



土木研究所資料

第九九五号

トンネル周辺の応力分布に関する実験的研究(I)

建設省土木研究所

土木研究所資料

第995号

トンネル周辺の応力分布に関する実験的研究(I)

昭和50年3月

建設省土木研究所

目 次

ま え が き	1
1. 実 験 装 置	2
2. 供 試 体	6
3. 実験計画および方法	7
4. 実験の結果および考察	8
4-1. 供試体破壊強度	8
4-2. 応力分布状態	22
4-3. 円孔変形量について	24
ま と め	33

ま え が き

今日、トンネルの支保工や覆工などの構造諸元の設計は既往の工事実績から得られた標準的数値を用いて行なっている。それはトンネル構造物に作用する荷重状態の定性的、定量的な推定が一般に困難であることが原因となっている。しかしながら地山の状況に即した、確実で、経済的な設計施工を行なうには、それらの理論的説明が必要である。

トンネル研究室では、模型実験による、トンネル周辺の地山応力の分布状態の推定方法を検討している。今回の実験に使用した模型は、均質等方性の地山部分と、その中央にトンネルとしての円孔、および覆工を設けたものである。この模型に油圧ジャッキにより荷重載荷を行ない、円孔周辺の地山の応力分布状態を測定するとともに、破壊状態を観察した。本報告は、その結果を報告し、トンネル土圧の推定方法の開発の基礎資料とするものである。

東北地方建設局企画課

石 橋 正 穂

土木研究所トンネル研究室

古 庄 隆

木 村 美知秋

1. 実験装置

実験装置は図-1，写真-1に示すように，四方から供試体に载荷するもので，载荷には手動油圧ジャッキを各方向当りに2台使用し，計8台の油圧ジャッキで行うものである。この実験装置を二次元载荷装置と呼ぶ。使用する供試体の寸法は，縦60 cm，横60 cm，高さ20 cmである。油圧ジャッキの反力は直径60 mmのロッドと，油圧ジャッキ取付部分から成る反力枠で受けている。

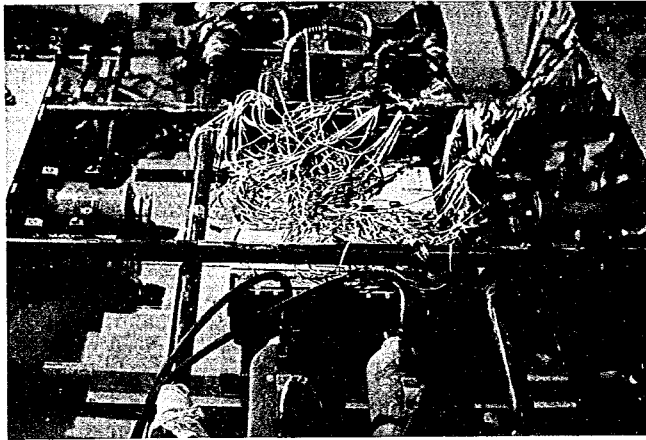


写真-1 地山模型载荷装置

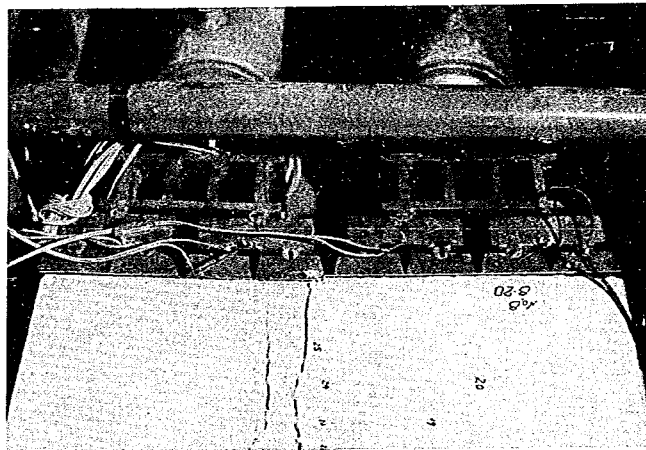


写真-2 鋼製载荷板

供試体面への載荷には図-2、写真-2に示す鋼製載荷板を用いた。この載荷板は、図に示すように7枚の載荷板がピラミッド型に組み合わせられて1組となる。この載荷板により油圧ジャッキの圧力は、供試体の載荷面で4等分される。また鋼製載荷板と供試体載荷面の間には、キャッピングの働きをさせるものとして、硬質ゴム板を入れた。

供試体の応力分布は、供試体表面のひずみを、ひずみゲージによって測定し求めた。

トンネルとしての円孔、および覆工の変形量測定には、図-3のような測定板を用いた。巾1cm長さ8cmのセルロイド板の両面に、ひずみゲージを貼ったものである。この測定板の変位量とひずみの関係を求めておき、図に示すように孔内にセットし測定した。

(1) 油 圧 ジャ ッ キ	容量 50 t	8 台	
(2) 油 圧 ポ ン プ	容量 50 t	1 台	
	容量 10 t	1 台	
(3) 載 荷 板	載荷板 I	2 枚	} × 4 セット
	載荷板 II	4 枚	
	載荷板 III	8 枚	
(4) 載 荷 枠	ロ ッ ド	8 本	φ 60 × 3200
	反力枠 A	2 台	540 × 300 × 904
	反力枠 B	2 台	394 × 300 × 904
	ロックネジ	36 個	

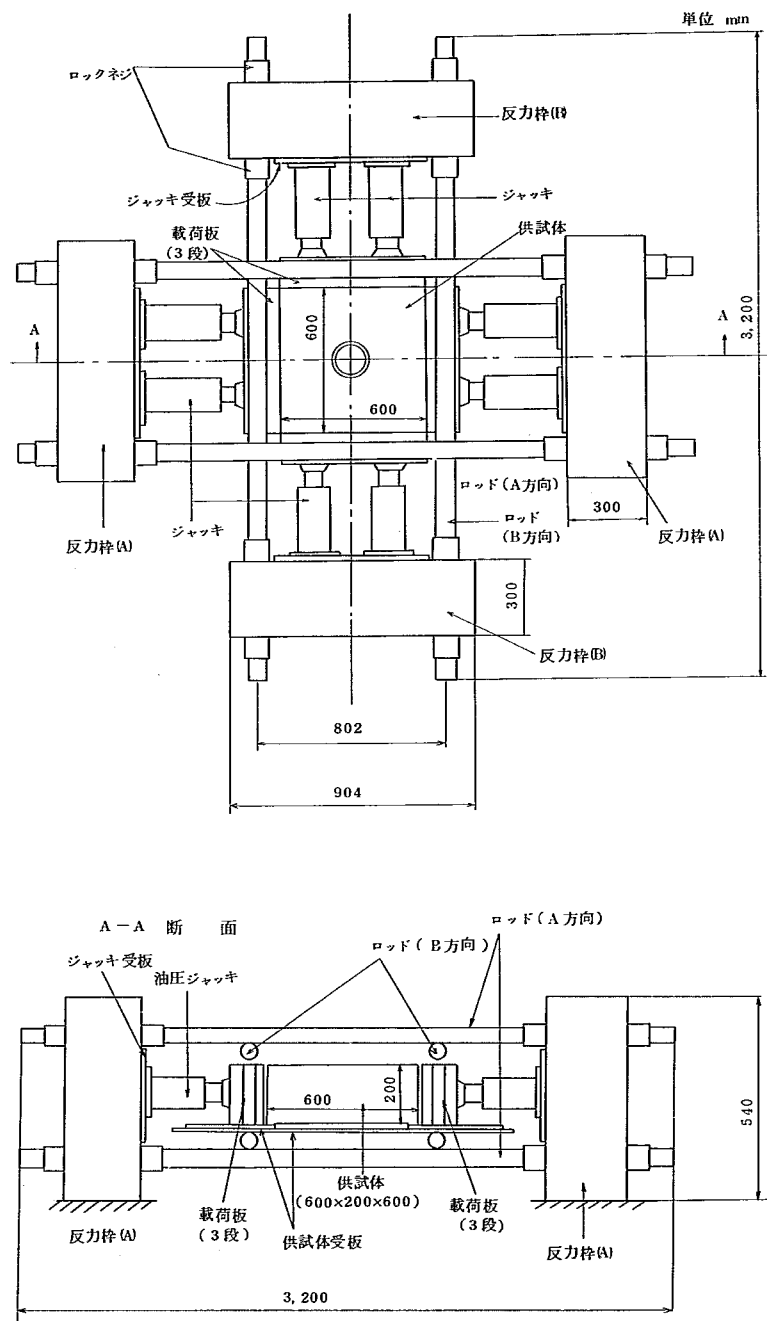


図-1 二次元方向载荷装置

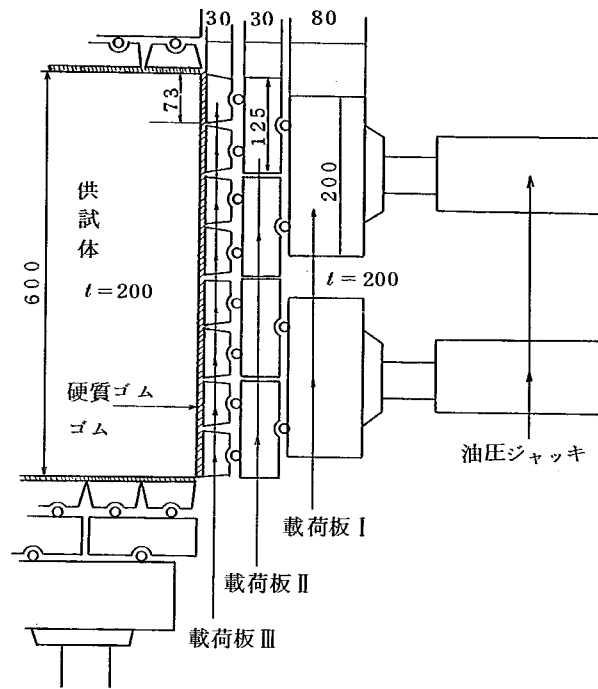


図-2 鋼製載荷板

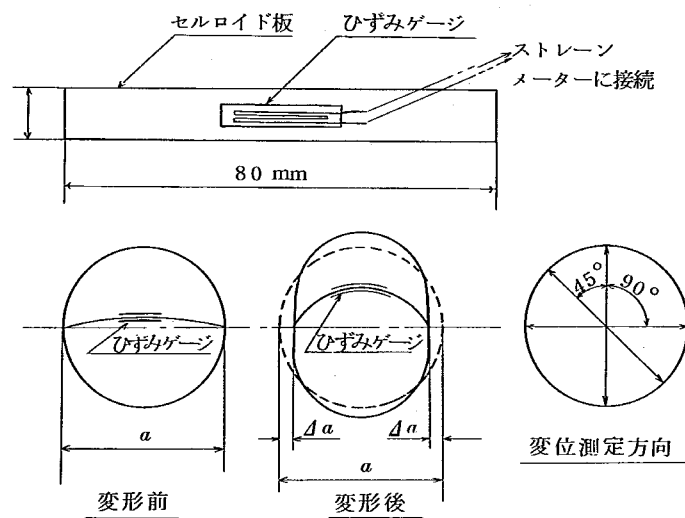


図-3 円孔の変位測定方法

2. 供 試 体

供試体は加工が容易で、実際の地山の性質に即したものを選ぶ必要がある。本実験では、地山部ではセッコウ、珪藻土、水を混合し固めたものを材料とし、覆工部ではセッコウ、水を混合し固めたものを材料とした。セッコウを P 、珪藻土を D 、水を W とし、材料の性質を表わす指標として、 W/P 、 D/P を用いた。供試体の試作を行ない、一軸圧縮強度、 $\delta - \epsilon$ 曲線、およびワーカビリティから検討した結果、地山部では、 $W/P = 1.2$ 、 $D/P = 0.3$ を、覆工部では $W/P = 0.7$ を基本とする混合比が得られた。そのときの地山部の一軸圧縮強度は約 35 kg/cm^2 、ヤング係数約 $5,000 \text{ kg/cm}^2$ 、覆工部の一軸圧縮強度は約 110 kg/cm^2 、ヤング係数は約 $20,000 \text{ kg/cm}^2$ である。完成した供試体を写真-3に示す。

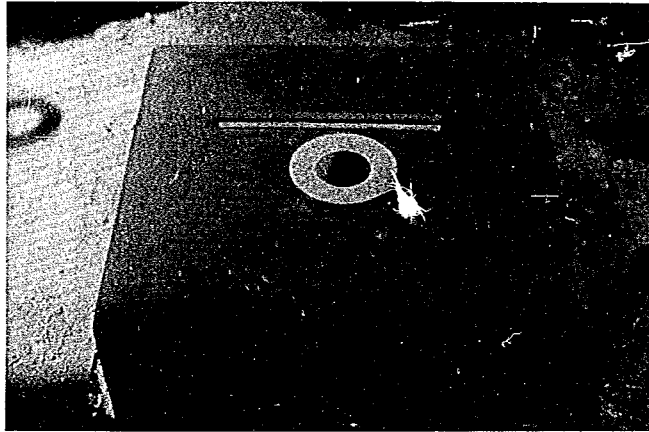


写真-3 供 試 体

3. 実験計画および方法

この実験の目的は、トンネル周辺の地山の応力分布状態を実験的見地から調べることである。応力の分布状態に影響をおよぼす因子としては次の2つが考えられる。

(1) 供試体形状

1) トンネルの掘さく後、覆工を施工していない状態、図-4(a)

2) 覆工を施工した状態では、トンネル内径(円孔の内径)を一定とし、覆工厚を変化した場合。図-4(b)

(2) 載荷条件

トンネル(円孔)表面に引張応力を生じないときの載荷状態は

$$K = \frac{\text{水平方向荷重}}{\text{鉛直方向荷重}}$$

としたとき $K = 1/3$ の場合である。よって

1) $K = 0$ の場合(鉛直方向荷重のみを載荷)。

2) $K = 1/3 \div 0.3$ の場合

3) $K = 1$ の3通りの場合を考えた。

表-1は実験条件の一覧表である。

実験における測定項目の主なものは次の通りである。

(1) 油圧ジャッキ圧力(油圧)。

(2) 各荷重段階毎の供試体表面のひずみ。

(3) トンネル(円孔)の変形量。

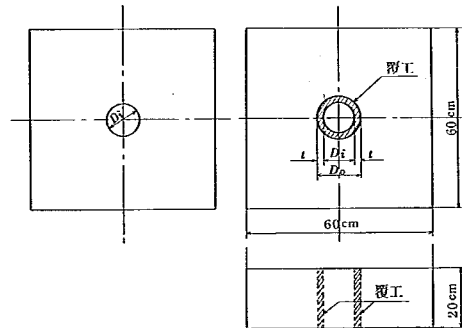


図-4(a) 覆工のない供試体

図-4(b) 覆工を有する供試体

表-1 実験条件一覧表

覆工厚: t 円孔内径: D_i		側圧係数 K		
		0.0	0.3	1.0
$t = 0.0$ (mm) $D_i = 77.0$	均質	≈ 1.0	≈ 1.2 ≈ 1.3	≈ 1.4 ≈ 1.5
	不均質	—	—	—
$t = 12.0$ $D_i = 77.0$	均質	≈ 1.6	≈ 1.7	≈ 1.8
	不均質	—	—	—
$t = 36.5$ $D_i = 77.0$	均質	≈ 7	—	—
	不均質	≈ 8	—	≈ 9
$t = 0.0$ $D_i = 115.0$	均質	≈ 2 ≈ 3	—	—
	不均質	—	—	—
$t = 11.5$ $D_i = 77.0$	均質	≈ 5	—	—
	不均質	—	—	—
$t = 17.5$ $D_i = 115.0$	均質	≈ 6	—	—
	不均質	—	—	—

4. 実験の結果

4-1 供試体破壊強度

供試体の破壊強度は、供試体間の材質による強度の差異を消去するために、実際の破壊強度をモールドの一軸圧縮強度で除した値を使用した。破壊強度と、供試体形状の一覧表を表-3、破壊形状を表-2、写真-4~12に示す。

表-3 供試体形状および破壊強度

供試体 番 号	破壊強度 δ_c kg/cm ²	モールド一軸 圧縮破壊強度 δ_c' kg/cm ²	$\frac{\delta_c}{\delta_c'}$	覆工厚 t (mm)	円孔内径 D_i (mm)	$\frac{t}{D_i}$	側圧係数 $K = P_h/P_v$
No 1	27.1	—	—	0	77	0	0.0
No 2	6.5	33.8	0.19	0	118	0	0.0
No 3	7.4	31.9	0.23	0	118	0	0.0
No 4	—	—	—	—	—	—	—
No 5	11.0	31.9	0.34	11.5	77	0.149	0.0
No 6	13.6	31.8	0.43	17.5	115	0.152	0.0
No 7	12.7	30.8	0.41	37	77	0.481	0.0
No 8	15.3	31.6 47.7	0.48 0.32	37	77	0.481	0.0
No 9	22.5	31.6 55.6	0.71 0.40	37	77	0.481	1.0
No 10	9.3	36.5	0.26	0	77	0	0.0
No 11	—	—	—	—	—	—	—
No 12	12.0	46.8	0.27	0	77	0	0.3
No 13	19.9	46.8	0.43	0	77	0	0.3
No 14	8.2	30.3	0.27	0	77	0	1.0
No 15	14.0	30.3	0.46	0	77	0	1.0
No 16	8.4	29.5	0.29	11.7	77	0.152	0.0
No 17	9.4	34.1	0.28	11.9	77	0.155	0.3
No 18	8.3	33.0	0.25	11.7	77	0.152	1.0

図-5は、供試体破壊強度(δ_c)/モールド軸圧縮強度(δ_c')と、覆工厚(t)/トンネル(円孔)内径(D_i)との関係を示すものである。この図において、側圧係数 $K=0$ 、すなわち鉛直方向荷重だけを載荷した場合においては、供試体の強度化(δ_c/δ_c')は覆工厚の比(t/D_i)に比例している。つまり供試体強度は覆工厚に比例しているといえる。しかし、側圧係数 K が0.3, 1.0のときは逆に供試体強度が覆工厚に反比例している。

また、理論解においては、供試体形状(t/D_i)を一定とした場合の破壊強度が、 K が0, 0.3,

1, 0 と変化するにしたがって増加する。しかし、実験においてはその傾向はみられず、特に $t/D_i = 0.49$ のときは逆に減少している。

これらは平面応力状態での理論解と全く一致していない。これは、20 cm の厚さを有する構造物（供試体）に平面応力状態での理論を適用したこと、また、载荷重荷が偏荷重となり易いなど、理論の組み立て、あるいは実験装置に何らかの欠陥があると考えられる。

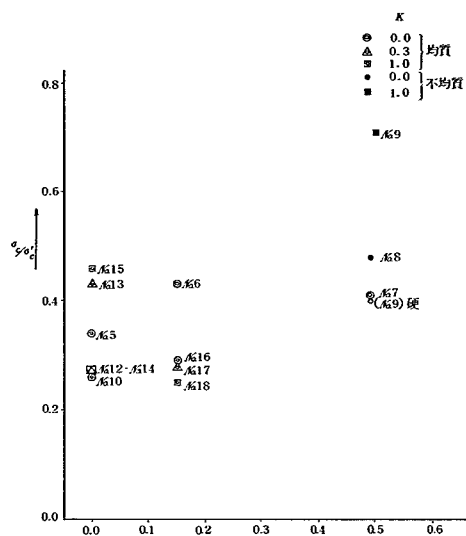


図-5 $\delta_c / \delta_{c'} \sim t / D_i$ の関係

表-2 載荷試験一覧表

供試体番号		№5	№6	№7	№8	№9
打設年月日		1973・8・9	1973・8・16	1973・8・16	1973・8・20	1973・8・21
試験実施年月日		1973・8・28	1973・10・18	1973・10・4	1973・10・31	1973・12・5
側圧係数 $K = P_h/P_v$		$K = 0.0$	$K = 0.0$	$K = 0.0$	$K = 0.0$	$K = 1.0$
供試体形状 および材質	地山	600mm×600mm×200mm $W/P=1.2$ $D/P=0.3$	600mm×600mm×200mm $W/P=1.2$ $D/P=0.3$	600mm×600mm×200mm $W/P=1.2$ $D/P=0.3$	600mm×600mm×200mm ○ 地山の性質を中央で2種類に分けた。 軟 $W/P=1.20$ $D/P=0.30$ 硬 $W/P=1.05$ $D/P=0.21$	600mm×600mm×200mm ○ 地山の性質を中央で上下2種類に分けた。 軟 $W/P=1.2$ $D/P=0.3$ 硬 $W/P=0.86$ $D/P=0.13$
	覆工	$D_o=100mm$ $D_i=77mm$ $t=11.5mm$ $W/P=0.7$	$D_o=150mm$ $D_i=115mm$ $t=17.5mm$ $W/P=0.7$	$D_o=150mm$ $D_i=77mm$ $t=37mm$ $W/P=0.7$	$D_o=150mm$ $D_i=77mm$ $t=37mm$ $W/P=0.6$	$D_o=150mm$ $D_i=77mm$ $t=37mm$ $W/P=0.6$
地山部 一軸圧縮強度		$\sigma_c' = 31.9 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c' = 31.8 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c' = 30.8 \text{ kg/cm}^2$	硬 $\sigma_c' = 47.7 \text{ kg/cm}^2$	硬 $\sigma_c' = 55.6 \text{ kg/cm}^2$
供試体圧縮強度		$\sigma_c = 11.0 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c = 13.6 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c = 12.7 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c = 15.3 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_c = 22.5 \text{ kg/cm}^2$
破壊状態		圧縮破壊面は、供試体の中央において、荷重載荷方向に対し直角でなく、載荷側にカーブしている。覆工は楕円形に変形して破壊した。覆工には微細なクラックが全局に、トンネル軸方向に発生した。	トンネルの上端、下端から荷重載荷方向に引張によるクラックの発生が著しい。荷重載荷方向に対し直角方向の圧縮破壊も同時に行なわれている。覆工は引張で破壊されており、圧縮による破壊はみられなかった。写真-4。	地山部、トンネル部共に圧縮引張を顕著に現わして破壊した。すなわちトンネルを中心として、荷重方向では引張破壊を、荷重方向に直角な面では圧縮破壊をしている。写真-5。	軟質の地山を中心に引張クラック、および圧縮破壊が発生し、硬質の地山部では、トンネル周辺の引張クラックのみが発生した。写真-6。	軟質の地山のみに圧縮による破壊が生じ、硬質の地山部および覆工の目立った変状はなかった。写真-7。

K : 水平荷重(P_h) / 鉛直荷重(P_v)
 D_o : 覆工を施工したとき、その外径

W/P : 水(W)とセッコウ(P)の重量比
 D_i : トンネル(円孔)および覆工の内径

D/P : 珪藻土(D)とセッコウ(P)の重量比
 t : 覆工厚

供 試 体 番 号	№ 10	№ 12	№ 13	№ 14	№ 15
製 作 年 月 日 試 験 実 施 年 月 日	1973・10・24 1973・12・15	1973・11・14 1973・12・19	1973・11・14 1974・2・20	1973・11・16 1973・12・20	1973・11・16 1974・2・26
側 圧 係 数 $K = P_h / P_v$	$K = 0.0$	$K = 0.3$	$K = 0.3$	$K = 1.0$	$K = 1.0$
供 試 体 形 状 お よ び 材 質	地 山 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 200\text{mm}$ $W/P = 1.20 \quad D/P = 0.30$ $D_i = 77\text{mm}$	地 山 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 187\text{mm}$ $W/P = 1.20 \quad D/P = 0.30$ $D_i = 77\text{mm}$	地 山 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 195\text{mm}$ $W/P = 1.20 \quad D/P = 0.30$ $D_i = 77\text{mm}$	地 山 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 200\text{mm}$ $W/P = 1.4 \quad D/P = 0.3$ $D_i = 77\text{mm}$	地 山 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 204\text{mm}$ $W/P = 1.4 \quad D/P = 0.3$ $D_i = 77\text{mm}$
	覆 工 $D_o = 150\text{mm} \quad D_i = 77\text{mm}$ $t = 37\text{mm}$ $W/P = 0.7 \quad D/P = 0.0$	なし	なし	なし	なし
地 山 部 一 軸 圧 縮 強 度	$\sigma_c' = 36.5\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c' = 46.8\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c' = 46.8\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c' = 30.3\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c' = 30.3\text{kg/cm}^2$
供 試 体 圧 縮 強 度	$\sigma_c = 9.3\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c = 12.0\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c = 19.9\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c = 8.2\text{kg/cm}^2$	$\sigma_c = 1.4\text{kg/cm}^2$
破 壊 状 態	引張クラックが、荷重載荷方向より45°の位置を始点として、荷重載荷方向に発生した。覆工には圧縮による破壊が生じている。写真-8。	トンネルを中心として、鉛直荷重載荷方向に対し、直角方向に圧縮破壊が生じている。また鉛直荷重載荷方向に引張クラックが発生している。写真-9。	表面部分だけの破壊が生じた。原因は偏荷重によるものか、あるいは供試体の材質が不均質であるためと考えられる。	地山部に細かい圧縮性のクラックが表面全般に生じた。破壊後も覆工と地山は密着していた。写真-10。	地山およびトンネルの横断方向にせん断破壊と思われる破壊面が発生した。三次元応力解析が必要と考えられる。

供試体番号		№16	№17	№18
製作年月日		1973・11・19	1973・11・22	1973・11・22
試験実施年月日		1973・12・21	1973・12・22	1973・12・25
側圧係数 $K = P_h / P_v$		$K = 0.0$	$K = 0.3$	$K = 1.0$
供試体形状 および材質	地山	600mm×600mm×195mm $W/P = 1.4 \quad D/P = 0.3$	600mm×600mm×195mm $W/F = 1.4 \quad D/P = 0.3$	600mm×600mm×197mm $W/P = 1.4 \quad D/P = 0.3$
	覆工	$D_o = 100\text{mm} \quad D_i = 77\text{mm}$ $t = 12\text{mm}$ $W/P = 0.7 \quad D/P = 0.0$	$D_o = 101\text{mm} \quad D_i = 77\text{mm}$ $t = 12\text{mm}$ $W/P = 0.7 \quad D/P = 0.0$	$D_o = 101\text{mm} \quad D_i = 77\text{mm}$ $t = 12\text{mm}$ $W/P = 0.7 \quad D/P = 0.0$
地山部 一軸圧縮強度		$\delta_c' = 29.5 \text{ kg/cm}^2$	$\delta_c' = 34.1 \text{ kg/cm}^2$	$\delta_o' = 33.0 \text{ kg/cm}^2$
供試体圧縮強度		$\delta_c = 8.4 \text{ kg/cm}^2$	$\delta_c = 9.4 \text{ kg/cm}^2$	$\delta_c = 8.3 \text{ kg/cm}^2$
破壊状態		理論通りの破壊状態を示した。表面部分だけに破壊が生じた。覆工、およびその周辺にはクラックの発生があまりみられなかった。写真-11。		
		覆工にはクラックなどの変状はみられず、地山部分だけが圧縮破壊された。写真-12。		

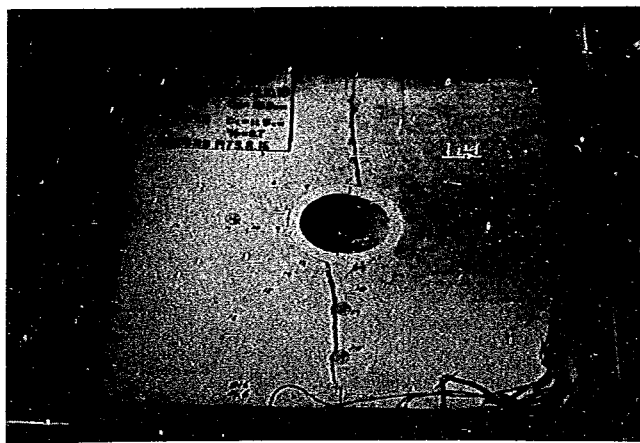


写真-4 破壊状態（供試体番号-6）

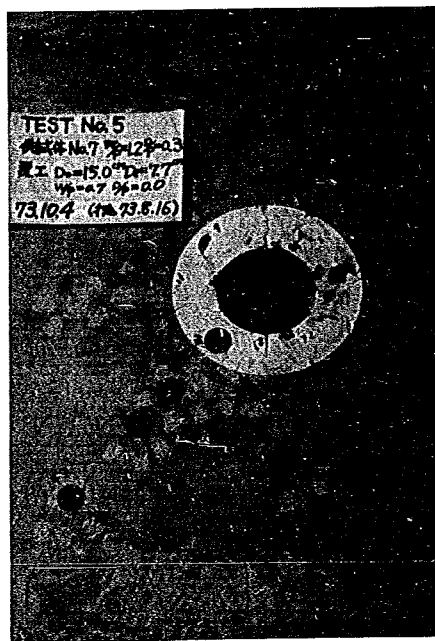


写真-5 破壊状態（供試体番号-7）

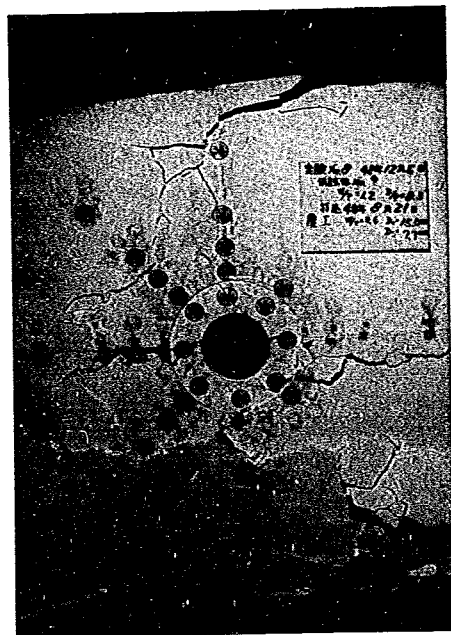
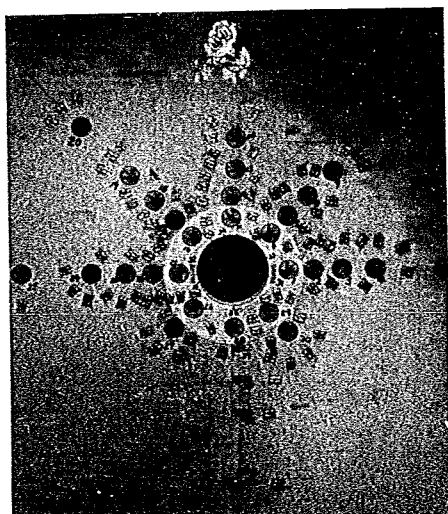
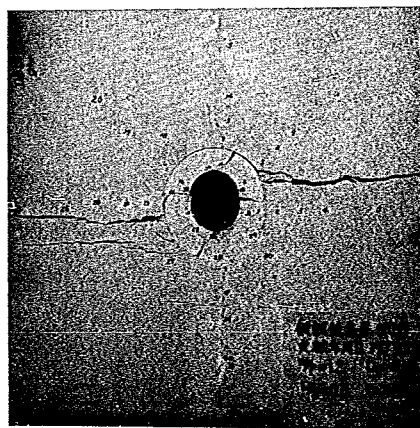


写真-7 破壊状態(供試体番号-9)



(a)



(b)

写真-6 破壊状態(供試体番号-8)

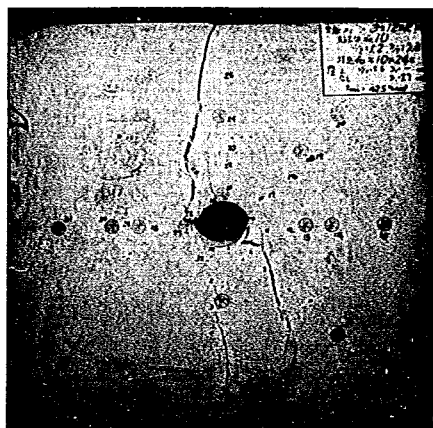


写真-8 破壊状態（供試体番号-10）

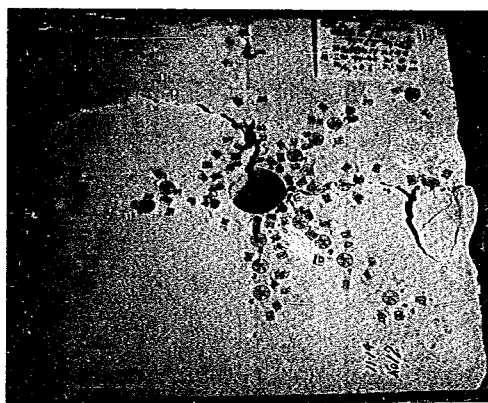
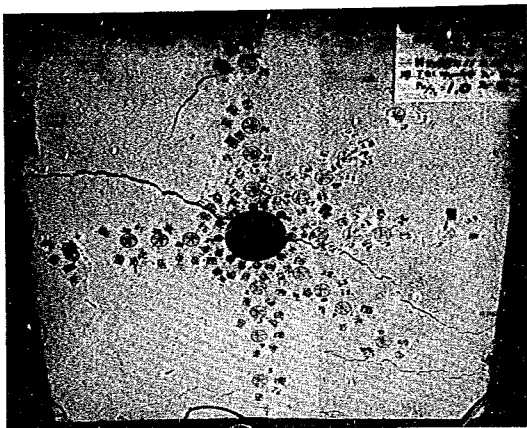
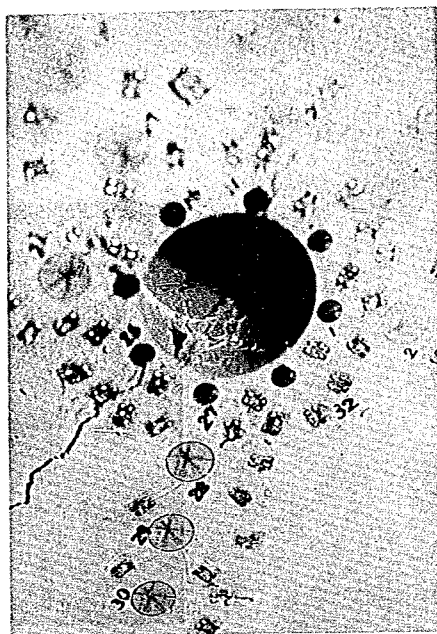


写真-9 破壊状態（供試体番号-12）

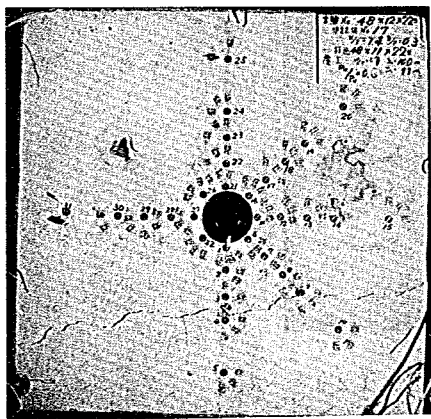


(a)

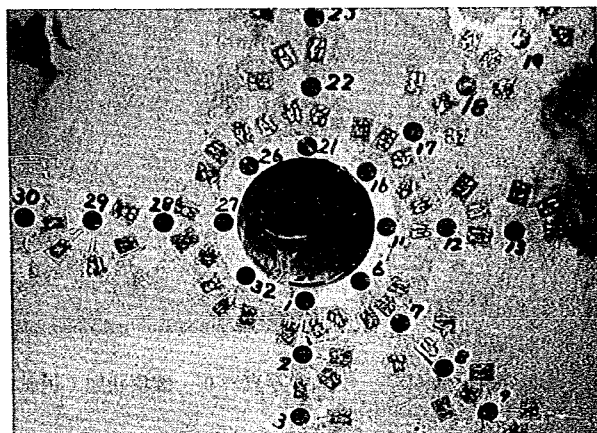


(b)

写真-10 破壊状態（供試体番号-14）



(a)



(b)

写真-11 破壊状態（供試体番号-17）

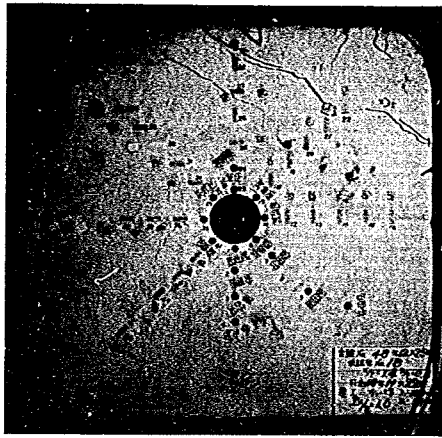


写真-12 破壊状態 (供試体番号-18)

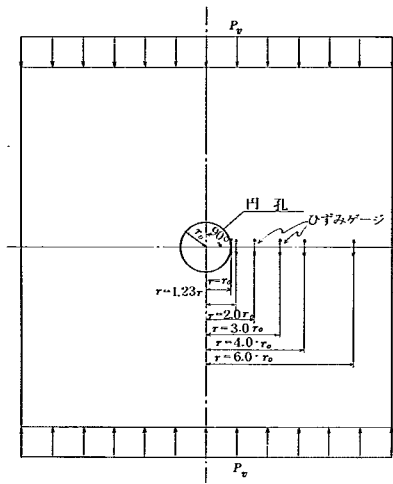


図-6(a) 供試体番号-7, 8, 10, 12におけるひずみ測定位置

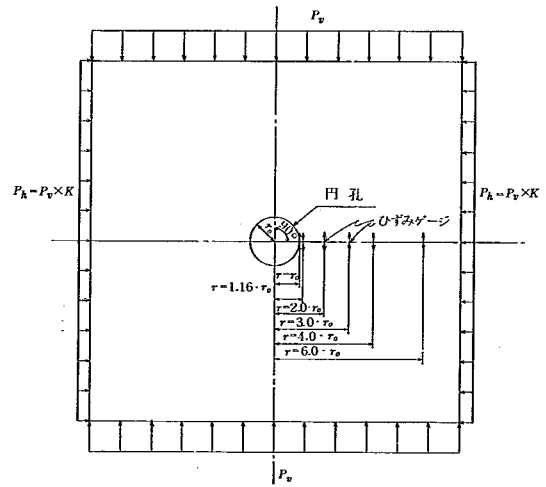


図-6(b) 供試体番号-14, 16, 17, 18におけるひずみ測定位置

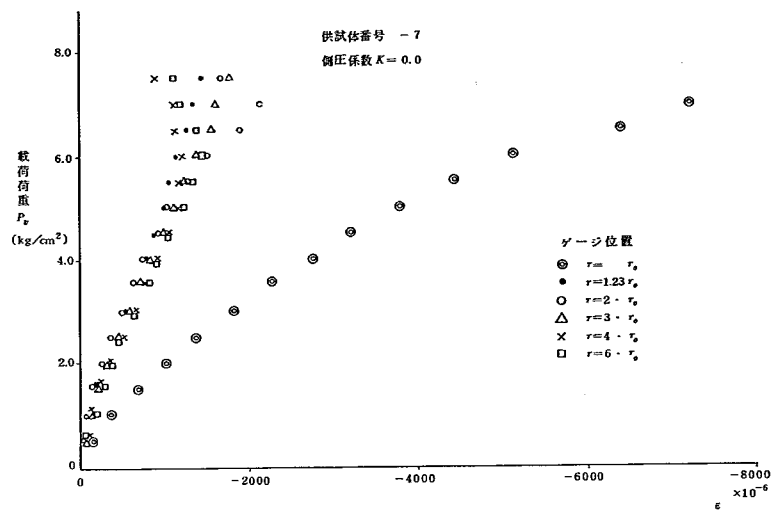


図-7 $P_v - \epsilon$ 曲線

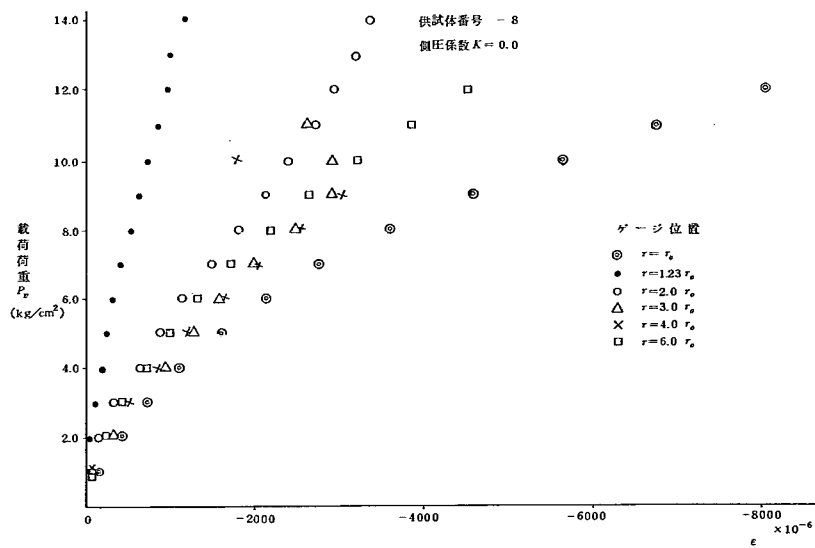


図-8 $P_v - \epsilon$ 曲線

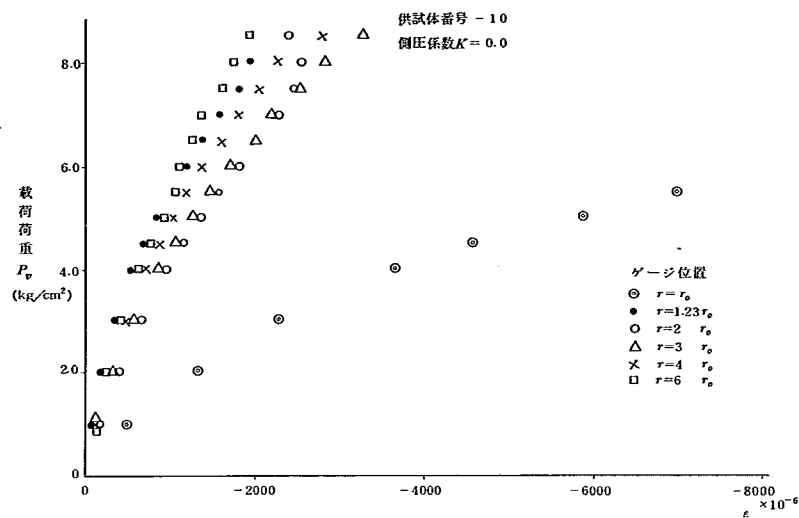


図-9 $P_v - \epsilon$ 曲線

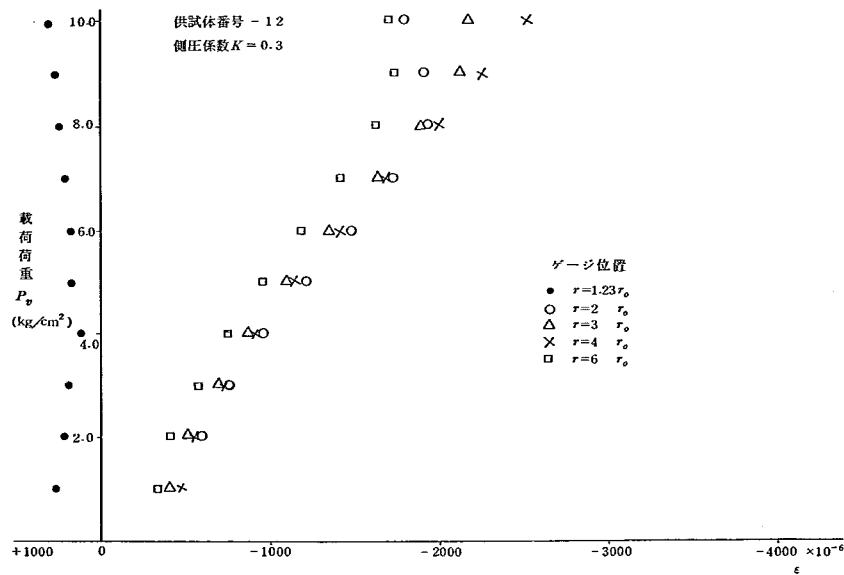


図-10 $P_v - \epsilon$ 曲線

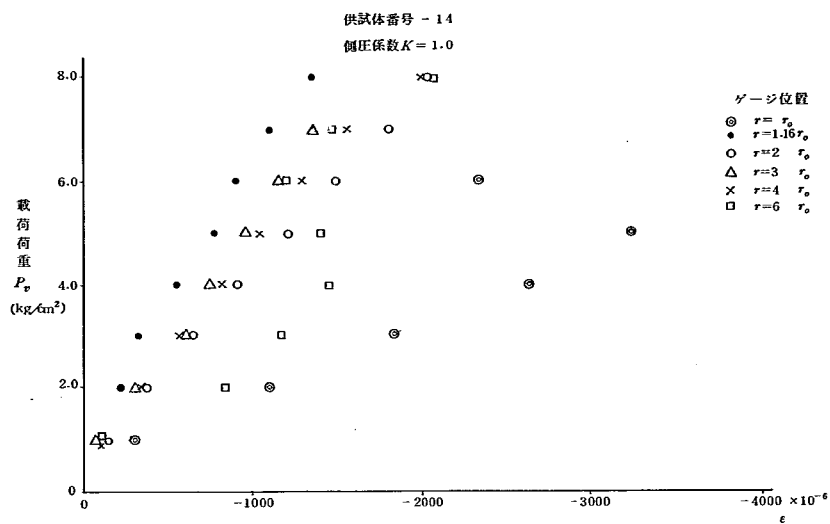


図-11 $P_v - \epsilon$ 曲線

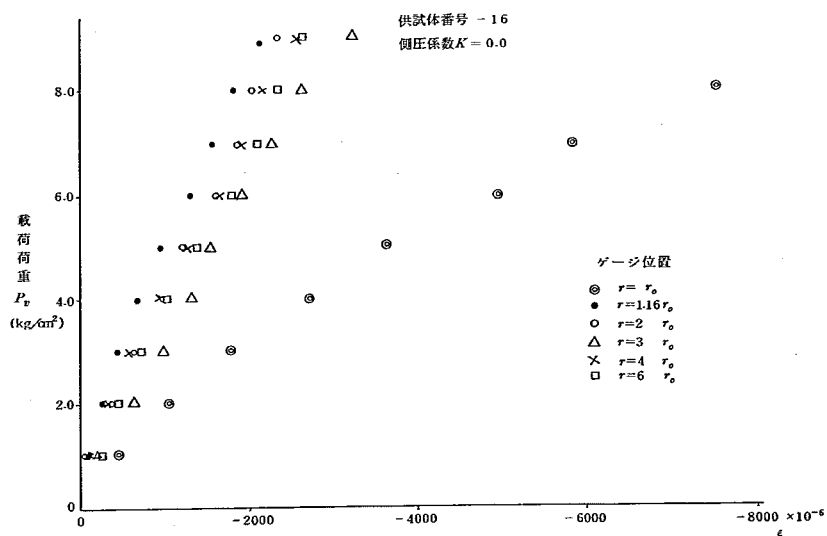


図-12 $P_v - \epsilon$ 曲線

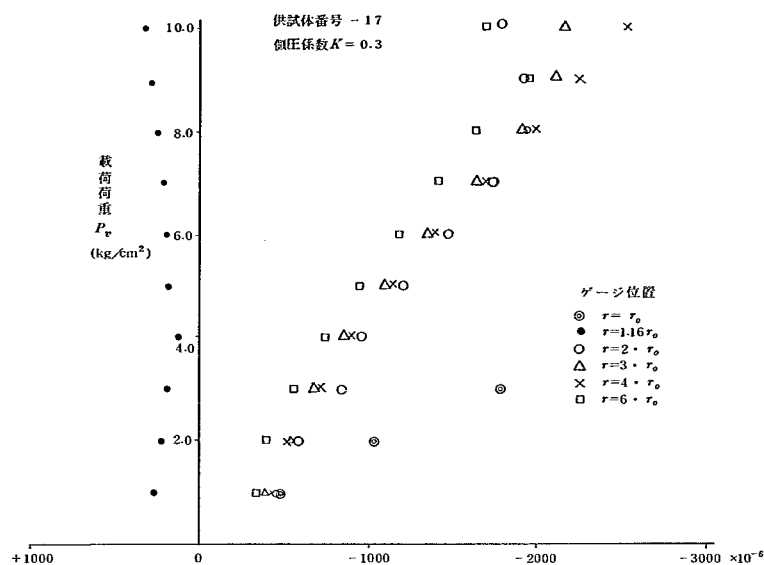


図-13 $P_v - \varepsilon$ 曲線

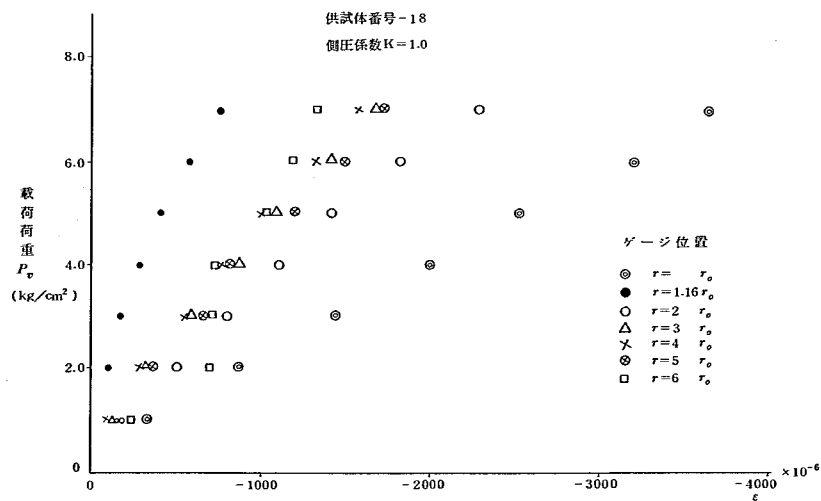


図-14 $P_v - \varepsilon$ 曲線

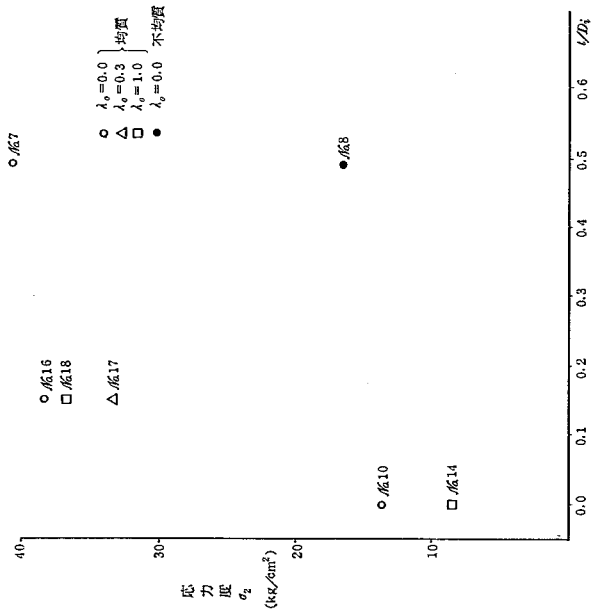


図-15 載荷荷重 3 kg/cm²で
の供試体応力と t/D_i
の関係
(ゲージ位置: $\tau = \tau_0$, $\theta = 90^\circ$)

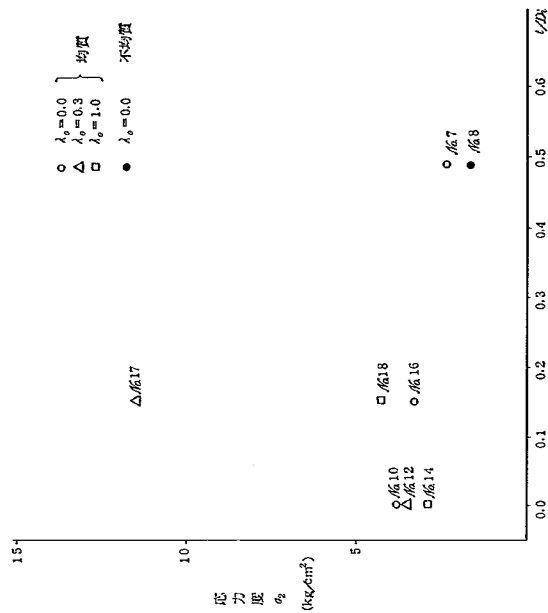


図-16 載荷荷重 3 kg/cm²で
の供試体応力と t/D_i
の関係
(ゲージ位置: $\tau = 2.0 \cdot \tau_0$, $\theta = 90^\circ$)

次に、供試体別に、載荷荷重 (P_v) とひずみ (ϵ) の関係を図-7～図-14に示す。これは供試体が弾性状態にあると考えられる範囲内における P_v と ϵ の関係である。ひずみ ϵ は図-6 (a) (b) に示す位置、方向で測定した値である (鉛直荷重 P_v の方向に貼り付けたひずみゲージによる値)。

図-7～図-14より、全ての供試体が弾性限度内にあると推定できる載荷荷重は、 3 kg/cm^2 のときである。このときの荷重載荷時で各供試体の応力を比較したものが図-15～図-16である。図-15はひずみゲージの位置が $\theta = 90^\circ$, $r = r_o$, 図-16はひずみゲージの位置が $\theta = 90^\circ$, $r = 2 \cdot r_o$ の点 (図-6 参照) の応力と、 t/D_i の関係である。

図-17は、側圧係数 $K = 0$ 、ひずみゲージの位置が $\theta = 0^\circ$, $r = r_o$ 、ひずみゲージ方向は、荷重 P_v の方向に対して直角 (引張応力が発生する方向) に測定したひずみと、油圧ジャッキのラム圧力 (荷重) との関係である。この図において、供試体番号-10と供試体番号-16の曲線を比較してみると、それらのひずみ量 ϵ の差異は少ない。しかし供試体番号-16の ϵ は覆工部のものであり、覆工のヤング係数は地山部の約4倍であるから、応力としては供試体番号-10の約4倍であることを示している。

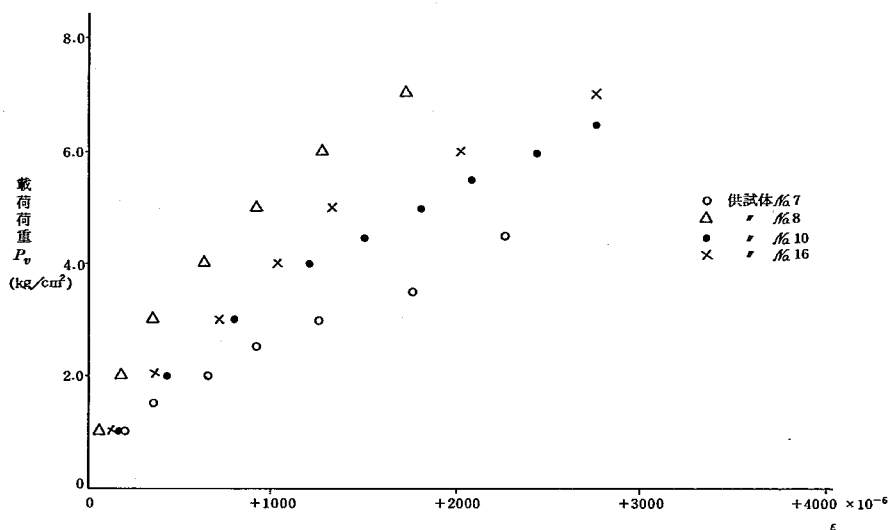


図-17 荷重- ϵ 曲線

(ゲージ位置: $r = r_o$, $\theta = 0^\circ$, $K = 0$)

4-2 応力分布状態

図-19～図-31は実験より求めた応力分布状態と理論値とを比較したものである。

実験値は、荷重が、 1 kg/cm^2 (ラム圧力 5 kg/cm^2)、 3 kg/cm^2 (ラム圧力 15 kg/cm^2)、

6 kg/cm² (ラム圧力 30 kg/cm²) のときの供試体表面のひずみにヤング係数を乗じ、載荷荷重で除した値である。理論値は図-18に示す θ が0°, 90°で、かつ側圧係数 $K=0, 0.3, 1.0$ の場合の接線方向応力 δ_θ と半径方向応力 δ_r である。

なお、図-19～図-31に使用する記号は次のとおりである。

- δ_θ : 接線方向応力
- δ_r : 半径方向応力
- K : 側圧係数
- θ : 鉛直軸よりの角度
- P_v : 鉛直方向載荷荷重の大きさ
- r_0 : トンネル半径
- × : 1 kg/cm² 載荷時の覆工のない供試体応力
- ☒ : 1 kg/cm² 載荷時の覆工のある供試体応力
- △ : 3 kg/cm² 載荷時の覆工のない供試体応力
- ▲ : 3 kg/cm² 載荷時の覆工のある供試体応力
- : 6 kg/cm² 載荷時の覆工のない供試体応力
- : 6 kg/cm² 載荷時の覆工のある供試体応力
- … : 弾性論厳密解

実験から求めた、 $r=r_0$ の位置における応力は、ほとんどの供試体で、理論値を手している。載荷荷重が6 kg/cm²のときは特に理論値との差が顕著である。その原因としては供試体に塑性領域が発生しているということが考えられる。

半径方向応力 δ_r は、理論値との差が大きい。しかし応力分布のパターンとしては形状が似ており、そのままスライドさせると理論解とほぼ一致する。

トンネルから最も離れた、 $r=6 \cdot r_0$ のひずみは理論と大きく異なっているものがある。しかし、供試体の載荷面付近が、部分的に圧縮破壊をする現象もあり、実質的には無視しても差し支えないと考えられる。

4-3 円孔変形量について

円孔の変形量は、前述の円孔変位測定法に従って測定した。表-5は有限要素法によって求めた変形量と、実験値を比較したものである。

実験値と理論値は、大きな変形をしているものについては一致しているが、変形量が微小であるものについては一致していない。これは変形量をセルロイド板のたわみから間接的に求めたところに問題があった。正確な測定をするには、弾性領域の狭いセルロイド板に変わって、たわみ量とひずみの量的関係を正確に把握できるものを使用する必要がある。

なお、有限要素で変形量を求める際に、地山のヤング係数を5,000 kg/cm²、覆工のヤング係数を20,000 kg/cm²として求めたが、供試体のヤング係数には多少の変動があった。

表-4 各供試体のヤング係数

供試体番号	地山のヤング係数	覆工のヤング係数
№ 1		
№ 2	4 6 2 0 kg/cm ²	覆工なし
№ 3	4 3 2 0 kg/cm ²	覆工なし
№ 4		
№ 5	4 3 2 0 kg/cm ²	
№ 6	5 0 5 0 kg/cm ²	
№ 7	4 4 9 0 kg/cm ²	
№ 8	軟 4 4 9 0 kg/cm ² 硬 7 2 9 0	
№ 9	軟 4 7 7 0 kg/cm ² 硬 9 3 4 0	
№10 №11 同時打設	5 9 2 0 kg/cm ²	
№12 №13	4 9 3 0 kg/cm ²	
№14 №15	4 6 2 0 kg/cm ²	
№ 1 6	5 4 1 0 kg/cm ²	2 1 1 6 0 kg/cm ²
№ 1 7	5 8 6 0 kg/cm ²	2 0 6 9 0 kg/cm ²
№ 1 8	5 4 5 0 kg/cm ²	2 5 6 9 0 kg/cm ²

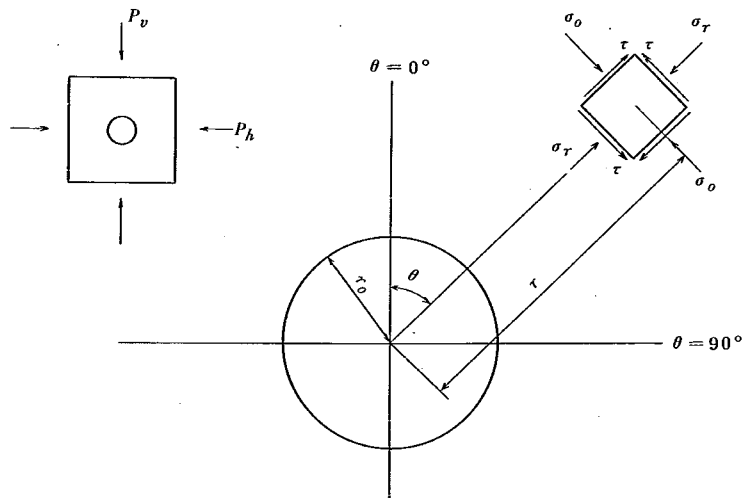


図-18 理論解の各記号

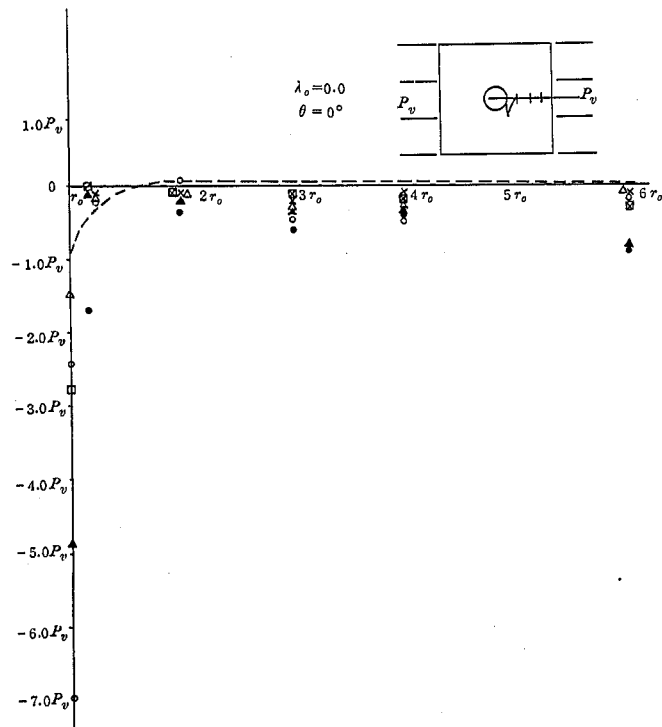


図-19 δ_θ の分布

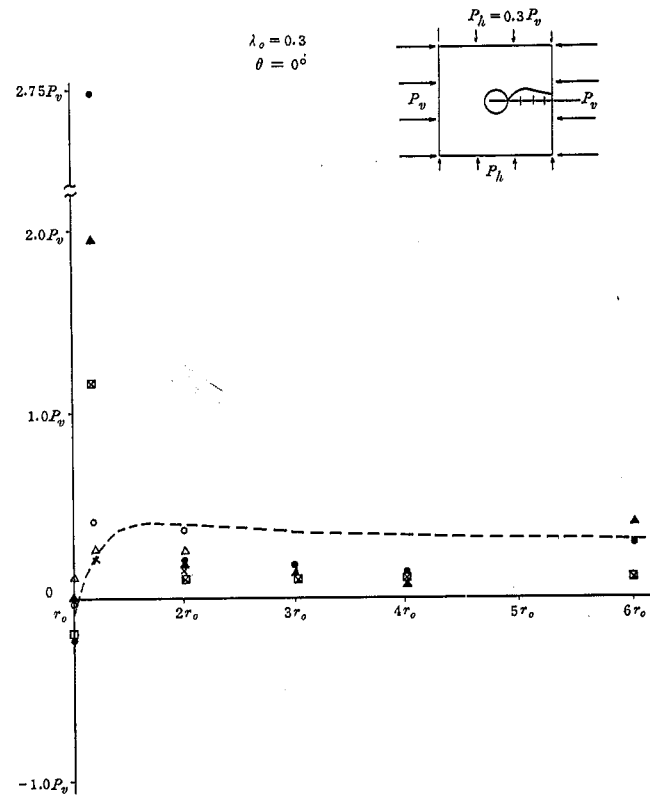


図-20 δ_θ の分布

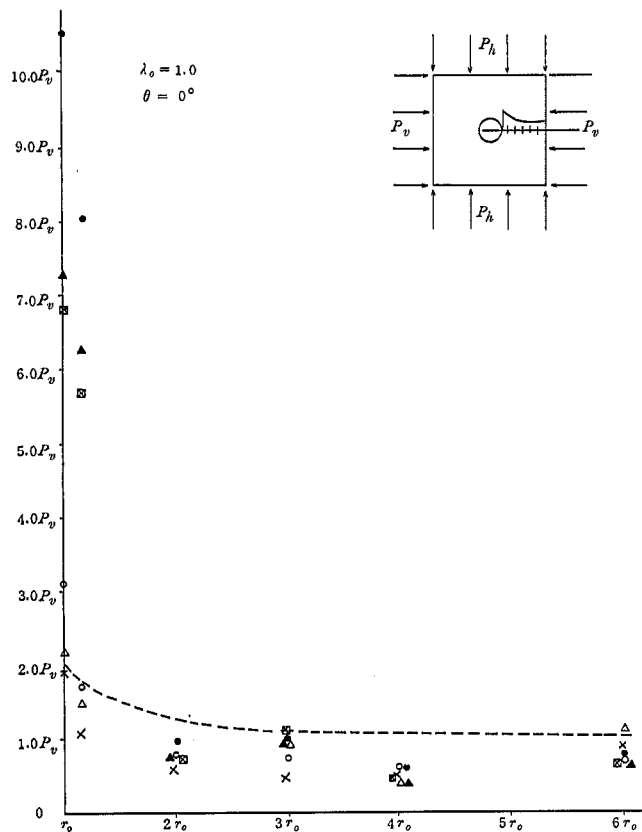


図-21 δ_θ の分布

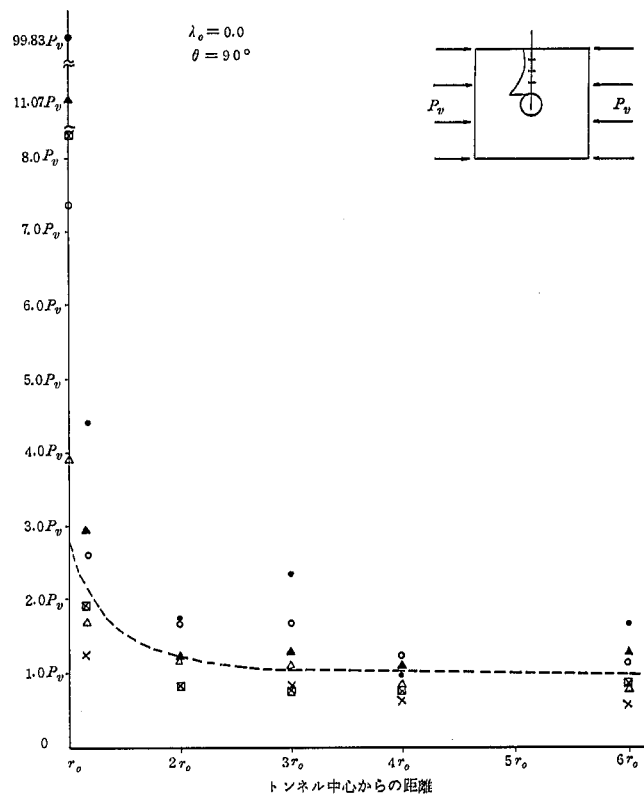


図-22 δ_θ の分布

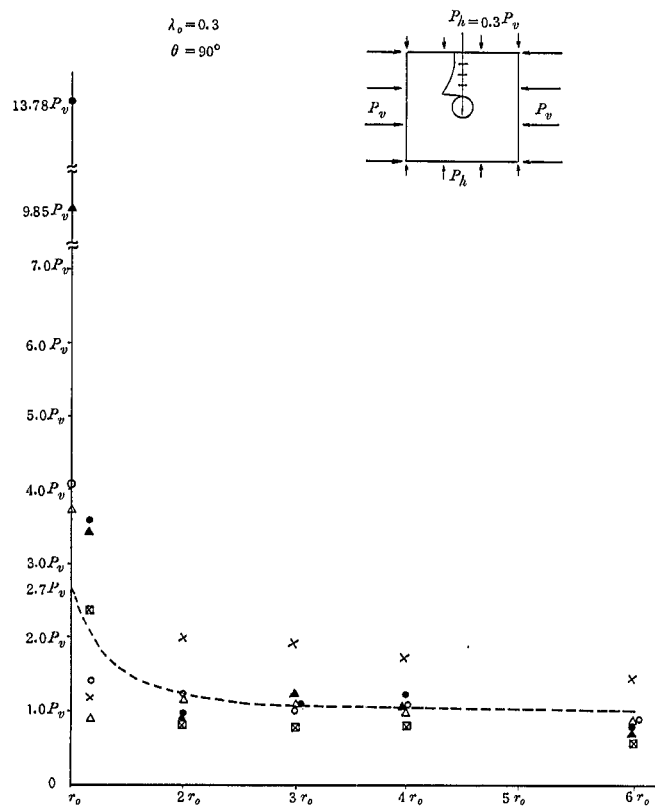


図-2 3 δ_θ の分布

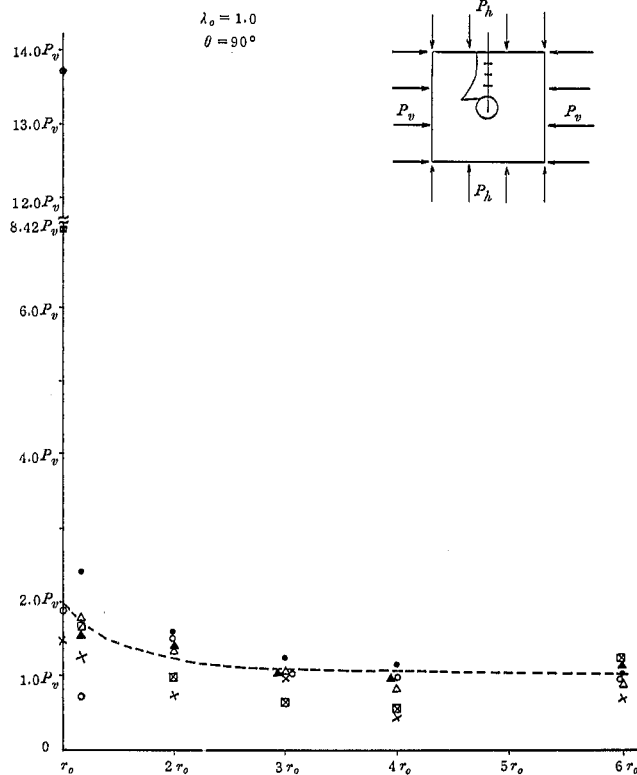


図-2 4 δ_θ の分布

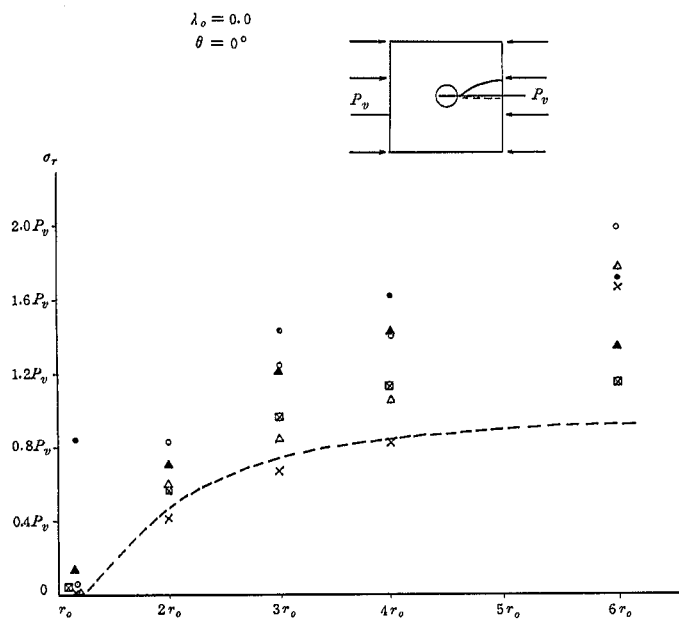


図-25 σ_r の分布

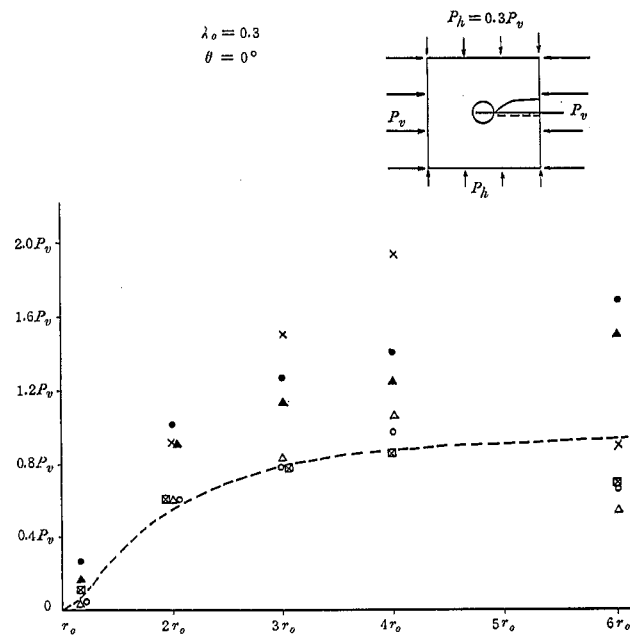


図-26 σ_r の分布

$\lambda_o = 1.0$
 $\theta = 0^\circ$

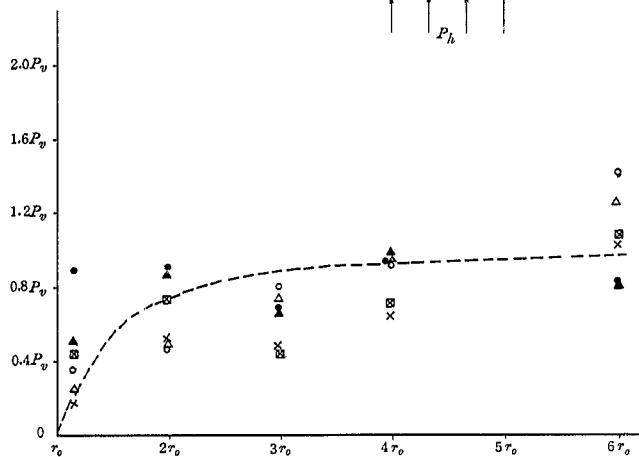
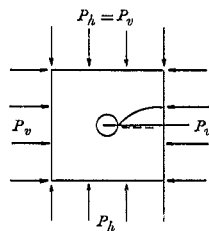


図-27 δ_r の分布

$\lambda_o = 0.0$
 $\theta = 90^\circ$

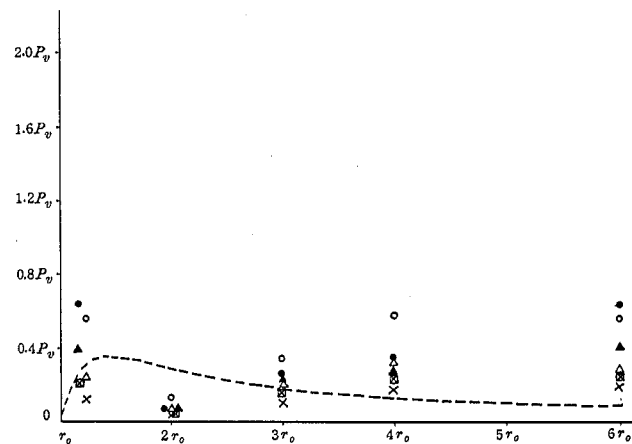
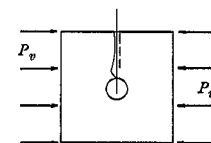


図-28 δ_r の分布

$\lambda_o = 0.3$
 $\theta = 90^\circ$

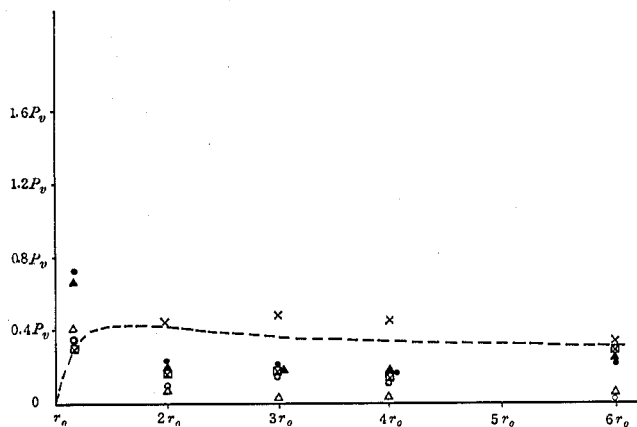
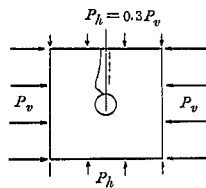


図-29 δ_r の分布

$\lambda_o = 1.0$
 $\theta = 90^\circ$

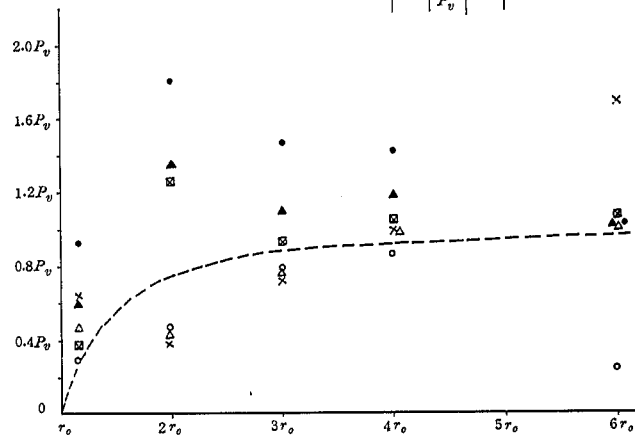
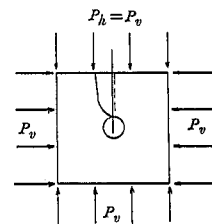


図-30 δ_r の分布

表-5 円孔変形量・実験値と理論値の比較

載 荷 荷 重			$P_v = 3 \text{ kg/cm}^2$ (ラム圧力 15 kg/cm^2)						$P_v = 6 \text{ kg/cm}^2$ (ラム圧力 30 kg/cm^2)					
覆 工 厚 t			0.0 cm			1.15 cm			0.0 cm			1.15 cm		
ヤ ン グ 係 数 E			$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 5,920	4,930	4,620	5,410	5,860	5,450	5,920	4,930	4,620	5,410	5,860	5,450
側 圧 係 数 K			0.0	0.3	1.0	0.0	0.3	1.0	0.0	0.3	1.0	0.0	0.3	1.0
変 形 量	X 方 向	実験値	$\frac{\text{mm}}{0.155}$	0.150	0.155	0.115	0.075	0.065	0.530	0.240	0.370	0.500	0.310	0.150
		理論値	$\frac{\text{mm}}{0.125}$	0.115	0.085	0.105	0.095	0.090	0.250	0.230	0.170	0.210	0.190	0.140
	Y 方 向	実験値	$\frac{\text{mm}}{-0.025}$	0.040	0.080	-0.065	-0.010	0.100	-0.190	-0.050	0.250	-0.410	-0.090	0.200
		理論値	-0.040	0.005	0.085	-0.005	0.005	0.070	-0.080	-0.010	0.170	-0.080	-0.010	0.140

ま と め

今回の二次元載荷装置による実験の目的はトンネル周辺の応力分布状態を調べることにあった。しかし実験方法あるいは、理論の組み立てに、まだ不完全な箇所があり、その点についての解決が先になされねばならない。

たとえば、今回の実験では理論的考察を平面応力状態（二次元応力状態）で考えることができるとして行なった。しかし供試体は20 cmの厚さを有しており、破壊形状からみても、平面応力状態で考えるには無理がある。本実験と対応させるには三次元応力状態で考える必要がある。

次回の実験計画はこれらの諸問題を踏まえて行なわなければならない。

トンネル周辺の応力分布に関する
実験的研究 (I)

土研資料第995号
昭50年3月(1975)

石 橋 正 穂
古 庄 隆
木 村 美知秋

キーワード

要旨 本報告書は、トンネル研究室において、二次元トンネル地山実験装置を用いて、トンネル地山の応力分布や、破壊の状況を実験的に確かめたものの報告である。

