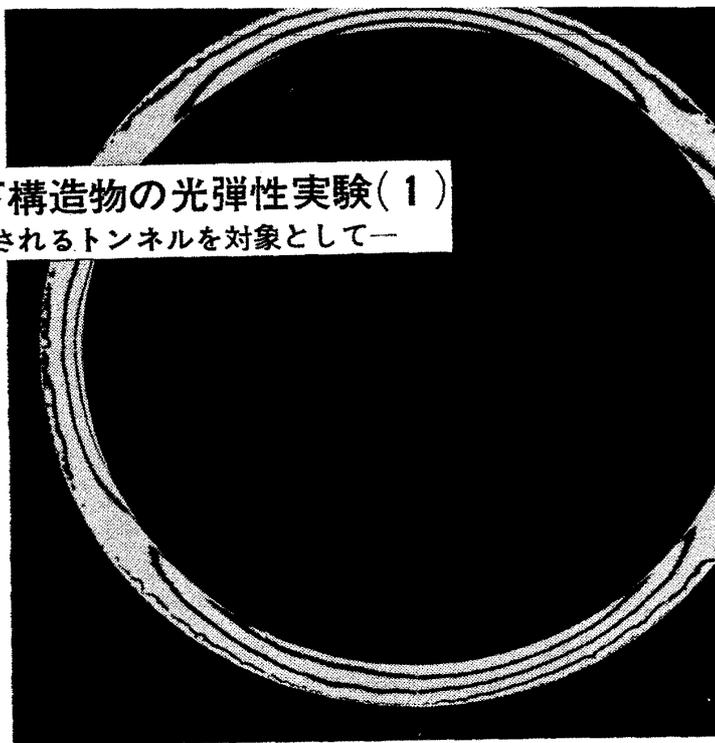


応力凍結法を利用した地下構造物の光弾性実験(1) —シールド工法によって砂中に構築されるトンネルを対象として—

やま 山	もと 本	みのる 稔*
えん 遠	どう 藤	ぞう 三**
やま 山	ざき 崎	りよう 良***
あり 有	ぞの 園	はげむ 励****



覆工モデルの凍結シマ写真 (L6-30-1.0-2)

1. 緒 言

地下構造物のモデル実験法を分類し、モデルをあらかじめ地中に埋め込んで行なう埋戻し法と実際のトンネル掘削と同一原理にしたがって行なうトンネル法とに分けて考えれば、前者は開削工法による地下構造物の力学的挙動の調査に、後者はトンネル掘削法によって構築される構造物の力学的挙動の調査に適することになる。実験技術からみて埋戻し法には本質的な問題はないが、トンネル法には常に実験手段上の困難がともなうから、室内実験の規模で簡単にしかも繰返しの可能な方法を見出すことは至難のわざといえよう。このためにモデル実験では抽象化が行なわれるが、ここでは乱されていない地山に直接ゆるみを与えるくふうが最も重要であると考えられる。そこで、モデルは埋戻し法で設置されるにしても、何らかの方法で地山を乱すことなくモデルに働く外力を解放することができるならば、その後発生する外力は、トンネル法によって構築された構造物に作用する外力すなわち地山のゆるみから生ずる外力に近いはずであるから、埋戻し法によってモデルを埋設してもトンネル法による地下構造物のモデル実験が可能になる。かくて問題は、埋設時にモデルに作用する外力を解放する手段とその後発生する外力またはモデルの応力の計測とに帰することになる。筆者らは、これらの要件を満たす実験手段の一つとして、エポキシ樹脂の2次転移域の性質を利用した応力凍結法の価値を認め、その適用を提案した。

実験法は、エポキシ樹脂の弾性的性質が狭い2次転移

* 東京都立大学工学部土木工学科助教授 工博

** 東京都交通局高速電車建設本部設計課長

*** 東京都立大学工学部土木工学科助手

**** 東京都交通局高速電車建設本部設計課技師

域をはさんで極端に相違するばかりか、いずれの領域においてもそれが安定かつ良好であることを利用している。前半の性質は、埋設時の外力を解放するのに役立ち、後半の性質は、モデルの応力の計測に利用される。すなわち、エポキシ樹脂で製作されたモデルをヤング率の大きいガラス状弾性域で埋戻し法によって埋設し、しかる後に2次転移域を越えてゴム状弾性域まで温度を上昇せしめれば、モデルのヤング率の大幅な低下にともない、埋設時にモデルに作用している土圧は逐次解放され、ついには力のつりあいが保てなくなってモデル周辺の乱されていない地山がゆるんで流動し始め、新しい力のつりあい状態を作り出すことになる。この状態は、実際の地下構造物をトンネル施工法にしたがって構築するとき、地山のゆるみとともに構造物にかかる土圧がしだいに増大し、新しい力のつりあいに移行する場合に相当する。したがって、この状態でモデルの温度を室温まで徐冷すれば、ゴム状弾性域で地山の流動から発生した土圧によるモデルの応力は、応力凍結法の原理にもとづいて凍結されるから、室温においてその応力状態を調査し、土圧を逆算すれば、所期の目的に達することができる。しかも、エポキシ樹脂は、2次転移域の幅が狭くかつ明確に区別できるから、実験誤差は比較的小さいと考えられるし、また必要に応じてその検討も可能なように思われる。

実験法の原理は上述のとおりであるが、しかし、この方法にもさらに解明を要する問題点が介在するので、应用到先だつてまずこれら諸点の考究がなされなければならない。次にその主なるものを列挙すれば

(1) 埋設時に作用する外力を解放するため、ガラス状弾性域から2次転移域を通してゴム状弾性域に至らしめるので、その間数十度の温度変化は避けられない。し

たがって、このとき発生する温度応力の処理の問題

(2) モデルに作用する外力は、モデルの変形に支配されるから、地山のシ(弛)緩により新しい力のつりあい状態に達した後でも、応力凍結サイクルの過程の温度変化によるモデルの伸縮にもなって外力がふたたび変化する可能性がある。したがって、これが実験結果に与える影響の問題

(3) 埋設時の外力が解放された後、地山の流動によって発生する土圧は、時間の関数であると考えられる。したがって、応力凍結サイクルが直接実験結果に影響することになるが、その処理の問題

となる。このうち(2),(3)は、モデル実験をある種の条件で調整すれば、実験誤差として処理することが可能であるが、(1)は実験法に内蔵された本質的な問題で、場合によっては実験法それ自体をも否定する要因を含んでいる。このために研究は、まずこれら問題点の解明から着手されなければならぬ。そこで、シールド工法によって砂中に構築されるトンネル覆工のモデル実験を念頭において実験材料の選択と予備実験を行ない、問題点を究明して実験法の当否を確かめてみたいと思う。しかる後、この場合を地下構造物のモデル実験例として一連の実験を行ない、トンネル覆工に作用する土圧現象を調査したいと考えている。

2. 実験材料とその性質

2.1 鉛製散弾

さきに問題点の(3)として地山の流動による土圧の時間変化を指摘したが、応力凍結法を用いた地下構造物の光弾性実験では、モデルがゴム状弾性域に留まっている間に地山は完全に流動し終わり、モデルに作用する土圧は最終土圧に達することが望まれる。このためには地山材料に多少とも粘性が存在することは好ましくないから、トンネル覆工のモデル実験においては砂質地山を対象とすることにした。しかし、砂の性質にもかなりの変動があるばかりか、自重も小さくまた熱伝達も悪いので、実験上の支障はまぬがれない。そこで、自重および熱伝導率が大きく、かつ流動性の良好な粒状材料で、実験中性質の変動の少ない径1mmの鉛製散弾を選び、砂の代用として使用した。

表-1 散弾の性質

項目	記事	備考
密度	11.2 gr/cm ³	
単位容積重量	6.8 gr/cm ³ (0.64) 7.0 gr/cm ³ (0.60)	ゆる詰め法 押し詰め法
内部摩擦角	直接セン断試験 32.0°(0.56)~36.7°(0.54) 三軸圧縮試験 29.5°(0.60~0.54)	上箱可動
線膨張係数	2.9×10 ⁻⁵ /1°C	

表中カッコ内は相当する間ゲキ比を示す。

かくして散弾の砂としての性質が調査され、詰め込み方法の相違による単位容積重量の測定とセン断試験が行なわれた。試験結果は一括して表-1に示されている。表から散弾は、砂の性質をかなりよく表現し得るものと考えてよい。また詰め方の相違に対してもとくに注意を払う必要がないようにみえたので、以後実験はすべてゆる詰めによった。なお、表中散弾の線膨張係数として示した値は、鉛ブロックの線膨張係数である。したがって、この値がただちに散弾の線膨張係数を表わさないが、散弾が密に詰まって互いに接触を保ち、温度変化によって相互の幾何学的関係が崩れない場合には、直接利用できるから、一つの目安としてこの値を採用することにした。

2.2 モデル材料

使用されたエポキシ樹脂はアラールダイトBで、硬化剤はハードナー HT 901である。既述のようにモデル材料の性質は実験法の基礎を形成するから、実験で用いられる材料において直接実測された結果を次に提示する。

(i) 光弾性感度

ゴム状弾性域における光弾性感度 $\alpha_h = 4.15 \text{ cm/kg}$

常温付近における光弾性感度 $\alpha_l = 0.09 \text{ cm/kg}$

これらは通常光弾性感度として認められている値にほぼ一致している。

(ii) ヤング率

図-1の曲線Aは、ここに実測された値を、曲線Bは参考としてバッチの全く異なる材料による結果を表わす。2次転移域の位置を始めとして材料の性質がその製

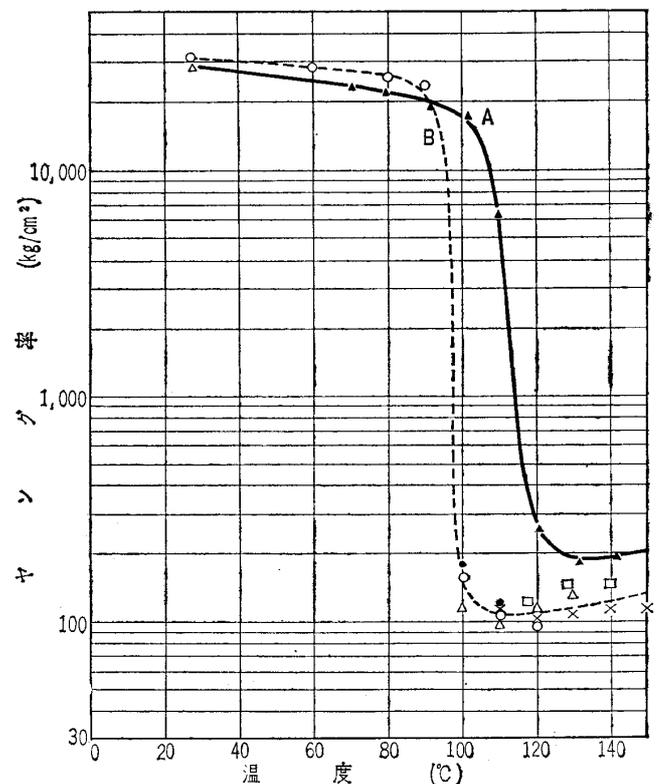


図-1 エポキシ樹脂のヤング率と温度の関係

造過程に多少とも影響されることは、両曲線から明らかである。これは、実験が実測結果にもとづいて立案されなければならない一つの根拠を与える。

曲線 A からヤング率は、常温付近で $E_l=28,000 \text{ kg/cm}^2$ 、ゴム状弾性域で $E_h=195 \text{ kg/cm}^2$ とすればよいと思われる。また 2 次転移域は $105\sim 125^\circ\text{C}$ にあると考えられるから、多少の安全を見込んで応力凍結実験における最高温度は $130\sim 135^\circ\text{C}$ とすることに定めた。一方、覆工モデルを散弾中に埋込む温度は 90°C と指定したが、これも曲線 A を参照し、温度変化の実験結果に与える影響を極力小さくする意から、ガラス状弾性域の上限に近くかつ安全なる温度として定めた値である。なお、理論的考察においては、簡単のために 2 次転移域のほぼ平均値に当たる 115°C をその指標として利用し、この温度において 2 次転移がすべて行なわれると仮定するが、他の実測結果もこの処置を肯定するようみえる。

(iii) 線膨張係数

線膨張係数は、温度変化にともなうモデルの膨張量を調査するために計測された。図-2 から明らかなように、線膨張はほぼ 116°C を境として二つの直線で示されるが、これは、その境界付近の温度が 2 次転移域の指標として利用できることを裏付けている。図の二つの直線から線膨張係数 β は

$$116^\circ\text{C} \text{ 以上において } \beta_h=17.1 \times 10^{-5}/1^\circ\text{C}$$

$$116^\circ\text{C} \text{ 以下において } \beta_l=6.7 \times 10^{-5}/1^\circ\text{C}$$

で与えられる。

以下に取扱われるすべての応力凍結実験は、上述の資料にもとづいて凍結サイクルの最高温度が $130\sim 135^\circ\text{C}$ 、徐冷速度が $4\sim 6^\circ\text{C/hr}$ になるように調節された。したがって、これを逐一記述することはしないが、実験結果の検討に当たって必要があれば、常にこれらの条件が付記されているものと考えていただきたい。

3. 予備実験

ここには問題点 (1) および (2) の対策を立てるために

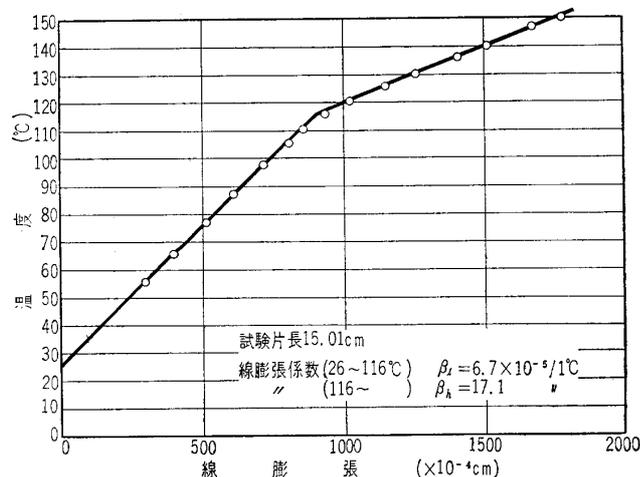


図-2 エポキシ樹脂の線膨張と温度の関係

行なわれた予備実験が記述されている。しかし、これら予備実験は、実験法に根拠を与えることを目的としているから、覆工モデルに作用する土圧調査には直接関係がない。したがって、実験法に厳密性を要求しない読者は、この項を略してただちに 4. に移ってもよい。なお、問題点 (3) についてはすでに 2.1 で対策が講じられている。

3.1 予備実験 その 1——温度膨張を相殺させるための変形導入法と変形の解放実験

問題点 (1) を処理するためにここに採用された方法は、応力凍結実験を逆に利用し、温度上昇にともなう自然膨張を応力の解放から生ずる収縮で打消さしめる方法である。この方法によれば、事実上温度変化による膨張を無視することができるから、問題に根本的な解決を与えることができると考えられる。しかも、あらかじめ導入すべき変形量を調整することにより、モデルと地山との間ゲキを自由に変えて実験できるから、実験条件も規制できる利点があるようにみえる。これらの予測は、光弾性材料の性質から容易に了解されるけれども、実験法の妥当性を確認するためにはさらに実証が必要である。かかる見地から、実験の対象とする覆工モデルによって予備実験が行なわれた。

(1) 変形導入用器具

目的が温度変化にともなう膨張を打消すことにあるから、内圧による変形を凍結することが望ましい。しかし、変形がほぼ同一であれば、それに対応する応力状態についてはさして注意する必要がないと考えられるので、ここには簡単にかつ繰返して実施できる方法として内圧をたくさん線荷重で置き換える方法を採用し、機械的にモデルを膨張させることにした。しかし、この場合変形導入器には応力凍結には無関係の約 115°C から室温までの温度差に当たる自然収縮を吸収できるような設備がなされなければならない。この注意を怠るとモデルが収縮する際に破壊する危険がある。写真-1 は、この

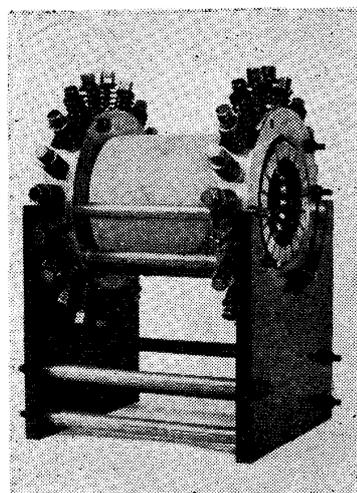


写真-1 変形導入用器具

点を考慮し、モデルを機械的に膨張させることができるようくふうした変形導入用器具である。モデルに線荷重を与えるために 20 本の載荷棒がその両端で各スプリングを介した締付けボルトで支えられており、所定の変形を与えるために図-3 のように円形ゲージにスプリングの弾力によ

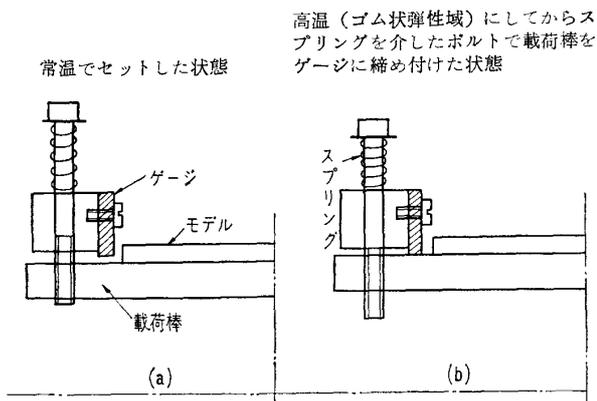


図-3

って締付けると同時にモデルの自然収縮にたいしてはこれが吸収される機構になっている。

(2) 変形の導入

実験には図-10と同じトンネル覆工モデルが利用された。モデルには元応力が存在するが、その一部は除去可能であるから、アニールを行なった後実験に供された。モデルは始め、容易に回転できる程度に载荷棒のまわりに取付けられる。しかる後器具を炉中にセットし、モデルがゴム状弾性域にはいったとき、図-3(b)のように载荷棒を締め付け、円形ゲージの内側に密着せしめて所定の変形を導入する。

ここに用いられたゲージは4種で、それぞれモデルの内径 88 mm より室温で 1, 2, 3 および 4 mm だけ大きい内径が与えられた。これら内径の差は導入される変形の指標として利用できるのので、簡単のためこれらを見かけの膨張量と呼称し、記号 e で示すことにする。

変形が導入されたモデルは、室温に戻った後装置からはずされ、図-4の各位置で外径が測定された。一方、実験前の外径は、すでに同位置で測定されているから、両者の差はモデルに導入された有効な膨張変形を与える。これをさきの見かけの膨張量に対して膨張の凍結量と呼ぶ。内圧による膨張の代用としてはこれら測定値の平均値を利用するのが適当であるから、以後膨張の凍結量といえば単に平均値のみを指すことにする。

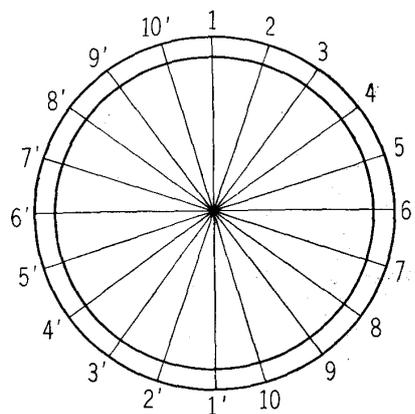


図-4

図-5は、膨張の凍結量と見かけの膨張量との関係を示すが、実測された膨張の凍結量は、導入された応力によるモデルの肉厚の減少量と 115°C から室温までの自然収縮量とを見かけの膨張量から差引いて得られる計算値に合致している。

(3) 変形の解放実験

膨張の凍結量をもつモデルが、後述するトンネル覆工のモデル実験における応力凍結サイクルの温度経過とともにいかに挙動するか調査するため、炉中でその温度サ

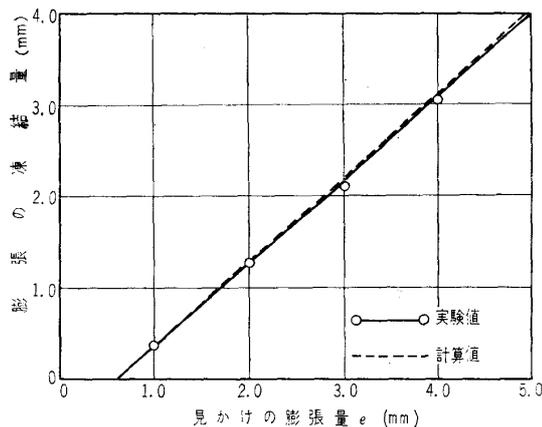


図-5

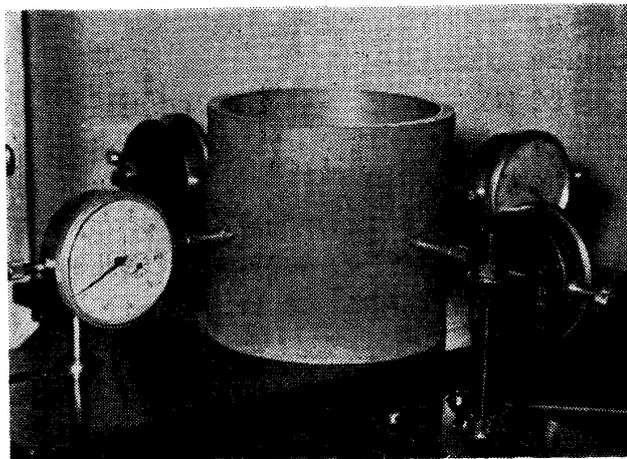


写真-2 相対変位の測定

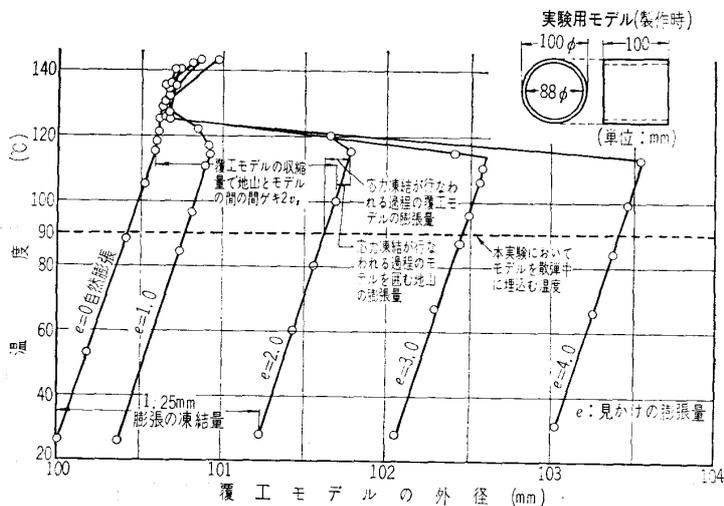


図-6 モデルに導入された変形の解放実験

イクルの一部を実現させ、写真-2のように直交2方向で外径が測定された。その結果は図-6に示されている。モデルがガラス状弾性域にある間は、すべての膨張曲線が $e=0$ の曲線に並行している。これは、温度膨張が膨張の凍結量に無関係であることを表わしている。しかし、115°C 付近に達し、ガラス状弾性域からゴム状弾性域に移行する過程で材料が軟化し始めると膨張の凍結量が解放されてモデルの収縮が生ずる。そして収縮量が自然膨張量に打勝れば全体としてモデルの外径は減少することになる。かくしてゴム状弾性域を示す 125°C に達すると、膨張の凍結量が完全に解放されて収縮が完了するから、モデルはふたたび自然膨張を始める。これはまたアニール状態に当たる。

次にこの現象を利用して散弾中に埋込んだ覆工モデルの実験における土圧発生メカニズムを推察してみよう。後述するように覆工モデルを散弾に埋込む温度を 90°C とすれば、90~115°C の間モデルは、モデルと散弾の線膨張係数の差に相当する分だけ膨張しなければならない。このとき、その一部はモデル周辺の地山の間ゲキを乱して膨張するが、残りは地山に拘束されて温度応力としてモデル内にロックされる。しかし、始めに膨張の凍結量を規制しておけば、図-6を参照して、応力凍結が始まる前に上述の膨張量差を打消すことができるので、温度応力がまったく問題にならないばかりか、積極的に地山とモデルとの間に所定の間ゲキを作ることも可能になる。かくして、問題点(1)は、膨張の凍結量を導入することによって完全に解決し得ることがわかる。

3.2 予備実験 その 2—階段状に変化する荷重を用いた応力凍結実験

地下構造物のモデル実験においては、モデルに作用する外力がモデルそれ自身の変形に支配されるため、応力凍結過程の温度変化にともなうモデルの変形によって外力が変化し、これが実験結果に与える影響の問題がある。すなわち、トンネル覆工のモデル実験を例として述べれば、応力凍結が行なわれる徐冷時には温度降下にもなって覆工モデルの収縮が生ずるから、モデルと散弾の接触状態ひいては外力状態に変化が生じ、これが実験結果にいか影響するかという問題で、まさに問題点(2)として指摘したものである。

この問題を解明するカギとするため、ここに予備実験として階段状に1段だけ減少する荷重を使って応力凍結実験を行ない、その実験結果を荷重が変化しない場合のそれと比較

してその相違が調査された。なお、ここに減少する荷重のみ採用したのは、応力凍結が行なわれる徐冷時にはモデルが収縮し、モデルに作用する外力は、一定もしくは減少するにすぎないと考えられたことによる。

(1) 実験の概要

実験はクサビ型試験片にクサビの対称軸に沿った引張力を加えて行なわれた。ここにクサビ型試験片が利用さ

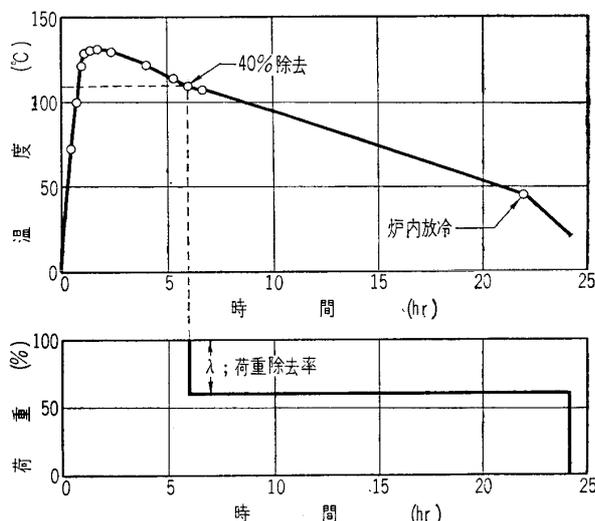


図-7 応力凍結サイクルの一例

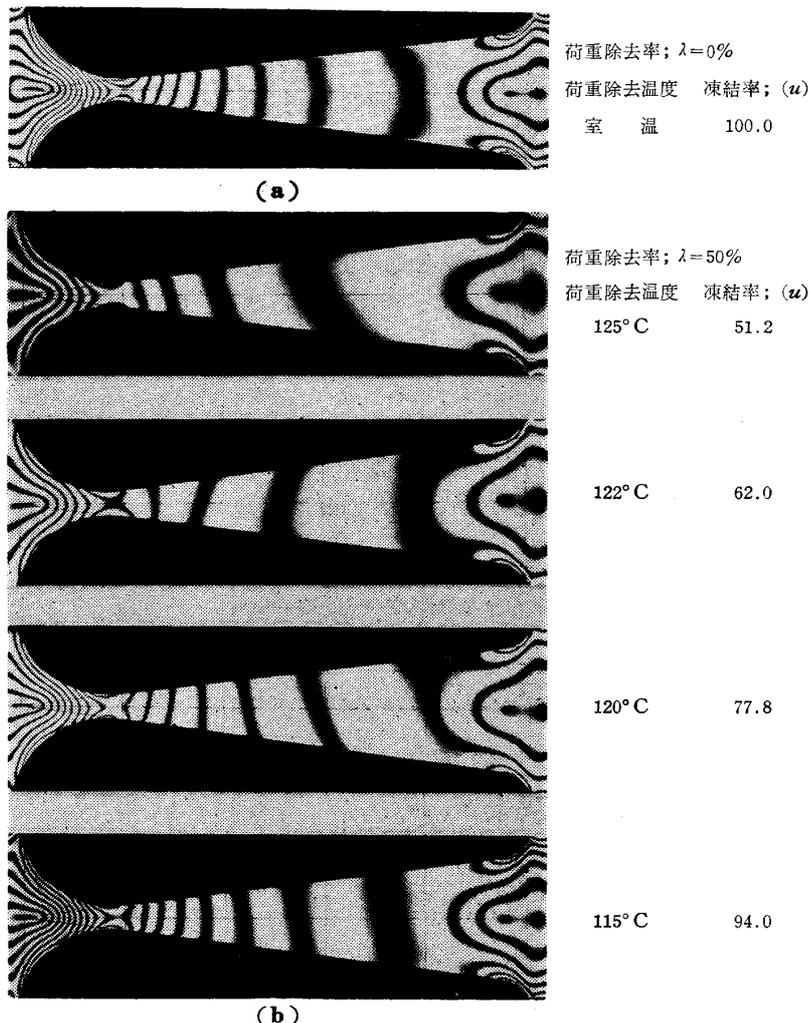


写真-3 凍結されたシマ写真

れたのは、理論との比較が容易なことはいうまでもないが、なお比較をクサビの対称軸上に限定すれば、そこではまた実験誤差もきわめて小さいことが理論的に証明できるからである。この理から、実験資料の整理はすべて対称軸上で行なわれた。図-7 は実験に使用された応力凍結サイクルとそれに対応する荷重図の例で、徐冷時 110°C においてははじめからかかっていた荷重の 40% を取り、応力凍結サイクルを完了させた場合に当たる。実験は、すべてこの例にならって行なわれ、最初に一定荷重を加えた後、除去荷重とその除去時の温度とが種々に変えられた。写真-3 は得られたシマ (縞) 写真の一例である。ここに λ は、荷重除去率で、除去荷重をはじめの荷重で除した百分率である。

(2) 実験結果とその考察

実験によって得られた一連のシマ写真を観察すると、シマ次数は荷重除去率 λ の増大とともに減少するが、シマ模様は相互に類似していることがわかる。これは、シマ次数の減少の割合が応力の大きさに無関係であることを推察させるが、これを詳細に検討するためには 図-8 が役立つ。図の横軸は、試験片の対称軸に沿ってクサビの頂点から測った距離で、応力の大きさを表わす尺度として用いられている。縦軸はシマ次数の凍結率 u すなわち荷重除去を行なわない $\lambda=0$ の場合に当たる 写真-3 (a) のシマ次数を基準として測った他の写真のシマ次数の百分率である。図示の四例中一例において凍結率が位置によって変化しているが、しかし、それにも規則性が認められないから、これは単に実験誤差を表わすにすぎないと考えられる。したがって、凍結率は応力の大きさには無関係であると解することができる。写真-3 に与えてある凍結率 u はこの見解にもとづき、平均値として決定した値である。

図-9 は、写真-3 を用い 荷重除去率 λ をパラメーターとして凍結率 u と荷重除去時の温度 t との関係をかいた曲線群である。 $t \geq 124^\circ\text{C}$ において u は温度に無

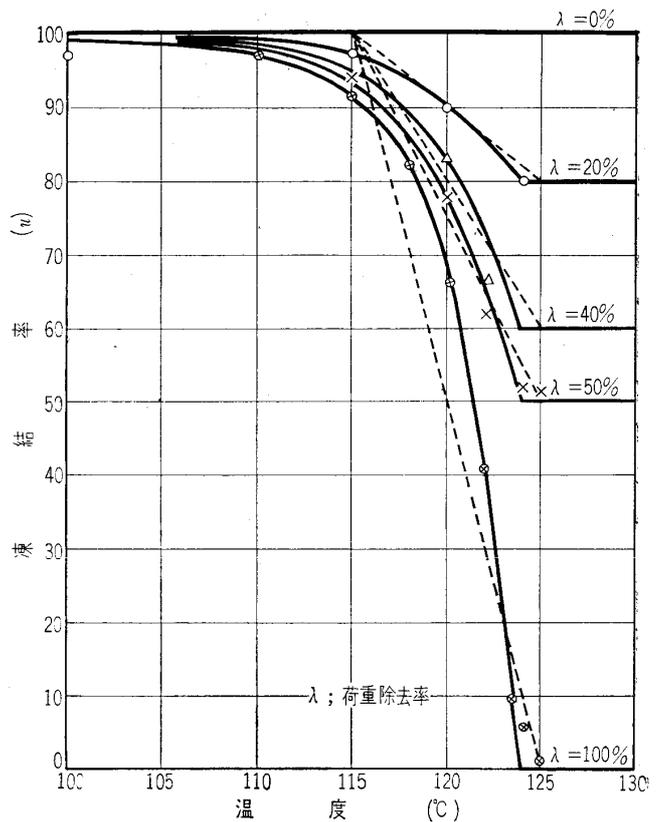


図-9 凍結率と温度との関係

関係になっているが、すでに指摘したように 124°C がゴム状弾性域の下限に当たることを想起すれば、この温度領域で弾性的挙動が良好なことは当然である。同様に $t \leq 105^\circ\text{C}$ においても u は一様で 100% と考えられるが、またこの温度がゴム状弾性域の上限に当たるから、これも当然の帰結で、これらの事実は、関係する実験結果の信頼性を裏付けるものである。破線は、簡単のために多少の誤差を無視して曲線を模式化したものであるが、概況を知るには十分であろう。

図の破線群は、シマ次数の減少率 v を $v=100-u$ とおいて次の関係式

$$v = \frac{t-115}{10} \lambda \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。しかし、一般の荷重状態においての λ は、階段状の変化をとらず、温度とともに連続的に変化すると考えられる。そこで、これを多数の階段状の小区分 $\Delta\lambda$ に細分し、その各々について (1) 式が独立に成立つものとするれば、連続的な荷重変化によって生じたシマ次数の減少率は

$$v = \sum \frac{t-115}{10} \Delta\lambda = \int_{115}^{125} \frac{t-115}{10} \left(-\frac{d\lambda}{dt} \right) dt \dots\dots (2)$$

で計算される。

一例として 125°C で 0、115°C で $a\%$ の荷重減少率をもち、その間では直線的に変化する荷重においては $\lambda = \frac{125-t}{10} a$ であるから $-\frac{d\lambda}{dt} = \frac{a}{10}$ となり

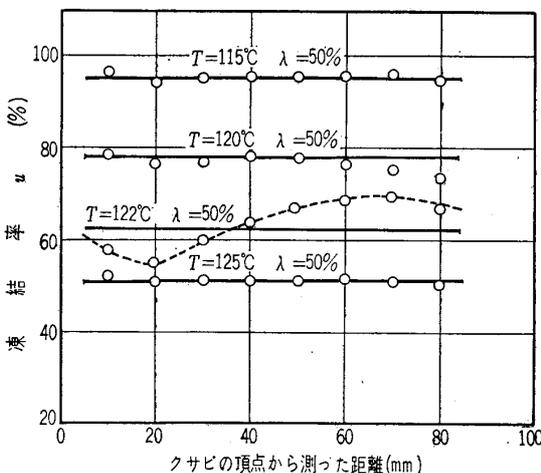


図-8 応力の大きさと凍結率との関係

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{a}{100} \int_{115}^{125} (t-115) dt = \frac{1}{2} a \\ u &= 100 - v = 100 - \frac{1}{2} a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。式(3)は単に一計算例に過ぎないが、これを目安として応力凍結実験における外力の減少が凍結シマ次数に与える影響の程度は類推することができよう。

以上の考察にしたがいトンネル覆工のモデル実験を推察してみよう。徐冷時における125~115°Cの間に覆工モデルは収縮するが、すでにモデルに作用している土圧は、地山の流動によって生起したものであるとすれば、この間に土圧の大幅な減少はないと考えられる。したがって、上記の見解にしたがい、これが実験誤差に与える影響は小さいと思われる。一方、これに関連した問題として凍結サイクルの温度上昇時、モデルの軟化と収縮とによって生じたモデルの変形およびその土圧条件と徐冷時応力凍結が行なわれる時期のそれらとが相違する可能

性がある。しかし、モデルの軟化と収縮にともなう地山の流動によって生じたモデルの変形は、また地山によって拘束されるから、事実上この問題は無視できよう。しかも、これらの考察とは別に地下構造物のモデル実験では、土圧の発生機構それ自体から考えて構造物に働く外力のバラツキは避けられないから、ここに取り上げた問題は十分このバラツキにおおわれてしまうものと思われる。

このように、問題点(2)に関しては実験精度の点で多少のあいまいさが残ったが、これは外力がモデルの変形によって影響を受ける光弾性実験の避けられない欠陥である。したがって、この意味も含め、ここでは実験結果を応力凍結が行なわれる温度領域の平均的な外力による測定値と考え、生じたバラツキを一率に実験誤差として処理することにする。(以下次号につづく)

(原稿受付 1966.8.25)

書 評

例 題 土 質 工 学 演 習

鹿島建設技術研究所 鈴木 音 彦 共著
東京農工大学講師 原 田 静 男

実業図書株式会社発行 (A 5) 358 ページ 定価 900 円

ここ2, 3年の間に土質に関する専門書が次々に出版されている。土質を学ぶ者にとっては大変有難いことである。しかしながら現段階では、いやおうなしに完成した学問でない土質工学によって解決を迫られる問題が多々生ずる。したがって、理解しやすく、かつ実際の問題との関連性に主眼を置いた参考書が要求される。

本書は著者らの長年の貴重な経験をもとに、工高、大学を卒業した若い技術者が土木、建築の現場において当面する諸問題の解決策を例題形式でまとめたもので、その豊富な図と詳細な計算例は本書の最も大きな特徴といえよう。多大な労に対して敬意を表したい。

内容としては、まず土質工学とはいかなるものかその多様性を説きさらに土質工学に密接な関連を持つ構造物基礎の考え方から述べられているが、各章は次のように分けられる。

- 第1章 総 説
- 第2章 土の基本的性質
- 第3章 土の透水性と地下水の運動

- 第4章 土の圧密
- 第5章 土のセン断
- 第6章 直立面および斜面の安定
- 第7章 地中の応力分布と地盤の支持力
- 第8章 土 圧
- 第9章 基 礎 工
- 第10章 土の安定処理
- 第11章 土質調査とデータの処理
- 第12章 総 合 問 題

ここに、第9章以下では第8章までの個々の考え方や計算方法をいかに組み合わせたら構造物基礎の設計や施工管理に役立つかを示し、第12章において総合問題として具体例をあげている。

本書は土質工学の最も初歩の問題から取り上げているので、現場技術者のみならず在学中の方々にも講義を補う演習書として適当であろう。ご一読をお勧めする次第である。(森)