

土木研究所資料

トンネル二次覆工コンクリートの初期材令に おけるひびわれに関する調査報告書

平成2年3月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

「Copyright © (1990) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

トンネル二次覆工コンクリートの初期材令に おけるひびわれに関する調査報告書

トンネル研究室	前室長	水谷 敏則
〃	室長	猪熊 明
〃	前研究員	大久保雅憲
〃	研究員	稲野 茂
前トンネル研究室		平岡 弘志

要 旨

吹付けコンクリートやロックボルト等を用いた山岳トンネル工法において、場所打ちコンクリートで形成する二次覆工コンクリートに、打設後数日程度の初期材令でクラックが発生する問題がある。本調査研究では、このひびわれの発生原因として、コンクリート打設後の急激な温度変化等による伸縮が、二次覆工背面で拘束を受けることにより発生する応力であることを示し、ひびわれの防止方法として、背面における防水シート等の緩衝材の施工や、二次覆工コンクリート表面の養生管理が効果的であることを示した。

キーワード：トンネル，二次覆工コンクリート，ひびわれ，温度応力

まえがき

現在のわが国の山岳トンネル工法では、吹付けコンクリートとロックボルトを主たる支保工とするNATMと呼ばれる工法が主流となっており、建設省としてもこの工法を昭和62年度から、従来の山岳トンネル工法の標準工法であった矢板工法と呼ばれる鋼製支保工と矢板類を用いる工法に代わり、山岳トンネル工法の標準工法として採用している。この工法では、吹付けコンクリート等の支保部材を施工した後、その内空側に二次覆工と呼ばれる場所打ちコンクリートを形成するのが通例である。しかし、この二次覆工に打設後数日後から数週間にかけて、表面にひびわれが発生する問題がある。このひびわれは、微小なものがほとんどであり、これにより即座にトンネルの構造に大きな欠陥が生ずることはないと判断されるが、トンネルの供用前あるいは供用直後から、トンネルとして利用者の目につく二次覆工コンクリートの表面にひびわれが発生していることは美観上決して望ましいものではない。また長期的にこのひびわれ内に水が入り凍結融解を繰り返すことにより、トンネルの構造的な安全率の低下を招く可能性もあると考えられ、このひびわれに対し、何らかの対処が必要であると考えられる。

このトンネル工法では、地山を掘削後、吹付けコンクリートやロックボルト、鋼製支保工等の支保部材を施工した後、地山の内空変位等を計測し、地山の変位が安定するのを確認した後に、セメントと呼ばれる型枠等を用いて場所打ちコンクリートにより二次覆工を形成することを基本としている。従って、一般にこの二次覆工に発生するひびわれの原因には、地圧等の外的な荷重の増加に伴うものであるとは考えられず、なんらかの要因による二次覆工コンクリートの収縮が、背面の吹付けコンクリートとの接触部分等から拘束を受けることにより発生する応力であると考えられている。この収縮の原因にはコンクリートの硬化熱による急激な温度変化に伴う温度収縮や二次覆工コンクリート表面からの乾燥収縮等が考えられている。一方、このひびわれ対策として、道路トンネルの場合には、一般に防水シートを吹付けコンクリートと二次覆工コンクリートの間に施工することにより、二次覆工の背面からの拘束力を低減させる方法がとられており、またひびわれ防止に効果的であることが報告されている。

本研究では、この二次覆工コンクリートの表面のひびわれについて、その発生機構と対策方法について、模型実験、数値解析等により検討を加えたものである。

目 次

1. 現地実態調査	1
1.1 調査目的	1
1.2 調査概要	1
1.3 調査結果	1
2. 背面拘束模型実験	5
2.1 実験目的	5
2.2 実験方法	5
2.3 実験結果	5
2.4 まとめ	6
3. FEMによる温度応力数値解析	9
3.1 概 説	9
3.2 平板モデル	9
3.3 アーチモデル	10
3.4 地山を含めたモデル	12
3.5 まとめ	12
4. 模型供試体による歪の計測	21
4.1 概 説	21
4.2 実験方法	21
4.3 実験結果	21
4.4 まとめ	22
5. さいごに	26

1. 現地実態調査

1.1 調査目的

トンネルの二次覆工コンクリートの、打設後初期に発生するひびわれの発生に影響を与える要因について検討を加えるために、道路トンネルの施工現場において二次覆工コンクリートの現地実態調査を行った。

本研究対象とする二次覆工コンクリートは、吹付けコンクリート等の支保部材を施工し、内空変位等の地山の変位が収束するのを確認した後に施工するので、地圧等の荷重によるものとは考えにくく、発生原因として、コンクリートの打設後の急激な温度変化や乾燥収縮等による収縮歪が、二次覆工コンクリート背面の吹付けコンクリートにより拘束されることによって発生する引張応力であるといわれている。このひびわれ防止策のひとつとして、防水シート等の緩衝材を覆工背面と吹付けコンクリートとの間に施工することが効果的であると報告されている。そこで、防水シートを施工した場合の二次覆工に発生する温度および歪の実態の把握、防水シートの有効性の確認、クラック発生機構を知る基礎データを得る目的で実態調査を実施した。調査では打設直後からの二次覆工コンクリートの温度と歪の挙動を調べることに由った。

1.2 調査概要

調査は実際の施工中の道路トンネルにおいて実施した。二次覆工コンクリートと吹付けコンクリートの間に0.4mmの防水シートと5mmの織布の積層シートが全面に施されている。二次覆工厚は30cmであり、高炉セメントB種を使用している。打設は、打設長9mの全断面スライドセントルを用いた吹上方式によっており、締め固めは棒状バイブレータを用いている。脱型は打設完了後約20時間である。

図1-1に測定を行った断面内の測定位置概要を示す。各測定において、温度は厚さ方向に3点、歪は厚さ中心においてトンネル軸方向とアーチ方向の2成分を測定した。測定方法は、歪はコンクリート埋込型の小型歪型を用い、温度は銅コンスタンタン熱電対温度計を用いて行った。

1.3 調査結果

図1-2に天端部厚さ中心位置(図1-1中のA点)における温度の経日変化を示す。打設温度は30℃であり、約13時間後に最高温度38℃に達し、その後徐々に降下を始め、1週間程度ではほぼ気温と等しくなった。なお、測定期間中の気温は25℃程度であった。図1-3に同じくA点における温度と見かけ歪(アーチ方向とトンネル軸方向)の関係を示す。見かけ歪とは、実際にコンクリートに発生している歪として歪型により直接計測される歪であり、応力に関与するのは、この見かけ歪から温度歪を差し引いた歪である。図中の式は、比較的直線とみなせる範囲毎に一次回帰により求めたものであり、傾きは見かけの線膨張係数に相当する。温度上昇中の傾きは小さく、下降を始めると大きくなり、その値は一般的なコンクリートの線膨張係数(10 μ /℃)とほぼ等しい。材令4日以降ではさらに大きな傾きとなっており、この原因には、乾燥収縮等が考えられる。図1-4にこれらの傾きから求めた二次覆工コンクリート背面の外部拘束の程度を示す拘束度の分布を示す。

拘束度は次に示す式によって算出される。

$$\text{拘束度} : K = 1 - \epsilon / \alpha \Delta T$$

(ϵ : 見かけ歪, α : コンクリートの線膨張係数, ΔT : 温度変化量)

拘束度は各測定点ともに同様な傾向がみられ、温度上昇中はある程度の拘束を受けているものの温度が降下するに従い、拘束度はほとんど0になり、二次覆工は自由に変形できる状態となっている。図1-5に測定した温度と歪から求めた天端部の応力の経日変化を示す。この際、弾性係数は $1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ (一定)、ポアソン比は $1/6$ と設定した。また、打設直後の温度上昇によるコンクリートの膨張は、非常に若材令であることから考慮していない。発生する引っ張り応力は 1 kgf/cm^2 未満であり、コンクリートの引張強度よりも小さく、引張クラックは発生しないと推測され、これは実際にもクラックは発生していなかったこととも一致する。なお、経日とともに圧縮応力が微増しているが、これは前述の若材令での収縮の影響と考えられる。

以上の現場計測の結果より、この現場測定において用いられている吹付けコンクリート (一次覆工) と二次覆工コンクリートの間に施工される防水シートは、二次覆工のクラック防止として効果があるものと考えられる。

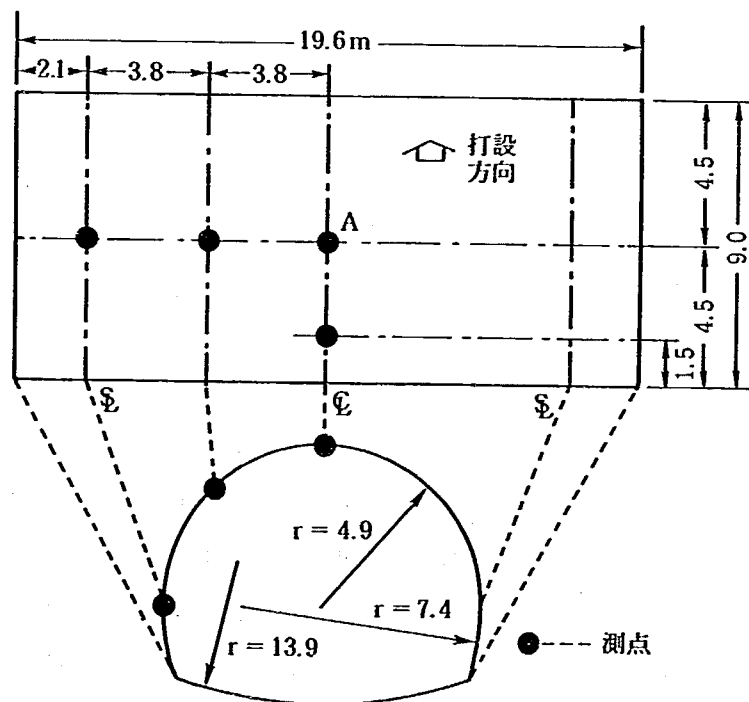


図1-1 測定位置概要

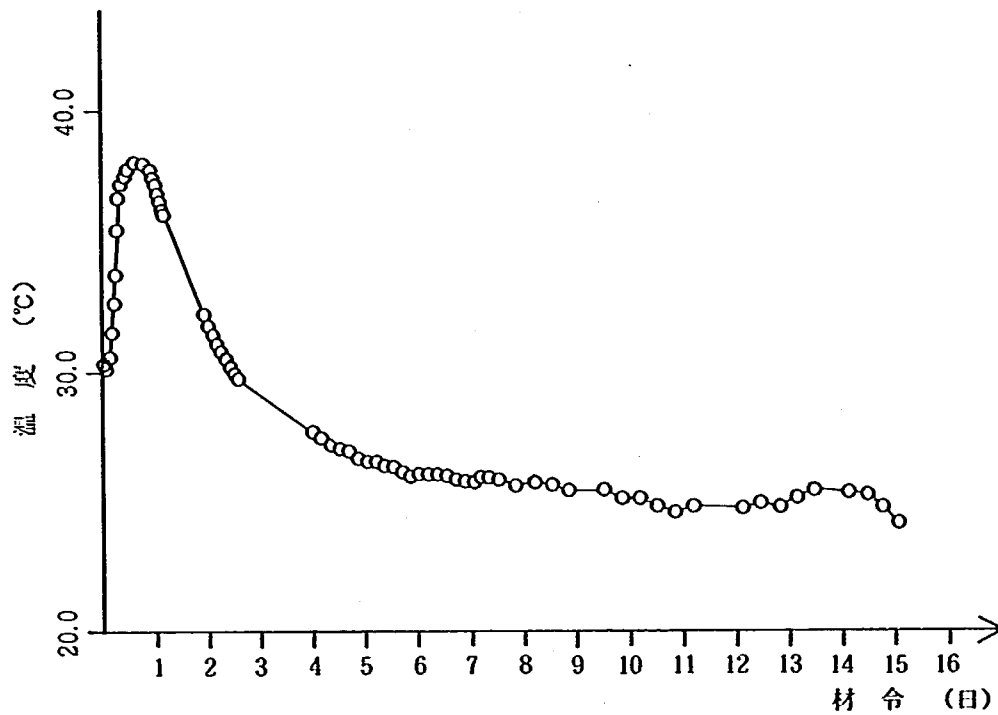


図1-2 コンクリート温度の経日変化 (A点)

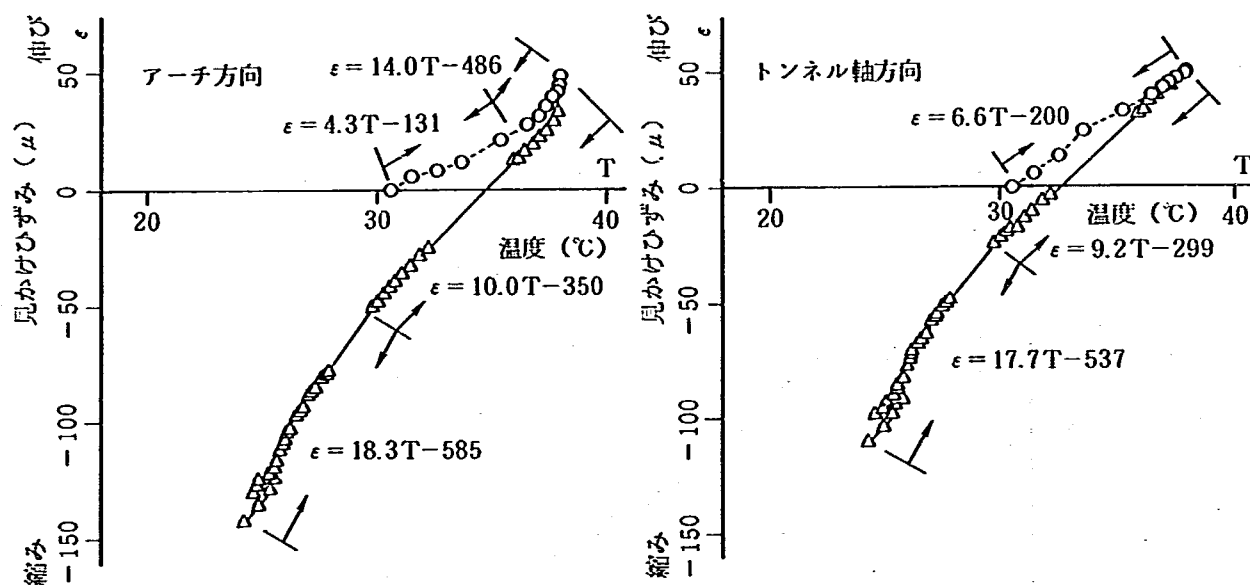


図1-3 温度と見かけひずみの関係 (A点)

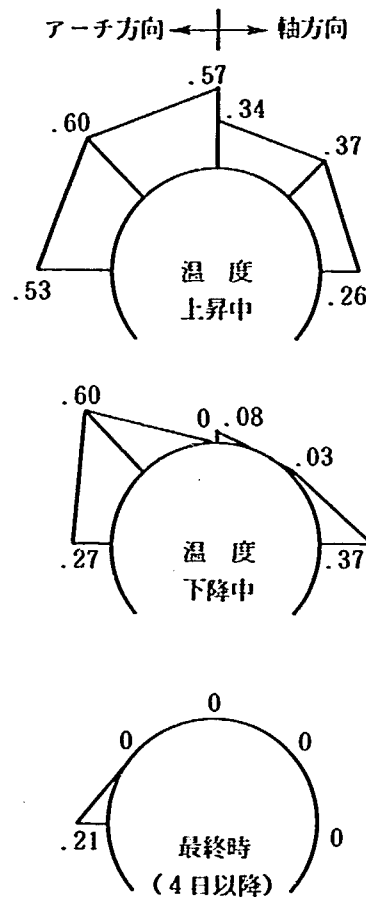


図1-4 拘束度の分布

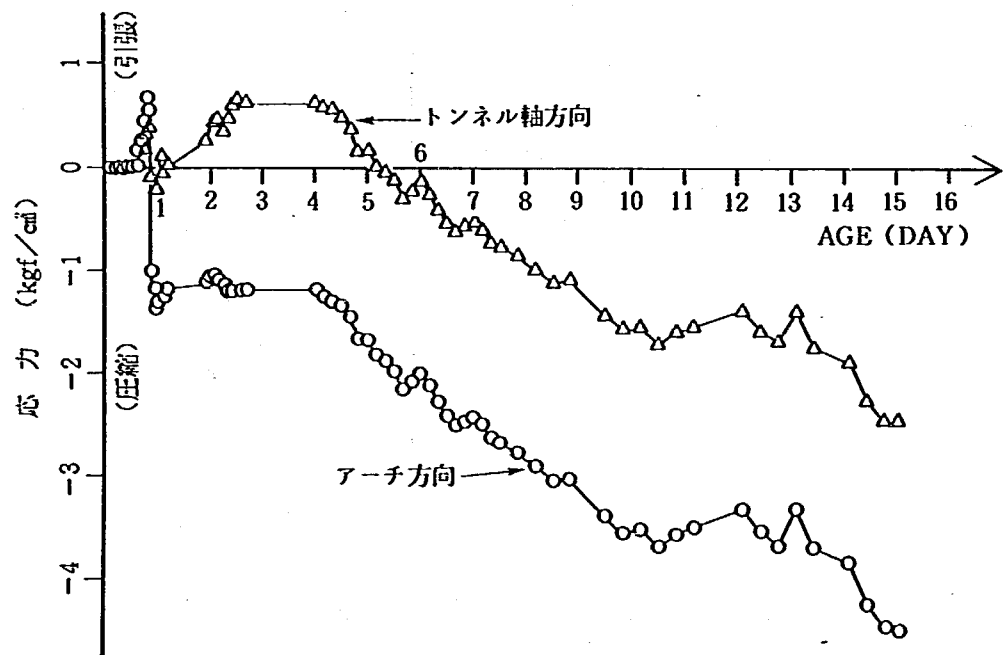


図1-5 応力の経日変化

2. 背面拘束模型実験

2.1 実験目的

前章では、現場計測の結果より、二次覆工コンクリートに発生するひびわれの防止方法として、二次覆工背面に防水シート等の緩衝材を施工することが効果的であることを示した。これは緩衝材により、二次覆工コンクリートの背面からの拘束力が低減されることによるものである。ここでは、この緩衝材による二次覆工コンクリート背面の拘束力の緩衝効果を定量的に把握するために、模型供試体による実験を行い、実験結果より二次覆工コンクリート背面の拘束状態を再現するモデルとして線形パネモデルを考え、このパネの力学的特性を求めた。

2.2 実験方法

二次覆工コンクリート内の応力は、温度変化等により発生する内部歪によって生ずるものである。しかし、背面の拘束という点にのみ着目すると、荷重と変位の関係を知ればよいことになる。そこで本実験では、一面せん断試験に準じた方法で行うこととした。

模型供試体の概要を図2-1に示す。供試体は、吹付けコンクリートに相当するモルタル(36×40×10cm)を打設し、硬化後に表面に防水シート等の緩衝材を挟んで二次覆工コンクリートに相当するモルタルを打設することにより作成した。実験のパラメータは、緩衝材の種類と吹付けコンクリートを想定したモルタルの打設面の凹凸形状とした。緩衝材の種類は、防水シート0.2mm(S2)、不織布3.0mm(H)、防水シート0.4mmと不織布3mmの積層シート(SH)の3種類とし、打設面の凹凸形状は表2-1に示すように凹凸の深さと間隔の組合せにより4種類とした。

実験時におけるモルタルの圧縮強度は、下側で約340kgf/cm²、上側で約220kgf/cm²(実際の二次覆工コンクリートの10日強度程度)である。なお、緩衝材のたわみ性のため、上側の凹凸は下側の凹凸(型枠で作成)よりもかなりなめらかとなっていた。

荷重方法は、水平方向の荷重に先立ち、鉛直方向に約0.28kgf/cm²の初期荷重(実際の二次覆工コンクリートの打設圧にほぼ相当)を油圧ジャッキにより行い、このジャッキの油圧を止めた状態で、水平方向の荷重を行った。これは、二次覆工コンクリートの上面がローラー拘束に近い状態となることを想定して行ったものである。

2.3 実験結果

水平荷重と上下モルタルのすべり量の関係の代表例を図2-2に示す。他のケースも同様な傾向を示しており、荷重直後は滑りは生じず荷重のみ増加し、ある荷重に達すると滑り始めるという結果であった。ここで、荷重と滑り量の関係を直線で近似し、滑り始める荷重を初期のせん断応力、滑り始めた後の傾きをパネ剛性として単位接触面積に換算して表2-2に示す。なお、緩衝材が(H)の場合には、パネ剛性が他のケースと比較してやや大きいのは、緩衝材として不織布のみであるため、上のモルタルが下のモルタルと付着していたためである。

ここで、得られた初期せん断応力とパネ剛性は、実際の二次覆工コンクリートではどの程度の拘束に

なっているのかを知る手段として、二次覆工コンクリートの応力の試算を行ってみた。試算に用いたモデルを図2-3に示す。解析に用いた数値は材令1週間程度における値を仮定しており、この値のもとで表2-2に示す初期せん断応力とバネ剛性を用いて、二次覆工コンクリートの引張応力を求めたものが図2-4である。なお、この条件で二次覆工コンクリートが背面で完全に拘束されているならば、引張応力は 40 kgf/cm^2 となる。S2とHでは形状Dにおいて引張強度を超えており、緩衝材として不適当であると判断される。一方、通常現場で用いられているSHでは、全てのケースにおいて引張応力に余裕があり、十分な緩衝効果が得られていると考えられる。

2.4 まとめ

二次覆工コンクリートの背面の挙動をバネでモデル化し、このバネの力学的特性を実験により明らかにした。そして、二次覆工コンクリートに発生する応力の試算を行い、防水シート等の緩衝材による応力の緩衝効果が定量的に把握できた。

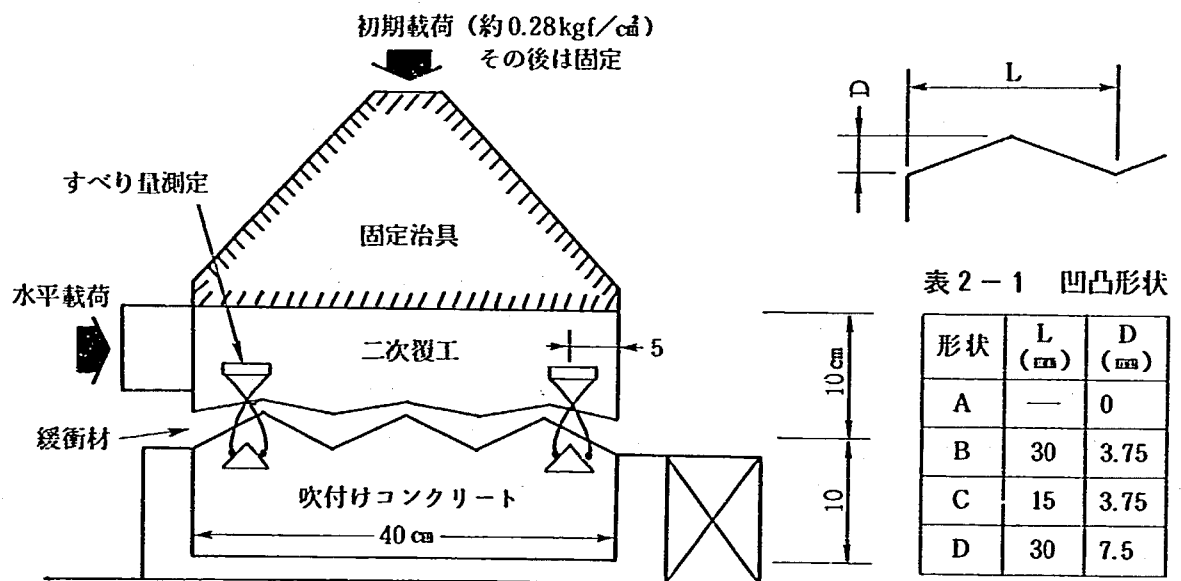


図2-1 実験概要

表 2-2 初期せん断力 τ_0 とバネ係数

シート	形状	τ_0 kgf/cm ²	k kgf/cm/cm
SH	A	0.12	0.11
		0.10	0.01
	B	0.18	0.52
		0.09	0.27
	C	0.21	0.31
		0.08	0.67
S2	A	0.10	0.55
		0.16	1.29
	B	0.15	0.15
		0.15	0.0
	C	0.39	0.0
		0.35	0.72
H	A	0.26	1.20
		0.32	0.67
	B	0.60	2.60
		0.54	1.98
	C	0.25	2.28
		0.17	1.91
	B	0.31	3.92
		0.29	1.23
	C	0.30	1.84
		0.51	1.11
	D	0.66	3.51
		0.41	3.14

上下段は、各ケース毎に2回の実験を行った結果である。

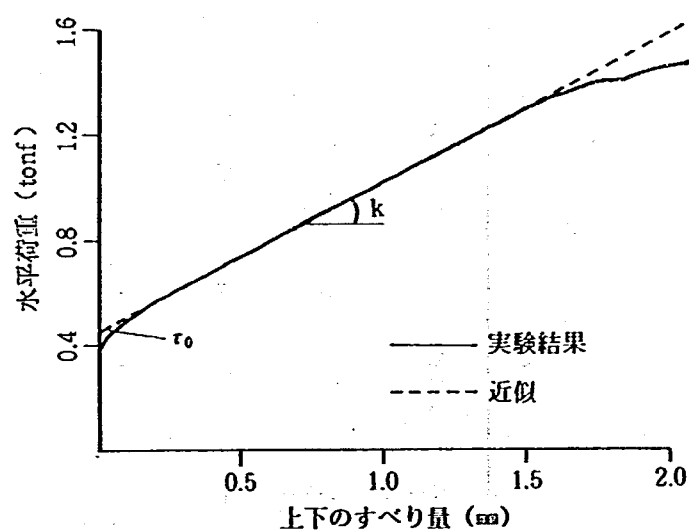
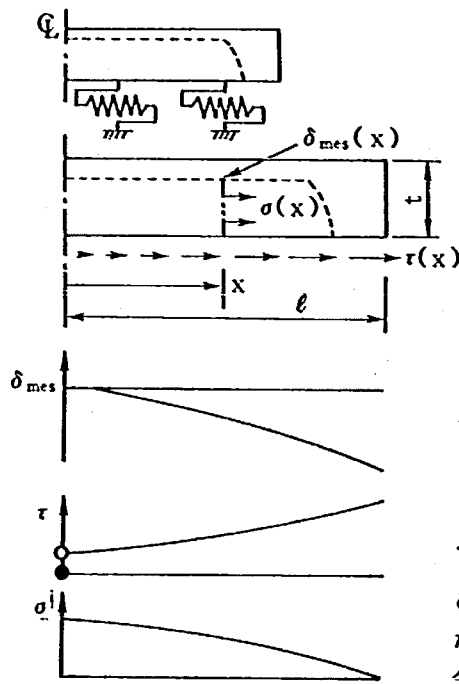


図 2-2 水平荷重と上下のすべり量の関係
(3 mm 不織布, 形状Bの例)



$$\begin{cases} \tau(x) = \tau_0 - k \cdot \delta_{mes}(x) \\ \text{ただし } \delta_{mes}(x) = 0 \\ \text{のとき } \tau(x) = 0 \\ \tau(x) = -t \cdot \frac{d}{dx} \sigma(x) \\ \sigma(x) = E \cdot \frac{d}{dx} \delta_{eff}(x) \\ \delta_{mes}(x) = \alpha \cdot \Delta T \cdot x + \delta_{eff}(x) \end{cases}$$

ここに、
 τ : せん断応力 (kgf/cm²)
 σ : 覆工内応力 (kgf/cm²)
 δ_{mes} : 見かけの変位 (cm)
 δ_{eff} : 応力に寄与する変位 (cm)
 E : 弾性係数 ($=2.0 \times 10^5$ kgf/cm²)
 t : 覆工厚さ (=30 cm)
 ℓ : 覆工の長さの1/2 (=1,000 cm)
 α : 線膨張係数 ($=10^{-5}$ 1/°C)
 ΔT : 温度変化 ($=-20^\circ\text{C}$)
 τ_0 : 初期のせん断応力 (kgf/cm²)
 k : バネ係数 (kgf/cm/cm², 図-2, 表-1 参照)

$$\therefore \sigma(x) = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \left(\frac{\cosh(Ax)}{\cosh(A\ell)} - 1 \right) + \frac{\tau_0}{A \cdot t} \cdot \frac{\sinh\{A(\ell-x)\}}{\cosh(A\ell)}, \quad A = \sqrt{\frac{k}{E \cdot t}}$$

この場合の δ_{mes} , τ , σ の分布の概要を、左図に示す。

ただし、上式は、 $\sigma(0) \leq -\alpha \cdot \Delta T \cdot E$ を満足する場合の解であり、今回の実験結果はすべてこの範囲であった。

図2-3 試算に用いたモデル

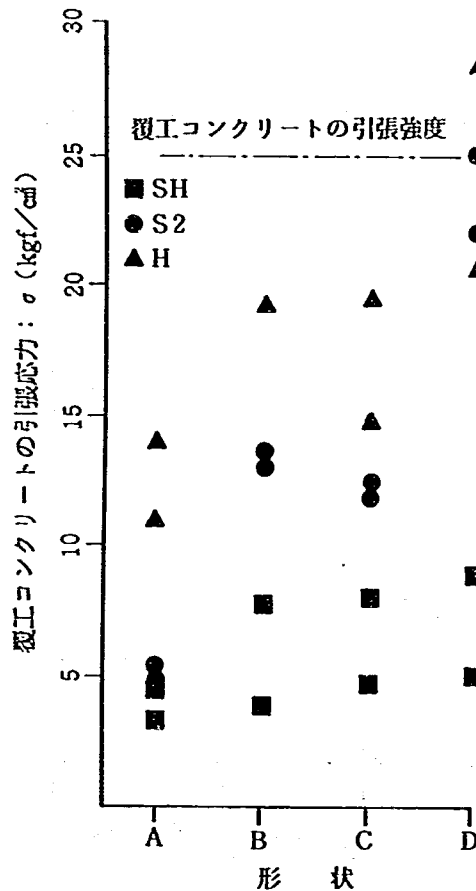


図2-4 覆工コンクリートに発生する応力

3. FEMによる温度応力数値解析

3.1 概 説

ここではFEMにより、二次覆工コンクリートの打設後の温度変化による温度応力の解析を行った。解析では、二次覆工コンクリートの温度が一様に 10°C 低下したものとし、また、二次覆工背面には防水シート等の緩衝材があることを想定して、背面の拘束条件はせん断バネと垂直バネにより拘束を受けている状態とした。コンクリートの力学的諸定数については、一つの解析の間は温度変化等の影響を受けずに一定として行った。

モデルの形状として、最も単純な平板モデル、実際のトンネルと同様の形状のアーチモデル、および周辺の地山の影響を考慮したアーチモデルの3種類の形状について解析を行った。解析の際には背面の拘束バネのバネ剛性とコンクリートの弾性係数を変化させて行った。

3.2 平板モデル

3.2.1 計算方法

図3-1に要素分割図を示す。一般に二次覆工コンクリートのトンネル軸方向の打設長は9~12mであり、これは、その中心を不動点として考え、その半分をモデル化したものである。背面は図に示すように直バネとせん断バネを付加しており、吹付けコンクリートは剛体としている。

トンネルアーチ方向は平面歪状態を仮定しており、覆工コンクリートの物性値は、以下の通りである。

弾 性 係 数： $E = 1.0 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$

ポアソン比： $\nu = 0.2$

線膨張係数： $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ (1/}^{\circ}\text{C)}$

温度変化は、覆工コンクリート全体が一様に 10°C 低下するものとしている。この状態でバネ剛性をパラメータとして計算を行った。

3.2.2 計算結果

1) 二次覆工の応力

図3-2に、バネ剛性と応力の関係を示す。この際、バネのせん断剛性と垂直剛性は同じ値としており、応力は図3-1に斜線で示す左端の要素（実際には二次覆工コンクリートの中心）の値であり、正が引っ張りである。バネ剛性が大きくなるに従い、発生する応力も大きくなり、バネ剛性が 100 kgf/cm^2 程度以上で応力が一定になる傾向を示している。断面内の分布では、バネ剛性が 3 kgf/cm^2 程度以上ではほぼ一様となっているが、それ以上では下側に比べ上側の応力は小さく、バネ剛性が 0.04 kgf/cm^2 では上側は圧縮となっている。

図3-3は垂直剛性 16 kgf/cm^2 においてせん断剛性を変化させた結果であり、図3-4は垂直剛性 0.2 kgf/cm^2 において同じくせん断剛性を変化させた結果であり、図3-5はせん断剛性 16 kgf/cm^2 において垂直剛性を変化させた結果である。まず、断面内の応力分布を見ると、せん断剛性の影響は図3

－3と図3－4からはほとんど無いといえ、図3－5から、垂直剛性の影響が大きいことが分かる。次に、発生する応力の値について引っ張り応力の大きい下部についてみると、図3－5より垂直剛性の影響はそれほど小さくなく、図3－3と図3－4からせん断剛性の影響が大きいことが分かる。

次に覆工の長さ方向の応力分布の1例（垂直，せん断バネ剛性16 kgf/cm）を図3－6に示す。端部に向かうに従い応力は減少している。また，中心から2 m程度までは断面内の応力分布はほぼ一様であるが，それより端部では上部になるほど応力は小さくなる分布である。この一様である部分の長さは，垂直剛性が大きくなるほど長くなる傾向にある。

2) 二次覆工の歪

ここでは，二次覆工コンクリートの歪について検討を加える。歪については，背面からの拘束を受けている程度を示す指標として，次式に示す拘束度に変換して検討を行った。

$$\text{拘束度：} K = 1 - \epsilon / \alpha \Delta T$$

（ ϵ ：見かけの歪， α ：線膨張係数， ΔT ：温度変化量）

これは覆工コンクリートの外的要因により変形が拘束される程度を示し，平面応力状態においては，拘束の全く無い自由に変形できる状態が0であり，完全に拘束を受けて全く変形できない状態が1となる。

図3－7に拘束度とバネ剛性と覆工コンクリートの弾性係数の比の関係を示す。この図は拘束度の最も大きい図3－1に斜線で示した最下部の要素についてのものである。また，覆工の弾性係数も変化させている。バネ剛性と弾性係数の比が $300 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 以上では，拘束度は約1で一定となり，完全に拘束された状態となる。また比が小さくなるにつれ拘束度は減少し，比が $0.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 以下で拘束度は約－0.2で一定となっている。拘束度が負になっているのは，この計算は平面歪状態を仮定していることによるものである。また，この図から拘束度はバネ剛性と弾性係数の比に支配されることが理解できる。なお，応力に関しては，歪に弾性係数を乗じて求めるため，比のみでなく弾性係数そのものにも支配される。

3) 結 論

- ・せん断方向のバネ剛性は，応力の値に大きく影響し，断面内の応力分布にはほとんど影響を与えない。
- ・垂直方向のバネ剛性は，断面内の応力分布に大きく影響する。
- ・歪に関しては，バネ剛性と覆工の弾性係数の比に支配される。

3.3 アーチモデル

3.3.1 計算方法

図3－8に要素分割図を示す。トンネル横断面の対称を考慮したモデルであり，背面は平板モデルと同様に直バネとせん断バネを付加している。なお，覆工の脚部にもバネを付加している。

トンネル軸方向には平面歪状態を仮定しており，覆工の物性値，温度変化は平板モデルの場合と全く同じである。

3.3.2 計算結果

1) 脚部のバネ剛性の影響

覆工背面のバネ剛性の影響を調べるに先立ち、脚部のバネ剛性の影響について検討を加えた。これは、覆工背面での防水シート等の緩衝材の種類や有無により発生する拘束状態と脚部の拘束状態は同列に扱えないことによるものである。

覆工背面のバネ剛性 16 kgf/cm^3 において、脚部のバネ剛性を $10^{-10} \text{ kgf/cm}^3$ (ほぼ自由状態)、背面と同じ、および 10^{10} kgf/cm^3 (ほぼ完全拘束状態) の3種類について計算を行った。図3-9に内空側の要素について最大主応力(引張)の周方向分布として示す。脚部のバネ剛性の影響は、脚部からSL部にかけて大きく現れるが、天端部ではそれほど大きくない。一般に実際の二次覆工コンクリートにおいてひびわれが発生して問題となるのは天端部であることから、脚部付近の応力は天端付近の応力よりは小さいと考えられる。これらのことから、脚部の境界条件は完全拘束までには至っていないと思われる。以後の計算では背面のバネ剛性と同じとすることとした。

2) 二次覆工の応力

図3-10にバネ剛性と応力の関係を示す。この際、バネのせん断剛性と垂直剛性は同じ値としており、応力は図3-8に斜線で示す天端部の要素のx軸方向の値である。

図3-11は垂直剛性 16 kgf/cm^3 においてせん断剛性を变化させた結果であり、図3-12はせん断剛性 16 kgf/cm^3 において垂直剛性を变化させた結果である。応力は天端部の要素の値である。覆工に発生する応力は、せん断剛性と垂直剛性の両者の影響を受け、後者の方が与える影響は大きい。断面内の応力分布は、せん断剛性の影響はほとんど受けないが、垂直剛性の影響を受け、垂直剛性が小さい間は地山側の方が内空側より応力は大きい、大きくなるに従い逆転して内空側の方が大きくなっている。この場合には、拘束されるのは背面の地山側であるにもかかわらず、ひびわれが発生するのは内空側からになる。

次に覆工の周方向の応力分布の一例(バネ剛性 16 kgf/cm^3)を図3-13に示す。端部に向かうに従い、応力が減少している点は平板モデルと同じであるが、SL部において、地山側が内空側より応力が大きくなるという現象がみられる。

3) 二次覆工の歪

図3-14に拘束度と、バネ剛性と覆工弾性係数の比の関係を示す。この図は拘束度のもっとも大きい図3-8に斜線で示した天端部の内空側の要素についてのものである。また図3-7に示した平板のものも併記した。結果は平板モデルとほとんど同じ傾向である。但し、同じバネ剛性の場合、アーチ形状の方が拘束度は若干大きい。

4) 結 論

- ・脚部の境界条件は、完全拘束であっても、また自由端であっても天端部の応力にはほとんど影響しない。ただし、SL部から脚部にかけての応力は、完全拘束の場合にはかなり影響を受ける。
- ・覆工に発生する応力は、せん断剛性と垂直剛性両者の影響を受け、後者の方がその影響は大きい。
- ・断面内の応力分布は、せん断剛性の影響はほとんど受けないが、垂直剛性の影響を受ける。
- ・垂直剛性がある程度大きい場合、ひびわれは内空側から発生する危険性がある。

- ・同じバネ剛性であっても、平板モデルよりもアーチモデルの方が拘束度は若干大きくなる。

3.4 地山を含めたモデル

3.4.1 計算条件

図3-15に、要素分割図を示す。前節のアーチモデルに地山を2 m厚で付加したモデルである。地山の境界条件は、左側面はローラーとし、他の面は固定である。覆工背面及び脚部のバネ剛性を 32 kgf/cm とし、パラメータとして地山の弾性係数及び地山の温度条件を変化させた。覆工に関する条件は前節と同じである。

3.4.2 計算結果

1) 地山の弾性係数

図3-16に、地山の弾性係数と拘束度の関係を示す。この際、地山には温度変化を与えていない。地山の弾性係数の増加にともない拘束度も大きくなり、地山の弾性係数 10^5 kgf/cm 程度ではほぼ一定となる。

2) 地山の温度条件

図3-17に、地山の温度条件と拘束度（天端部内空側の要素）の関係を示す。覆工の温度は 10°C 低下させており、地山の温度も低下させると拘束度は大きくなり、逆に地山の温度を上昇させると拘束度は小さくなる。

3) 結 論

- ・拘束度は地山の弾性係数の影響を受ける。
- ・拘束度は地山の温度上昇の影響を受ける。

3.5 まとめ

覆工背面の拘束をバネでモデル化し、覆工が一様に温度低下するといった非常に単純な状態を仮定して、バネ剛性の影響、形状の影響、地山の影響を数値解析により把握した。

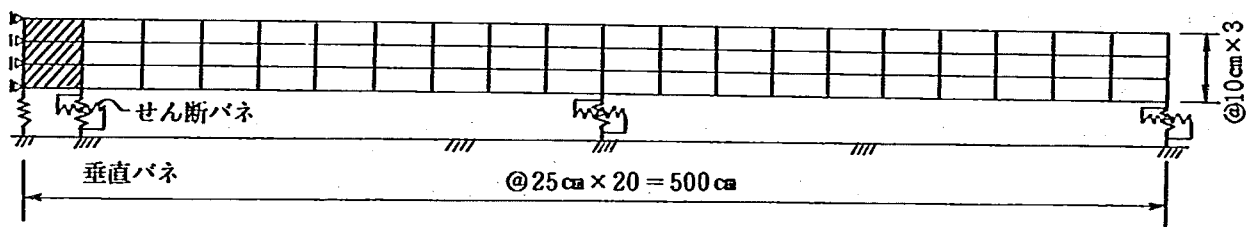


図3-1 要素分割図

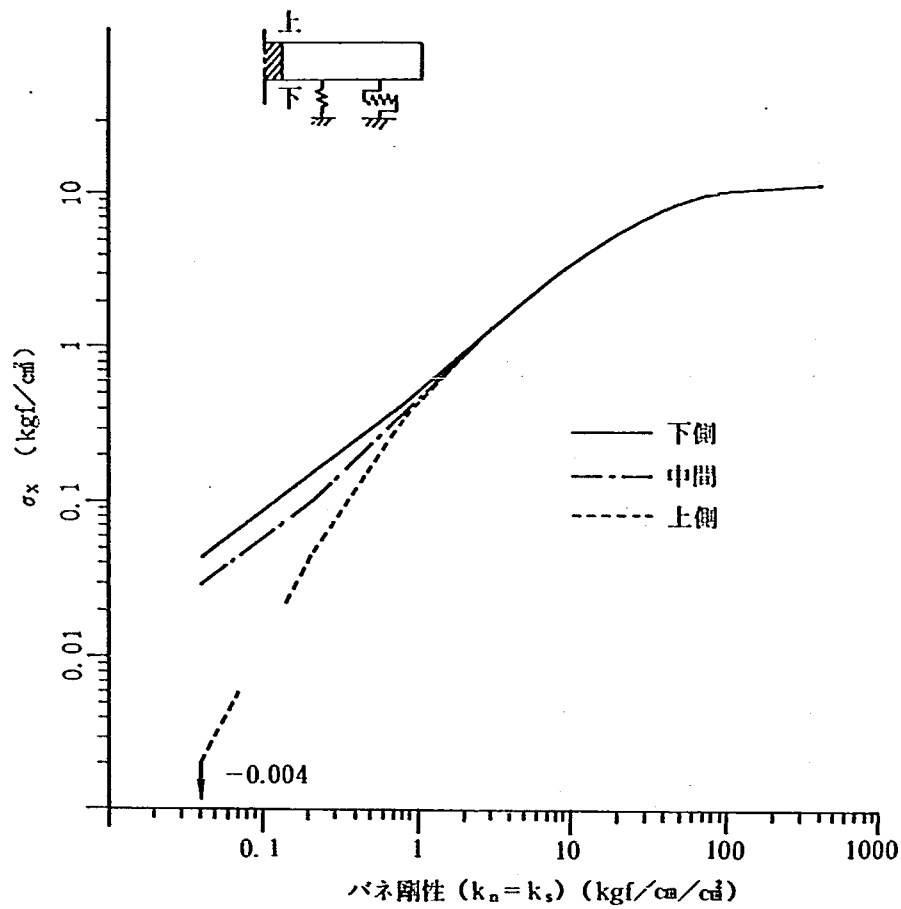


図 3-2 バネ剛性と応力の関係

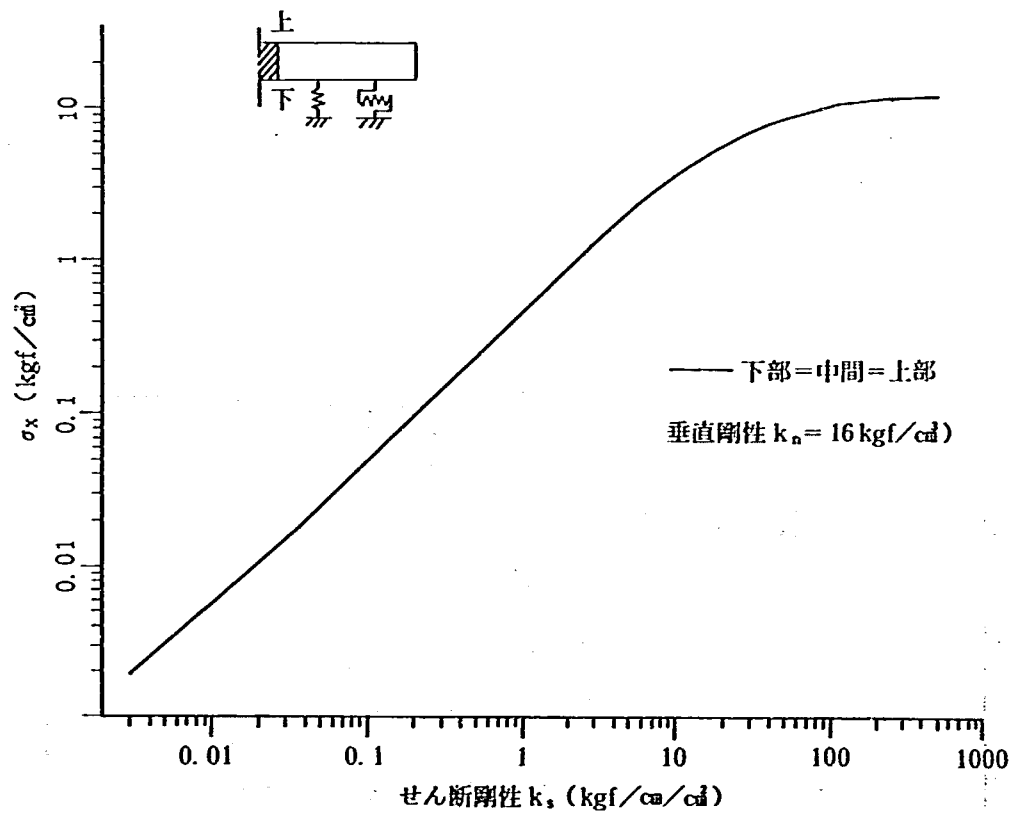


図 3-3 せん断剛性の影響 ($k_n = 16 \text{ kgf/cm}^2$)

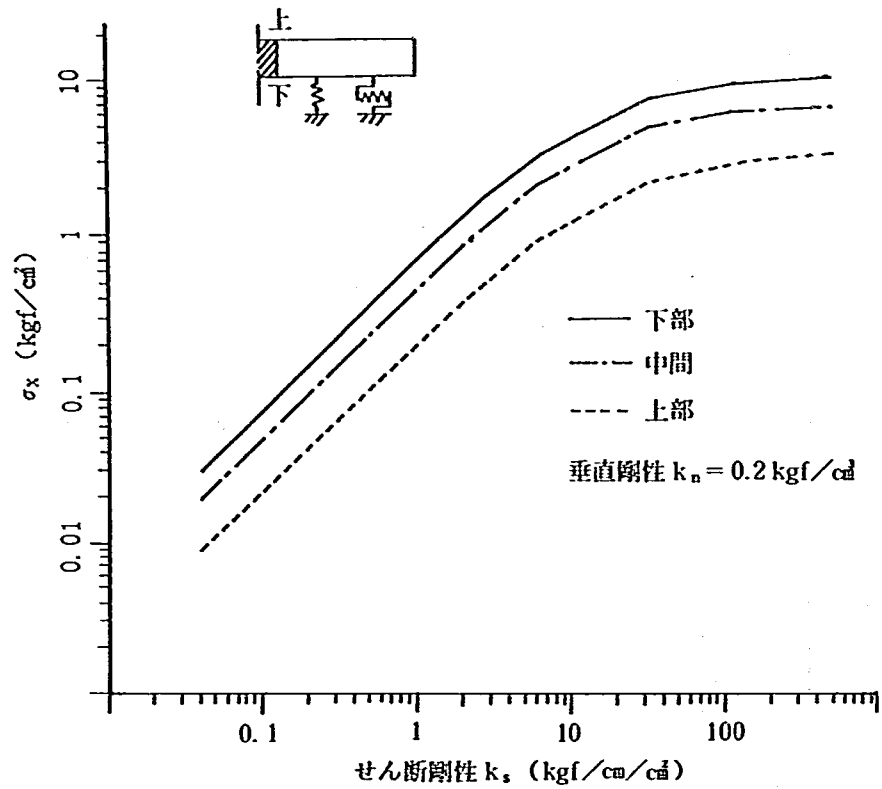


図3-4 せん断剛性の影響 ($k_n = 0.2$ kgf/cm/cm²)

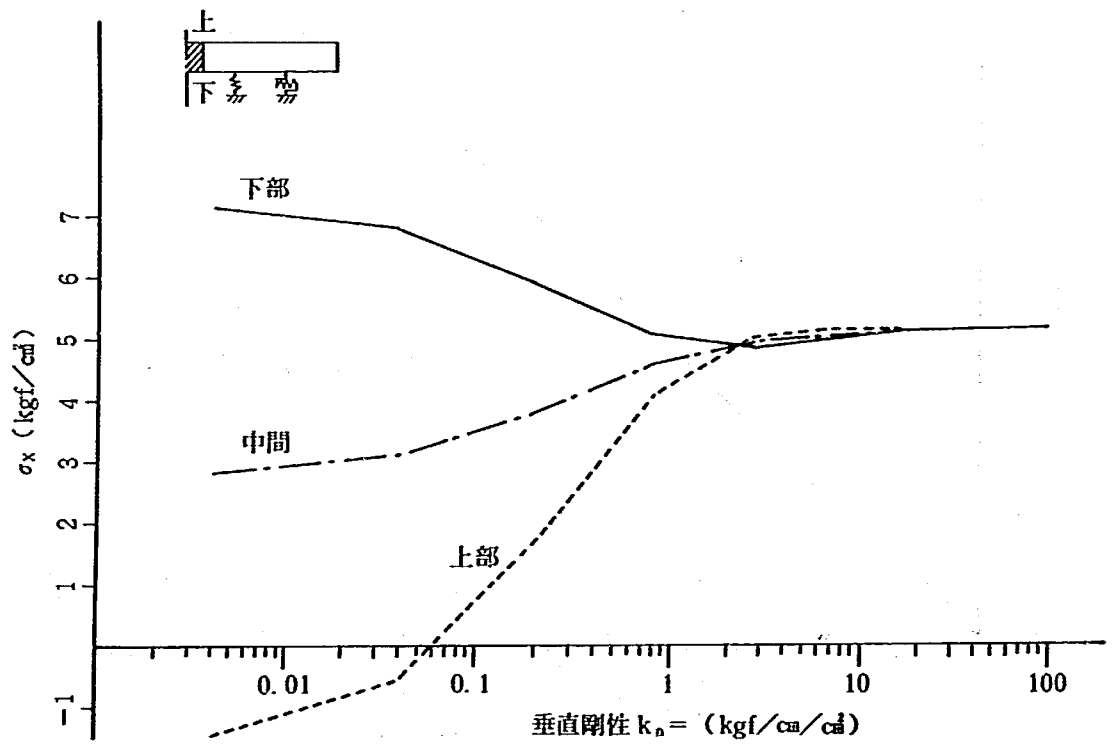


図3-5 垂直剛性の影響 (せん断剛性 $k_s = 16$ kgf/cm/cm²)

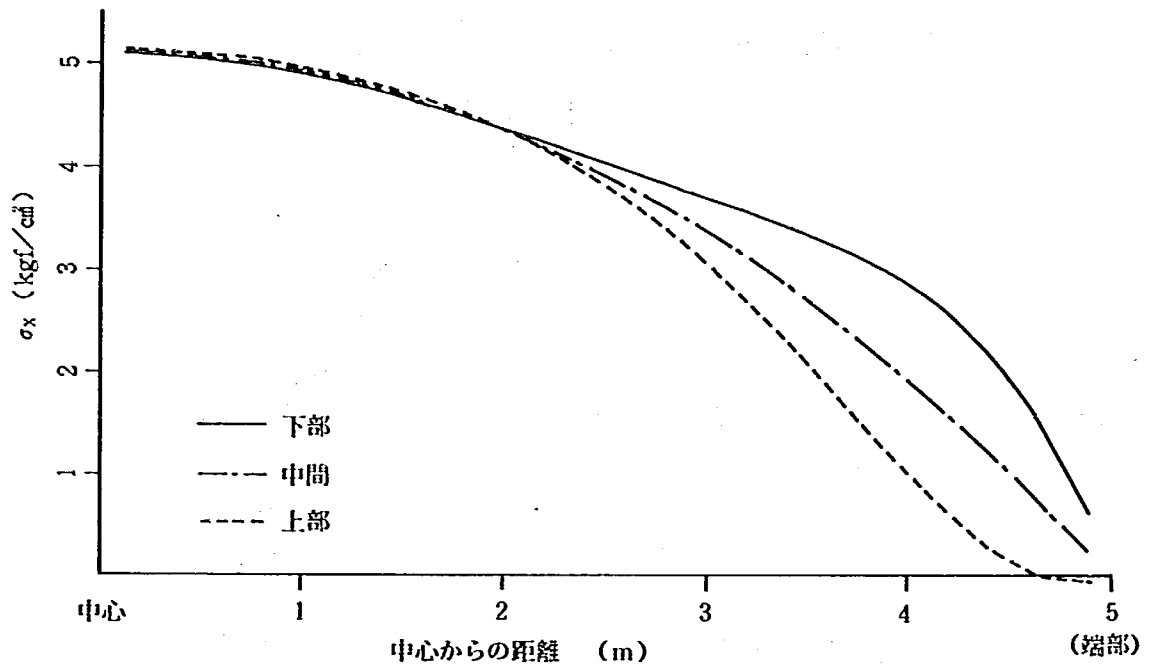


図3-6 覆工の長さ方向の応力分布 ($k_s = k_n = 16 \text{ kgf/cm/cm}^2$)

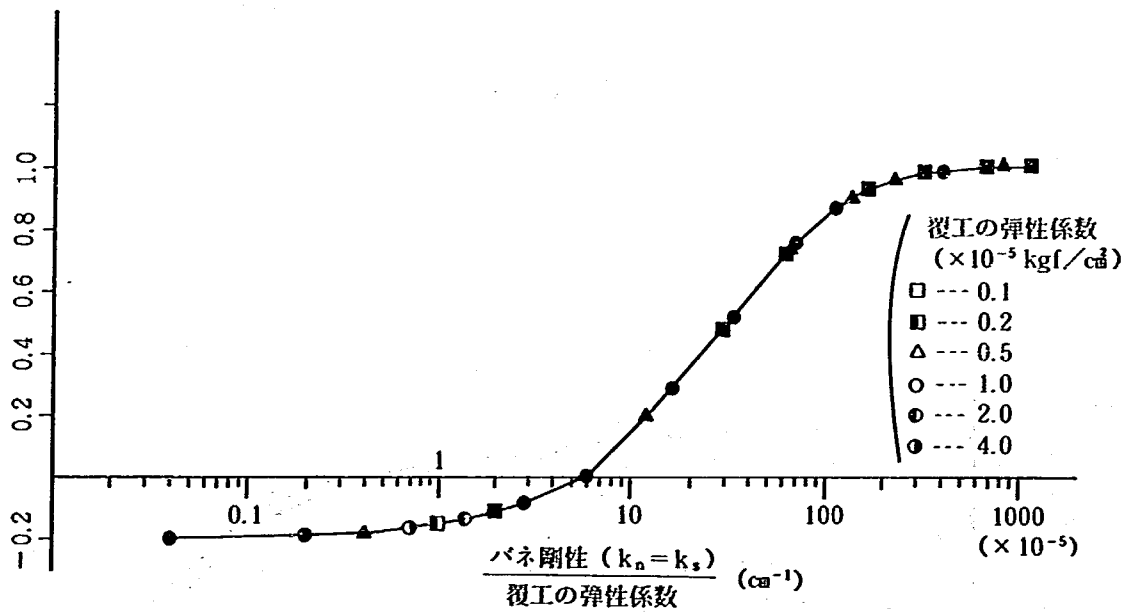


図3-7 拘束度とバネ剛性と覆工の弾性係数の比の関係

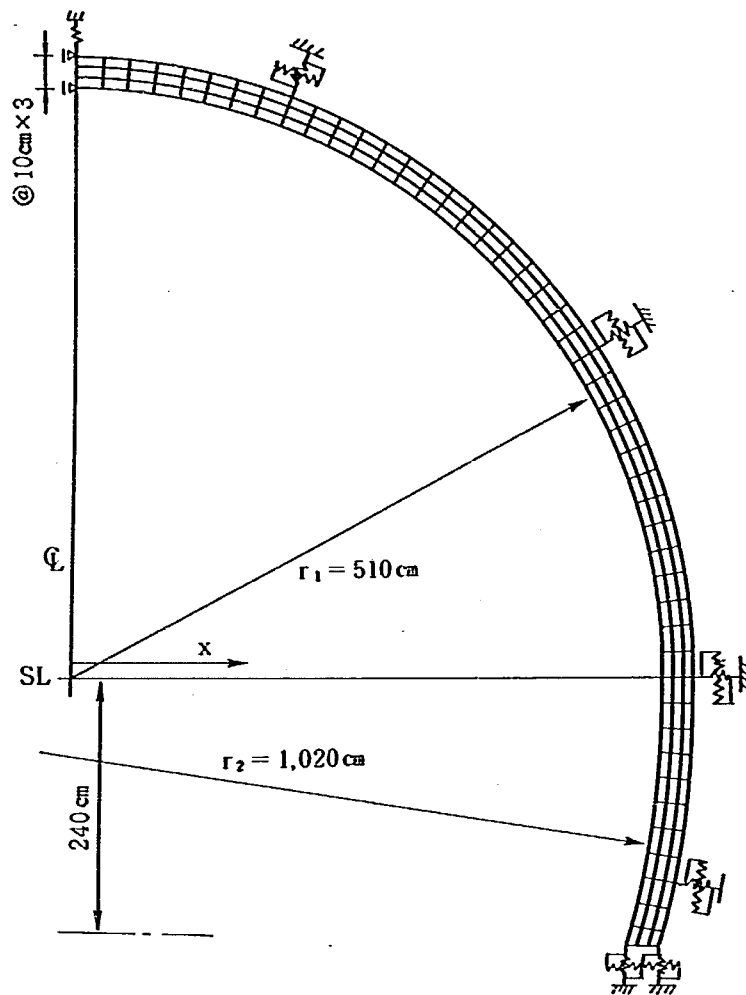


図 3-8 要素分割図

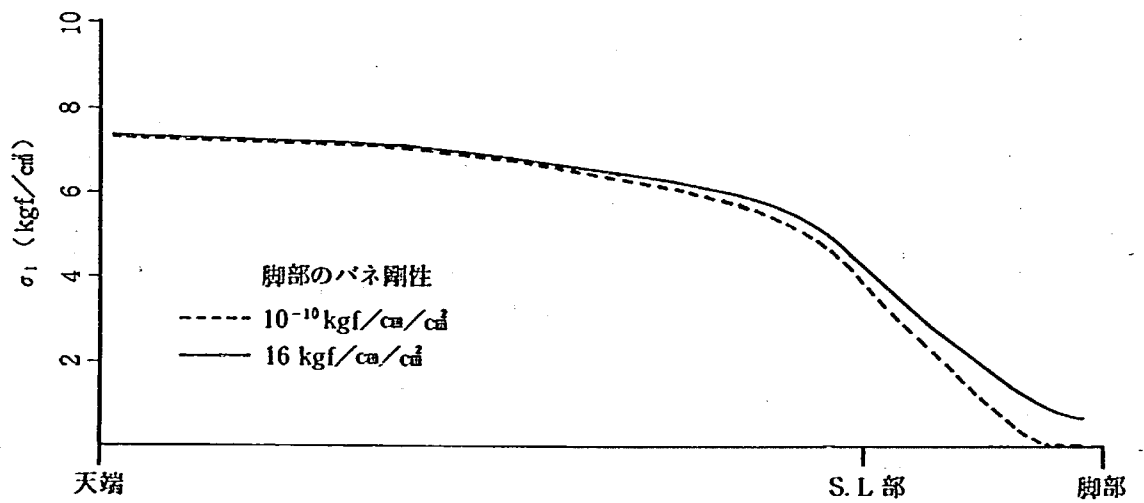


図 3-9 脚部のバネ剛性の影響

(内空側要素最大主応力の周方向分布；背面のバネ剛性 $k_n = k_s = 16 \text{ kgf/cm/cm}^2$)

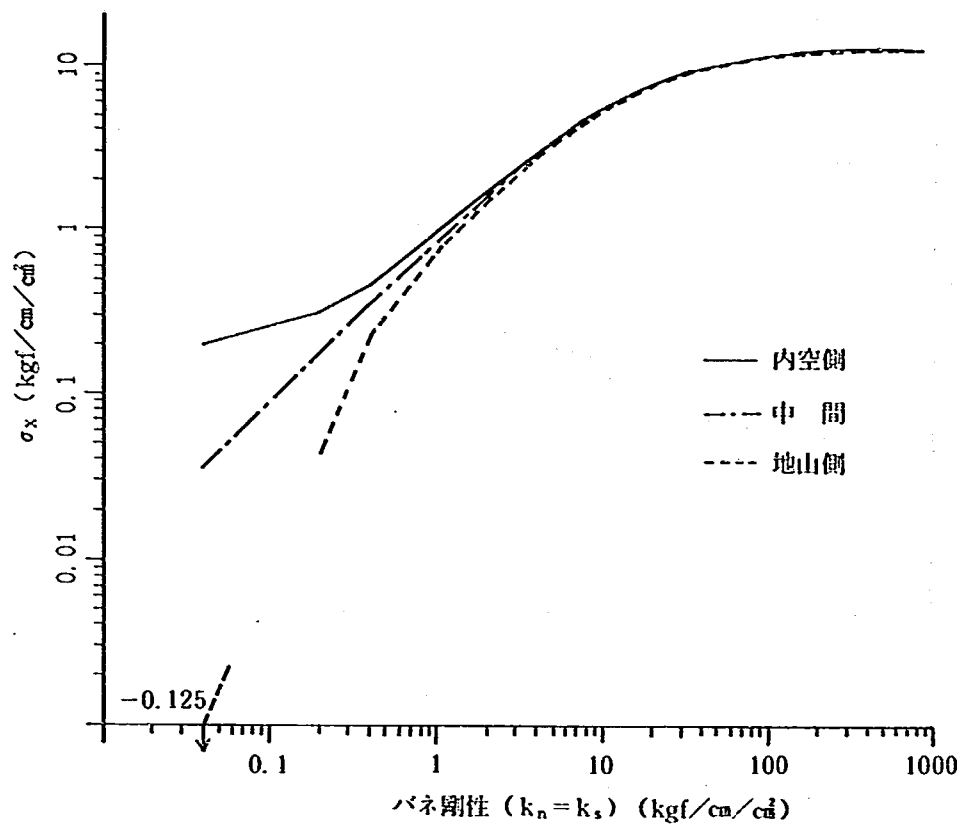


図 3 - 10 バネ剛性と応力の関係

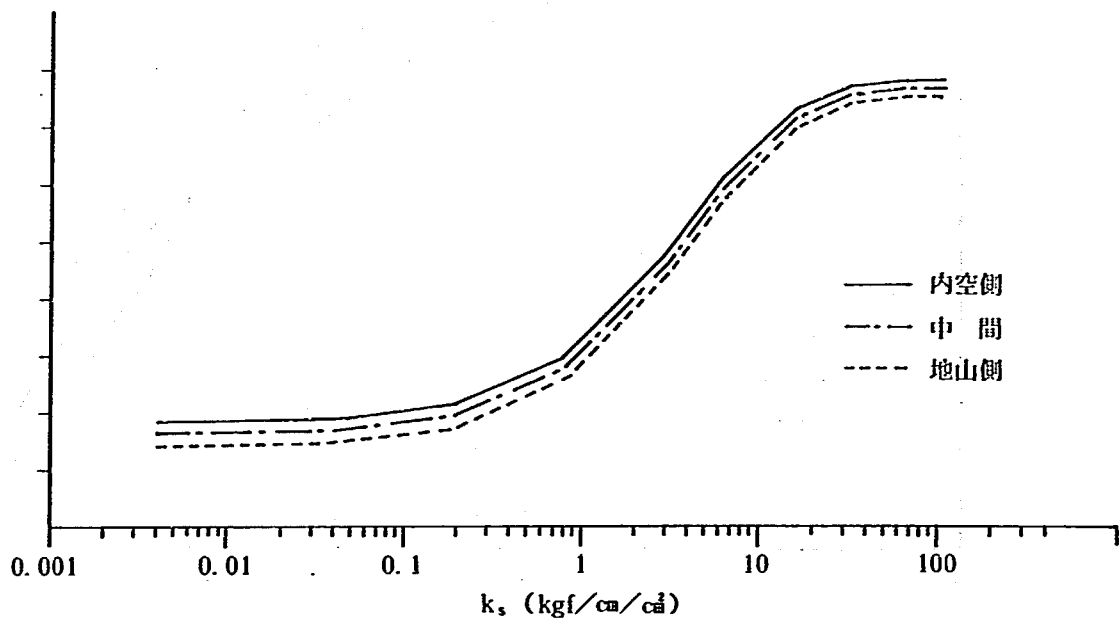


図 3 - 11 せん断剛性の影響 ($k_n = 16 \text{ kgf/cm}^2$)

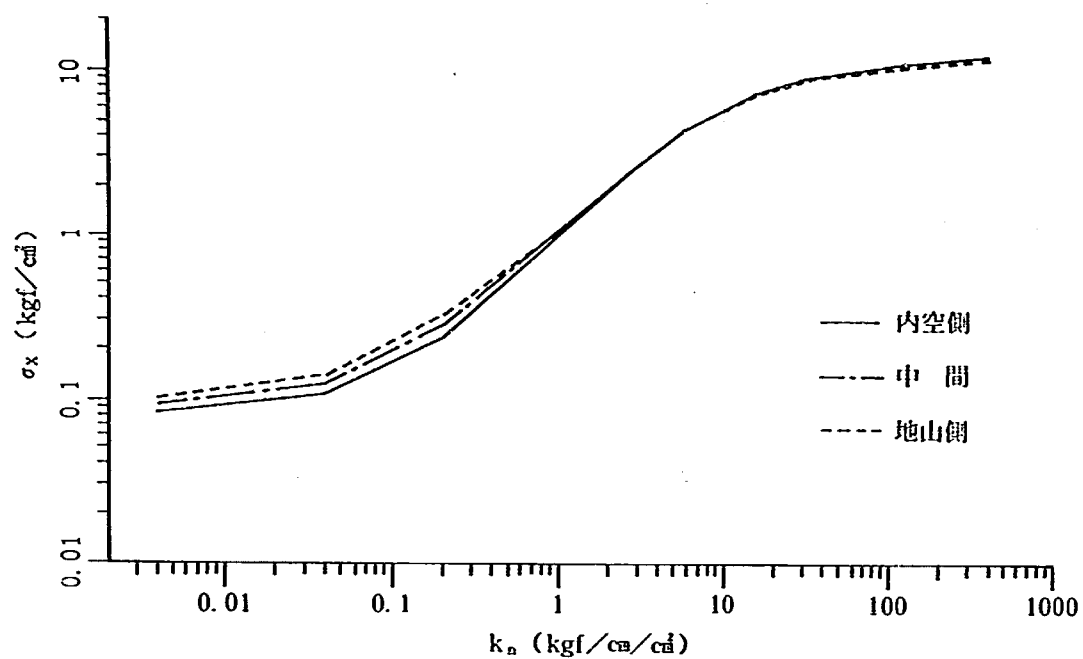


図 3 - 12 垂直剛性の影響 ($k_s = 16 \text{ kgf/cm}^2$)

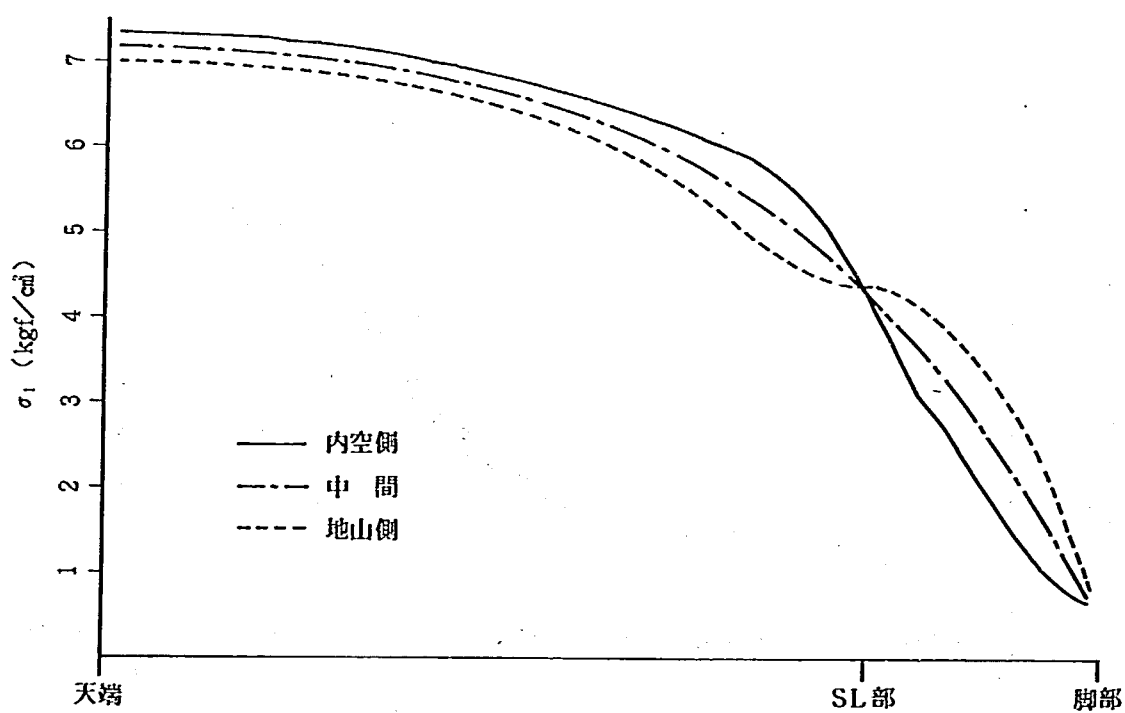


図 3 - 13 覆工の周方向の応力分布 ($k_s = k_n = 16 \text{ kgf/cm}^2$)

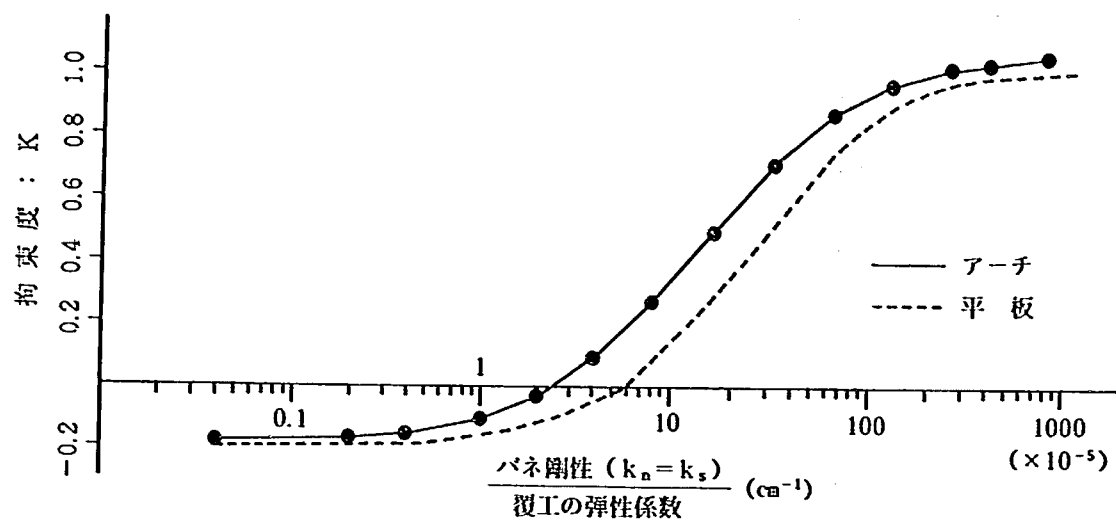


図3-14 拘束度とバネ剛性と覆工の弾性係数の比の関係

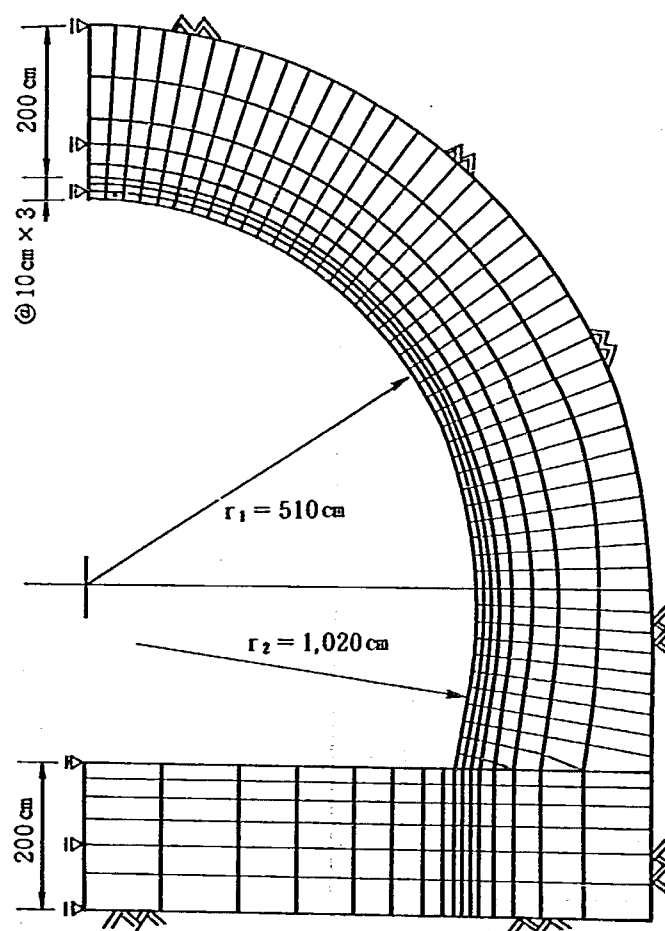


図3-16 要素分割図

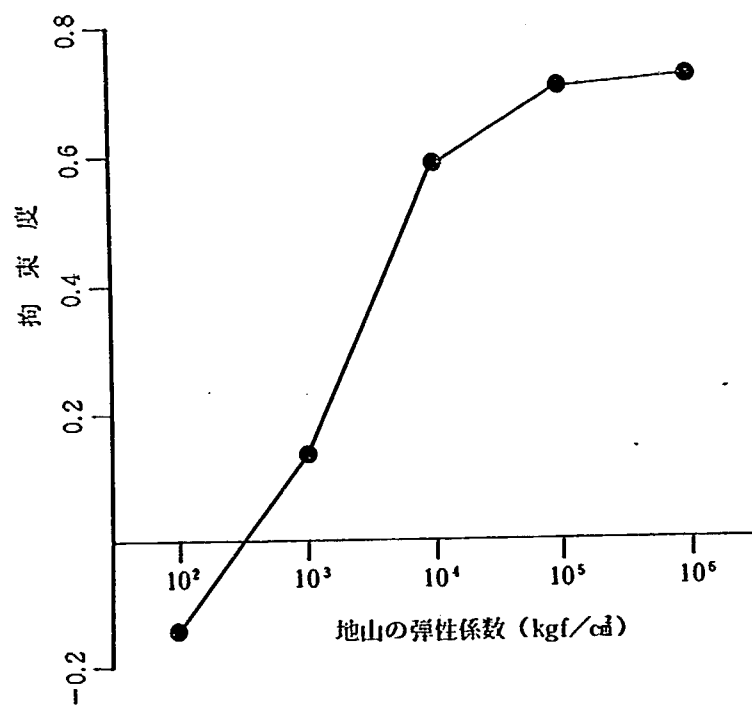


図 3 - 16 地山の弾性係数と拘束度の関係

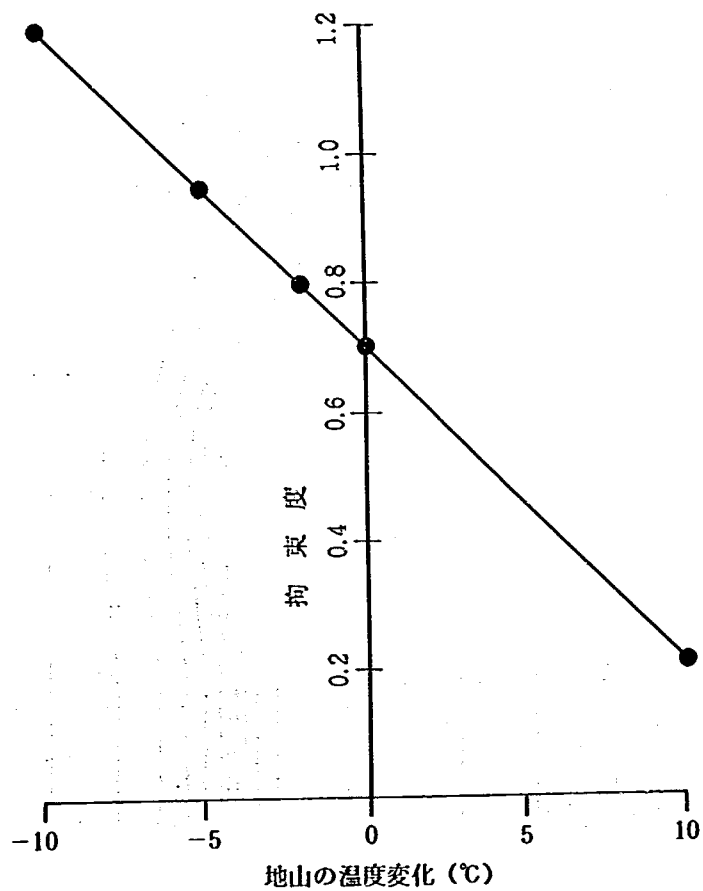


図 3 - 17 地山の温度条件と拘束度の関係

4. 模型供試体による歪の計測

4.1 概 説

前章では、二次覆工コンクリートの初期材令のひびわれ発生原因として、打設後の温度変化による伸縮が背面により拘束を受けて発生する温度応力に関して、数値解析により検討を行ったが、ここでは二次覆工コンクリートの打設後の表面の養生環境と防水シート等が初期の歪の発生に与える影響を調べるために行った模型実験の結果について報告する。

4.2 実験方法

図4-1に用いた模型供試体の概要図を示す。実験は図に示すように、側方周囲を断熱材で覆った型枠に、地山及び吹付けコンクリートを模擬したコンクリートを打設し、十分に硬化した後、その上にさらに二次覆工コンクリートを模擬したコンクリートを打設し、コンクリート内部に埋設した歪計と熱電対温度計により打設直後からのコンクリートの挙動を計測することにより行ったものである。この供試体では、側面が断熱材で覆われていることから、熱の移動は上下方向のみであり、コンクリートには外部からの拘束力は作用しないと考えることができる。

実験の条件としては、表4-1に示すように、吹付けコンクリートと二次覆工コンクリートの接触部の拘束の影響を調べるために、打ち継目に防水シートを施した場合と直接打設した場合の2種類を設定し、また養生環境がコンクリートの収縮に与える影響を調べるために、覆工コンクリートの養生条件を4種類設定した。

供試体は表4-2に示すように実験条件を組み合わせ作成し、約1ヶ月間の測定を行った。

4.3 実験結果

図4-2に代表的な供試体のコンクリートの温度の経日変化を示す。この図に示すように、各供試体の温度は、打設時の約27℃から、コンクリートの硬化熱により約42～52℃程度を示した後、周辺気温である25℃程度に低下している。ここで、歪計による歪の計測値における、これらのコンクリートの温度変化による影響を取り除くために、以下の式による歪の計測値の補正を行った。

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\text{mes}} - \alpha \Delta t + \beta \Delta t$$

(ϵ_{eff} : 有効歪, ϵ_{mes} : 計測される歪, Δt : 温度変化量

α : コンクリートの線膨張係数, β : 歪計の線膨張係数)

この式により求められる有効歪は、温度変化によるコンクリートや歪計の伸縮の影響が取り除かれた歪として考えることができる。表4-2に、各供試体の材令5日と30日の有効歪を、また図4-3～5に代表的供試体B, D, Eのコンクリート有効歪の変化図を示す。なお、コンクリート埋設型の歪計では、打設後約6時間以後にコンクリートによる歪計の拘束が十分になされ、正しい歪の計測が可能になると報告されており、本研究においても、歪計の初期値の設定は、打設後約6時間を基準に行った。

4.3.1 防水シートの影響の考察

温度応力の発生には、内部拘束による応力と外部拘束による応力の2種類がある。内部拘束による応力は部材断面内の非線形な温度分布により、部材内部で伸縮を拘束することにより発生するものであり、外部拘束による応力は部材の温度変化による伸縮が、部材の外部からの拘束力を受けることにより発生する応力である。実際の二次覆工コンクリートでは、その厚さが30cm程度であり、部材内部にそれほど大きな温度勾配が生じないことより、温度変化による内部拘束応力は小さいものと考えることができる。従ってここでは、外部拘束の原因となる背面のコンクリートとの接触部分（打ち継目）の影響について考察を加える。

覆工コンクリートの下部（打ち継目近く）の歪では、いずれの供試体についても打設後5日以後は大きな変動がなく安定した状態がみられた。ここで打ち継目の防水シートの影響を見ると、防水シートのある供試体（AとB）では、 $100\sim120\times10^{-6}$ 程度の伸び歪がみられたのに対して、防水シートを用いずに直接コンクリートを打設した場合は $60\sim70\times10^{-6}$ と、歪の発生量が小さくなっている。この場合使用した防水シートは、実際の現場で用いられている0.4mmのシートに3.0mmの不織布を積層したものであり、打ち継目においてコンクリートには拘束力がほとんど作用しない状態であると考えられるので、打ち継目に直接コンクリートを打設した場合の拘束の度合を示す指標拘束度としては、0.36~0.40と求めることができる。（拘束度は、0→拘束無し、1→完全拘束）

4.3.2 養生環境の影響の考察

実験供試体の養生環境条件毎に、コンクリートの上部（表面近く）の有効歪（材令5日）についてみると、断熱状態の供試体（E）では 20×10^{-6} の伸び歪であるのに対して、表面にフィルムを密着させた供試体（BとC）では 25×10^{-6} 程度、表面にシートをかぶせただけの場合（A, D, F）は 90×10^{-6} 程度のいずれも収縮歪が発生している。また材令30日では、断熱状態の供試体では歪に大きな変動は見られないのに対して、フィルムを密着させたケースは 65×10^{-6} 、シートをかぶせたケースでは $200\sim250\times10^{-6}$ と収縮歪が、特にシートをかぶせただけの養生ケースで大きく進行している。また、コンクリートの中央部の歪においても、表面の歪ほど顕著ではないが、同様の進行性の収縮歪がみられた。これらのことより、この収縮歪の抑制には、今回の実験でとりあげた要因では、断熱材で表面を覆うのが効果的であり、次いで表面にビニールシートを密着させることであるといえる。

今回の実験とは別に、同様の配合のコンクリートに同じ歪計を埋め込んだ実験において、養生を水中養生としたケースでは、コンクリートの表面近くにある歪計においてもほとんど進行性の収縮歪はみられなく、今回の実験における進行性の収縮歪の原因としては、表面からの乾燥収縮ではないかと考えられる。

4.4 まとめ

今回の実験では、模型供試体を用いて、防水シートとコンクリートの養生環境がコンクリートのひびわれ発生に大きく関係する歪の発生に与える影響について考察を加えてきた。

防水シートの効果については、今回の実験ではさほど歪の抑制効果があることは確認できなかった。

これは今回の実験に用いた供試体の寸法が小さく、また形状も実際のトンネルではアーチ構造であるのに対して供試体では平板構造であり、また打ち継目の状況も実際には凹凸が大きいのに対し供試体では平滑であること等によるものと考えられる。

一方、養生環境の影響については、養生環境の違いによってコンクリートの表面から進行性の収縮歪が発生することが確認できた。この歪の発生原因は乾燥収縮と考えられ、ひびわれ発生に大きく影響を与える可能性があると考えられるが、第1章に示した現場計測結果ではこの大きな進行性の収縮歪は計測されていない。この理由としては、実際の現場での施工環境は今回の実験環境と比較して気温の変動が少なく、湿度も高いこと等の相違点があることによるものと考えられる。これらのことより、実際の現場では、今回の実験で示した養生環境の影響による二次覆工コンクリートの表面からの収縮歪はあまり大きな問題ではないと考えられる。しかし一方、養生環境によっては、コンクリートの表面のひびわれに大きな影響を与える収縮歪が発生する可能性があることを配慮しておく必要があると考えられる。

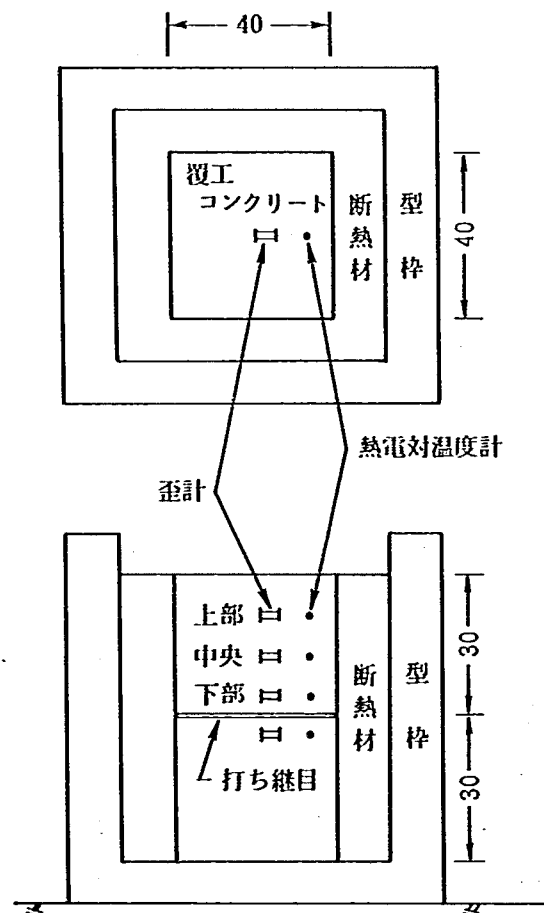


図4-1 実験供試体概要

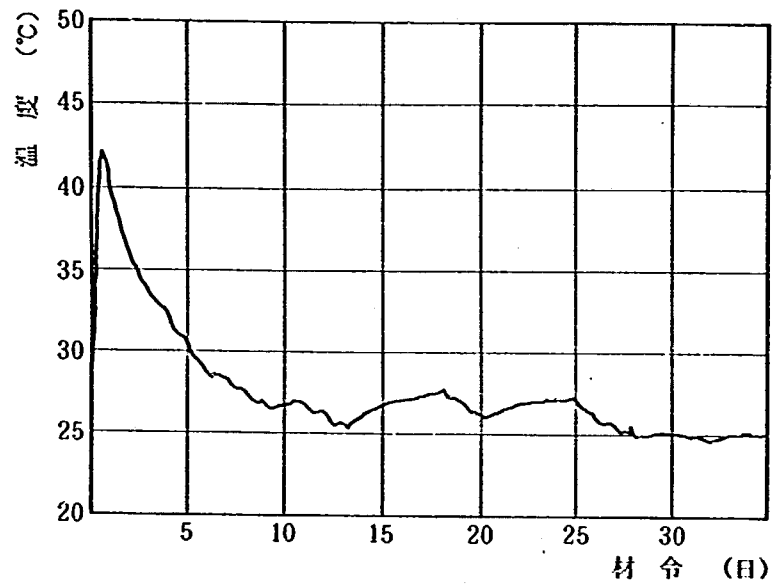


図4-2 供試体の温度の経日変化

表4-1 実験条件

	二次打設コンクリート表面の養生環境
ア	断熱材（発泡スチロール）で密着して覆う
イ	ビニールフィルムで密着して覆う
ウ	ビニールシートで覆う（空隙あり）
エ	打設後2日間のみビニールシートで覆う（空隙あり）
	打ち継目の状態
オ	防水シート（不織布付き）
カ	直接

表4-2 二次打設コンクリートの実験条件と有効歪

供試体	位置	下部		中央		上部	
	材令	5日	30日	5日	30日	5日	30日
	実験条件						
A	ウ, オ	+110	+120	+20	-40	-100	-250
B	イ, オ	+100	+100	+20	0	-30	-70
C	イ, カ	+60	+60	+30	+10	-20	-60
D	ウ, カ	+70	+70	+30	-30	-80	-230
E	ア, カ	+60	+60	+40	+40	+20	+10
F	エ, カ	+70	+70	+30	-20	-80	-210

（単位：strain = 10^{-6} 歪，正→伸び，負→収縮）

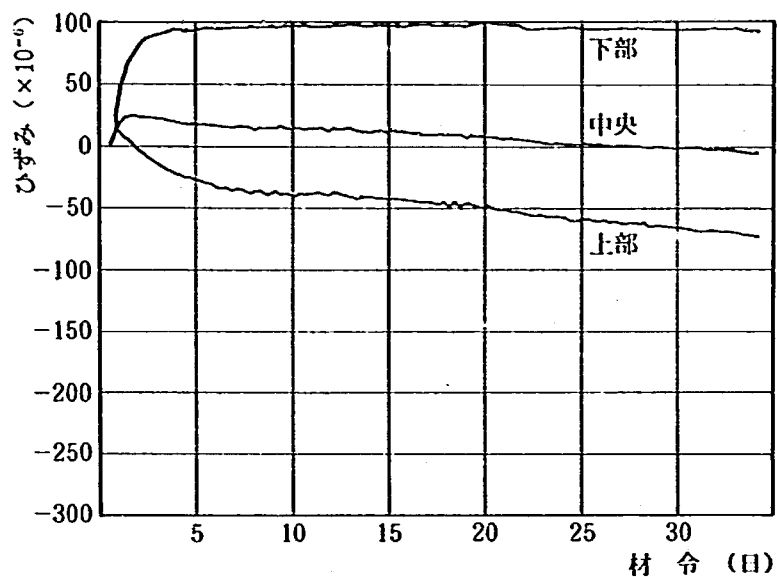


図4-3 供試体Bの有効歪の経日変化

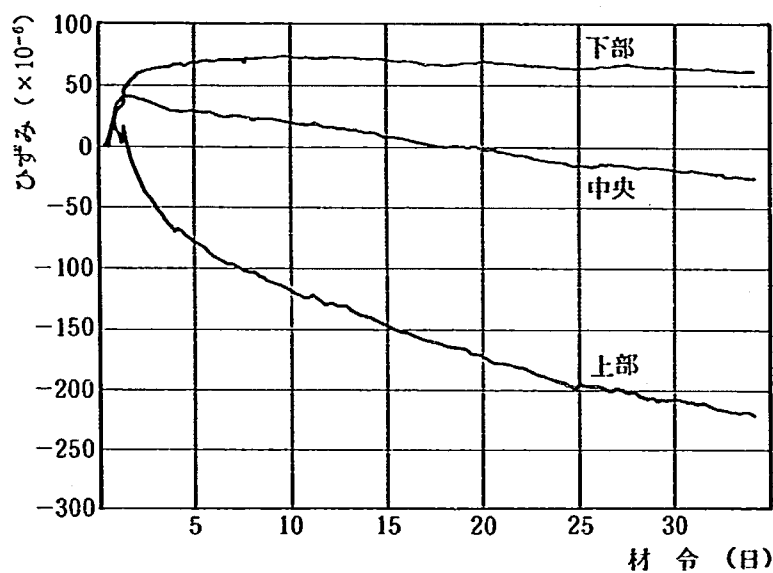


図4-4 供試体Dの有効歪の経日変化

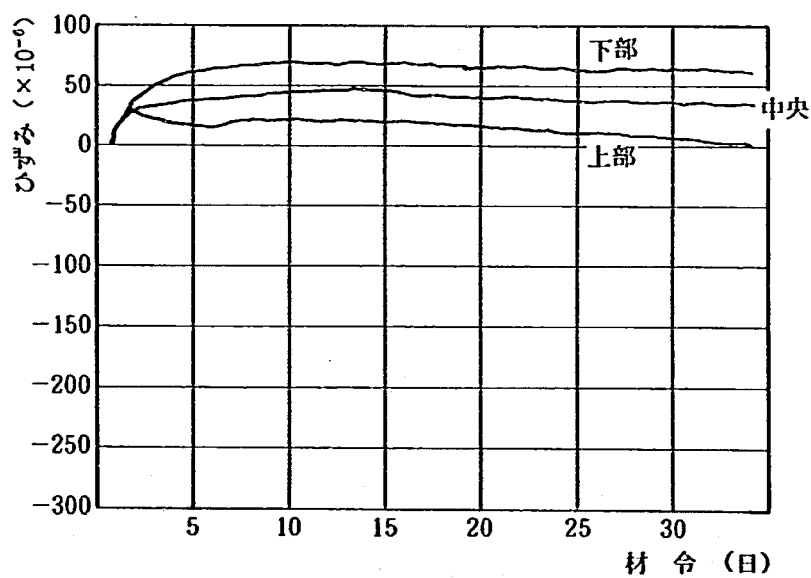


図4-5 供試体Eの有効歪の経日変化

5. さいごに

本研究では、山岳トンネル工法における二次覆工コンクリートのひびわれ対策方法として、覆工背面の防水シートの施工とコンクリートの養生管理の2つの方法について模型実験と数値解析等により検討を加えてきた。結論として、覆工背面に防水シートを施工した場合には、ひびわれ発生の原因となる外部拘束力が低減されること、二次覆工コンクリートの背面の挙動はバネモデルで表現できること、バネモデルを用いた計算により、垂直バネ剛性とせん断バネ剛性の違いが覆工内応力に与える影響は異なること、またコンクリートの養生条件によっては、ひびわれの発生原因となるコンクリートの収縮歪が発生することが各々確認できた。

実際の現場における二次覆工コンクリートのひびわれ対策としては、ほとんどの現場で防水シートの施工が行われており、また実際にひびわれ防止の効果があると報告されている。この防水シートの施工は、地山からの湧水に対する防水工としての目的で行われるものであるが、結果的にひびわれ防止工としても非常に効果的であり、防水工とひびわれ防止工を兼ねた経済的かつ効率的な工法であるといえる。また、本研究による実験や数値解析によっても大いに効果があることが確認された。

一方、養生管理によるひびわれ対策については、通常の施工中のトンネルの施工環境は、一般に湿度が高く温度変化もあまり無いこと等から、結果的に二次覆工コンクリートの養生環境として適している状態にあり、ひびわれ対策として防水シートを施工することで十分であると言える。しかし一方、極端に短いトンネル等で貫通後に二次覆工コンクリートを打設する場合、外気とほとんど変わらない施工環境となることが考えられるので、そのような場合には、防水シートの他にも二次覆工コンクリート養生管理として乾燥や温度に十分に注意することが必要であると考えられる。

トンネル二次覆工コンクリートの初期材令におけるひびわれに関する調査報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2836号
平成2年3月(1990)
道路部トンネル研究室
水谷敏則 猪熊明茂
大久保雅憲 稲野茂
平岡弘志

要 旨

吹付けコンクリートやロックボルト等を用いた山岳トンネル工法において、場所打ちコンクリートで形成する二次覆工コンクリートに、打設後数日程度の初期材令でクラックが発生する問題がある。本調査研究では、このひびわれの発生原因として、コンクリート打設後の急激な温度変化等による伸縮が、二次覆工背面で拘束を受けることにより発生する応力であることを示し、ひびわれの防止方法として、背面における防水シート等の緩衝材の施工や、二次覆工コンクリート表面の養生管理が効果的であることを示した。

キーワード：トンネル，二次覆工コンクリート，ひびわれ，温度応力

郵便はがき

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

道路部トンネル研究室

御中

切手をは
て下さい。

No.187

No.187

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 2836 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑩

土木研究所資料第 2836 号

○

トンネル二次覆工コンクリートの初期材
令におけるひびわれに関する調査報告書