

# 論文 膨張材を使用したトンネル覆工コンクリートのケミカルプレストレス量の評価

平川 泰之\*1・竹下 永造\*2・永久 和正\*3・橋爪 正博\*4

**要旨:** トンネル覆工コンクリートは、鉄筋を配置しない無筋構造物として施工されるのが一般的である。しかし、無筋構造物の場合、コンクリートの収縮によるひび割れの発生が生じやすいこと、また、インバートを有するトンネル覆工コンクリートの脚部（インバート打継部）は拘束度が高いために、トンネル周方向にひび割れが生じやすいこと等が問題となっている。そこで本論文では、膨張材を使用したトンネル覆工コンクリートのひずみ計測を行い、その結果より、膨張材によって導入されたケミカルプレストレス量の評価と拘束度の影響について部位毎に考察した結果を報告するものである。

**キーワード:** 膨張材, ケミカルプレストレス, 拘束度, 覆工コンクリート

## 1. はじめに

トンネルの覆工コンクリートは、道路、鉄道、及び水路等の使用目的、使用条件等に適合し、必要な強度を有するのはもちろんのこと、長期的にトンネルの安定を保ち、亀裂、剥落、過大な変形、崩落等を起こさず、漏水等による侵食や強度の減少等のない、耐久性のあるものでなければならないとされている。さらに、温度変化、乾燥収縮によるひび割れの少ないことも重要な要件である。覆工コンクリートの設計には、力学的機能を付加させる場合と付加させない場合の2種類があり、力学的機能を付加させない場合は、上記供用性を目的として施工され、一般に無筋コンクリートが用いられる。

しかしながら、無筋コンクリート構造物は、コンクリートの収縮によるひび割れが生じやすく、かつ、ひび割れ幅が過大になること、また、インバートを有するトンネル覆工コンクリートの脚部（インバート打継部）は拘束度が高いために、トンネル周方向にひび割れが生じやすいこと等が問題となっている。その問題の対策として、膨張材によるケミカルプレストレスを導入し、ひび割れを抑制する方法<sup>2)3)4)</sup>、収縮低減剤を用い乾燥収縮量を抑制する方法<sup>5)</sup>、また、繊維混入コンクリートを使用し、コンクリートに引張抵抗性を持たせる方法など、様々な

方法が検討されている。

そこで、本論文では、膨張材を使用したひび割れ抑制方法に着目し、膨張材を使用したトンネル覆工コンクリートの現場計測試験を実施し、膨張材を使用することで導入されるケミカルプレストレス量と拘束度を部位毎（ここでは、インバート打継部、SL部、肩部、天端部）に評価した結果を報告するものである。

## 2. 試験概要

### 2.1 現場計測試験概要

#### (1) コンクリートの配合と施工条件

コンクリートの配合を表-1に示す。配合は、膨張材の有無による2パターンとし、膨張材はセメントに対し内割りで20kg/m<sup>3</sup>の混入量とした。なお、セメントは高炉セメントB種を使用した。また、脱型後、超音波加湿養生システムにより養生した。打設時期は、2月から3月にかけてであり、インバートを有する箇所にて計測を行った。

#### (2) 現場計測概要（計測ケース）

計測ケースを図-1のトンネル軸方向断面図と立面図に示す。隣接した3ブロック（以下BLと略す）にて計測を行い、各BLにてコンクリートの配合を組み合わせ

表-1 コンクリートの配合

配合	種別	水結合材比	細骨材率	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤
				水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	繊維	P*wt%
1	24-15-40BB	47.2%	42.5%	151	320	-	787	1089	0.91	1.3
2	24-15-40BB	47.2%	42.5%	151	300	20	787	1089	0.91	1.5

※P:セメント+膨張材

\*1 (株)大林組 東京本社生産技術本部トンネル技術部 副主査 (正会員)

\*2 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 工修 (正会員)

\*3 (株)大林組 東京本社生産技術本部トンネル技術部 課長 工修

\*4 (株)大林組 徳山放水路JV工事事務所 工事長 工修

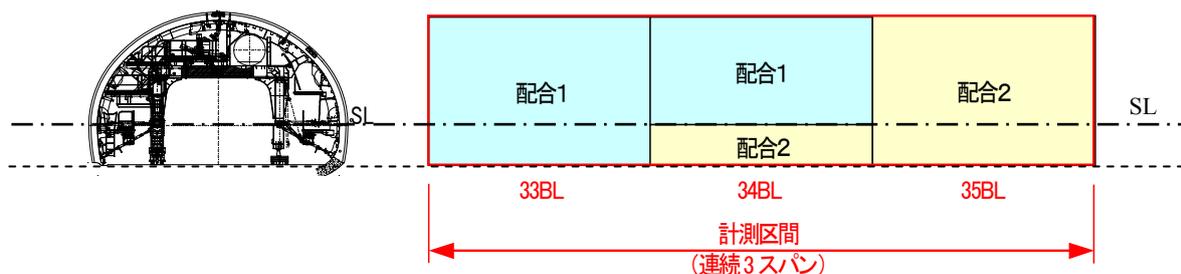


図-1 トンネル軸方向断面図(左)と側方向立面図(右)

せて測定を行った。なお、SL部分にてコンクリートの配合を区別したのは、SL部分までインバート拘束の影響が及ぶのではないかと推定したためである。これにより、拘束度の大小により導入されるケミカルプレストレス量の評価を行なうことができるものと判断した。

### (3) 現場計測概要(計測ポイント)

トンネル断面図における計測概要を図-2に示す。計測機器は、測温機能付きの埋込み型ひずみ計を用い、覆工コンクリートの断面中心部分に設置した。断面中心にした理由としては、覆工コンクリートの背面からの拘束の影響と、内空側からの乾燥収縮を考慮して決定した。断面内の計測部位は4箇所とし、①インバート打継部(トンネル軸方向)、②SL付近(トンネル軸方向)【※34BLでは、配合1部分と配合2部分でそれぞれ計測】、③肩(45°)部(トンネル周方向)、④天端(トンネル周方向)とした。各埋込み型ひずみ計の設置方向については、①と②の比較、周方向応力が卓越するものと想定した③と④の比較を行なうために設定した。現場計測期間は1ヶ月とした。現場計測状況を写真-1(上:埋込み型ひずみ計設置状況、下:①~③設置状況)に示す。

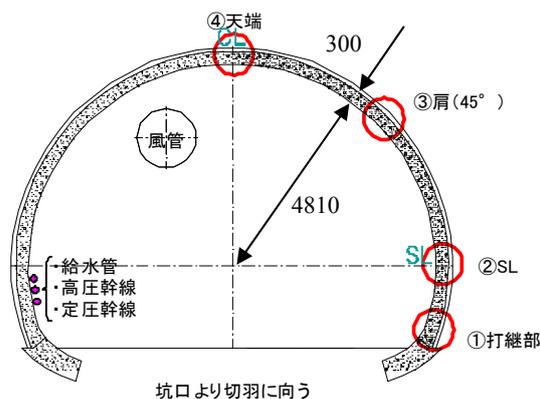


図-2 トンネル断面図における計測ポイント

## 2.2 室内試験概要

### (1) 室内試験目的

現場計測データより膨張・収縮ひずみを抽出するために、必要となる①有効自由膨張ひずみと②若材齢時のヤング係数を求めることを目的として室内試験を行なった。

### (2) 測定方法

現場環境にて測定されたコンクリート温度履歴を用いた1軸拘束膨張試験と、 $\phi 10 \times 20(\text{cm})$ の試験体による静弾性係数測定試験を行った。1軸拘束膨張試験は、JIS A 6202 コンクリート用膨張材拘束膨張試験B法に準拠して行った。拘束鋼材比は、0.2, 1.0, 3.0(%)の3種類とし、測温機能付ひずみゲージを鉄筋に貼り付け膨張ひずみを測定した。静弾性係数測定は、JIS A 1149に準拠して行い、材齢1, 2, 3日で行った。

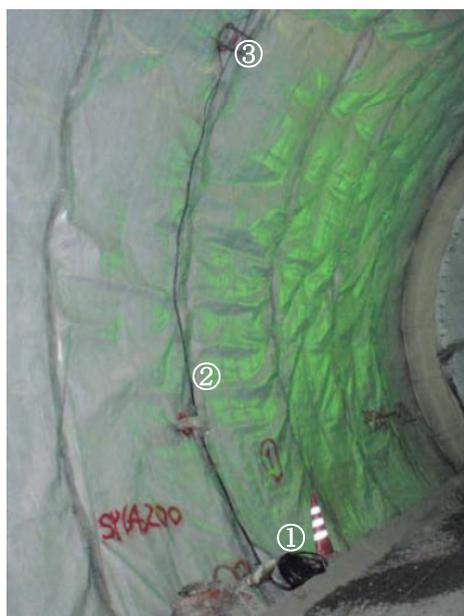


写真-1 現場計測状況

### 3. 試験結果

#### 3.1 現場計測温度

図-3に各BLにおける温度履歴試験結果を示す。

図より、膨張材が混和されている部分においては、無混和部分と比較すると、コンクリートの最高温度が高いことが分かる。これは、坑内のBL毎、部位毎の雰囲気温度の違いによるものや膨張材混和による水和熱の上昇等が原因であると考えられるが、それら個々の影響については、今回の現場計測においては定かではない。次に、最高温度到達材齢については、インバート打継部、SL部に関しては、ほとんど0.8日程度で到達しているが、天端部分に近づくにつれ、最高温度の到達材齢が若干伸びることが分かる。これに関しては、下方向からの熱伝達の影響であると推察される。

#### 3.2 現場計測実ひずみ

図-4に各BLにおける実ひずみ測定結果を示す。実ひずみは、+が膨張側、-が収縮側を表している。まず、35BLの天端部の実ひずみであるが、肩部よりもひずみが小さく、また、収縮側へのひずみの動きが大きい等、

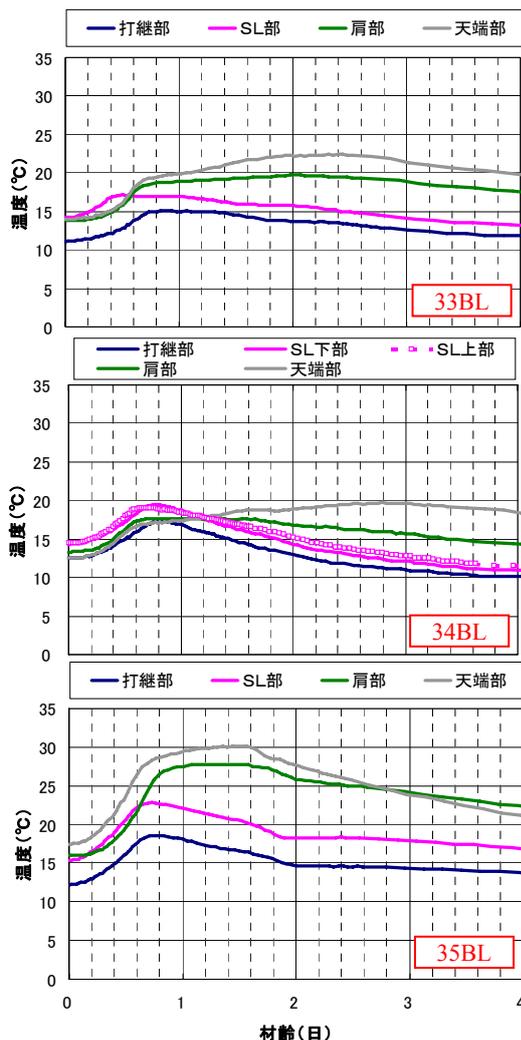


図-3 コンクリート温度履歴結果

他とは違う傾向にあるデータとなっている。これは、自重による変形等の外部要因による影響を受けた結果と考えられるため、天端部に関しては、考察を除外する。

図より、インバート打継部に関しては、膨張材の混和に関わらず、ひずみの動きが小さいことが分かる。このことより、打継部は、拘束度が大きいことが推察できる。しかし、肩部、天端部に関しては、打継部、SL部と比較して、実ひずみ自体が大きいことが分かる。これは、打継部、SL部に比べ、肩部と天端部は拘束度が小さいためであると考えられる。特に35BLの肩部に関しては、膨張材の混和の影響もあり、大きな実ひずみとなっている。

#### 3.3 室内試験における拘束膨張試験結果

図-5に恒温恒湿槽内の温度履歴のグラフ、図-6に拘束膨張試験結果を示す。設定した温度履歴は、全周膨張材が混和された35BLの肩部の温度履歴を参考にして設定した。これは、肩部の温度履歴が他の部位に比べ大きい(天端部を除く)ことから、他の部位の温度履歴を包括できるためである。試験結果から得られた材齢1日と2日での鉄筋ひずみを表-2に示す。

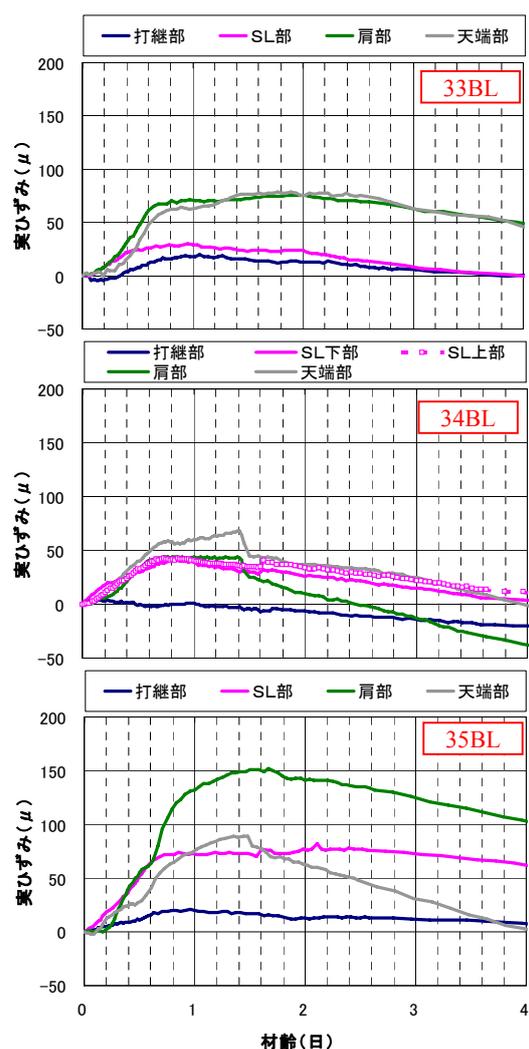


図-4 実ひずみ測定結果

#### 4. 現場計測結果における拘束度とケミカルプレストレス量の評価

##### 4.1 評価方法

拘束度 (R) は、現場にて計測された実ひずみから、拘束度を考慮した温度ひずみを除去し、膨張・収縮ひずみを求めるのに必要な数値である。まず、拘束度とは、変形が拘束される程度を表す指標であり、変形が拘束されるために生じる応力を拘束応力と呼ぶ。次に、温度ひずみとは、線膨張係数 ( $\mu / ^\circ\text{C}$ ) に基準となる温度からの変化値を掛け合わせたものであるが、外部要因からの拘束が生じる場合においては、先述したものに對し、(1-R) を掛け合わせたものが、拘束度を考慮した温度ひずみとなる。ケミカルプレストレス量は、時刻歴によって変化する拘束ひずみの増分量 (有効自由膨張ひずみ - 膨張ひずみ) に對し、同じく変化するヤング係数とを掛け合わせ、その全てを足し合わせることで、導入されたケミカルプレストレス量として評価した。

上記の評価を行なうにあたり、まず、①有効自由膨張ひずみの算出、②拘束度の算出について以下に説明する。

##### 4.2 有効自由膨張ひずみの算出方法

有効自由膨張ひずみは、式(1)を用いて拘束鋼材比と拘束膨張ひずみの関係式を求め、その関係式と Y 軸との交点を求めることによって算出した。<sup>1)7)</sup>

$$\varepsilon_s = \varepsilon_f / (1 + p \cdot E_s / E_c) \quad (1)$$

$\varepsilon_s$  : 膨張ひずみ(鉄筋ひずみ),  $\varepsilon_f$  : 有効自由膨張ひずみ  
 $E_s$  : 鋼材のヤング係数,  $E_c$  : コンクリートの静弾性係数  
 $p$  : 拘束鋼材比

この結果を図-7に示す。図より、有効自由膨張ひずみは材齢1日目で110 $\mu$ 、材齢2日目で140 $\mu$ であることが分かった。

##### 4.3 拘束度の算出方法

有効自由膨張ひずみを求めることで、実ひずみから、



図-5 恒温恒湿槽内温度履歴

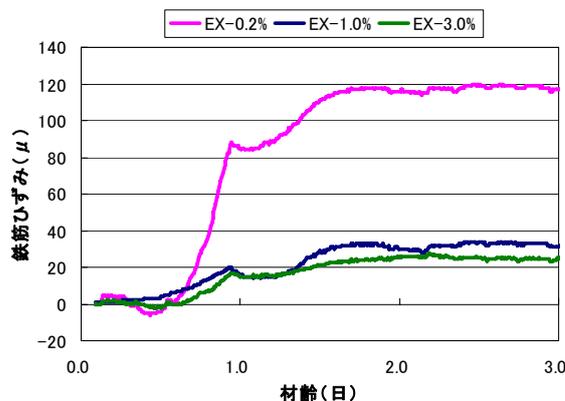


図-6 拘束膨張試験結果 (EX - 鋼材比)

表-2 材齢毎の拘束膨張ひずみ

	1日での膨張ひずみ	2日での膨張ひずみ
拘束鋼材比 0.2%	85 $\mu$	115 $\mu$
拘束鋼材比 1.0%	20 $\mu$	30 $\mu$
拘束鋼材比 3.0%	15 $\mu$	25 $\mu$

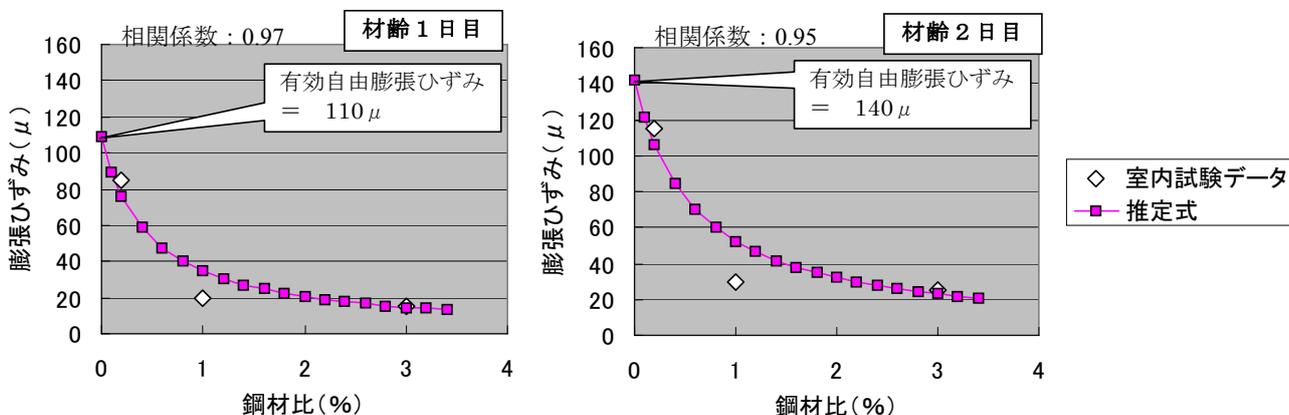


図-7 有効自由膨張ひずみの算出

拘束度を考慮した温度ひずみと膨張・収縮ひずみに分離することが可能となる。その方法を以下に示す。

まず、式(2)により膨張・収縮ひずみが求められる。

$$\varepsilon_{ex} = \varepsilon_a - (1 - R) \times \varepsilon_t \quad (2)$$

$\varepsilon_{ex}$  : 膨張・収縮ひずみ

$\varepsilon_a$  : 実ひずみ,  $R$  : 拘束度,  $\varepsilon_t$  : 温度ひずみ

ここで、拘束度  $R$  が未知数であるため分離が不可能であるが、式(3)により、現場計測での有効自由膨張ひずみ ( $\varepsilon_f$ ) を算出し、室内試験結果と比較することによって  $R$  の推定を行なうことが出来る。

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{ex} / (1 - R) \quad (3)$$

図-8 に、 $R=0.3$  と仮定した場合の膨張・収縮ひずみと有効自由膨張ひずみを示す。 $R=0.3$  と仮定することによって、式(2)の計算を行なうことで、膨張・収縮ひずみが求められる。その膨張・収縮ひずみに対し、式(3)を用いて、有効自由膨張ひずみを算出している。ここで、有効自由膨張ひずみが、室内試験から推定できた材齢 1 日、2 日での有効自由膨張ひずみの値に最も近似する場合に、 $R$  の仮定が正しいとして、拘束度である  $R$  を決定した。

図より、室内試験における有効自由膨張ひずみの結果が、現場にて測定されたひずみに対し、 $R=0.3$  と仮定するとほぼ一致する結果が得られることが分かる。上記方法により他部位（打継部と SL 部については、34BL と 35BL の平均値であり、天端部は除く）についても同様にして拘束度を求めた結果を表-3 に示す。拘束度はインバート打継部が最も高く 0.8 となっており、SL 部は 0.4、肩部は 0.3 という結果であった。また、分離した膨張・収縮ひずみの結果を図-9 に示す。33BL を基準として比較すると、34BL の SL 部、35BL の SL 部と肩部に膨張材により導入された膨張ひずみが生じていることが認められる。また、34BL では、SL 部分の打ち重ね部分 (SL 上部と下部) が同じような傾向でひずみが生じており、普通コンクリートと膨張コンクリートの打ち重ねに関しては、特に問題がないことが分かる。

#### 4.4 ケミカルプレストレス量の評価

膨張材により導入されたケミカルプレストレス量は、式(4)によって求められる。

$$\sigma_c = \Sigma [E ((t_i + t_{i-1})/2) \times \Delta \varepsilon (t_i - t_{i-1})] \quad (4)$$

$\sigma_c$  : コンクリートに発生する応力

$E$  : 静弾性係数,  $\Delta \varepsilon$  : 拘束ひずみの増分量

ここで、静弾性係数は、各材齢時のデータを線形補間して計算に用いることにした。また、材齢 3 日以降については、現場計測された温度結果が下降域であることより、材齢 3 日までをケミカルプレストレス量として評価した。

式(4)によって得られた結果を表-4、5 に示す。表より、膨張材の混和により、インバート打継部では、 $0.7(N/mm^2)$ 程度のケミカルプレストレス量が導入されて

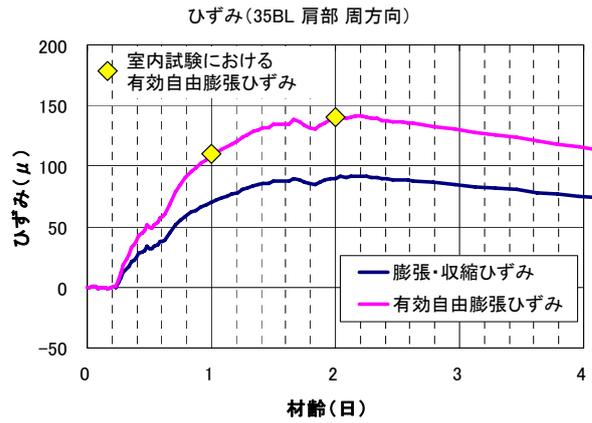


図-8 膨張・収縮ひずみと有効自由膨張ひずみ ( $R=0.3$  と仮定した結果)

表-3 各部位における拘束度

	打継部	SL部	肩部
拘束度 (R)	0.8	0.4	0.3

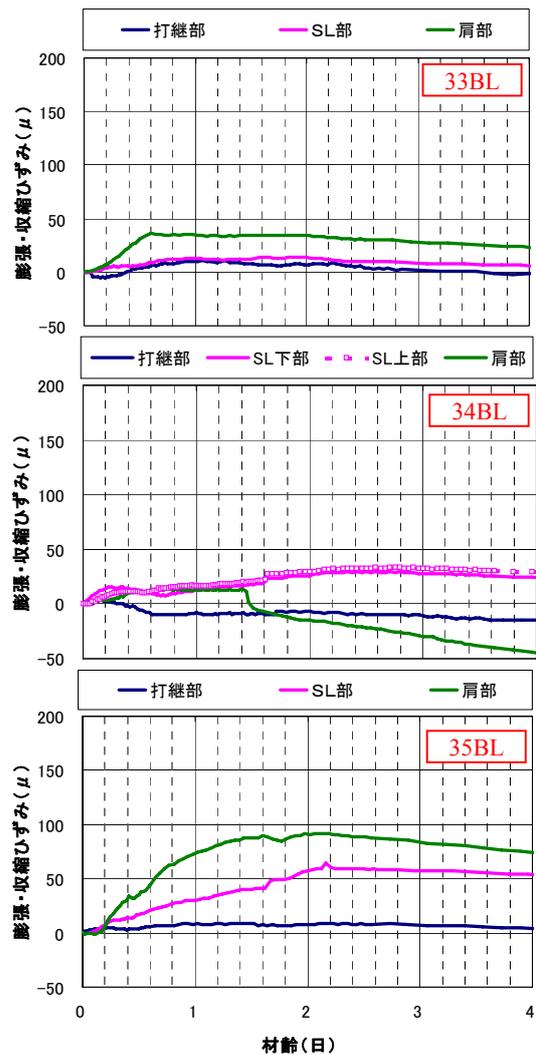


図-9 膨張・収縮ひずみ

表-4 ケミカルプレストレス量 (34BL)

34BL	打継部	SL部	肩部
拘束度 (R)	0.8	0.4	0.3
ケミカルプレストレス量 (N/mm <sup>2</sup> )	0.77	0.22	—

表-5 ケミカルプレストレス量 (35BL)

35BL	打継部	SL部	肩部
拘束度 (R)	0.8	0.4	0.3
ケミカルプレストレス量 (N/mm <sup>2</sup> )	0.76	0.42	0.35

おり、膨張材によるひび割れ抑制効果が期待できる。SL部では、打ち重ねがある場合、0.2 (N/mm<sup>2</sup>)程度、全周膨張材混和の場合、0.4 (N/mm<sup>2</sup>)程度のケミカルプレストレスが導入されるという結果となった。肩部においても、全周膨張材であった場合には、0.3(N/mm<sup>2</sup>)程度のケミカルプレストレスが導入されるため、全周膨張材を混和した場合、ひび割れ抑制効果はかなり高いと言える。ただし、拘束度の効果を考慮すると、インバートを有する覆工コンクリートの打継部のひび割れ抑制対策としては、SL部分までの膨張材混和でも十分効果があり、経済的であると考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、膨張材を使用したトンネル覆工コンクリートの現場計測を行い、その結果より、膨張材によって導入されたケミカルプレストレス量の評価と拘束度の影響について部位毎に考察した結果を報告した。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) トンネル覆工コンクリートの部位毎に、拘束度を求めることができた。
- (2) 本報告の範囲においては、打継部の拘束度は 0.8、であり、SL部は 0.4、肩部は 0.3 であった。
- (3) 導入されたケミカルプレストレス量の評価は、拘束度を求めることによって可能であった。
- (4) 本報告の範囲においては、打継部では、0.7(N/mm<sup>2</sup>)程度のケミカルプレストレス量が導入されており、膨張材によるひび割れ抑制効果が期待できる。
- (5) SL部では、SL部分までの膨張材混和の場合、0.2 (N/mm<sup>2</sup>)程度、全周膨張材混和の場合、0.4 (N/mm<sup>2</sup>)程度のケミカルプレストレスが導入された。
- (6) 肩部では、全周膨張材であった場合には、0.3(N/mm<sup>2</sup>)程度のケミカルプレストレスが導入された。
- (7) 全周膨張材を混和した場合、ひび割れ抑制効果はかなり高いと言える。ただし、拘束度の効果を考慮すると、インバートを有する覆工コンクリートの打継

部のひび割れ抑制対策としては、SL部分までの膨張材混和でも十分効果があり、経済的であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 三谷裕二, 谷村 充, 佐久間隆司, 佐竹紳也: 膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響 コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2003 年7月 pp.155-160
- 2) 保利彰宏, 五味秀明, 鳥越 隆, 辻 幸和: 低添加型膨張材を用いたモデル壁における耐久性評価試験コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2003 年7月 pp.659-664
- 3) 高瀬和男, 寺田典生, 福永靖雄, 石川敏之: 場所打ちPC床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一考察 コンクリート工学年次論文集 Vol.24 No.1 2002 年6月 pp.549-554
- 4) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲: 膨張材を用いたマスコンクリートの収縮低減効果の研究 コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2003 年7月 pp.1037-1042
- 5) 浦野知子, 石原昌行, 青木 茂, 新村 亮: 膨張材と収縮低減剤を使用した収縮応力抑制効果に関する研究 コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.12003 年7月 pp.1055-1060
- 6) 一家惟俊: 膨張材によるひび割れ防止 建築の技術施工 1975 年8月
- 7) 辻 幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎的研究 土木学会論文報告集 Vol.47A 1975 年3月 pp.111-124
- 8) 佐竹紳也, 佐久間隆司, 細見雅生, 中本啓介: 高膨張コンクリートの配合設計・基礎物性について コンクリート工学年次論文集 Vol.25 No.1 2000 年7月 pp.125-130