

# トンネル覆工の作用応力の現場 測定法に関する研究

安井将文\*・大山勇治\*\*

## 〔I〕 ま え が き

外力は構造物の設計条件として不可欠な要素である。地盤中の構造物の場合、地盤の初期応力状態は構造物の設計に不可欠な要素である。従って、安全で経済的な地盤中の構造物の設計には地盤の初期応力状態を精度よく測定する技術が必要である。この目的から既に地盤（特に岩盤）の初期応力を測定する方法として各種の計測法が開発されている。例えば孔底ひずみ法などはその例である<sup>(1)</sup>。

トンネルはその外力条件が不確定な構造物の代表ともいえ、設計、施工されたトンネル構造の真の安全性と経済性を検討するためには外力条件を正確に定める必要があり、その手段が求められる。我々は外力条件を直接求める代わりに外力によって生ずるトンネル構造物の応力や変形の測定値から外力を推定し設計、施工の方法を改良する方法を知っている。いわゆる“逆解析”と呼ばれるものである<sup>(2)</sup>。電子計算機の発達により複雑な逆解析も簡単に解が得られるようになった。従って、逆解析においても現場におけるコンクリート覆工の応力の測定は重要な項目である。さらに、設定された外力条件の妥当性を検討するためには同様な測定がなされねばならず、構造物の診断という意味で現場における応力測定は不可欠なものである。

筆者らは地盤中に構築されるトンネル覆工の構造を対象として、その作用応力を現場で測定する方法を提案し、その基礎実験を行ない結果が得られたので、ここに報告する。

岩盤やコンクリートの一次応力を計測する方法として、孔底ひずみ法、ひずみゲージ埋設法がある。これらは計測する対象の岩盤やコンクリートをオーバーコヤリングすることによりコアを基岩（ベース）から完全に分離する方法であって、従って一次応力によるひずみの弾性成分はすべて解放されるから、応力解放法としての手法には問題はない。この方法はしかしながら計測が繁雑であると一般に言われている。この方法に対してスリット法と呼ばれる方法は岩盤やコンクリートに平行な二本のスリットを入れる方法で簡単ではあるが、次に述べる（i）、（ii）の問題があり計測法として成立しても実用には問題があり試用の域を脱しないのが現状である。

（i） スリット間隔  $l$  とスリットの深さ  $d$  の関係が縁応力の解放にどのような相関関係を有するか。

（ii） スリット底部の応力集中が解放されるべき縁応力にどのように影響するか。

山本、山崎らは計測法として簡便なスリットによる応力解放法に着目し、（i）、（ii）

\* 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

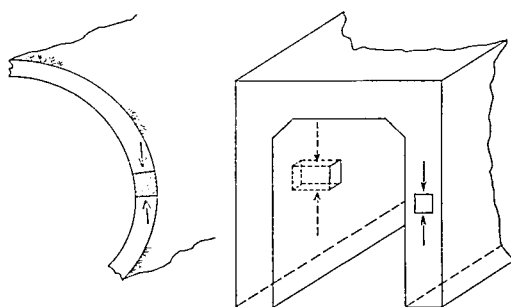


図-1 トンネル覆工モデルの例

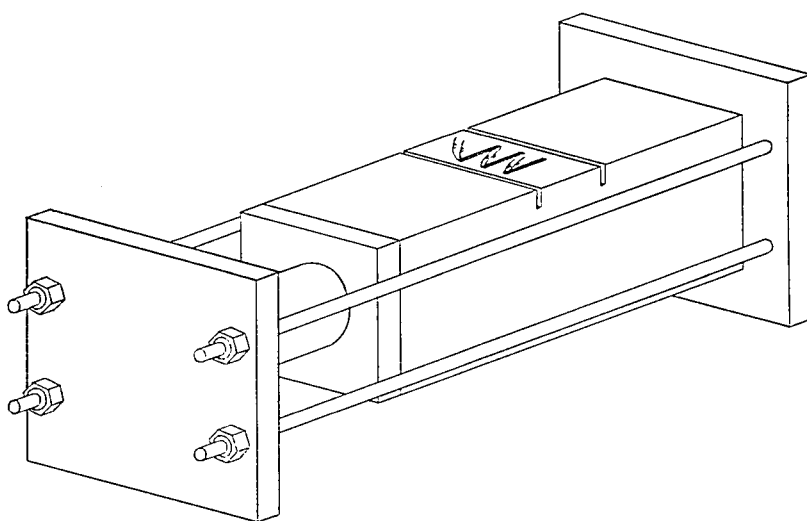


図-2 モデルと試験装置

の問題点を明確にするため基礎的なモデル光弾性実験を行ない次の結果を得た<sup>(3)</sup>。

(ア)  $d/l=0.3\sim 0.4$  の深さまでスリットを設け計測すれば縁応力は完全に解放される。

(イ) 底部の応力集中による影響は存在するがスリット深さ $d$ の増分と縁応力の解放による解放ひずみの増分から解放されるひずみの弾性成分を抽出することにより一次応力を推定することが可能である。

これらの結果を踏まえてトンネル覆工を対象とした実物モデル実験を考え 図-1 に示すようにトンネル覆工の軸力を計測の対象にし、さらに、そのモデルとして 図-2 に示す角柱供試体を製作し、供試体に軸力を作用させ、軸力により生ずるひずみをスリットによる解放ひずみから推定することとした。また、これらの実験結果を検討するための理論計算として電子計算機による FEM 解析を行ない、比較している。

## 〔Ⅱ〕 実験の方法

角柱コンクリートモデルに軸力 $N$ が作用する場合を対象とし、軸力 $N$ の作用時のひず

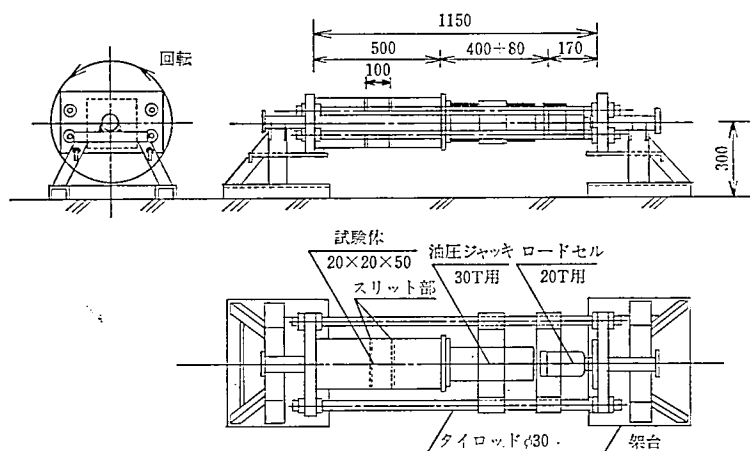


図-3 荷重試験装置図

み  $\epsilon_0$  をスリットによる解放ひずみから推定する。軸力の荷重装置を図-3 に示し、装置は水平荷重とし、装置全体を荷重したまま水平軸に回転できるように工夫されている。荷重装置内に水平方向にロードセル、油圧ジャッキ、供試体の順にセットし供試体の両端面には荷重板を介する。

実験は二種類の供試体（各 10 本、20 本）について行ない、No. 1 は粗骨材を有する標準配合のコンクリート（最大粒径 25 mm，スランプ 10～12 cm， $\sigma_{28} \geq 240 \text{ kg/cm}^2$ ）で  $200 \times 200 \times 500$  の寸法を有し、No. 2 供試体はモルタルコンクリート（スランプ 10～20 cm， $\sigma_{28} \geq 240 \text{ kg/cm}^2$ ）で  $150 \times 150 \times 500$  の寸法である。荷重準備の終了した供試体に  $N=20 \text{ t}$ （No. 2 の場合は  $11.25 \text{ t}$ ）まで  $2.5 \text{ t}$  毎に荷重し、各荷重時のひずみを測定し供試体の応力-ひずみ曲線を得る。これを 3 回繰り返し 3 回目の  $20 \text{ t}$  荷重の状態をコンクリート覆工の応力作用時と考える。この応力状態を保持し、図-4 の A 面と C 面にコンクリートディスク・カッターでスリットを入れる。切削深さ  $d$  は 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40,

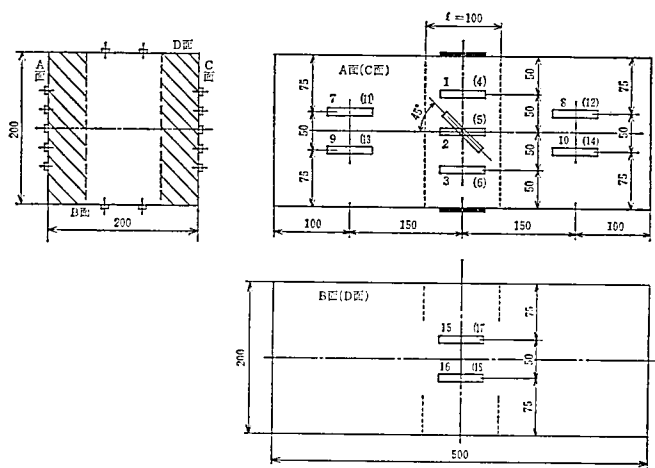


図-4 柱状コンクリート供試体の寸法とゲージ位置（単位 mm）

50 mm の順である。切削と計測の手順は 20 t 載荷状態で、まず A 面（上面に位置している）5 mm 切削，計測，回転，C 面（上面に位置している）5 mm 切削，計測，回転（A 面が上），計測，A 面 10 mm 切削，……と繰り返す，C 面 50 mm 切削後，計測，荷重を 0 に戻し残留ひずみを計測して終了する。

載荷荷重 20 t は角柱の軸方向直応力に対して

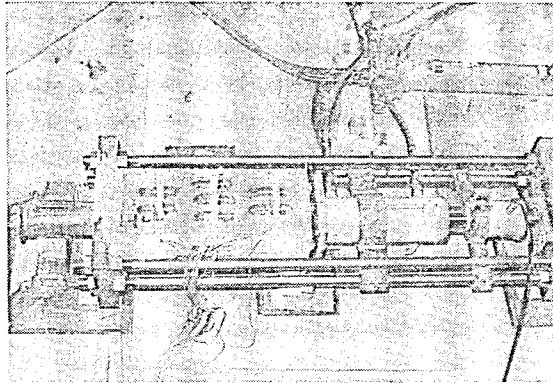


写真-1 モデルと載荷装置

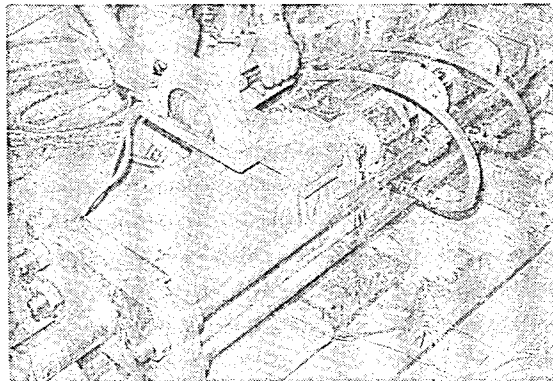


写真-2 スリット切削の様子

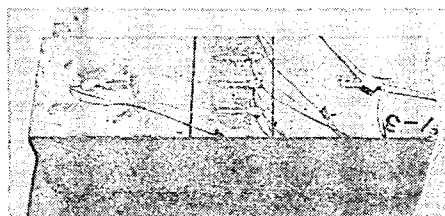


写真-3 ゲージ貼付終了モデル

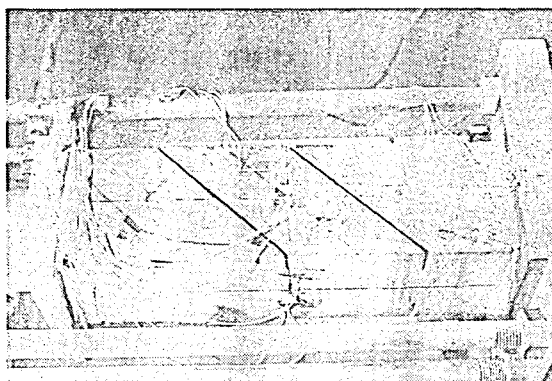


写真-4 切削終了のモデル  
( $d=40\text{ mm}$ ,  $l=100\text{ mm}$ )

表-1 供試体の概要

	記 号	概 要			
		切削時の状態	荷重方向とゲージのなす角 $\theta$	荷重方向とスリットのなす角	スリット平行間隔 $l$
No. 1 供 試 体	No. 1-1-1 " -2	注 水	$0^\circ$	$90^\circ$	10 cm
	No. 1-2-1 " -2	注 水	$0^\circ$	$90^\circ$	10 cm
	No. 1-3-1 " -2	注 水	$0^\circ$	$90^\circ$	10 cm
	No. 1-4-1 " -2	注 水	$0^\circ$	$90^\circ$	10 cm
	No. 1-5-1 " -2	注 水	$45^\circ$	$90^\circ$	10 cm
No. 2 供 試 体	No. 2-1-1 " -2	注 水	$0^\circ$	$90^\circ$	10 cm
	No. 2-2-1 " -2	注 水	$45^\circ$	$45^\circ$	10 cm
	No. 2-3-1 " -2	注 水	$30^\circ$	$60^\circ$	10 cm

$$\sigma_N = \frac{20000\text{ kg}}{20 \times 20\text{ cm}} = 50\text{ kg/cm}^2$$

に相当する。No. 2 供試体については角柱モデルの断面寸法が相違し、載荷荷重は  $\sigma_N = 50\text{ kg/cm}^2$  に相当する荷重として  $N' = 50 \times 15 \times 15 = 11,250\text{ kg} = 11.25\text{ t}$  であり切削深さ  $d$  は 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 mm とし他の実験手順は No. 1 供試体の場合と全く同一である。

写真-1～4 に、それぞれひずみゲージ貼付終了時の角柱供試体、セットの完了した実験装置、スリットの切削の様子、実験終了時の供試体をそれぞれ示す。

表-1 に供試体の記号とその目的を示す。

### 〔Ⅲ〕 実験結果

#### Ⅲ-1 材料の強度とその特性

No. 1, No. 2 供試体ともその打設時に強度試験用の供試体 ( $\phi 15\text{ cm}$ ,  $\phi 10\text{ cm}$  円柱) を製作し材令 28 日強度を求めた。その結果を表-2 示す。

図-5 に角柱供試体の載荷試験により得られた応力-ひずみ曲線とポアソン比を求めるための応力-横ひずみ曲線の一例を示す。但し、横ひずみの符号は逆符号として示してある。

表-2 供試体の強度とヤング係数

供 試 体	強 度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	ヤング係数 ( $\times 10^5\text{ kg/cm}^2$ )	ポアソン比
No. 1	250～310 平均 280	2.6～3.0	—
No. 2	250～490 平均 400	2.7～3.3	0.24

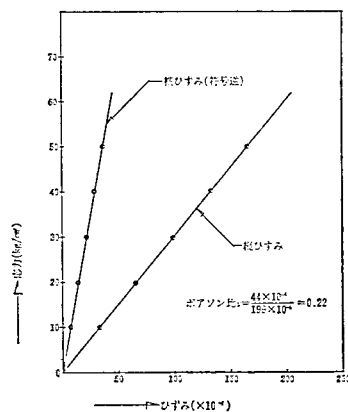


図-5 供試体の応力-ひずみ曲線

#### Ⅲ-2 解放ひずみの測定結果

図-4 と図-6 にそれぞれ No. 1, No. 2 供試体のひずみゲージの貼付位置を示し、これらのゲージを使用して実験の方法で述べた手順によりスリットを順次切削した時の各ゲージの測定値を表-3 に示してある。

表-3 は各ケース二体一組のうち、一体の結果を全てのケースについて掲げた。表中の第12欄は各 A, C 面のスリット深さ 0 cm の場合の 3 ケのゲージの平均値であり、第13欄は各 A, C 両面 6 ケの平均値であり、角柱供試体の軸力のみによるひずみである。

表-3 スリット切削深さと測定ひずみ (単位 $\times 10^{-6}$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	供試体 番 号	A面か C面か	スリットの切削深さ (mm)									各面の 平 均	各 供 試 体の平均
			0	5	10	15	20	25	30	40	50		
No.1  供 試 体	1-1-1	A	176	170	167	154	158	136	94	39	4	174	188
			170	173	168	136	96	69	45	26	14		
			175	187	227	167	167	139					
		C	198	195	260	175	157	53	33	-10	-25	201	
			204	209	217	159	111	54	14	-11	-34		
			201	201	177	124	134	59	17	-21	-30		
	1-3-1	A	166	171	161	133	111	77	70	40	19	170	195
			170	179	173	143	113	71	59	36	8		
			174	181	170	146	119	84	57	33	12		
		C	220	242	223	192	153	117	78	42	23	221	
			215	241	221	186	138	86	53	26	0		
			229	247	223	181	131	81	44	13	-8		
1-5-1	A	203	208	192	162	143	122	108	75	60	218	180	
		201	212	207	187	170	145	127	92	69			
		250	255	239	206	179	145	118	78	45			
	C	121	130	129	127	122	112	104	77	26	142		
		153	159	158	155	152	145	138	104	53			
		153	158	156	153	155	144	135	104	59			
No.2  供 試 体	2-1-1	A	160	166	184	183	170	154	127	94	134	168	
			154	169	181	183	169	152	125	92			
			87	93	116	131	127	125	108	99			
		C	239	256	253	247	222	185	158	103	203		
			223	249	252	248	227	195	166	111			
			146	173	179	178	167	151	135	101			
	2-2-1	A	76	75	87	71	52	37	25	12	74	53	
			78	87	66	54	29	7	18	25			
			67	71	69	56	38	23	-2	-14			
		C	30	43	49	43	40	35	29	33	32		
			40	56	90	60	58	53	50	50			
			25	44	47	37	36	32	27	27			
2-3-1	A	153	175	165	174	148	133	110	83	153	109		
		182	190	194	194	177	153	132	94				
		123	139	140	147	126	108	77	54				
	C	22	36	39	48	48	48	42	43	65			
		85	100	112	108	104	96	84	75				
		87	102	104	103	92	88	77	69				

\* 但し圧縮ひずみを正とする。

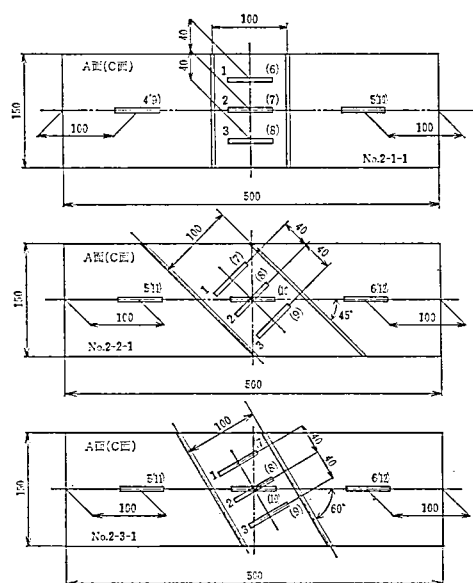


図-6 No. 2 供試体のゲージ貼付位置

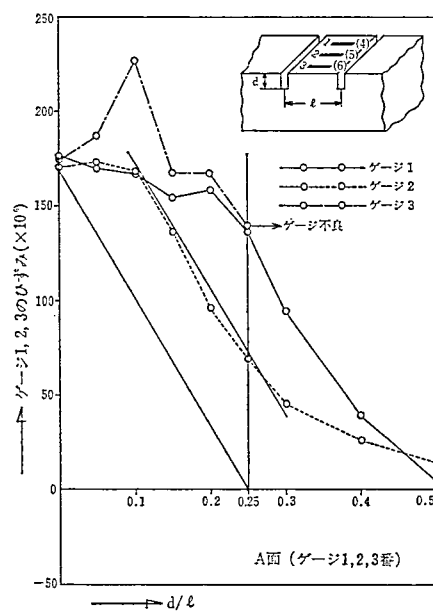


図-7 No. 1-1 の実測ひずみと推定値

表-3 の各実験結果のうちA面のゲージについてのみ、その値を図-7～図-12 に示し図-7 の縦軸は各スリット深さにおけるA面の1, 2, 3番ゲージの値であり横軸はスリット間隔  $l$  (10 cm) でスリット深さ  $d$  を割った値をとる。図中の直線は軸力作用時のひずみ  $\epsilon_0$  の推定値を示しており  $\frac{d}{l}=0.1\sim0.3$  区間でひずみの解放量の度合いの大きいもの、即ち、最



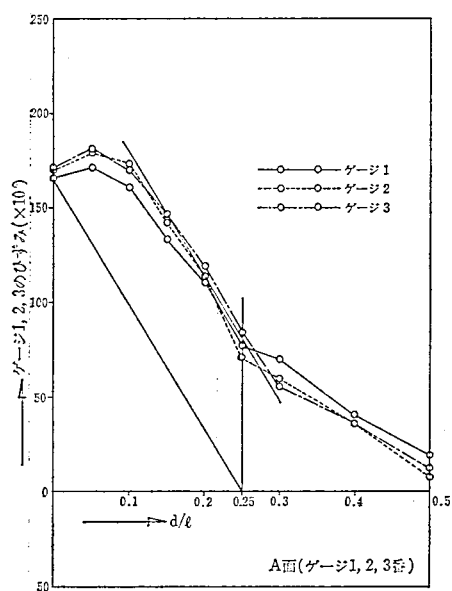


図-8 No. 1-3 の実測ひずみと推定値

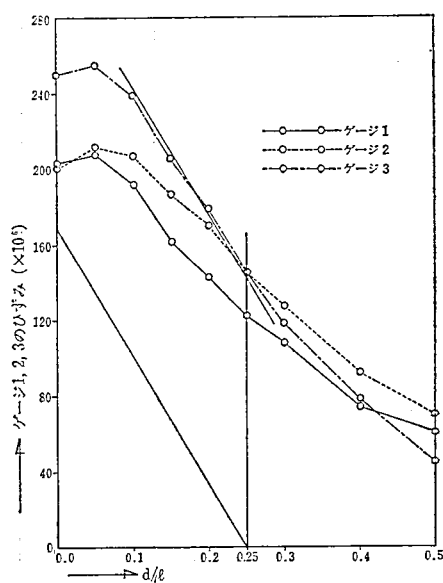


図-9 No. 1-5 の実測ひずみと推定値

急勾配を求め、この直線に平行で横軸上の  $\frac{d}{l}=0.25$  を通る直線を描き縦軸との交点が推定値  $\varepsilon_0$  を与えると考えらる。

No. 1 供試体の実測結果を図に描き、上述の方法により得た推定ひずみ  $\varepsilon_0$  と実測値とをまとめて表-4 に示す。

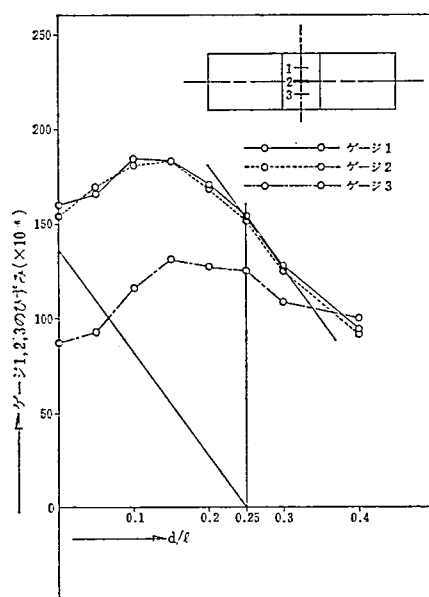


図-10 供試体 2-1-1 の実測ひずみと推定値 (A面)

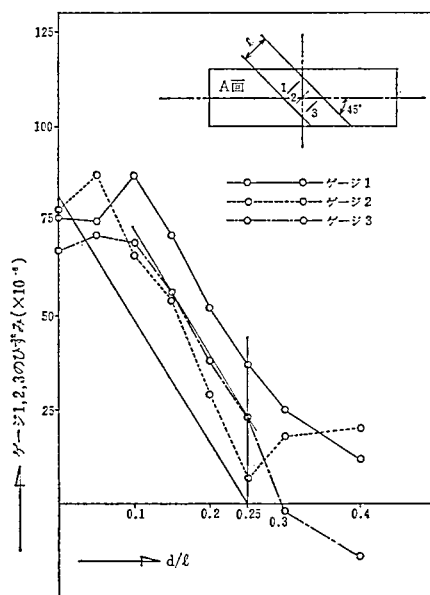


図-11 供試体 2-2-1 の実測値と推定値 (A面)

No. 2 供試体は No. 1 に比較して偏心による曲げモーメントの影響が大きく、データの整理の方法として No. 1 の場合とは同一に論じられない。即ち、No. 1 の場合には偏心モーメントがほとんど 0 (1-3-1 供試体を除いて、いずれもモーメントによるひずみは数パーセントである) であるが No. 2 供試体は軸力に対する曲げモーメントの影響が 40%

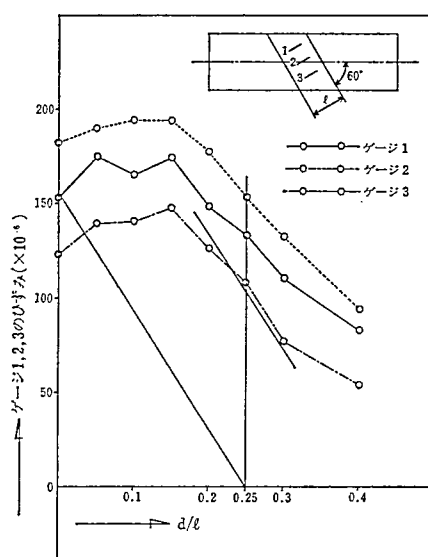


図-12 供試体 2-3-1 の実測値と推定値 (A面)

表-4 No. 1 供試体の実験結果

供試体番号	推定ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )		実際に生ずるひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	推定値精度 (%)	
	A 面	C 面		A 面	C 面
1-1-1	170	183	188	90	97
1-1-2	196	207	162	121	128
1-2-1	192	207	195	98	106
1-2-2	201	194	197	102	98
1-3-1	165	214	195	85	110
1-3-2	173	197	195	89	101
1-4-1	166	182	186	89	98
1-4-2	176	166	193	91	86
1-5-1	170	—*	180	94	—*
1-5-2	130	—*	184	71	—*

\* 1-5-1, 1-5-2 はA面のみ切削。

程度存在するため精度の推定を A, C 面の平均値について考えることはできず各 A 面, C 面の実測ひずみに対する各 A 面, C 面の推定ひずみの精度を採用せねばならぬ。これを考慮して前述の方法と全く同様にして得られた実験結果を表-5 に示す。

表-5 の④欄の値から偏心による A, C 面の縁曲げひずみが軸力によるひずみにに対して 40% 程度の値を有していることがわかる。従って、この実験は軸力と曲げモーメントが同時に作用した場合と考えられる。また、No. 2-2 と No. 2-3 の場合は計測されるひずみゲージの方向が角柱の軸に対してそれぞれ 45°, 30° 傾斜しており、この方向のひずみ  $\epsilon_x'$  の値を計算により求めると図-13 を参照して式 (1) に  $\gamma_{xy}=0$ ,  $\epsilon_y=-\nu\epsilon_x$

$$\epsilon_x' = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin^2 \theta \quad \dots\dots (1)$$

表-5 No. 2 供試体の実験結果

供試体	①		②		③		④	
	推定ひずみ( $\times 10^{-6}$ )		実測ひずみ( $\times 10^{-6}$ )		推定精度 (%)		実測ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	
	A 面	C 面	A 面	C 面	A 面	C 面	軸方向ひずみ	曲げひずみ
2-1-1	138	191	134	203	103	94	169	35 (0.21)
2-1-2	224	112	194	104	115	108	149	45 (0.30)
2-2-1	81	30	74	32	109	94	53	21 (0.40)
2-2-2	50	84	45	82	111	102	64	18 (0.29)
2-3-1	156	55	153	65	102	85	109	44 (0.40)
2-3-2	123	98	130	92	95	107	111	19 (0.17)

但しカッコ内は軸方向ひずみに対する曲げひずみの割合

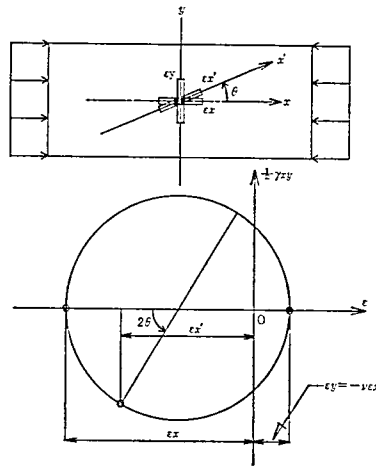


図-13 ひずみ成分の計算

を代入し整理すると (2) 式を得る。

$$\epsilon_{x'} = \epsilon_x \times [(1+\nu) \cos^2 \theta - \nu] \quad \dots\dots (2)$$

例えば, No. 2-2-1 は角柱とゲージの軸のなす角  $\theta$  は  $45^\circ$ ,  $\epsilon_x$  (角柱の軸方向平均ひずみ)  $= 178 \mu$ ,  $\nu = 0.25$  を代入すると

$$\epsilon_{x'} = 178 \times \left[ (1+0.25) \times \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 - 0.25 \right] = 67 \mu$$

を得, この値は表 5 の第④欄の軸方向ひずみ ( $45^\circ$  方向) の値  $64 \mu$  と良く一致する。同様に No. 2-3-1 は  $\theta = 30^\circ$ ,  $\epsilon_x = 153 \mu$ ,  $\nu = 0.25$  を (2) 式に代入し,

$$\epsilon_{x'} = 153 \times \left[ (1+0.25) \times \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 - 0.25 \right] = 105 \mu$$

を得, この値は同表の値  $111 \mu$  を良く説明している。

#### 〔IV〕 結果の考察

コンクリート覆工に作用している応力を現場で測定する方法としてスリットを切削し二

本の平行なスリットの間に着着してあるひずみゲージを利用しスリットの切削深さを順次増大させる方法を提案し、そのモデル実験を行ない結果を図-7～図-12に示した。図-7～図-12によれば、いずれの測定結果も、スリットの深さ $d$ とスリットの間隔 $l$ との比 $\frac{d}{l}=0.15\sim0.3$ の間ではほぼ一様に直線的にひずみが解放される状態を明確に示しており解放が応力集中等の影響の入らない弾性成分であることを教えている。この区間の曲線の最急勾配にある係数を乗じた値により覆工コンクリートのひずみを推定し、その結果を表-4、表-5に示してある。

表-4 からスリット切削時の注水、非注水による変化はなく（温度の影響）、推定精度も70～120%の範囲であるが各面に生ずるひずみを基準に取れば、更に精度は上がりスリット解放法によりコンクリート覆工の作用応力（ひずみ）の推定可能なことが判明した。

表-5 は No.2 供試体の場合でスリットが主応力軸に対して任意に傾斜した場合の推定の可能性を検討するために行なわれたもので、その結果から精度は90～110%の範囲内にありスリットが主応力軸に対して傾斜した場合においても、さらに、断面に曲げモーメントが作用している場合においても、この方法により推定可能なことが判明した。なお図-7

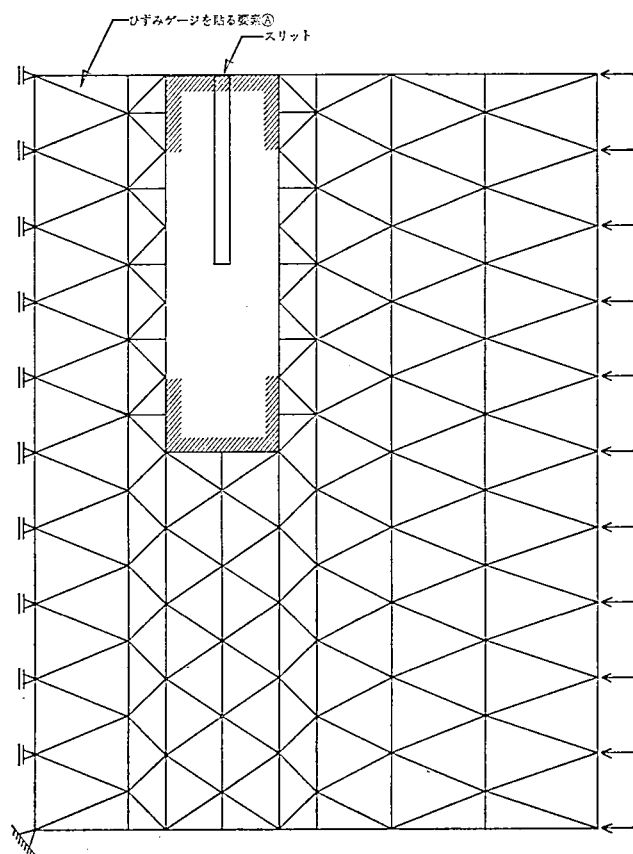


図-14 (a) FEM 分割図 (対称 1/2 部分)

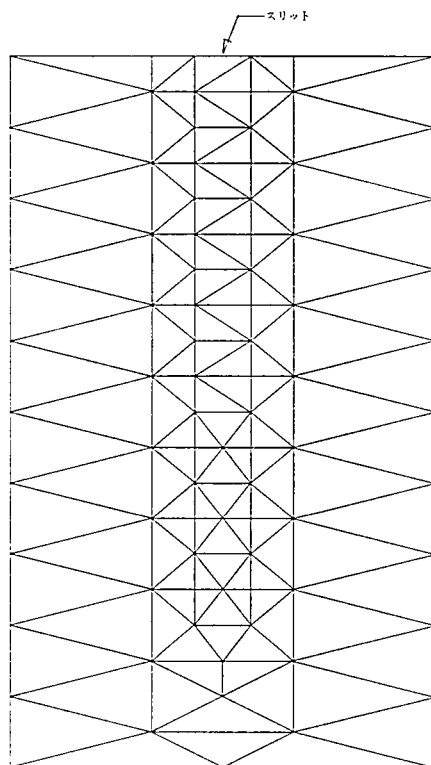


図-14(b) 図(a) のハッチング部分

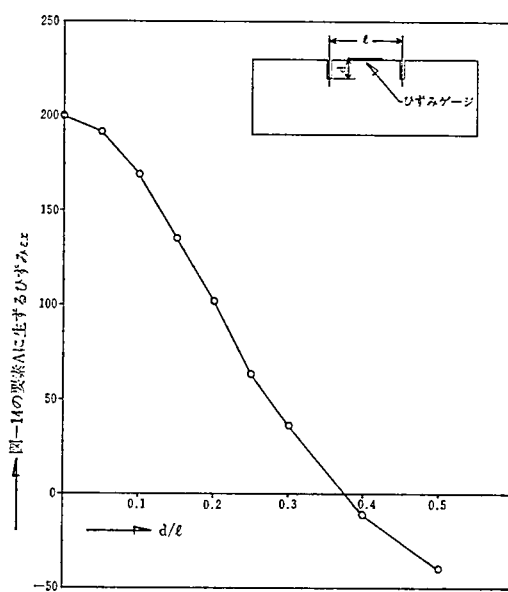


図-15 FEM 解析によるスリット切削深さと解放ひずみの関係

～図-12 の信頼性を確認するためスリットを有する角柱供試体が軸方向圧縮力を受ける場合の応力解析として有限要素法による二次元平面応力弾性解析を行なった。図-14 はその分割図である（要素数 217, 節点数 169）。その結果からスリット深さ各  $d=0, 5, 10, 15, 20, \dots$  の場合のゲージ接着位置の軸方向ひずみを求め、これを図-15 に示す。図-15 のひずみとスリットの深さとの関係は図-7～図-12 を良く説明しており実測値の解放ひずみが弾性ひずみであることをこのデータからも示すことができる。

これらの結果からスリットの深さを段階的に増加させ、その都度、解放されるひずみを測定することにより部材に生じているひずみを推定することが可能なことが判明した。推定できたひずみから応力を求めるには部材の応力状態を考慮して応力-ひずみの関係を導入すれば容易に応力を求めることができる。

以上の研究成果のうち一部は他で既に、発表したものであり後半の結果は本学学生小林信勝君による昭和59年度の卒業研究として行なわれた結果の一部を引用している。

また、FEM 解析は本学の情報科学研究センターの電子計算機 HITAC-M-160 H を使用し、まとめたものであり、データの製作、整理も小林信勝、岩崎啓介両君の努力に負う所が大きい。ここに感謝の意を表わす。

#### 参考文献

- 1) 「岩盤力学と計測」鈴木 光, 内田老鶴園新社。
- 2) 「トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法」桜井・武内, 土木学会論文報告集 No.337。
- 3) 「トンネル覆工の応力測定法に関する光弾性実験」山本 稔, 山崎良一 日本光弾性学会第6回研究発表講演会論文集 No. 6 (1984) p. 51。