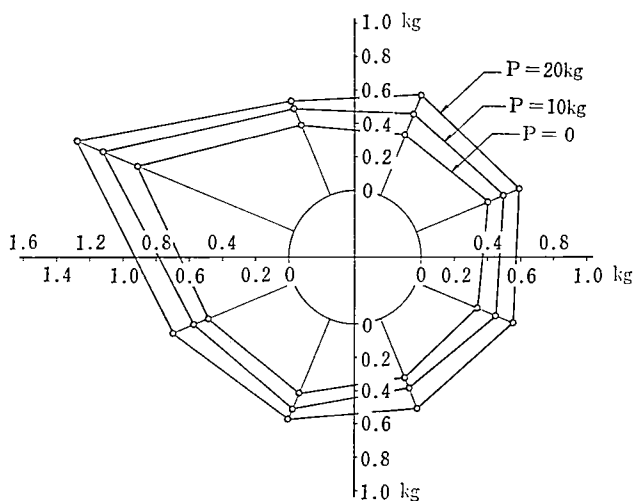


図-19 ボルト軸力の測定結果 (おがくず入り寒天、ロックボルトと吹付コンクリートで補強した場合)

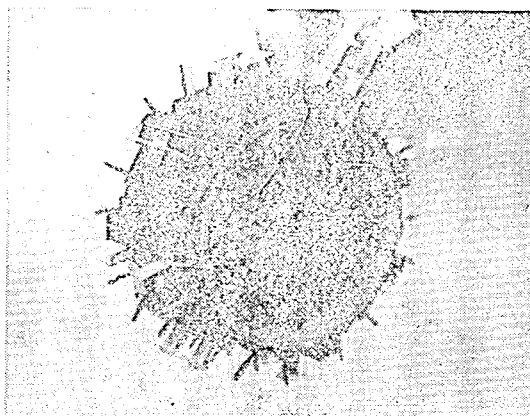
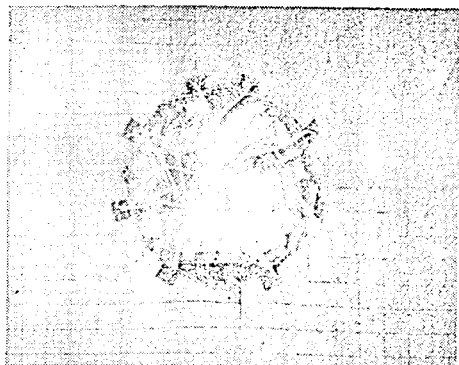
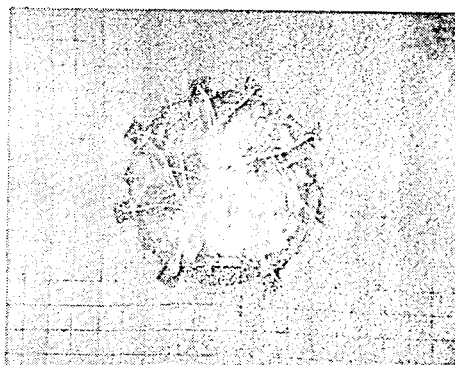


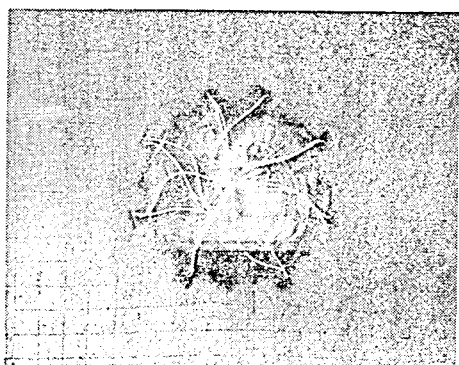
写真-11 鋳付アクリル板と分割されたラバーにより組み立てたロックボルトと吹付コンクリートモデル（おがくず入りの場合）



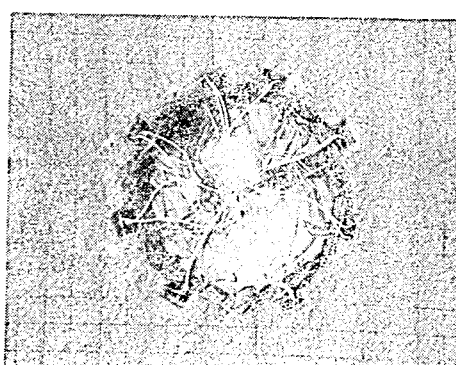
(a) $P=0$



(b) $P=10 \text{ kg}$



(c) $P=20 \text{ kg}$



(d) 実験終了後の破壊の確認
(すべり破壊発生せず)

写真-12 ロックボルトと吹付コンクリートにより補強された円形空洞周辺の変形状態（おがくず（5%）入り）

本の鍔付きボルトを有し、測定についてはラバーに作用する地山の圧力とボルトの軸力の両者を同時に測定する。これを各ラバー 8 個についてすべて行い。従ってこの実験の場合には 1 断面のボルト軸力と地山の圧力は他の断面に影響されず独立したものと考えることができる。

写真-12 (a)~(c) は $P=0, 10, 20 \text{ kg}$ の場合の円形空洞周辺の変形の状態である。写真-12 (d) は 30 kg 荷重後実験を終了し水平にもどした状態である。

写真-12 (d) と写真-9 との比較によりロックボルトと吹付コンクリートにより補強した場合には空洞周辺に明確なすべり破壊が発生しないことがわかる。

図-19は $P=0, 10, 20 \text{ kg}$ に対応する各断面のボルト軸力の分布である。ほぼ一様な軸力の分布を示している。各荷重に対するボルト軸力の合計はそれぞれ $4130, 5110, 5990 \text{ gr}$ であり、内圧に換算すると $7.9, 9.8, 11.5 \text{ gr/cm}^2$ である。

図-20は各吹付コンクリートモデルに作用する地山圧力の測定結果である。No. 2 以外はほぼ一様な地山圧力を示している。さらに $P=0, 10, 20 \text{ kg}$ の圧力の最大値はそれぞれ $8.4, 10.1, 12.1 \text{ gr/cm}^2$ であり、ボルト軸力を圧力に換算した値によく一致している。

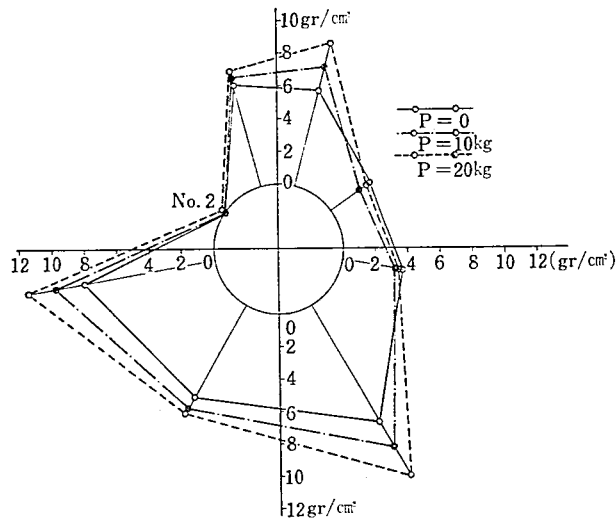


図-20 吹付コンクリートに作用する地山圧力の測定結果 (おがくず入り寒天、補強した場合)

表-5 空洞の変形計算と実測 (おがくず入りの場合)

	外圧 p_0 (gr/cm^2)	ボルト軸力計 合計 $\sum N$ (gr)	換算内圧 (gr/cm^2)	$(u_r)_{r=R}$ 理論値* (cm)	D' 理論値* (cm)	D' 実測値 (cm)
1	50	4,128	7.9	0.70	15.20	15.2
2	60	5,112	9.8	0.83	14.93	14.8
3	70	5,992	11.5	0.97	14.66	14.7

* $E=750 \text{ gr/cm}^2, \nu=0.5, \mu=250 \text{ gr/cm}^2, D=16.6 \text{ cm}$

これは各構造におけるボルト引張力と地山圧力がつり合い状態にあることを示したものである。従って本実験は4.1.2と同様ロックボルトと吹付コンクリートの効果を内圧に換算することの妥当性を証明した実験と考えることができる。

さらに(4.4)式による理論値と実測値との比較から(表-5参照), 4.1.2と同様この場合にも変形の計算法としてボルト軸力を内圧に換算することの妥当性を示すことができる。

以上の実験結果の考察から以下のように結論できる。

- ① 吹付コンクリートを8個に分割し, 分割された吹付コンクリートとロックボルトが一体化している場合には吹付コンクリートに作用する地山圧力とロックボルトの引張力がつり合うこと。
- ② 地山側から考えれば地山は吹付コンクリートに作用している圧力で支保されていること。
- ③ ロックボルトの軸力は円形空洞周辺に作用する内圧の效果に換算できること。
- ④ ロックボルトと吹付コンクリートで補強された円形空洞の変形は $P_v = P_h = p_0$ (土被り圧), 換算内圧 p_{ib} を受ける軸対称問題の変形で説明できること。
- ⑤ 吹付コンクリートの効果はリングとしての効果をこれに加えることにより2次元歪状態のロックボルトと吹付コンクリートの効果を求めることが可能なこと。
- ⑥ ロックボルトと吹付コンクリートの効果は以上の効果に補強された薄肉パイプの軸方向曲げ剛性の効果を考慮しなければならぬこと。

5. 結 論

筆者はロックボルトと吹付コンクリートの設計法を確立するため粘性地山を対象としたモデル実験を行い, その考察から設計法として以下の提案を行う。但し, この設計の対象は周辺地山の側圧係数がほぼ1に近く, 軟弱で土被りの大きな円形トンネルである。

設計の考え方は次に掲げる①, ②の効果を重ね合わせたものである。

- ① 切り羽からある程度離れた断面のロックボルトと吹付コンクリートは2次元歪状態にあり, パターンボルティングの場合には吹付コンクリートをロックボルトの中間で分離し, 分離した各吹付コンクリートはその部分のロックボルトと完全に一体化しているものと考え, 吹付コンクリートのリングとしての効果(耐力)は別途これを考慮する。
- ② 切り羽付近のロックボルトと吹付コンクリートの効果はロックボルトで補強した薄肉パイプの有するトンネル軸方向の断面抵抗である。

図-21は①, ②の設計法を理解する助けとして示したもので, (a)はパターンボルティングと吹付コンクリート構造及びその外力状態である。(b), (c)は(a)を分割して考えたものである。(b)はボルト軸力を吹付コンクリートに作用する地山圧力につり合う圧力に換算できることを示している。この場合の換算圧力 p_{ib} はボルト軸力を N として

$$p_{ib} = \frac{N}{A_c} \quad (5.1)$$

但し A_c はパターンボルティングのロックボルト1本当りの吹付コンクリートの面積
図(c)は吹付コンクリートを分割したことにより考慮せねばならぬリングとしての効

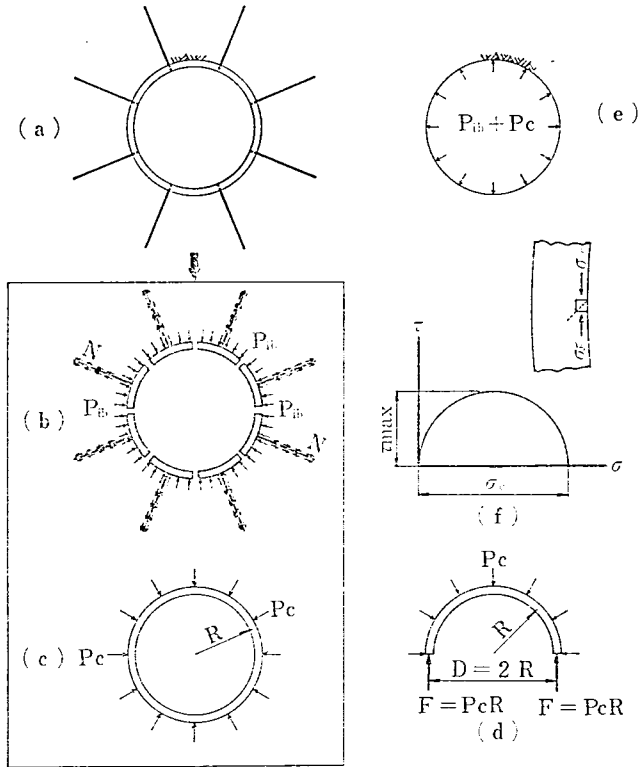


図21 ロックボルトと吹付コンクリートの設計法の概要図

果であり、この場合のリングの耐力を p_c とする。 p_c の計算には吹付コンクリートが軸対称荷重下で内空表面からせん断破壊することを考慮（リングが弾性座屈する場合には座屈荷重を p_c とする）する。図 (f) を参照し、内空側表面から吹付コンクリートがせん断破壊する場合、破壊時軸方向直応力 σ_c とせん断破壊強度 τ には (5.2) 式の関係が存在する。

$$\sigma_c = 2 \cdot \tau \tag{5.2}$$

また、吹付コンクリートが内側からすべり破壊する場合のリングに発生する軸力 F は次式で与えられる。

$$F = \sigma_c \cdot A = (2\tau) \cdot A \tag{5.3}$$

図 (d) から一様な圧力 p_c を受けるリングの軸力 F は次式で与えられる。

$$F = p_c \cdot R \tag{5.4}$$

(5.3), (5.4) 式から半径 R のリングがすべり破壊する場合のリングに作用する圧力 p_c は次式で与えられる。

$$p_c = \frac{2\tau \cdot A}{R} \tag{5.5}$$

(5.1) と (5.5) 式から図 (a) の2次元歪状態の場合のロックボルトと吹付コンクリートの効果は図 (b), (c) の効果の合計であり、この効果を内圧 p_i に換算すると次の関係が得られる。

$$p_i = p_{ib} + p_c \quad (5.6)$$

図(e)は(5.6)式の有する意味をトンネル地山側から考えた場合であり、 p_i の内圧により索掘円形空洞の周辺地山が変形を拘束されている状態を示している。従って、この場合のロックボルトと吹付コンクリートは耐力 p_i を有する支保工と考えることができる。

②の補強された薄肉パイプの効果を(5.6)式に加算すれば設計できるが今パイプの効果を p_i の3割と仮定して数値計算すると以下ようになる。但しトンネルの直径4m, 吹付コンクリート厚10cm, 吹付コンクリートのせん断強度 $\tau=30\text{ kg/cm}^2$, ボルトピッチ $1\text{ m}\times 1\text{ m}$, 1インチボルトで $N=20\text{ ton}$ とする。

$$(5.1) \quad p_{ib} = \frac{20}{1.0 \times 1.0} = 20 \text{ t/m}^2$$

$$(5.5) \quad p_c = \frac{2 \times 300 \times (0.1 \times 1.0)}{2.0} = 30 \text{ t/m}^2$$

$$(5.6) \quad p_i = 20 + 30 = 50 \text{ t/m}^2$$

パイプ効果を考えるとロックボルトと吹付コンクリートは $50(1+0.3)=65\text{ t/m}^2$ の耐力を有する支保工と考えることができる。

以上ロックボルトと吹付コンクリートのメカニズムを明らかにするため、ロックボルトと吹付コンクリート構造を3段階に分割して考えた。即ち①補強されたパイプ構造, ②リング構造, ③ロックボルトにより補強された個々に分離された吹付コンクリート構造。

①～③の分割は筆者のこれ迄の実験により得たロックボルトと吹付コンクリートのメカニズムに対する具体的表現であり、この分割によりロックボルトと吹付コンクリートの効果を簡単な式で表現することが可能となった。また筆者の言うロックボルトと吹付コンクリートの効果を内圧に換算する方法には何ら矛盾はない。

この理論をさらに精度良く展開するためには①の補強されたパイプ構造の効果を定量化する必要がありさらに研究を進めねばならぬ。

本研究は昭和55, 56年度の明星大学理工学部土木工学科の卒業研究の成果をまとめたもので、特に資料の大半は56年度のものである。四年次学生熊澤巧, 杉田公敬, 松本房治, 村田佳範, 本多浩一君等は春からの追実験を始め、夏期休暇中も実験に取り組み、本文中で紹介したごとく微妙かつ複雑な測定をくり返し行い、改良と工夫を重ね40回にのぼるモデル実験を経て見事これを克服した努力と熱意に改めて感謝する次第である。

さらに本学土質工学研究室森満雄教授並びに実験室の皆様には寒天モデルの材料特性の調査に関し試験はもち論、資料の整理等いろいろ御援助頂き厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 安井将文：「粘土中のロックボルトの補強効果に関する実験と考察」トンネルと地下 Vol 11, No. 7, 1980年7月
- 2) 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」第34回土木学会, 年次学術講演会・講演概要集, III-280, 1979年
- 3) 安井将文：「寒天を用いたトンネル模型実験に関する研究」明星大学理工学部研究紀要, 第16号, 昭和55年3月
- 4) 安井将文：「寒天を用いるトンネルモデルによる周辺地山の破壊実験」明星大学研究紀要理工学部, 第17号, 昭和56年3月

- 5) W.H. Ward: "Ground supports for tunnels in weak rock", *Geotechnique* Vol. 28, No. 2, p. 133-171 (1978)