

NATMにおける shotcrete軸応力測定の事例と問題点

小 林 賢 二
(株)東横エルメス

1 はじめに

注1)

これは、N A T Mにおけるshotcreteの軸応力測定について、第19回岩盤力学symposium(1987日本)に発表された内容に着目し、私達、計測器に深く関わる立場から意義あるものとして捕らえ、用いられた計器と共に、ここに提起された問題について報告するものである。

shotcreteはN A T Mの主要な支保材のひとつであり、掘削直後のtunnel断面に施工されて、一次覆工として地山を支保する重要な役割をになっている。そのため覆工に発生する応力を正確に把握することは、施工管理の面からも、また設計にfeedbackして安全で経済的なtunnelを構築するうえからも極めて重要である。

そして、N A T Mと共に日本に導入された計測手法においてshotcrete 軸応力にはGlotzl社製pressure cellが数多く用いられてきたが、この報告によるとshotcreteで供試体を作成して載荷応答試験を行った結果では、pressure cellの指示値は載荷試験の70%以下を示したに過ぎない。

また、旭川tunnelで同一断面、同一位置にpressure cellとconcrete有効応力計(東横エルメス社製 以下、有効応力計という。)を埋設して計測した結果でも、前者の方が低い指示値を示している。これは、shotcreteの特殊性が原因となっていることが考えられる。そこで、もしpressure cellの指示値が実際の応力より常に低い値を示すことがあれば、過去に測定された多くのtunnelの計測dataと計測結果の解釈にも影響を及ぼす可能性があり、また、今後の計器選定にも影響を与えかねない問題を含んでいる。と指摘している。

そこで、この報告にある旭川tunnelのshotcrete軸応力の測定結果と検証結果を報告すると共に、pressure cellおよび有効応力計の原理についても概略をのべる。

なお、事例と検証の図表は、筆者の了承を得て引用したものである。

2 二種類の計器を用いたshotcrete軸応力の現場計測結果

旭川tunnelでは、施工管理の一環として、有効応力計によりshotcreteの軸応力測定を行っているが、土被りの増加と共に最大で20MPa(204kgf/cm²)を超える軸応力の発生が見られた。そこで、覆工応力の確認と使用計器の検証を目的として、pressure cellを同一断面に並列に設置して、二種類の計器によるshotcrete軸応力の測定を行うことにした。図-1に測定位置でのtunnel断面図を示す。

shotcreteは厚さ20cmで、一次(5cm)、二次(15cm)に分けて施工される。

鋼製支保工は1m pitchで断面全周に建込まれている。pressure cellと有効応力計は、上半断面の二次側のshotcreteに天端および左右の肩部の三個所に、それぞれ図-2のとおりに埋設した。図-3はshotcrete軸応力の経時変化を示したものである。

この図で明らかなのは、pressure cellの指示値が有効応力計のそれより低いことである。また、最終のshotcrete軸応力は表-1に記載しているが、有効応力計の指示値を基準とした場合、pressure cellのそれは天端で57%、左右の肩部ではこれより更に低く3~21%の応答しか得られていない。ただここで、最終値が低いのは土被りが浅いためである。

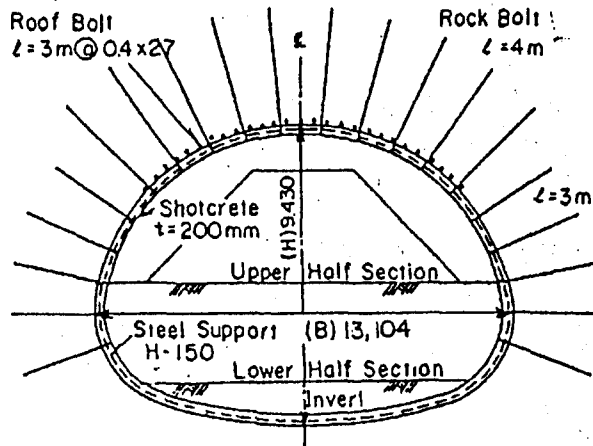


図-1 トンネル掘削断面図 (SP.612)

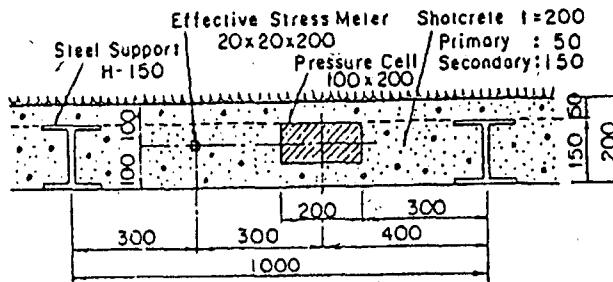


図-2 応力計の取付け位置

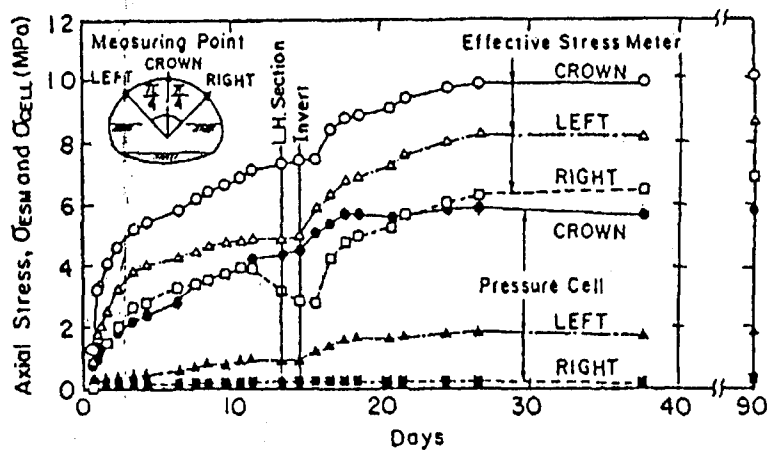


図-3 覆工軸応力の経時変化

表一 1 軸応力の測定結果 (計器の違いによる指示値の相違)

| Measuring Instrument | Axial Stress, Final Values (MPa) | | |
|----------------------|----------------------------------|-------|-------|
| | Left | Crown | Right |
| ① E.S. Meter | 8.57 | 10.14 | 6.87 |
| ② Pressure Cell | 1.83 | 5.81 | 0.23 |
| ② / ① × 100 (%) | 21.4 | 57.3 | 3.3 |

* E.S. Meter Effective Stress Meter

3 使用計器の検証

図-4は島らが実施した、mortarの供試体に埋設したpressure cellの載荷試験の結果で、問題のない応答性を示している。また、図-5はconcrete供試体に埋設した有効応力計の検証結果を示したものであるが、これも十分な応答性を示している。

また、他の研究機関で行なった載荷試験結果を図-6に示す。

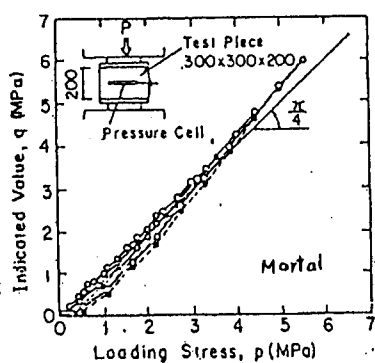


図-4 応力セルの載荷応答試験結果 (島ら)¹⁾

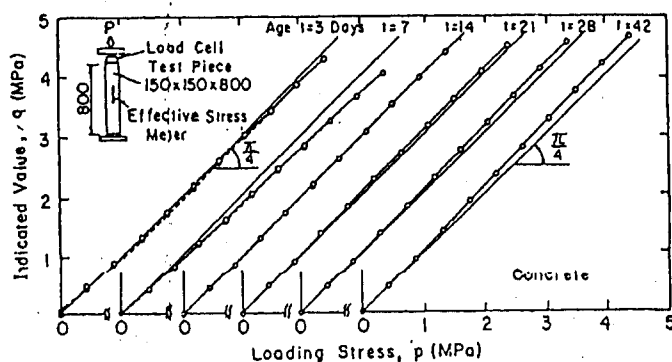


図-5 有効応力計の載荷応答試験結果

応力~応力計指示値曲線
 NO.1-ready mixed concrete-有効応力計 (電気式)
 ○ NO.2-ready mixed concrete-pressure cell (機械式)
 ○ NO.3-sharatake-有効応力計
 △ NO.4-sharatake-pressure cell

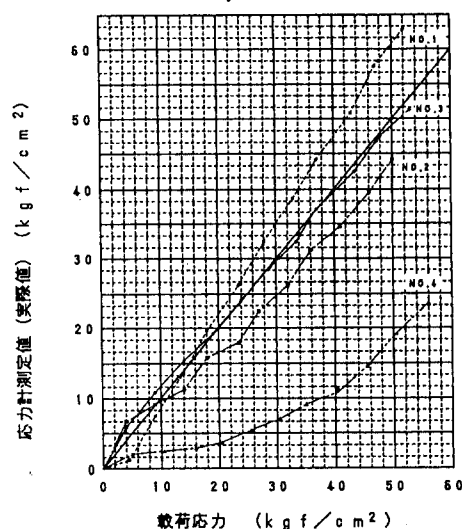


図-6

4 shotcreteの供試体に埋設したpressure cellの載荷試験結果

shotcreteがmortarおよびconcreteと異なる点は、圧送された混合材料をnozzleが吹き付けることにある。これは、跳ね返りが生じやすく、また、絞め固めを行わないためにporous（多孔質）になりやすい。

以上の条件で、pressure cellの応答性を確認するためにshotcreteの供試体に埋設し、載荷試験をおこなった。

図-7に供試体の形状、寸法を示す。

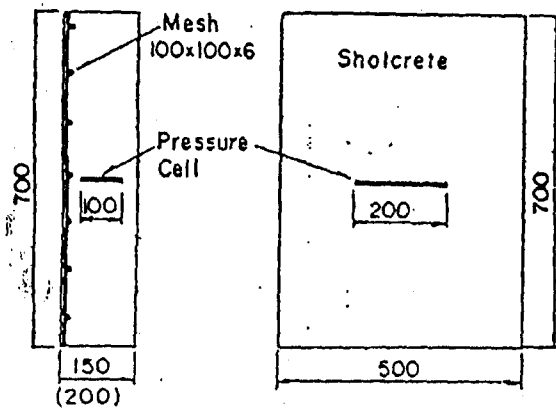


図-7 吹付けコンクリート供試体

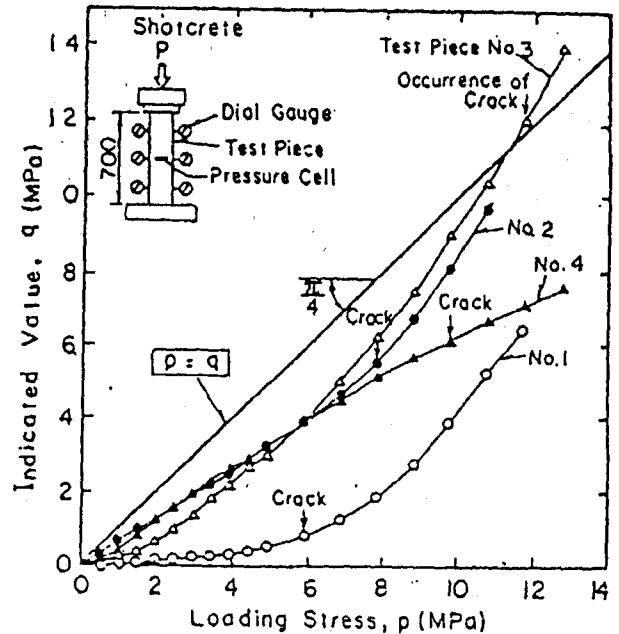


図-8 吹付けコンクリート供試体による載荷応答試験結果

供試体は、No. 1～2（厚さ150mm）とNo. 3～4（厚さ200mm）の4個を作成した。図-8に載荷試験の結果を示す。

ここでpressure cellは初期段階から低い値を示しshotcreteの中での応答性の悪さがうかがえる。また、crackが発生した時点で指示値が急激に上昇する現象が認められるが、これはpressure cell近辺のconcrete局所的な破壊が起こりpressure cellに応力が集中したためである。図-9は載荷応力に対する百分率で表したものである。

ここで応力集中がないと思われる5MPaでの応力levelでは70%以下の応答性であった。また、No. 1の供試体では図-10に示すようにpressure cellの受圧面に対するshotcreteの付着状態が悪く、指示値の低さに大きく起因していた。

受圧面の状況次第ではpressure cellの計器としての信頼性を著しく損なわれかねないものであり、注目される。

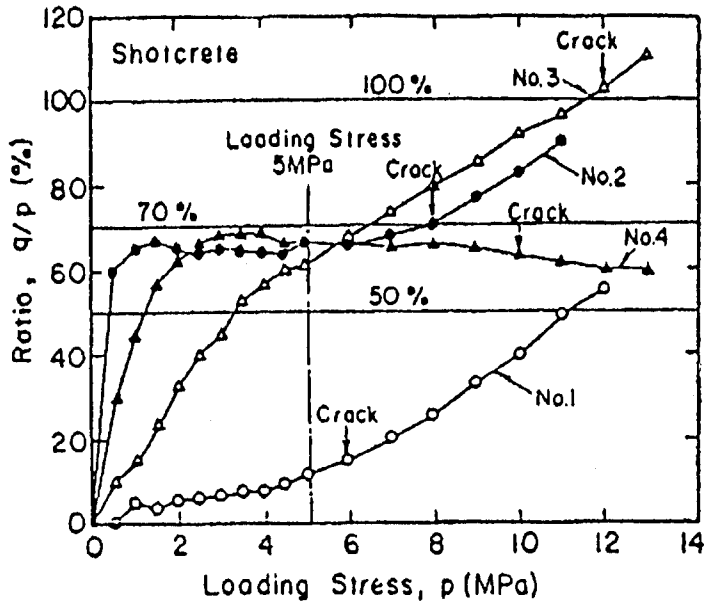


図-9 $p \sim q/p$ の関係

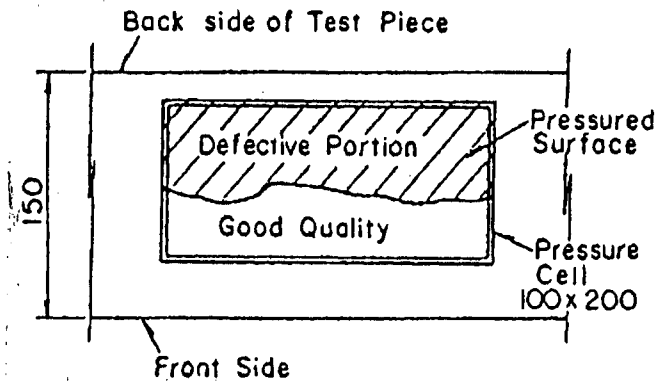


図-10 受圧面の状況 (供試体 No. 1)

5 弾塑性解析による覆工軸応力の解析

旭川tunnelの計測断面(SP.612)で、実際に覆工に発生している軸応力を確認するため、FEMによる二次元弾塑性解析を行なった。ここではtunnel壁面の変位が測定されている。そこで、変位が実測値に合うように地山物性値を変えてsimulation解析を行ない、そのときの軸応力を求めることにした。変化させる定数は地山の弾性係数(E)と側圧係数(K₀)とした。

図-11はtunnelの天端直上で測定された地山変位の特性曲線である。上半断面を掘削し覆工が施工されるまでに22%、rockbolt打設と変位計測が開始されるまでに35%の変位がすでに生じていることになる。解析はこれらの作業手順および掘削段階を考慮したstep解析によった。地山はDrucker-Pragerの降伏基準による平面ひずみ要素とし、shotcreteと鋼製支保工は弾性beam要素でmodel化した。

表-2に壁面変位の対比と、解析に用いた入力定数の一部を示す。解析値と実測値はA測線で合わないものの、その他の測線では良くsimulationできている。shotcreteの弾性係数(E_{crt})は土屋によって詳しく研究され、若材令から高い弾性係数を示すことが報告されている。そのため、ここではE_{crt}の経日的変化は考慮せず、各解析stepを通じて同じ値を使用した。表-3は覆工に発生する最終軸応力を、解析値と実測値とを対比して示したものである。有効応力計による測定結果は解析値に対して天端で97%、左右の肩部で75~93%程度となっている。図-11に示す先行変位(0.22)が厳密には切羽到達時点のものであり、shotcreteの施工がこれよりも若干遅れることを考慮すると、有効応力計は実際にはかなり良い応答を示していることが推察される。

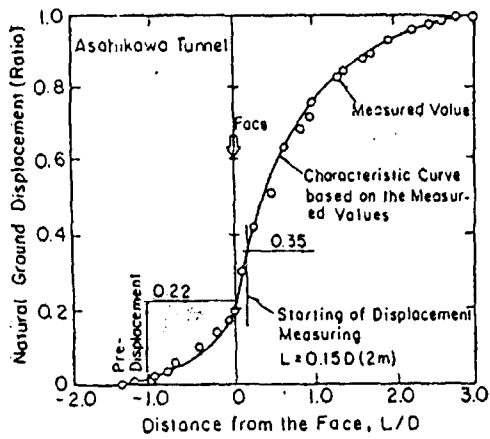


図-11 地山変位の特性曲線

表-2 解析値と実測値との対比(変位)

| Measuring Lines | Final Displacement (mm) | | Remarks | Input Data |
|-----------------|-------------------------|----------|---------|--|
| | Analysis | Measured | | |
| T | 5.12 | 15 | | $K_0 = 0.90$ |
| C | 40.40 | 30.38 | | $E = 700 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ |
| A | 7.35 | 12.61 | | $C = 0.2 \text{ (")}$ |
| B | 7.09 | 7.28 | | $\theta = 35 \text{ (deg.)}$ |
| | | | | $\gamma_1 = 1.85 \text{ (t/m}^3\text{)}$ $E_{CRT} = 2.0 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ $E_{STL} = 2.1 \times 10^6 \text{ (")}$ |

表-3 解析値と実測値との対比(覆工軸応力)

| Axial Stress | Final Values (MPa) | | |
|-------------------|--------------------|-------|-------|
| | Left | Crown | Right |
| ① Analysis Values | 9.24 | 10.47 | 9.19 |
| ② E.S. Meter | 8.57 | 10.14 | 6.87 |
| ③ Pressure Cell | 1.83 | 5.81 | 0.23 |
| ②/① x 100 (%) | 92.7 | 96.8 | 74.8 |
| ③/① x 100 (%) | 19.8 | 55.5 | 2.5 |

6 pressure cellの概要(Glotzl社のcatalogより)

pressure cellは、液体を封入した容器に外力が作用すると、容積変化を生じることなく内圧が上昇するが、このときの圧力を直接測定する方法をとっている。

また、形状も応力・圧力を正確に測定するための条件(可能な限り薄く、剛性が高い)を満足している。

次に、原理・構造を説明する。

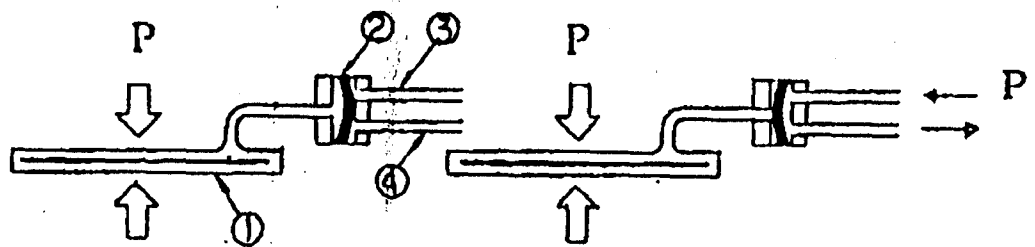


図-12

図-13

図-12において、外力Pによって平衡弁は右に押しつけられた状態になっているが、図-13のように油圧指示器によってpressure lineからoilをおくり、圧力P'を加えていくと、P < P'となった時点で平衡弁は左へ移動し、oilはreturn lineへ流れる。この時ΔP (P' - P)はPに対して無視できるほど小さいため、P' ≒ Pとしてこの時の圧力をguageで読み取る。図-14にpressure cellの外観と計測のsystemをしめす。

仕様 (concrete)

受圧面寸法 : 100 × 200 × 5 mm

最大容量 : 200 kgf / cm²

測定精度 : 0.1 kgf / cm²

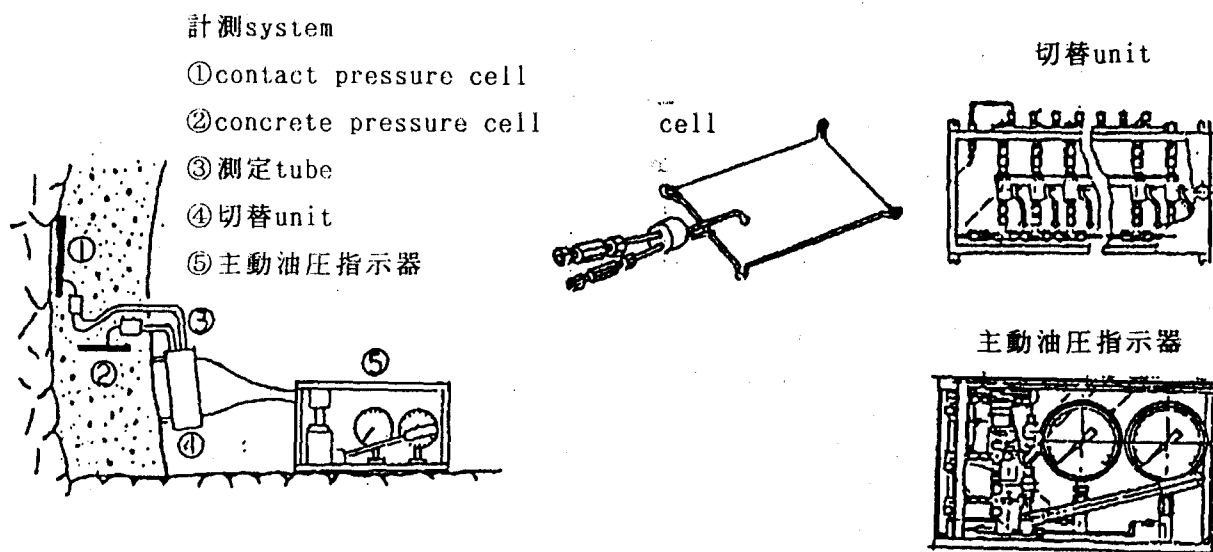


図-14

7 有効応力計

注2)

①有効応力計の基本構造は図-15に示すように、load cellと埋設の際に同時に打ち込んだ柱状のconcrete部分を直列に配置したもので、全長にわたって水分移動可能な縁切材によって、被測定concreteから応力的に絶縁されている。

測定すべき応力は、a端およびb端から柱状部分を経てload cellに伝達され、荷重として検出される。応力度は検出された荷重を柱状部分の断面積で除して求める。

従って、この応力計は原理的に以下に示すような特性を有する。

$$\frac{Kg}{Kc} = \frac{ls + lc}{\frac{Ec}{Es} \cdot \frac{Ac}{As} \cdot ls + lc} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- Kg : 応力計の剛性
- Kc : 応力計と同一形状寸法の被測定concreteの剛性
- Ec : 被測定concreteの弾性係数
- Ac : 柱状部分の断面積
- As : load cellの断面積
- lc : 柱状部分の長さ
- ls : load cellの長さ

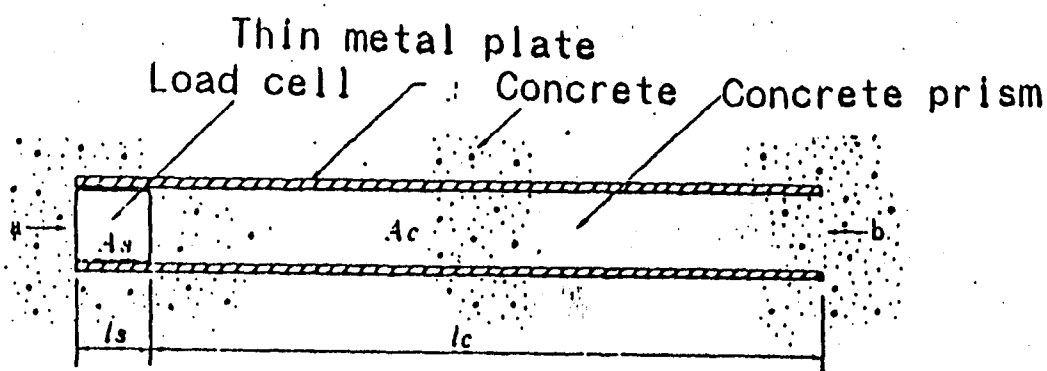


図-15

図16に種々の条件でのKg/Kcの変化を示す。この図に示されるように、lcをlsに比較して十分大きくとることにより、被測定concreteの弾性係数が広範囲に変化する場合でも、応力計の剛性を実用上十分な精度で追随させることができる。その結果、剛性の不一致による測定誤差を最小限にとどめることができる。

また、検出される応力度すなわち柱状部分の応力度と被測定concreteに作用している応力度との間には次の関係が成り立つ。

$$\sigma = \sigma_g = \sigma_c * K_g/k_c \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 σ : 検出される応力度

σ_g : 柱状部分の応力度

σ_c : 被測定concreteの応力度

したがって、被測定concreteの弾性係数変化に対してKg/Kc=1であれば、検出誤差も実用上無視できる程度の大きさである。

② creep・乾燥収縮に対する特性

①で述べたように、応力計の柱状部分に生じる応力の大きさは、被測定concreteとほぼ等しい。したがって、応力計のcreep変形量は被測定concreteとほぼ等しくなるので、creep変形の影響を受けずに実応力のみを分離して測定できるものと考えられる。

また、乾燥収縮に対しても、柱状部分は被測定concreteと水分移動が自由であり、また l_c が l_s に比較して十分大きいので、応力計の乾燥収縮量は被測定concreteとほぼ等しくなる。したがって、乾燥収縮が測定値に与える影響は少ないと考えられる。

③温度変化に対する特性

$$\frac{\alpha_g}{\alpha_c} = \frac{\frac{\alpha_s}{\alpha_c} l_s + l_c}{l_s + l_c} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

α_g : 応力計の線膨張係数

α_s : load cell材料の線膨張係数

α_c : 被測定concreteの線膨張係数

この式から示されるように、 α_s と α_c に差があっても l_c を l_s に比較して十分大きくとれば、応力計の線膨張係数は被測定concreteとほぼ等しくすることができる。例として、load cell材料に鋼を用い($\alpha_s=10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) $l_s/l_c=0.1$ とすれば、 α_c の $9 \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の範囲で α_g/α_c は $1.01 \sim 0.98$ となる。したがって、温度変化が測定値に及ぼす影響は実用上無視できる程度である。

なお、有効応力計の実験に関わる図表は別に第1図から第5図にしめした。

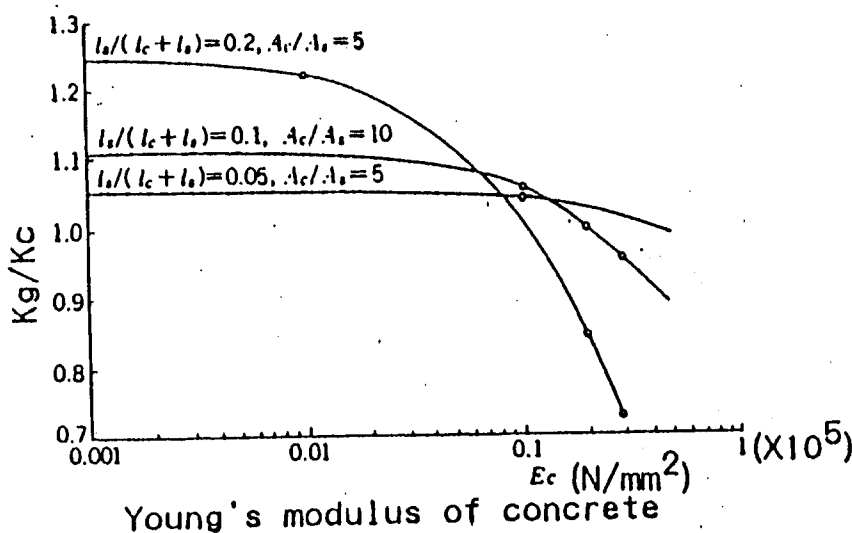


図16

8 まとめ

ここでは、旭川tunnelで得られた覆工軸応力の計測結果をもとに、pressure cellと有効応力計を用いた場合の指示値について検証を加えてきた。その結果明らかになった点をまとめて示すと次のようである。

- (1) pressure cellと有効応力計をtunnel内の同一断面に並置して測定した結果では、前者が常に低い指示値を示した。有効応力計を基準とした場合、tunnel天端では約60%、それ以外の測定では3~21%の指示値しか得られていない。
- (2) 有効応力計の指示値はFEM解析で求めた軸応力と比較的よく一致している。
- (3) pressure cellはmortar供試体に埋設して載荷応答試験を行った結果では応答性がよいことが確認された。ただしshotcrete供試体では載荷応力に対して70%以下の応答しか示さない。これは、他の研究機関で行なわれた載荷試験でもその傾向を明らかにしている。

以上の結果から、pressure cellが特にshotcreteの中で十分な応答を示さないことが明らかになった。cell周辺に跳返りによる不良部または空隙が生じやすく、受圧面が接触不良になることが原因と考えられる。旭川tunnelの実測dataで、天端よりも肩部に埋設した計器の指示値が極端に低くなっているのは、受圧面が水平に近くなるため、不良部がより発生しやすくなるためであろう。受圧面の接触不良で計器の応答性が著しく低下することは、4章(図-8~10)からも明らかである。計器の持つ本来の機能というよりは、むしろ受圧面の大きさに支配される問題であると思われる。

なお、今後はこの計器も含めて、多くの応力計について検証を行うと同時に計器の埋設にも十分な注意が必要であり、これら計器の特性を認識して取扱うことが問題を解決することにつながると思う。

注1)第19回岩盤力学symposium

shotcrete覆工の軸応測定結果と問題点

大林組技術研究所

山下 幸夫

藤原 紀夫

注2)鹿島建設技術研究所年報

鴈原 康夫

夏目 忠彦

佐々木光夫

正村 芳久

コンクリート有効応力計

実験結果資料

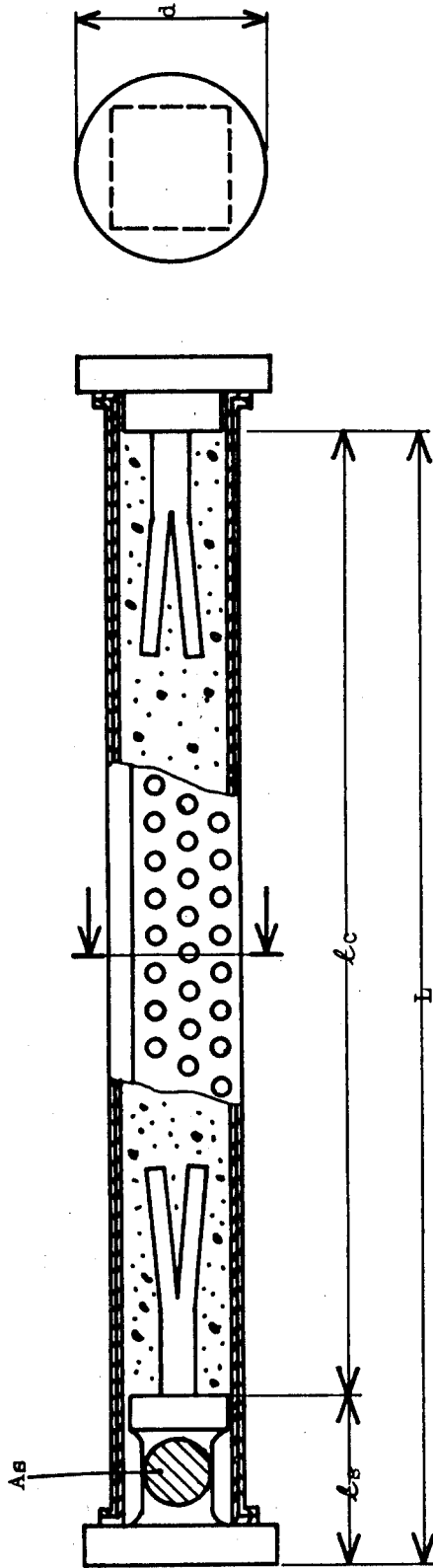
昭和52年実施



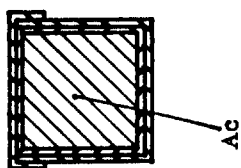
心でつくり心ではかる

株式会社 東横エルメス

第1図(イ)



第1図(ハ)

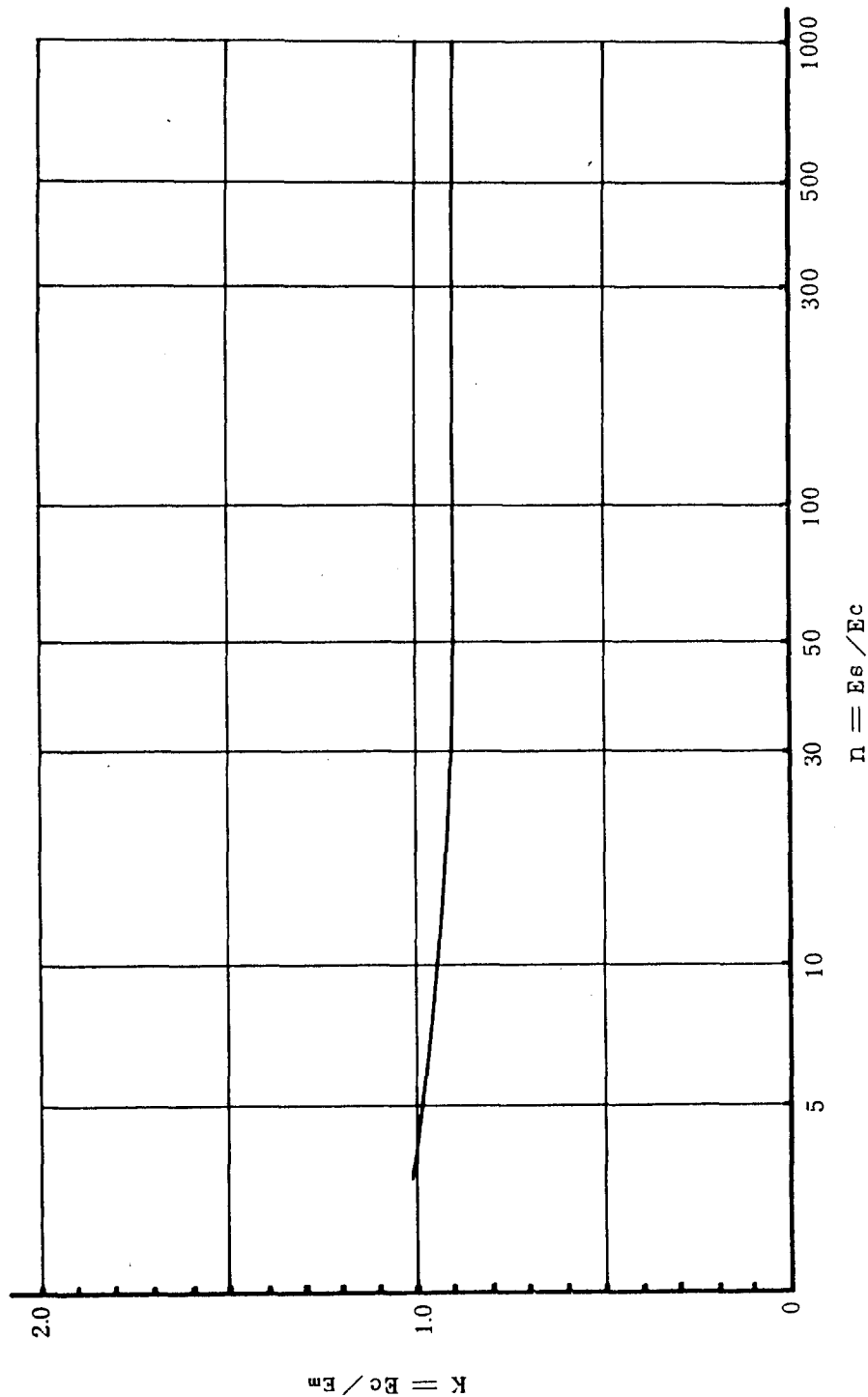


第1図(ロ)

使用された有効応力計の諸元

| 項目 | 寸法・特性 | 項目 | 寸法・特性 |
|-----------------------------------|-------|--|-------|
| 計器長さ L (cm) | 20.0 | コンクリート柱断面積 A_c (cm ²) | 4.00 |
| ロードセル長さ L_s (cm) | 2.0 | フランジ直径 d (cm) | 4.0 |
| コンクリート柱長さ L_c (cm) | 18.0 | 応力感度 K_g / cm / 10 ⁻⁶ ひずみ | 0.135 |
| ロードセル断面積 A_s (cm ²) | 0.85 | 温度係数 K_t / cm / °C | -0.08 |

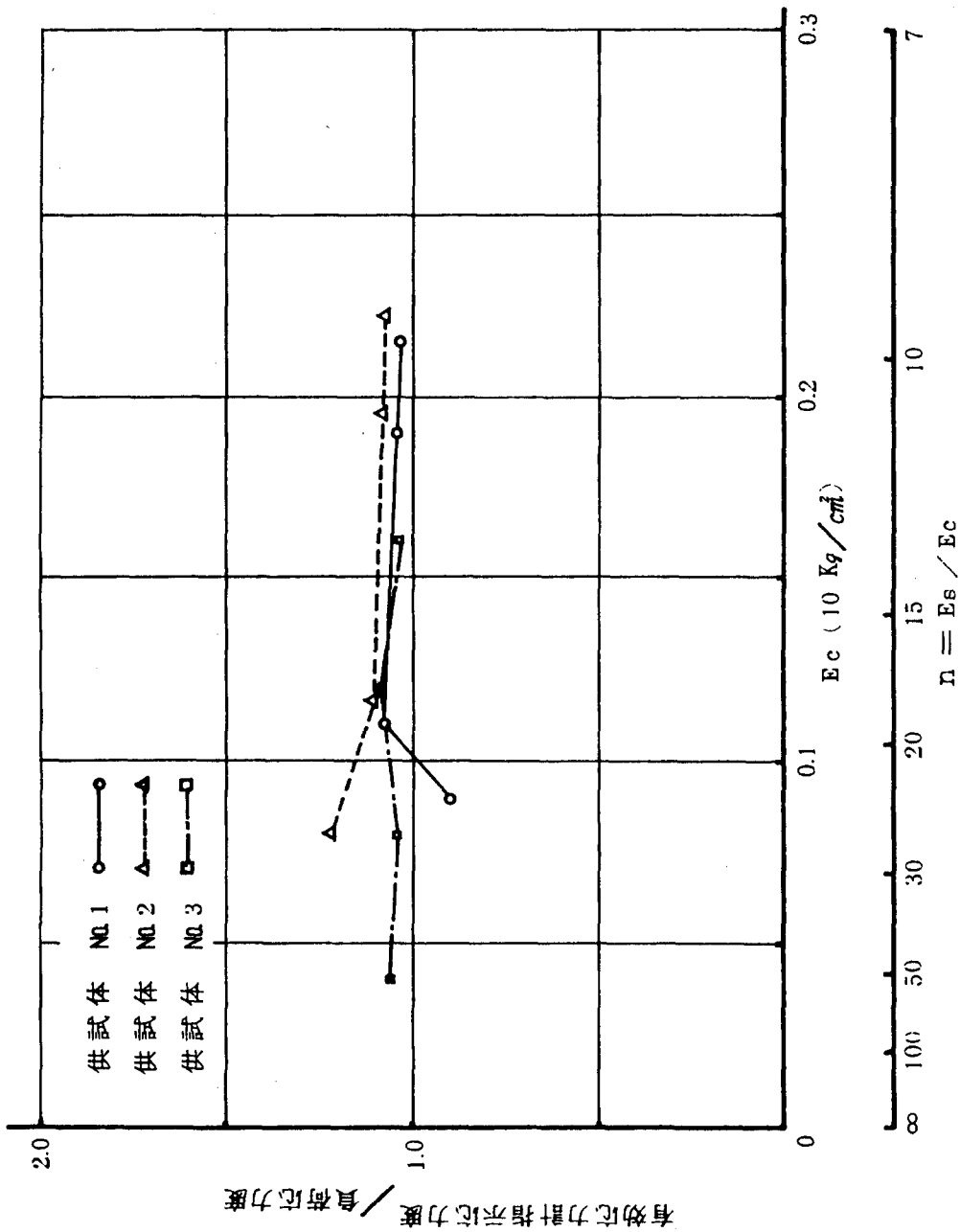
第 2 図



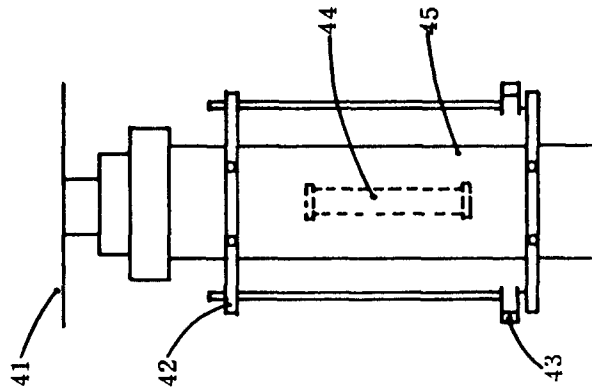
計器の弾性係数は第 2 図にその一例を示すように被測定コンクリートとほぼ近似して変化するので、若材令のコンクリートでも正確な応力度を知ることができる。なお、第 2 図において

- $n = E_s / E_c$ $K = \frac{\rho}{n} \cdot \frac{L^B}{L} + \frac{L^C}{L}$ $\beta = A_c / A_s$
 E_s : 鋼材の弾性係数 L : 計器長 A_c : コンクリート柱の断面積
 E_c : 被測定コンクリートの弾性係数 L^B : ロードセルの長さ A_s : ロードセルの断面積
 $K = E_c / E_m$ L^C : コンクリートの柱の長さ
 E_m : 有効応力計の弾性係数

第 3 図 (甲)



第 3 図 (乙)

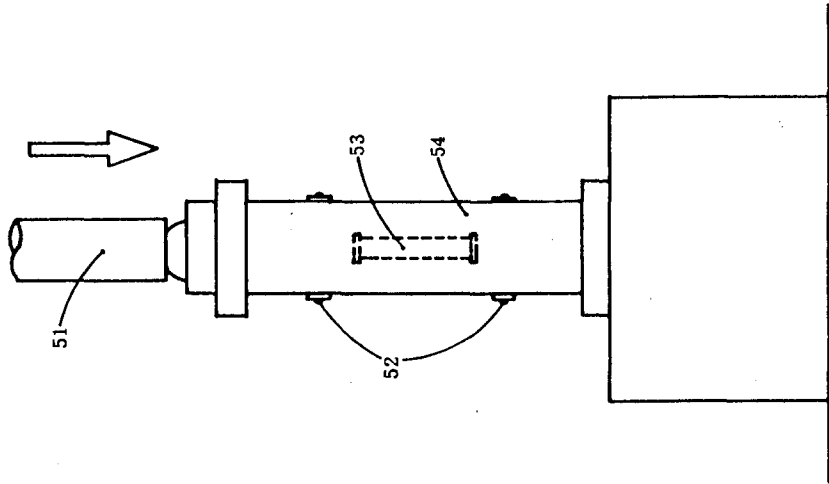
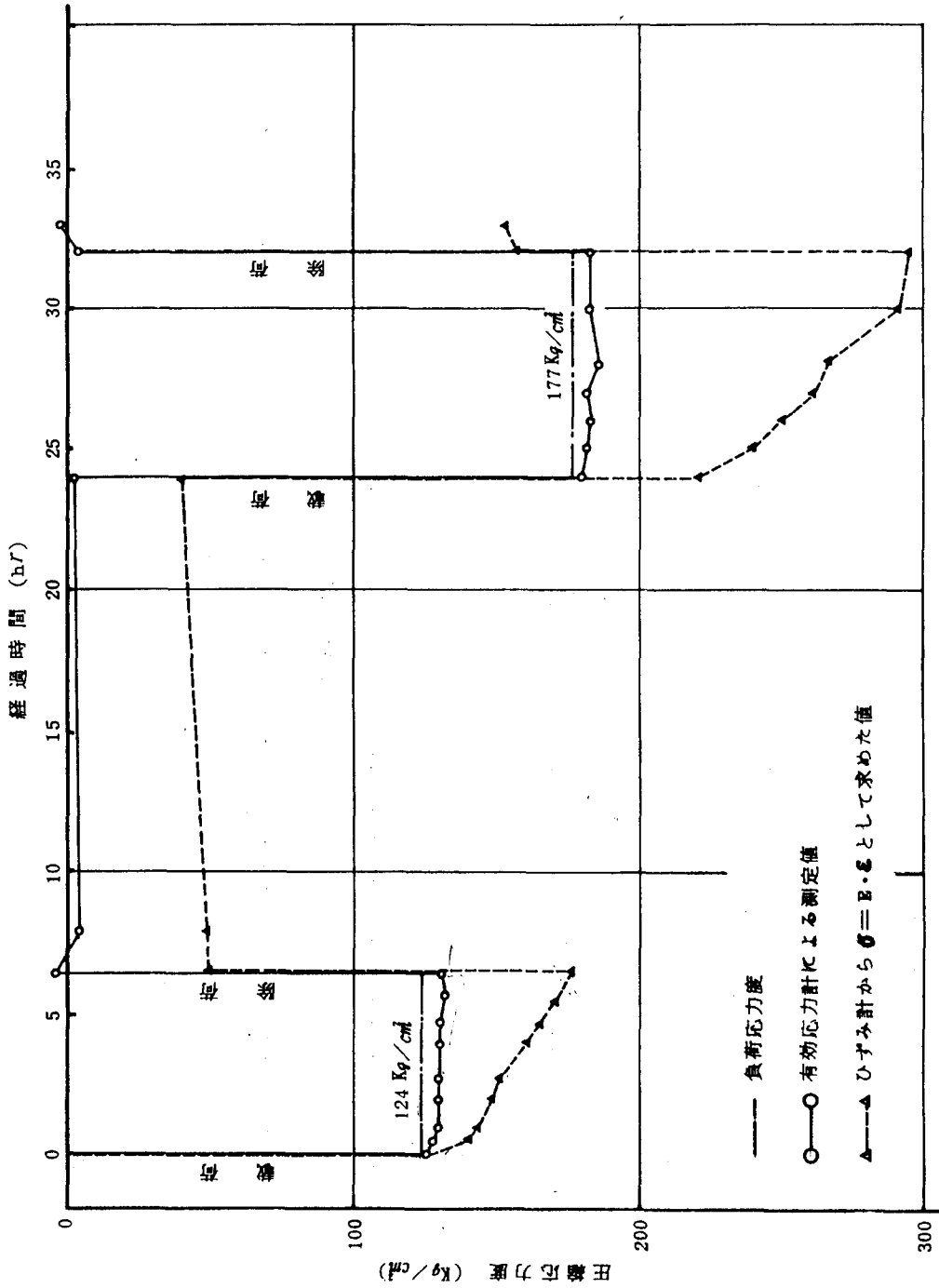


(1) 弾性係数変化に伴う出力特性

試験方法および結果を第 3 図(乙)、(甲)に示す。この結果からみられるように被測定コンクリートの弾性係数が約 4 倍変化しても有効応力計の出力感度はほぼ一定で、かつ実際の負荷応力度に対しおおよそ ±10% 以下の誤差である。これはコンクリートの硬化熱による温度応力など若材令時に生じる応力も測定可能であることを示している。

なお、第 3 図(乙)において、41 は圧縮試験機、42 は変位計取付枠、43 は変位計、44 は有効応力計、45 は供試枠 ($15 \times 15 \times 55 \text{ cm}$) をそれぞれ示す。

第 4 図 (ロ)

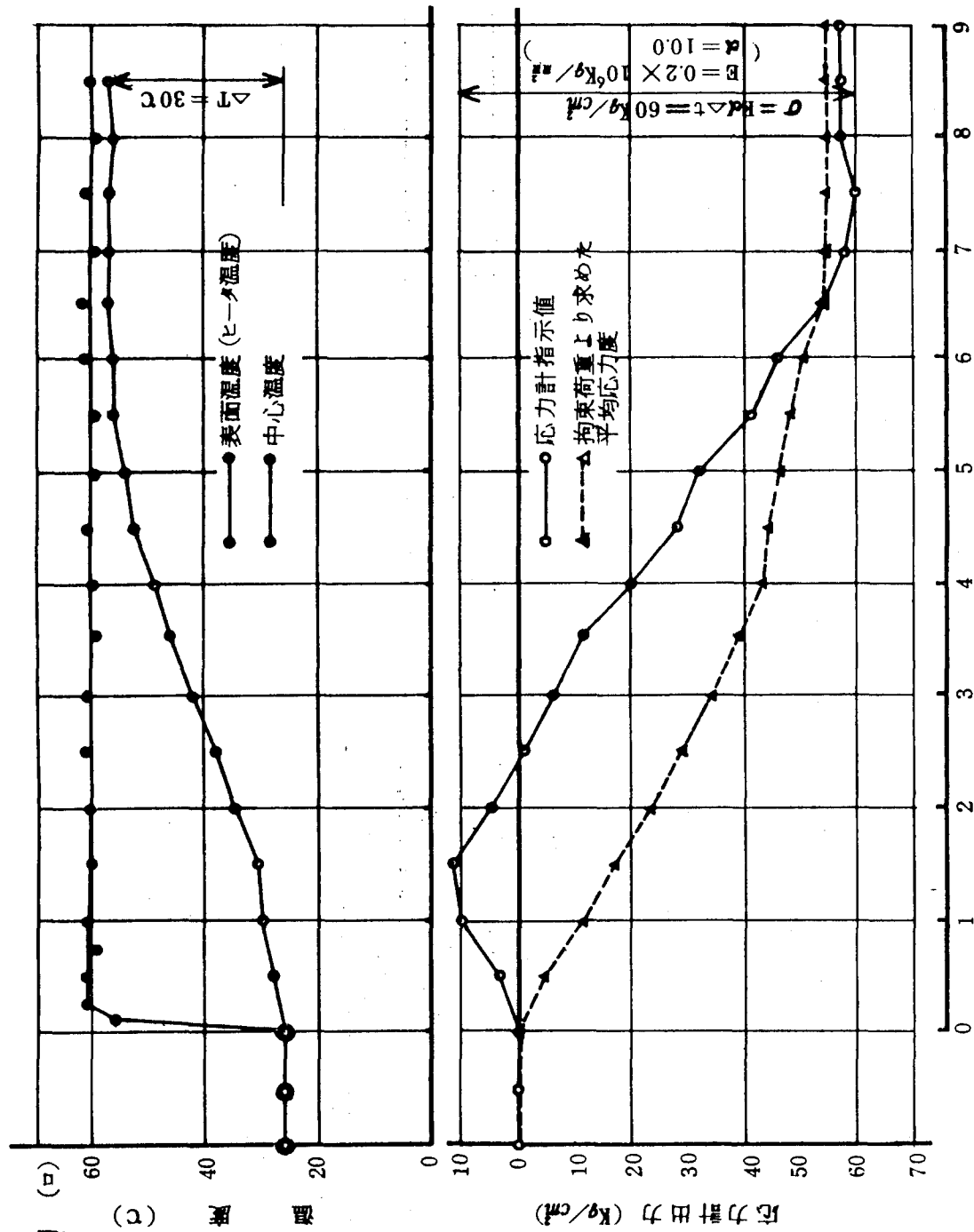


(2) クリープ変形に対する出力特性

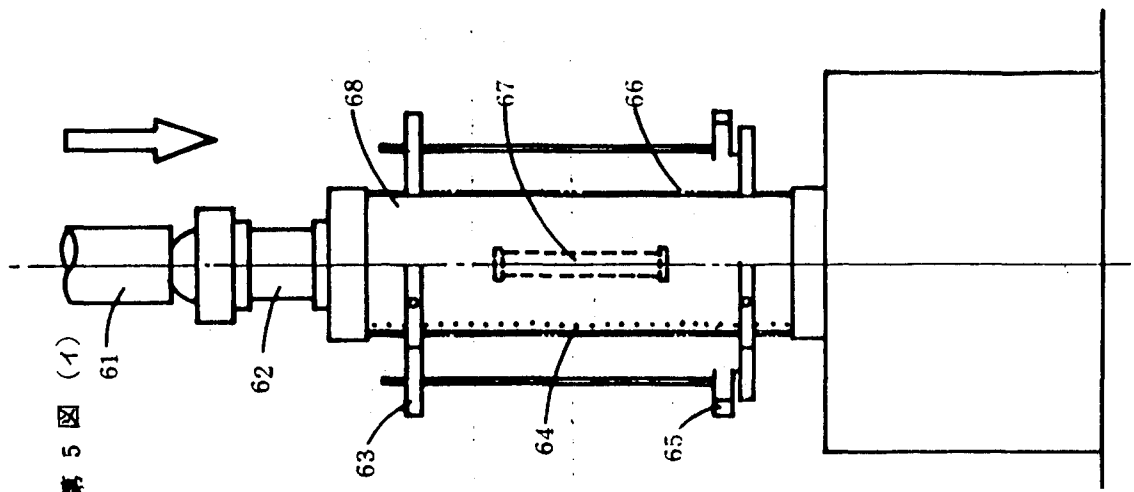
試験方法および結果を第 4 図(イ)、(ロ)に示す。試験結果によると被測定コンクリートがクリープ変形を起した場合でも有効応力計の出力はほとんど一定であり、有効応力のみを測定できる性能を有するものであることがわかる。

なお、第 4 図(イ)において、51は電気油圧式加力装置 (一定荷重を載荷)、52はコンタクトひずみ計標点 (検長300mm)、53は有効応力計、54は表面をシールし含水量の変化を防止した供試棒 (15×15×55cm) をそれぞれ示す。

第 5 図 (ロ)



第 5 図 (イ)



(3) 拘束応力の測定試験

有効応力計を埋設した供試体の温度を上昇させ、生じる温度膨張ひずみを電気油圧式加力装置により完全拘束し、このときの有効応力計の出力を調べた。結果を第 5 図(イ)、(ロ)に示す。この結果からみられるように供試体内部の温度がほぼ均一になった時点で有効応力計には $E \cdot \epsilon \cdot \Delta t$ (E は被測定コンクリートの弾性係数、 ϵ は被測定コンクリートの線膨張係数、 Δt は温度変化量) に相当する出力が得られた。これはひずみ測定では不可能である拘束応力が測定可能であることを示している。

なお、第 5 図(イ)において、61 は電気油圧式加力装置、62 はロードセル、63 は変位測定棒、64 はヒーター、65 は変位計、66 は断熱材 (グラスウール)、67 は有効応力計、68 は表面をシールして含水量の変化を防止した供試体 ($15 \times 15 \times 55 \text{ cm}$) をそれぞれ示す。