

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

安 井 将 文*

I. まえがき

国土の狭い我が国においてトンネルは国土の有効な利用に欠くことのできない構造物であり、トンネルの施工される地質条件は、年とともに悪くなるのは当然のことといえる。

筆者は、悪条件の一例として、泥岩または、粘性土中に掘削されるトンネル及びトンネル周辺地山の変形や応力、破壊の状態の解析を行うためのモデル実験を提案し報告している^{1),2)}。また、粘土中に施工されるロックボルトのメカニズムを求めめるため、粘土中に存在するアルミボルトの軸力、粘土の圧力、粘土の変形等を測定し、ボルト軸力分布、ベアリングプレート、吹付けコンクリート、締め付け等について言及した^{3),4),5)}。

さらにトンネル周辺地山の破壊を求めめるモデル実験の開発のため、円形空洞を有する2次元トンネルモデルの破壊に関する実験を行い、円形空洞にロックボルト施行を行った場合のロックボルト及び地山のメカニズムを解明するため、一連の研究を行っている⁶⁾。

今回の報告は、寒天モデルを用いたトンネル周辺地山の破壊を求め、軟弱で土被りの大きな地山中に鉄道単線トンネルを掘削する場合⁷⁾の施工法の妥当性を求めめるために行った実験をまとめたものである。

以下に実験の概要と結果及びその考察を述べる。

表-1 実験の種類

Type	実験番号	実験の種類と目的
I	No. 1, No. 4	未補強空洞 (8 m × 8 m) の塑性破壊領域と変形を求めめる実験
II	No. 2, No. 3	Type I とほぼ同一の未補強空洞を有するトンネル模型で、空洞後方のトンネル支保工に作用する圧力測定する実験
III	No. 5, No. 6	ショートベンチカット工法で鏡及びさねをボルトで被強しない場合の破壊領域の大きさとその速度を求めめる実験
IV	No. 7, No. 8 No. 9, No. 10	Type III のさね部をロックボルトで補強する適切な方法を求めめる実験でボルトの種類長さを変化させた
V	No. 11, No. 12, No. 13	頂設導坑先進上半断面の場合の破壊の状態を求めめる実験でボルト補強した場合としない場合の比較

II. 実験の方法

II-1 モデルの製作法

寒天材料は粉末寒天 (添川理化学) を用い濃度は 1.0% (重量比) である。図-1 に示し

* 理工学部土木工学科助教授 応用力学

たモデルに必要な寒天の体積は 110 l であり、この場合の寒天の必要量は 1110 gr である。

粉末寒天を所要の水に加え加熱し、95℃ 以上で 10 分間以上煮沸し、攪拌を行う。注型及び硬化後の実験室の状態は、湿度 90% 以上、温度 15℃ である。写真-1 は実験中の型枠及びモデル (No. 13) の一例である。寒天溶液を 50~55℃ まで冷却し型枠の上部から流し込み、15℃ で 48 時間冷却硬化させる。寒天は、硬化と同時に自重の影響を受け変形し、一部の自由水が絞り出され、変形と同時に収縮する (土の圧密と同様な状態) ため寒天中のモデルの位置は、これを考慮して設置する。この寒天の性質については、現在研究室において検討中である (寒天のクリープ特性の明確化が必要)。表-1 の No. 1 のテストの例について写真-2 から写真-5 を用いてモデルの製作の説明を行う。写真-2, 3 は

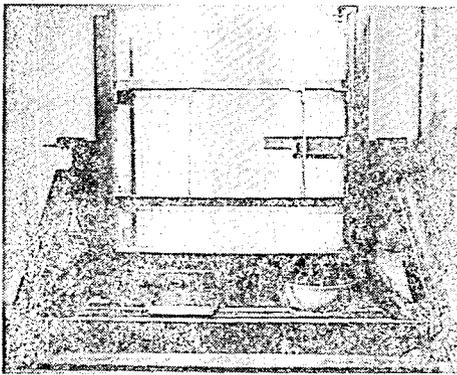


写真-1 実験の型枠と供試体 (No. 13)

ボルトを有するモデルの製作の例である (No. 6, No.7)。写真-2 は寒天中に必要な空洞を確保するための空洞枠である。空洞枠には長さ 5 cm のボルト付きラバー (厚さ 5 mm) が上・下面に結び付けられている。寒天硬化後ボルトとラバーは寒天と一体になるが空洞枠は取り除き可能に工夫されている。空洞枠除去により完成した空洞に所定の支保工に相当するプラスチック製モデルを挿入する。写真-3 はプラスチック製支保工を挿入し、さらに変形・破壊状態を調査するために必要な格子縞を表面に描いた状態を示したも

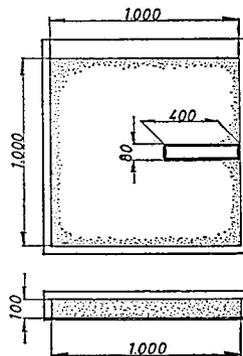


図-1 Dimension of Model

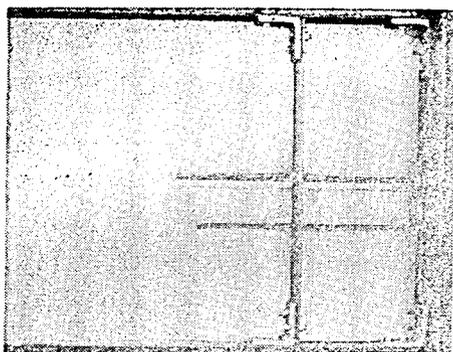


写真-2 ボルトを有する空洞枠と寒天の硬化
(No. 9)

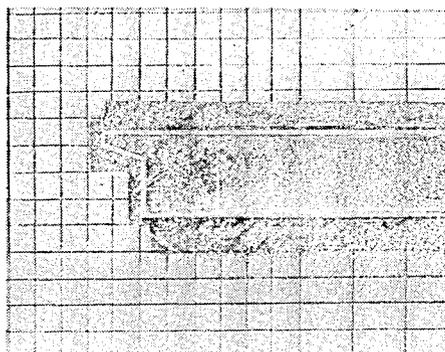


写真-3 ボルトを有する支保工モデル完成
(No. 9)

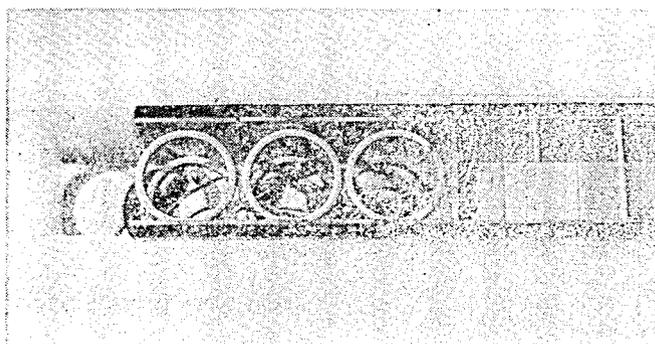


写真-4 寒天の圧力測定リングの設置 (No. 3)

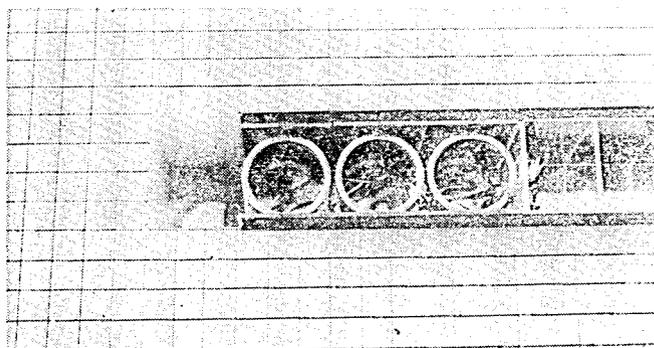


写真-5 寒天の圧力測定モデルの完成

のである。写真-4, 5 は No. 2, 3 の実験モデルの製作である。完成した空洞に寒天の圧力を測定する装置をセットした状態 (写真-4), さらに表面に格子縞を描いた状態 (写真-5) を示す。

II-2 寒天の性質

今回のモデル実験に使用した粉末寒天は、これ迄使用した“つらら寒天”より同一濃度

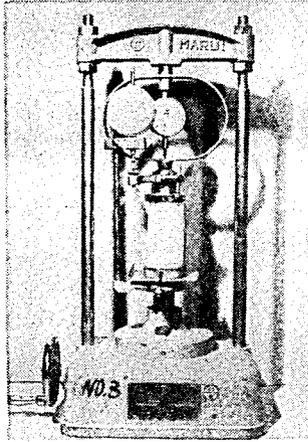


写真-6 寒天の1軸圧縮試験

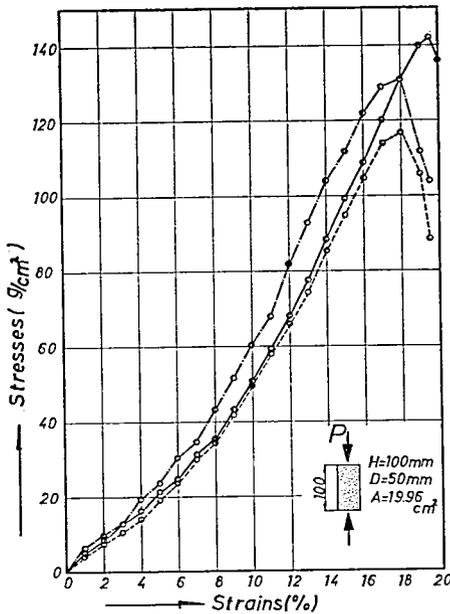


図-2 Stress-Strain Curves

表-2 寒天 (1.0% 濃度) 3軸せん断試験 (U. U.) 結果

	σ_1 (kg/cm ²)	σ_3 (kg/cm ²)
No. 1	0.359	0.25
No. 2	0.620	0.50
No. 3	0.881	0.75
No. 4	1.132	1.00

において強度が大きく、使用にあたり再試験を行った。試験は1軸圧縮, 3軸せん断 (U. U.), 1軸引張, ボルトの引抜き等である。写真-6 は1軸圧縮試験の様子である。圧縮試験の供試体は、直径 50 mm, 高さ 100 mm の円柱である。1軸圧縮試験結果から得られた 1% 濃度寒天の応力-ひずみ曲線を図-2 に示す。図-2 から1%濃度寒天の1軸圧縮強度は 120~140 gr/cm² である。表-2は、3軸せん断試験結果から得られた側圧と軸方向圧力 σ_1 の値であり、モールの破壊包絡線から寒天の粘着抵抗の内部摩擦角 ϕ を示した。

また寒天中に存在するボルトの引抜き抵抗を求めるため、次の3種類のボルトを製作し同一寒天中に設置し引抜き試験を行った。その結果は (i) $\phi 5$ mm のアルミパイプに粗砂を接着した長さ 5 cm のボルトの場合 500~600 gr, (ii) $\phi 9$ mm のアルミパイプに粗砂を接着した長さ 8 cm のボルトの場合、1000~1200 gr, (iii) $\phi 10$ mm の鍍付きアルミパイプ ($\phi 2$ mm, $l=8$ cm) の場合、1800~2000 gr である。これらのボルトはいずれも後のモデル実験において使用されたボルトである。

これら試験結果から得られた 1% 濃度寒天の材料特性を表-3 に示す。

II-3 モデルの相似則について

軟弱でしかも土破りの大きな地山中にトンネルを掘削した場合のトンネル周辺の破壊領域を求めることと、このような地山中

表-3 寒天 (1% 濃度) の材料特性

1軸圧縮強度	130 gr/cm ²
粘着抵抗	50 gr/cm ²
内部摩擦角	0°
引張強度	30~40 gr/cm ²
ヤング係数	400~900 gr/cm ²

にロックボルトを施工する場合の適切な方法を求めることが本実験の目的である。対象とするトンネル及び地山物性を次に示す。

1軸圧縮強度	$q_u = 2 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$	}	(a)
単位体積重量	$\gamma = 1.78 \sim 2.08 \text{ t/m}^3$		
トンネル直径	7.5~8m		
土被り高	30~300m		
ヤング係数	$E = 60 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$		

この値に対して次に示す値を対象トンネル及び地山特性と考えた。

1軸圧縮強度	$q_u = 25 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$	}	(b)
単位体積重量	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$		
トンネル直径	$D = 8\text{m}$		

時間のパラメーターを考慮しない場合モデルのバイナンバーは、 $\pi = \frac{q_u}{D \cdot \gamma}$ である。このバイナンバーに従って寒天モデルの寸法を決定するため、表-3 に示す寒天の 1 軸圧縮強度 $q'_u = 130 \text{ gr/cm}^2$ 、単位体積重量 $\gamma' = 1.0 \text{ gr/cm}^3$ を用いると 2 次元トンネルモデルの空洞の高さ D' は

$$\frac{q_u}{D \cdot \gamma} = \frac{q'_u}{D' \cdot \gamma'} \quad \therefore D' = \frac{q'_u}{\gamma'} \times \frac{D \cdot \gamma}{q_u} = \frac{130}{1.0} \times \frac{800 \times 2.0}{25 \times 1000} = 8.3 \text{ cm}$$

トンネル模型の空洞の高さを 8 cm とする。従って寸法の倍率は約 1/100 である。

II-4 実験の方法

準備の終了した寒天モデル（水平な位置にある）上面に厚さ 10 mm のアクリル板を当て、寒天の平面ひずみ状態を保持させるため、アクリル板を外側から補強し、実験装置が完成する。写真-1 は完成した実験装置及び寒天モデルの 1 例である。実験装置は写真-1 に見られるように寒天モデルを水平な軸を中心として回転できるように作製されており、水平面から回転し、寒天モデルを鉛直な面に直立させ、寒天と自重の影響の場に置く。その後 10 分経過後に寒天の土被り厚を大きくさせるため $P = 10 \text{ kg}$ を寒天の上部に載荷する (No. 1~No. 5 までは、20 kg 載荷)。トンネル空洞より上にある寒天の高さは 45~46 cm, さらに $P = 10 \text{ kg}$ に相当する寒天の高さは 10 cm (No. 1~No. 5 までは 20 cm),

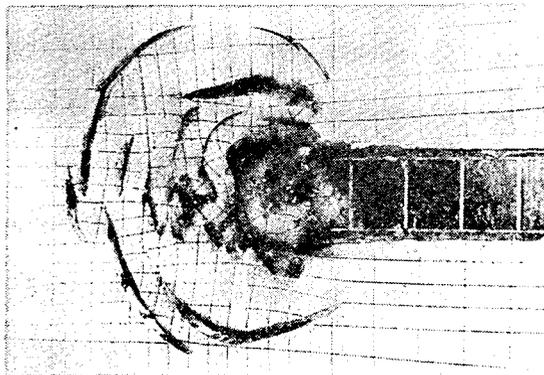


写真-7 No. 1 の最終破壊状態

合計高 55~56 cm (No. 1~No. 5 までは 65~66 cm) である。寒天モデルを直立させた後、寒天の変形、破壊状態をモノクロ、カラーズライド、8 mm で撮影記録する。また、ボルト軸力の測定、寒天の圧力測定を各時間間隔毎に行う。これら計測は、寒天モデル直立後 2~3 時間行ない、その後は直立のまま翌朝まで放置し、破壊・変形の状態を確認した後、モデルを水平にもどし、寒天の破壊の状態を調査し、実験を終了する。写真-7 は水平な位置に戻した場合の寒天の最終の破壊状態の 1 例である。

III 実験結果とその考察

表-1 に示した Type I~IV について、空洞の形状・ボルトの寸法、間隔、寒天の変形や破壊の状態等の結果とその考察を示す。

III-1 : Type I (No. 1, No. 4)

この実験は、軟弱で被りの大きな地山中にトンネルを掘削し、地山を完全に弛ませた場合を対象としたものである。実験モデルの空洞及び支保工の形状・寸法を図-3 に示す。支保工は厚さ 2 mm, 3 mm のアクリル板からなり、寒天と支保工の間に厚さ 5 mm の硬質ゴムを挿入した。空洞の大きさは、トンネル軸方向に 6 m, 高さ 8 m に相当する。No. 4 寒天モデルの破壊の進行状態を写真-8 (a)~(c) にまた、No. 1 モデルの最終破壊の状態を写真-7 に示す。

これらの結果から、軟弱で土被りの大きな地山中にトンネルを掘削し、地山を完全に弛ませた場合、トンネル先端に楕円体状の塑性破壊領域が発生し、その大きさは、写真-7

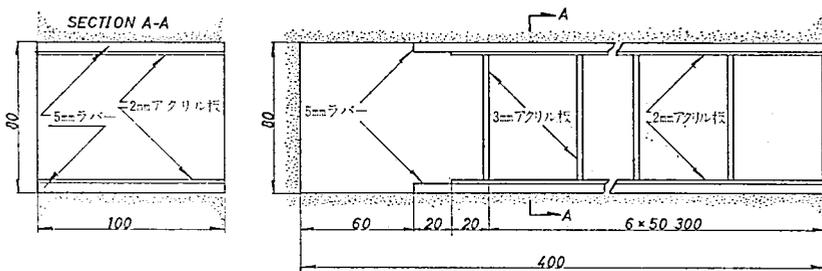
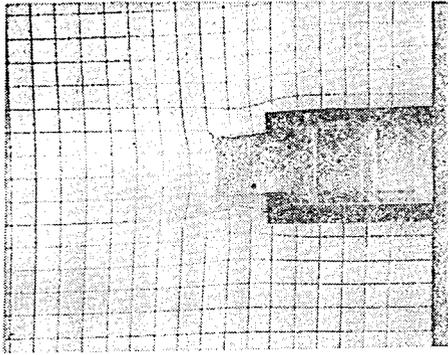


図-3 Model of Tunnel and Support (No. 1, 4)

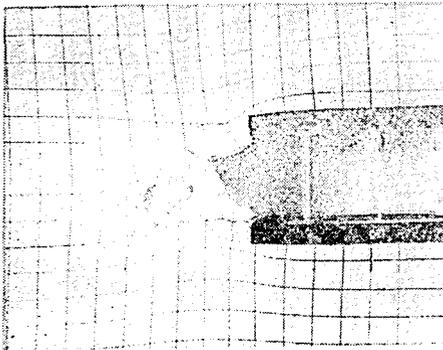


(a) 直立直後の空洞の変形 (未破壊)

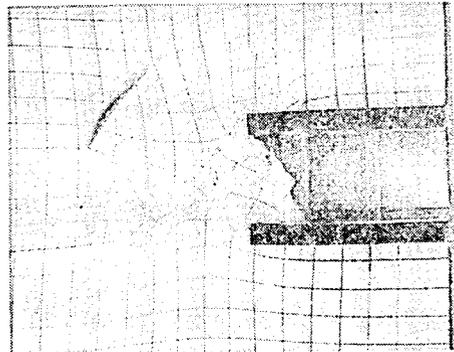
を参照して鏡より前方に 2.5H, トンネル天井部の上方に 2H, トンネル底部から 2H である。

III-2 : Type II (No. 2, No. 3)

この実験は, 支保工に作用する寒天の圧力の大きさと, 位置による圧力の変化を求めるために行った実験であり, 空洞の大きさは, 高さ 8 m, トンネル軸方向に 6 m である。支保工及び圧力測定用装置を図-4 に示す。リング A, B, C に作用する寒天の面積は $6\text{ cm} \times 10\text{ cm} = 60\text{ cm}^2$ である。



(b) 鏡前面の破壊の進行



(c) 大きな引張亀裂の発生

写真-8 No. 4 の実験結果 (破壊の進行)

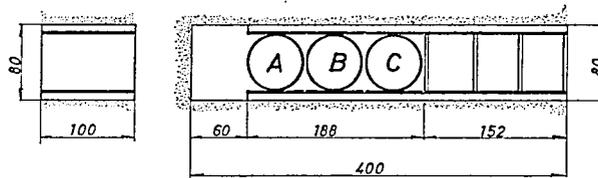


図-4 Model of Tunnel and Supports (No2, 3)

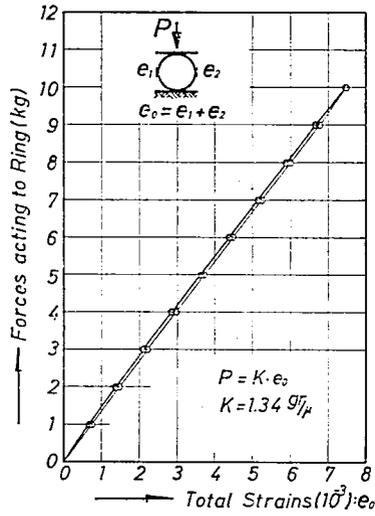
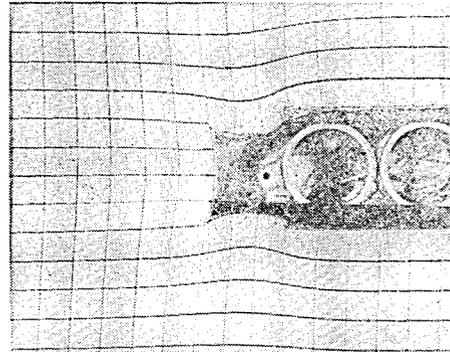


図-5 Calibration of Ring

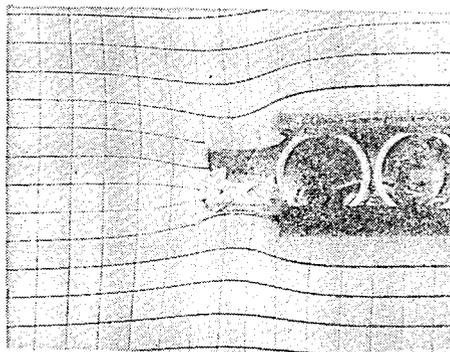
この面積上に分布している寒天圧の合力がリングの軸ひずみとして読み取られる。リングの校正試験をこれらA, B, C, リングについてあらかじめ行い, リングの出力ひずみと作用力との関係を求めた。リングA, B, Cの係数はそれぞれ 1.34, 1.35, 1.42 gr/μ である。図-5は校正試験結果の1例である。

写真-9 (a), (b)は, 変形と破壊の状態を示したものである。図-6はこの実験により得られた支保工圧の測定結果であり, リング A, B, C に作用する寒天の圧力と実験の経過時間との関係を示している。Type I, II の実験においては, 直立時の急激な破壊を防止するため, 空洞内の空気を密閉し, 直立後荷重 ($P=20 \text{ kg}$) し, 徐々に空気圧を開放した。

図-6は, リング A, B, C に作用する圧力の合計が常に寒天の被り高 ($46+20=66 \text{ cm}$) に等しく, 寒天の如く軟弱な地山においてはアーチ作用が現われず, 全土被



(a)



(b)

写真-9 No. 3 の変形と破壊の状態

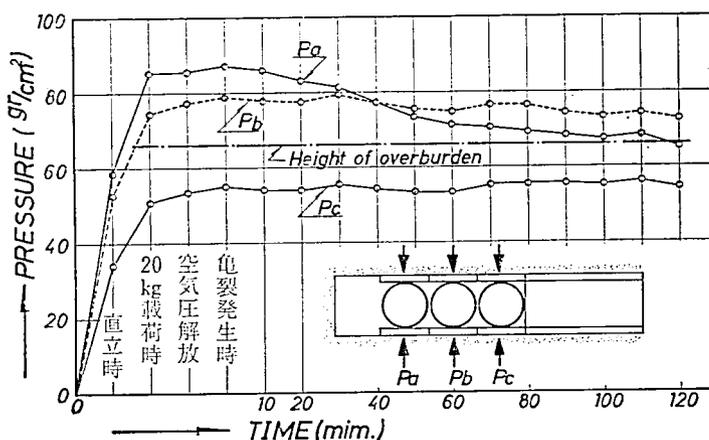


図-6 Relation of Time and Pressures acting to Rings

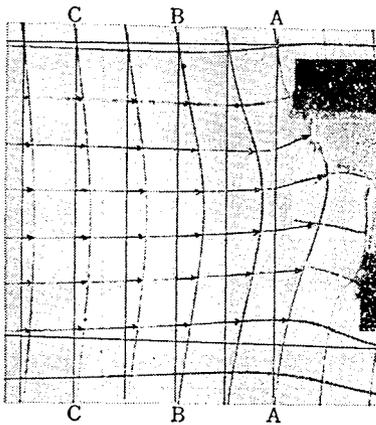
り高さが作用し、液体と同一の状態にあることを示している。さらにリング A, B, C 相互の関係について述べると、載荷時の P_A と P_C の比は $85/50=1.7$ であり、空洞先端での応力集中の激しいことが分かる。破壊発生とともに応力の再配分による圧力の均一化に向かい、 P_A/P_C の比は次第に小さくなり、直立後 2 時間経過後においてその値は 1.3 に減少している。この場合も平均圧力は 65 cm で土被り高にほぼ等しい。

III-3 Type-III (No. 5, No.6) の実験結果 (写真-10 参照)

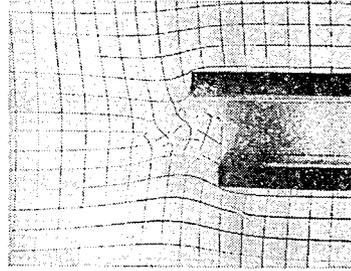
この実験はショートベンチカットを反映した 2 次元モデルである。ベンチ長は 2m, 上半の高さ 4m, 下半の高さ 4m で掘削面を補強しない場合である。載荷重は破壊が大きいかも速度が大きいため No. 6 以後は 10 kg としている。No. 6 の実験の結果から写真-10(a)~(d) に破壊の進行の状態を示す。写真-10(a) はベンチの押し出し、下半の前 3m の位置に引張亀裂の入った状態である。ベンチ前方のモデルの水平変位をわかりやすくするため、変形モードを写真中に記した。写真 10-(b) は、さらに破壊が進みトンネルの鏡の部分の部分が細かく破壊し、下盤の持ち上りが激しくなった状態である。(c) (d) はさらに破壊が広がった状態である。(c) にはモデルの上下方向の変形をわかりやすくするため変形モードを写真中に記した。ベンチ下部の持ち上りの大きなことが確認できる。

これらの結果から未補強の超ショートベンチカットの場合には、底盤覆工が天井部覆工より遅れて施工されるため (この実験の場合には 3m 遅れ) 軟弱なベンチ部が下方から持ち上げられると同時にトンネル内部へ押し出される結果になり写真に見られるように空洞を完全に弛ませた場合の破壊領域と同じ状態になる。

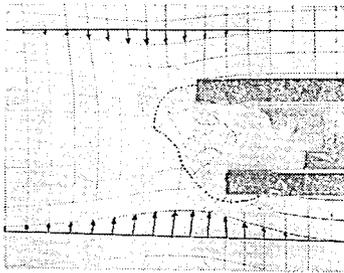
写真-10(a) に示した鏡前面の水平変位の変形モードから写真中の A-A 断面 (上段の鏡の位置), B-B 断面 (A-A 断面からトンネル高さの 1/2 の位置にある), C-C 断面 (A-A 断面からトンネル高だけ離れている) の水平変位を比較すれば、C-C 断面における変位は A-A 断面の 20~30%, B-B 断面における変位は 50% 程度である。この結果は弾性計算により示されている事実であり、これをモデル実験により示した例といえる。



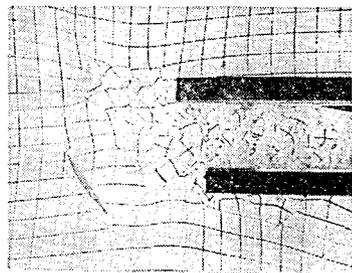
(a) 鏡前面に亀裂発生時の変形状態



(b) 破壊の進行



(c) 破線の内部が塑性破壊領域



(d) 破壊の最終状態

写真-10 No. 6 の実験結果

III-4 Type-IV (No. 7, No. 8 No. 9 No. 10)

Type-IV の実験 (No. 7~No. 10) の概要を表-1 に示す。図-7 に示す如くベンチ部を補強する場合には、ベンチ下段の垂直な壁にラバーを当て、これとボルトを接着し、ベンチ部の押し出しをボルトで抵抗させている。実験結果を写真-15~18 に示す。写真の説明中の時間はモデル直立後の時間である。

ボルトで補強した場合と補強しない場合を变形、破壊の状態について比較すると、ボルト補強による効果が現われているとはいえず、むしろ、ボルト挿入により破壊を早める傾向にあるといえる。これはベンチ部の押し出しをラバーとボルトで拘束し、拘束力を寒天の地山中に還元することにより、ボルトの先端（内空側）に大きな引張力が作用し、ボルトの地山側の深い位置に亀裂が発生するためである。No. 10 の実験結果によれば变形が小さな間はボルトとラバーは、ベンチ壁部を押えるのに役立っているが、寒天の变形は、拘束されていない方向（この場合は、ベンチの水平部の持ち上り）に増大する。この变形に対してボルトは变形拘束の役目を果たすことができずさらに变形が増大し、ボルト周囲の寒天が破壊し、ボルトの抵抗力を減少または消滅させる。

この実験結果によれば、寒天の如く变形が大きく、地山強度の小さな地山においては、ボルトにより变形を拘束するためには、寒天の流動可能な面、いわゆる未補強の面 (No. 10 の場合は上半鏡とベンチ水平部) を無くすることが重要であり、この条件が不可能な場合には、寒天の如く軟弱な地山に対して、ロックボルトを有効に使用することは困難な

ことを示唆するものである。また逆の見方をすれば、鏡の面を一体となった薄膜で覆い、ロックボルトと一体にすれば寒天の移動を完全に拘束できるため、ボルトは有効に働くことを教えたものといえる。これについては現在追実験を行っており、報告する予定である。

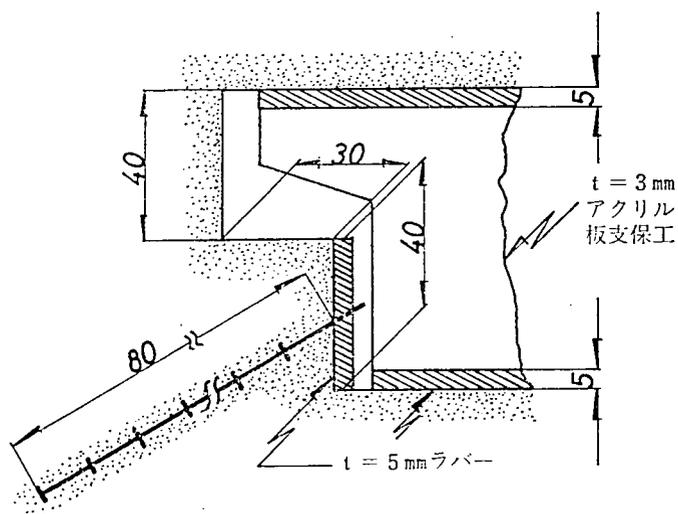


図-7 ベンチ部の補強 (ボルトとラバーは接着)

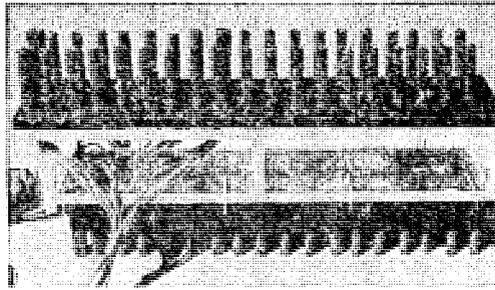


写真-11 No. 7 モデルの補強用ボルトと枠

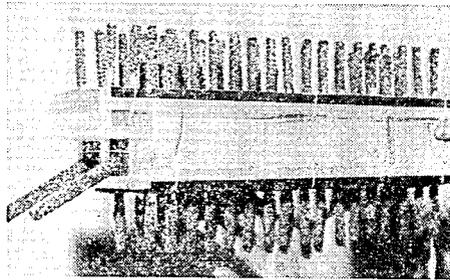


写真-12 No. 8 モデルの補強用ボルトと枠

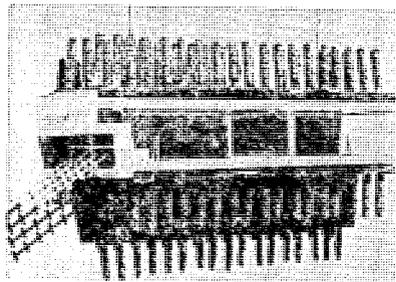


写真-13 No. 9 モデルの補強用ボルトと枠

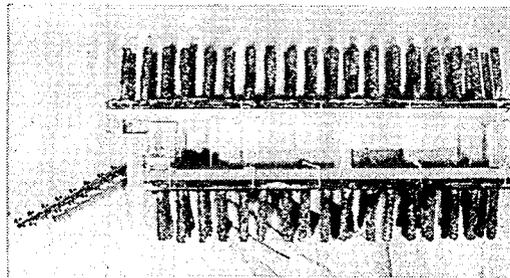


写真-14 No. 10 モデルの補強ボルトと枠

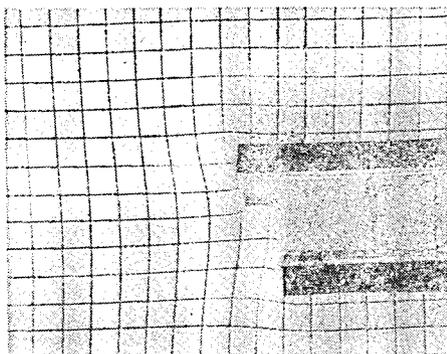
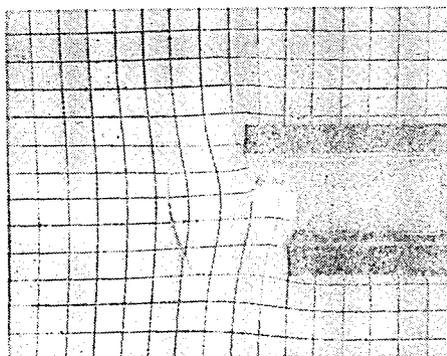
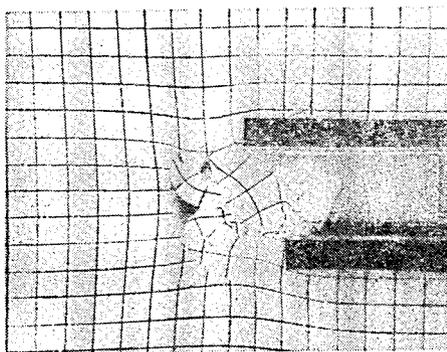
(a) $t=5$ 分(b) $t=30$ 分(c) $t=60$ 分

写真-15 No. 7 (ベンチ部未補強)
の実験結果

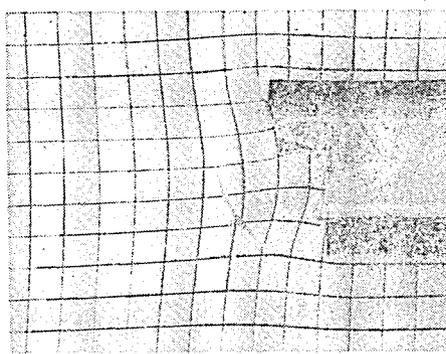
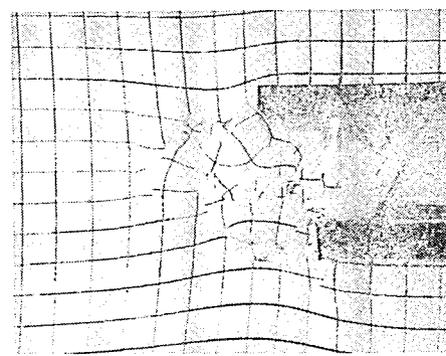
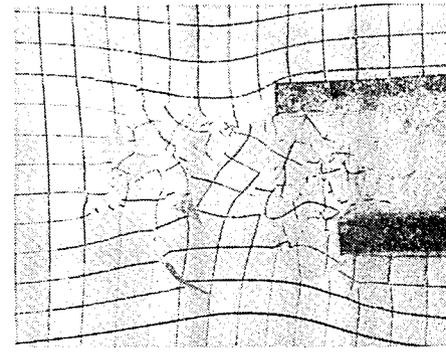
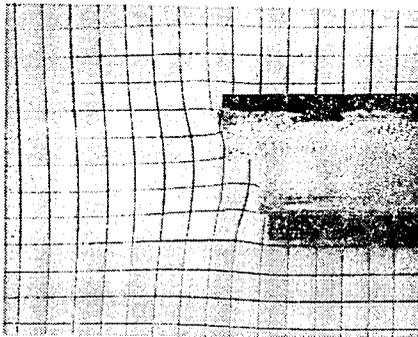
(a) $t=4$ 分(b) $t=20$ 分(c) $t=30$ 分

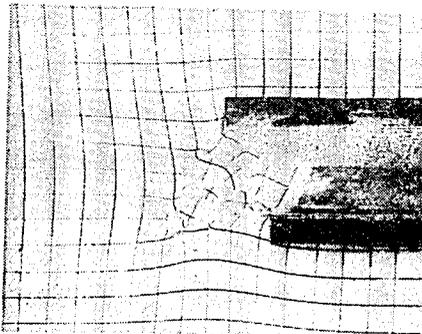
写真-16 No. 8 (ベンチ部補強)
の実験結果

III-5 Type V (No. 11, No. 12, No. 13) (写真-19,20 参照)

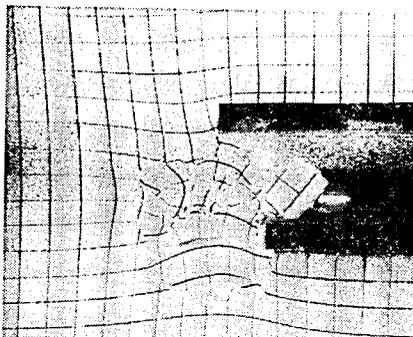
頂設導坑先進で導坑を長くした場合の破壊の状態を実験により求めた。No. 11, No. 12 の頂設導坑の長さはそれぞれ 15m, 26m であり, 上・下面はボルトで補強されている。No. 13 は, 上下面にボルトのない場合である。結果を写真-19, 20 に示す。これらの結果は掘削面を小さくし, しかも上・下面をボルトで補強すればトンネル周辺の寒天の移動がボルト及び地山により拘束され, トンネル周辺の大きな破壊を防止できることを示した一つの例である。この例から判断すると頂設導坑 15m 以上施工後の頂設導坑掘削による弛みは小さく, 破壊もほとんど発生しないことがわかる。但し, このモデルにおいては, 導坑の覆工剛性は, 全断面の支保工剛性と同一のものを使用しているため, 導坑の覆工として吹付けコンクリート及び鋼アーチ支保工を使用した場合に対応したものである。



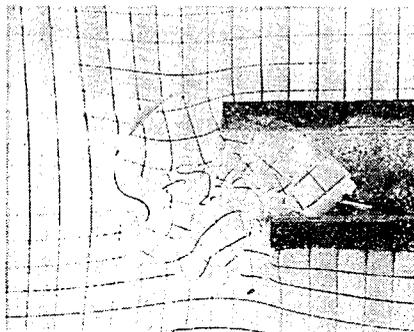
(a) $t=4$ 分



(b) $t=20$ 分

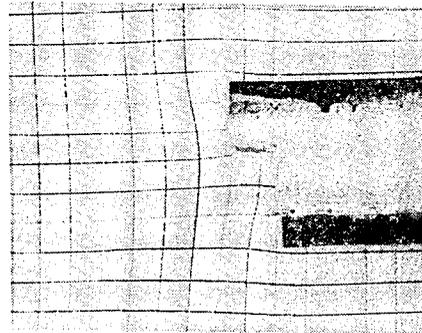


(c) $t=35$ 分

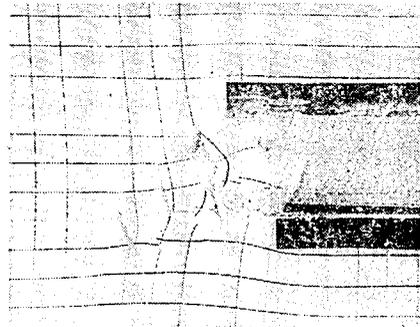


(d) $t=60$ 分

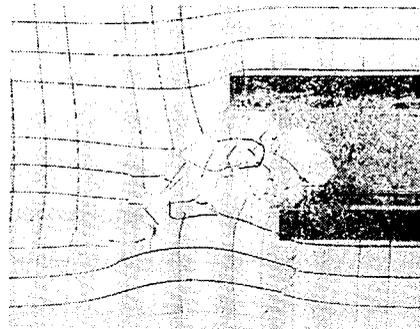
写真-17 ベンチ部補強 ($l=8$ cm) No. 9



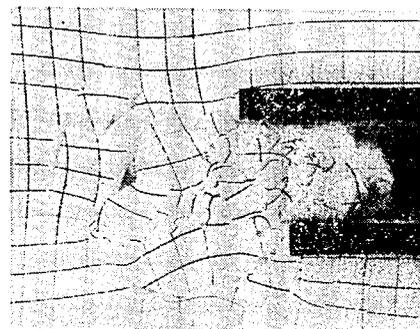
(a) $t=4$ 分



(b) $t=20$ 分



(c) $t=30$ 分



(d) $t=60$ 分

写真-18 ベンチ部補強 ($l=12$ cm) No. 10

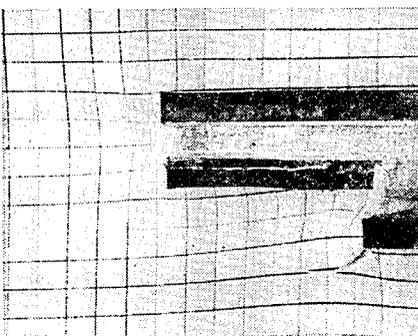
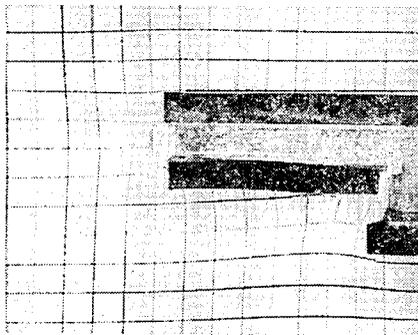
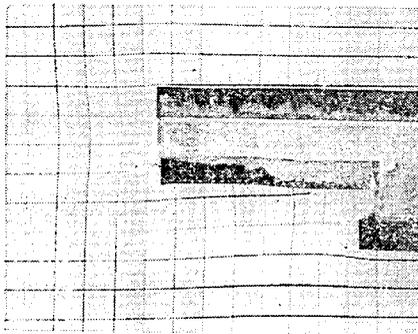
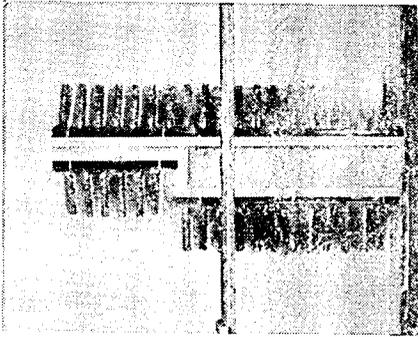


写真-19 頂設導坑先進 (No. 11) の実験結果。上から順に (a) 流し込み前のモデル (b) $t=10$ 分, (c) $t=30$ 分, (d) $t=60$ 分

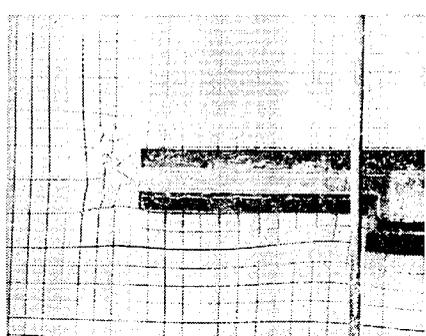
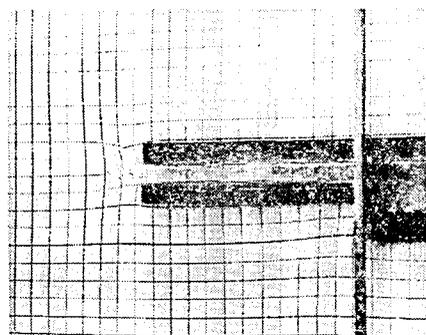
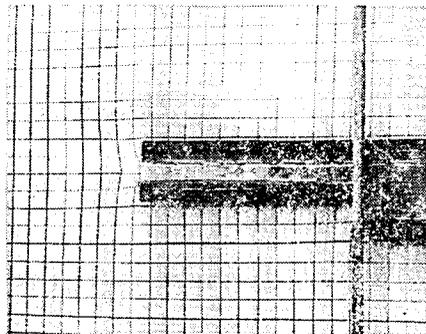
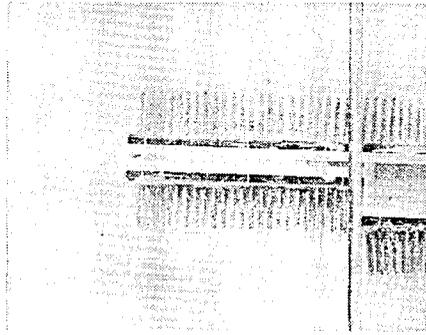


写真-20 頂設導坑先進 (No. 12) の実験結果。上から順に (a) 流し込み前のモデル, (b) $t=10$ 分, (c) $t=30$ 分, (d) $t=60$ 分

謝 辞

本論文は、筆者の指導の下に昭和 55 年度、土木工学科学部卒業研究の一環として行われた実験結果からそのままデータ、写真を引用し、まとめたものである。大量の寒天を扱かい、しかも短期間に多数の実験を行った安部高之、小泉景一、高見澤幸也、湯本信隆君等に心から感謝致します。

さらに、寒天のせん断、圧縮試験について毎回、土質実験室の皆様には、実験装置の使用からデータのまとめ等、御援助頂き感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安井将文：「寒天を用いたトンネル模型実験に関する研究」明星大学研究紀要理工学部第16号，1980
- 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）1979
- 3) 安井将文：「ロックボルトを有する粘性土の変形特性について」第7回土木学会関東支部年次研究発表会・講演概要集 1979
- 4) 安井将文：「粘土中のロックボルトの補強効果に関する研究」『トンネルと地下』Vol. 11, No. 7, 1980
- 5) 安井将文：「粘土中のボルト軸力の測定とその考察」第35回土木学会年次学術講演会・講演概要集（Ⅲ）1980
- 6) 安井将文：「トンネル破壊に関するモデル実験について」第8回土木学会・関東支部，年次研究発表会・講演概要集 1981
- 7) 大塚・高野：「膨張性軟岩におけるトンネルの挙動と地質特性」『土と基礎』Vol. 28, No. 7, July, 1980
- 8) D.J. シューリング，江守一郎共著：「模型実験の理論と応用」技報堂