

シールドを用いた場所打ち支保の 内部ひずみ計測方法の開発

Development of the internal strain measurement method of the extruded concrete lining

飯田廣臣¹⁾・磯谷篤実²⁾・小山幸則³⁾・水原勝由⁴⁾・千代啓三⁵⁾

Hiroomi Iida, Atsumi Isogai, Yukinori Koyama, Katsuyoshi Mizuhara, Keizou Chishiro

- 1) 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部
- 2) 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部
- 3) 正会員 財団法人 地域地盤環境研究所
- 4) 財団法人 地域地盤環境研究所
- 5) 正会員 熊谷・東洋・大本・井上特定建設工事共同企業体

Usually, the concrete lining in ECL (Extruded Concrete Lining) method is designed by using the segmental design method of a shield tunneling. However, the in-situ measurement for validating the design method has not been established. Thus, we developed the method for measuring the internal strain variation of a cast-in-place concrete after pouring a concrete into an inner formwork. In this paper, the outline of the developed measurement method is described and the results of the laboratory test are reported.

Key Words : tunnel, extruded concrete lining, concrete strain, in-situ measurement

1. はじめに

東北新幹線（八戸・新青森間）三本木原トンネルは、青森県上北郡六戸町から十和田市に至る4,280mの新幹線複線断面のトンネルである。

三本木原トンネル¹⁾²⁾では、平成13年8月から平成15年12月までに青森方からの1,265.2mをNATMで施工している。しかし、NATM施工では、掘削地盤のトンネル上半上部から天端付近に透水性の高い砂質土層（一部粘土層）が存在し、事前に施工したディープウェルでは十分な地下水対策が行えず、切羽の安定が問題となった。そのため、残り3,014.8mについては、安全性・経済性・施工管理上の問題から、泥土圧式シールド工法とECL工法を組み合わせた新しい施工システムに変更して施工を行うこととした。

この工法は、含水未固結地山において最も重要な「切羽の安定」についてはシールド工法を適用し、「早期併合」についてはいわゆるECL (Extruded Concrete Lining) 工法³⁾を用いた場所打ちライニングとしたものである。この工法の特徴は、従来のECL工法と異なり、場所打ちライニングをNATMにおける一次支保（鋼製支保工、ロックボルト、吹付

けコンクリート）に代わる支保部材とした点にある。

三本木原トンネルの設計⁴⁾では、ECLの設計に順じた検討を行っているが、従来のECLトンネル設計は、シールドトンネルのセグメント設計を準用したものである。そのため、ECLの施工実態と異なった力学モデルとなっている。また、この設計法により設計された場所打ちライニングの妥当性についても、十分に検証されていない。更にECLの設計法の妥当性を検証するためには、ライニング内部の応力（ひずみ）を計測する必要があるが、その方法が確立されていないのが実情である。

そこで、三本木原トンネルでは、型枠内のコンクリート内部応力（ひずみ）をコンクリート打設直後から、経時的に計測する方法を開発し、実施工でのライニング計測を行った上で、設計法の妥当性の検証を行うこととした。

計測法の開発に際しては、計測器の選定試験を初め、計測装置の開発及び設置方法について室内試験によって検証を行った。本報告では、ライニング内部ひずみの計測法概要および室内試験結果について言及するものである。

2. 計測法の開発

(1) 開発の課題及び着目点

従来のECLにおける計測例⁵⁾を見ると、内枠型のひずみを計測するか、型枠脱型後にコンクリート内面側表面ひずみを応力解放法によって計測するにとどまっている。ECLの設計法の妥当性を検証するためには、コンクリートの強度発現から脱型までの一連の経時的な応力（ひずみ）変化を計測⁶⁾する必要がある。更に、表面ひずみだけでなく、コンクリート内部のひずみ分布を把握する必要がある。

以上の条件をみたま計測を実施するためには、妻型枠、内型枠、地山により閉塞された空間に打設された直後のコンクリート内部にひずみ計を設置する必要がある。コンクリート打設直後の流体状態から、強度が発現し固体に変化するまでの材料特性を考慮した計測が必要である。また、水和反応熱によりコンクリート温度が上昇するという条件下で、外力によって生じるひずみを正確に計測できる必要がある。

(2) 検討及び室内試験項目

計測法の開発においては、開発課題に対して以下の検討及び室内試験を行った。

- ①コンクリート硬化の過程で発生するひずみを精度良く計測できるひずみ計の選定
- ②打設直後の妻型枠内コンクリートにひずみ計を押し込むことができる装置の開発
- ③打設直後のコンクリートにひずみ計を押し込み、所定位置に正確に設置できる方法の開発
- ④ひずみ計の押し込み装置の信頼性の検証
- ⑤水和反応熱による温度ひずみと自己収縮ひずみをキャンセルする方法の検討

3. 室内試験

3.1 ひずみ計の選定試験

ひずみ計の選定試験では、場所打ちライニング内部の応力（ひずみ）に適したひずみ計を選定するとともに、実施工で使用するコンクリートの熱ひずみ、自己収縮ひずみ量を把握（基礎データの収集）した。また、載荷試験によって検出ひずみの精度確認を行ったものである。

(1) 試験概要

ひずみ計の選定試験は、表-1に示す市販の3種類のひずみ計について行った。試験に使用したコンクリート（高流動コンクリート）の配合および性

状は、表-2、表-3に示すとおりである。

3種のひずみ計および温度計を埋込んだ供試体（ 100×400 の直方体）を個々に3供試体ずつ作成し、コンクリート打設直後からの供試体の検出ひずみ及び温度の経時的な変化を30分毎に計測した。

供試体は、コンクリート打設から24時間後に脱型し、24時間後、36時間後、48時間後に載荷試験を各3回行った。載荷試験時の荷重は、 5N/mm^2 の応力が発生する大きさ 50.0kN （ $=0.005 \times 1002$ ）とした。なお、脱型後も載荷しない間は、室温 20°C 、湿度 80% の条件で養生を行った。

また、載荷試験用とは別に、コンクリート硬化過程の熱ひずみと自己収縮ひずみ量を計測するための供試体を作成（埋込み型ひずみ計）し、計測を行った。

表-1 選定試験に用いたひずみセンサ

試験センサ		個数
モールドゲージ	PMFL-60T	3
ひずみゲージ	PL-60-11	3
埋込み型ひずみ計	KM-100BT	6

表-2 コンクリートの配合

W/C	S/a	単位量(kg/m^3)				増粘剤 A, B 液 W×%	高性能 AE 減水剤 C×%
		W	C	S	G		
35	38	190	543	597	948	各 4.0	3.2

表-3 フレッシュ状態でのコンクリート性状

項目	計測値
コンクリート温度	17.0°C
スランプフロー	600×580 (mm)
空気量	3.5 (%)

(2) 試験結果

(a) 検出ひずみの経時変化

各ひずみ計で計測した経時変化図を図-1に示す。図の横軸はコンクリート打設直後からの経過時間、縦軸は検出ひずみ量（引張：+，圧縮：-）を示す。また、図-2はコンクリート打設直後からのコンクリート内部温度の経時変化量を示す。図の横軸は経過時間、縦軸は温度変化量（ $\Delta T^\circ\text{C}$ ）を示す。

図-1、図-2から次のことが言える。

- ①ひずみ変化の挙動は、コンクリート打設後に引張ひずみが生じ、約18時間後から反転し、圧縮ひずみが増加する傾向を示す。これは、液体～半固体状態でのコンクリート硬化に伴う発熱によって、ひずみ計自体が熱膨張したためと考えられる。また、ある程度のコンクリート強度が発現した時点

からは、硬化収縮の影響が大きくなり、圧縮ひずみが増加したと考える。

- ②コンクリート打設から5日後のひずみ量は、モールドゲージ(PMFL-60T)と押込み型ひずみ計(KM-100BT)が200~280 μ で近い値を示すが、ひずみゲージ(PL-60-11)は、その1/5程度と小さい。これは、ひずみゲージの供試体を作成する際、硬化過程でのコンクリート強度よりも大きいモルタル板にひ

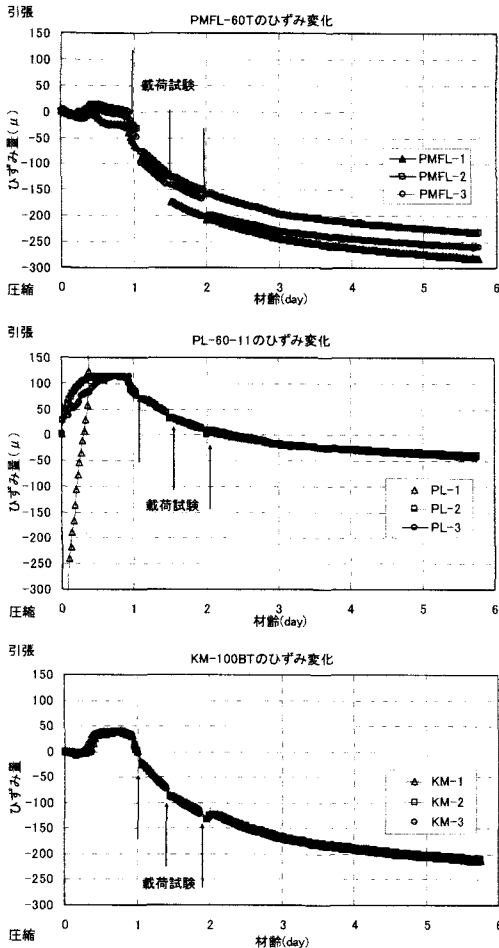


図-1 各ひずみ計の経時変化

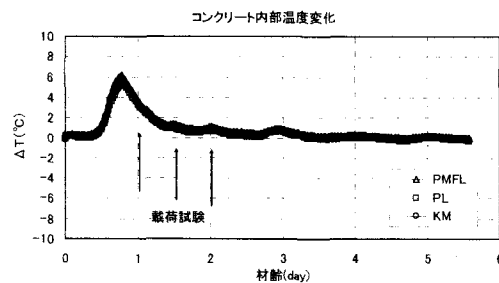


図-2 コンクリート内部温度($\Delta T^{\circ}\text{C}$)の経時変化

ずみゲージを貼り付けたため、ひずみ検出感度が鈍くなっているものとする。

- ③モールドゲージ(PMFL-60T)は、3供試体ひずみ値で最大最小値に約60 μ の差が生じている。
④モールドゲージは、荷重試験前後でひずみ値がシフト(不連続)している。
⑤ひずみゲージでは、3供試体中の1つが絶縁不良になり、計測不能となった。

(b) 荷重試験結果

図-3にコンクリート打設から48時間後に実施した荷重試験結果を示す。

荷重試験結果からは、押込み型ひずみ計が最も精度良く荷重応力が検出できていることがわかる。

(3) ひずみ計選定

ひずみ計の選定試験結果に基づき表-4に示す総合評価を行った結果、押込み型ひずみ計を選定した。

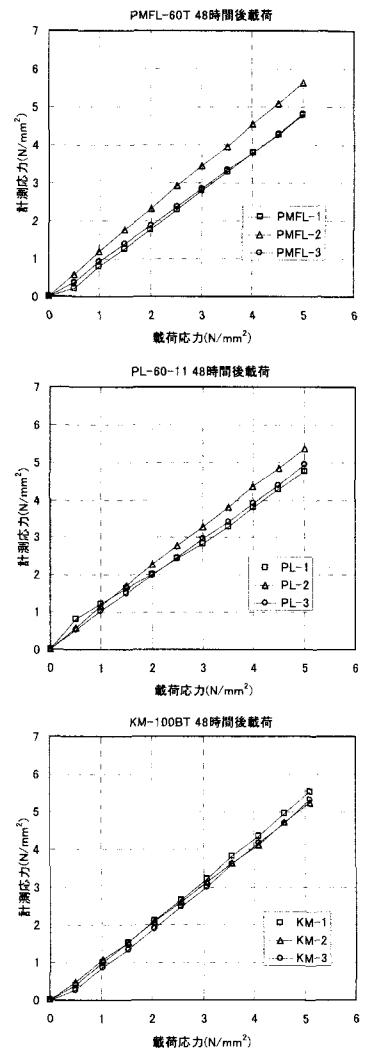


図-3 48時間後の荷重試験結果

表-4 ひずみ計の評価表

評価項目	ひずみ計 KM-100BT	モールド PMFL-60T	ゲージ PL-60-11
荷重実験	○	△	△
経時変化	○	×	×
取付・耐久性	○	○	×
総合判定	○	△	×

4. ひずみ計押込み装置

ひずみ計は、埋込み型ひずみ計を使用する。押込み装置概要及び設置手順、計測用内型枠の加工、設置方法の確認試験結果について、以下に示す。

4.1 押込み装置の概要

押込み装置概要図を図-4に示す。押込み装置は、押込みユニット(押込みロッド、ボールネジ、ボールネジサポートユニット)とひずみ計ケースで構成している。図-4に示すように押込みロッドをガイドとし、ボールネジサポートユニットのねじを回すことにより、型枠スリットから押込みロッドをコンクリート内に押込み、ひずみ計を所定位置に設置する構造である。

なお、ひずみ計は支持台を介して押し込みロッドに固定するが、支持台の部材は、剛性が高いとひずみ計周辺のコンクリートの変形を抑える可能性があるため、コンクリートと比べ、剛性の低い高分子材料(MC ナイロン)を使用している。

4.2 ひずみ計設置手順

ひずみ計の設置手順を図-5、表-5に示す。コンクリート打設時は、妻型枠のブラシが内型枠のスキムプレート上を通過する。そのため、あらかじめスリットを設けた内型枠外面にひずみ計ケースを固定しておき、コンクリート打設時は、ひずみ計をケースの中に格納し、ブラシをやり過ごした後、ひずみ計の押し込み作業を行い、所定位置に設置する。設置完了後、押込みユニットを分離撤去、

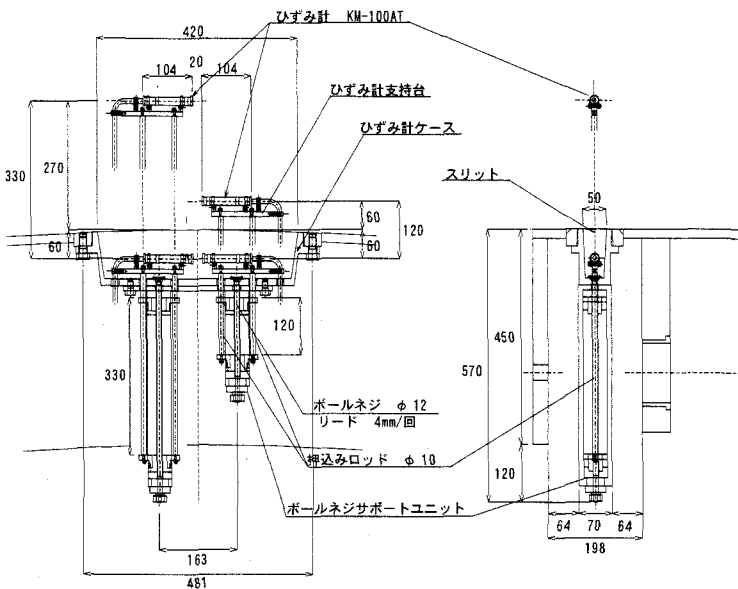


図-4 ひずみ計押込み装置概要図

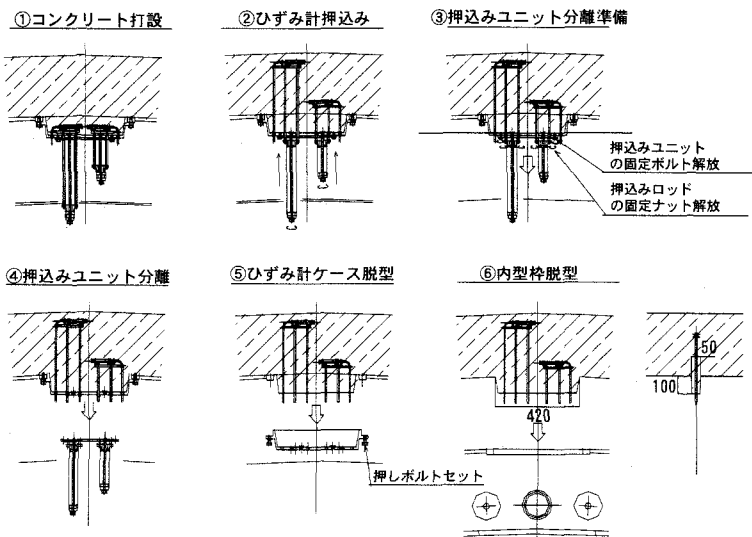


図-5 ひずみ計設置手順

コンクリート硬化後(約 24 時間後)にひずみ計ケースを脱型する。

表-5 ひずみ計設置手順要領

①-1 内型枠(計測リング)組立	ひずみ計は型枠のひずみ計ケース内にあらかじめ装備しておく。
①-2 妻型枠ブラシ通過	スリットからひずみ計ケース内にコンクリートが流入する。
② ひずみ計押込み	コンクリート打設終了後、押し込みロッドでひずみ計を押し込む
③, ④押し込みユニット分離	押し込み後、早期に押し込み装置を撤去する。
⑤ ひずみ計ケース脱型(1日後)	ケーブルを損傷しないようにひずみ計ケースを脱型する。
⑥ 内型枠脱型	内型枠を脱型すると、ケース分の突起が覆工内面に残る。

4.3 計測用内型枠の加工

計測用内型枠の代表1ピースを図-6に示す。内型枠のスキムプレートには、2台のひずみ計（コンクリート内外）を押込むためのスリット（50mm×420mm）を設ける。スリット回りには、押込み装置を固定するボルト孔加工を施す。なお、計測終了後は、スリットを鋼板で塞ぎ、通常施工用の内型枠として使用できる。

4.4 設置方法の確認試験

(1) 押し込み試験

押し込み試験は、模擬型枠内での押し込み作業を繰り返し行い、押し込み設置の作業性とひずみ計の設置位置精度を検証したものである。

a) 押し込み試験用の模擬型枠

実施工では、後続台車のレールや縦リブが、ひずみ計の押し込み作業や型枠の脱型作業の支障となる可能性がある。このため、押し込み試験は、作業が最も困難と思われる台車レール付近の型枠中子を再現し、図-7に示すレール・リブ模擬板を設けた330mm×400mm×900mmの鋼製型枠を作成した。型枠は、コンクリート打設後に上蓋を取り付け密封し、ひずみ計の押し込み実験中にコンクリートの逃げ場が無い構造としている。

b) 試験用コンクリート

押し込み装置をセットした後、型枠に高流動コンクリートを打設する。高流動コンクリートは、打設時にフロー値、空気量を測定し、実施工で使用するものと同じ性能を有するものであることを確認した。

c) ひずみ計の押し込み作業

押し込み装置を用いて所定の深さまでひずみ計を押し込み（ひずみ計1を120mm、ひずみ計2を330mm）、押し込み完了後、ひずみ計を掘り起こし、ひずみ計の位置や姿勢を確認した。確認後、再度押し込み装置をセットし直し、押し込み速度を変えた作業を繰り返し行った。また、押し込み時のひずみ計への負荷を把握するため、1秒毎のひずみ計測を行っている。

d) 脱型

実際の作業手順に従い、埋込み直後に押

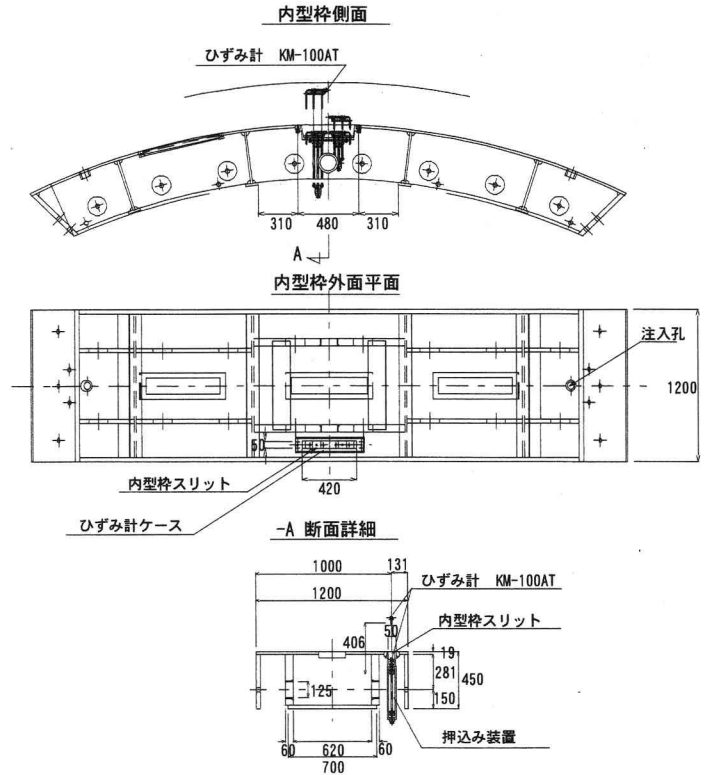


図-6 計測用内型枠

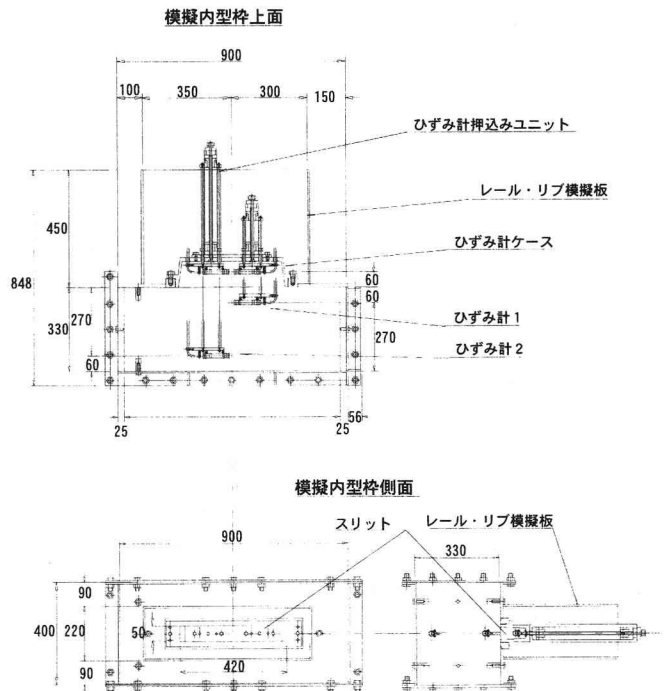


図-7 ひずみ計押し込み実験装置

込みロッドを、24 時間後にひずみ計ケースを、48 時間後に型枠全体を脱型し、脱型作業によるケーブルの損傷やデータの連続性が損なわれる等の影響が生じないことを確認した。

e) 押込み試験結果

押込み速度を 80, 120, 240 mm/min の 3 ケースで押込んだ時のひずみ計の出力結果を表-6 に示す。

表-6 ひずみ計押し込み時ひずみ計測定結果

	押込み (mm)	押込み速度 (mm/min)	ひずみ (μ)	
			最大値	平均値
ひずみ計 1	120	80	16.0	2.5
		120	12.8	1.7
ひずみ計 2	330	80	25.6	13.1
		240	6.4	2.5

※ひずみ計 KM-100AT の測定許容範囲は、5000 μ

押込み時に発生したひずみ量は、すべてのケースで非常に小さな値であり、作業中に想定する押込み速度では、ひずみ計測定値への影響が殆んどなく、ひずみ計に損傷を与えることもないことを確認した。また、コンクリート打設後にひずみ計を掘起こし、設置位置を確認した結果、ひずみ計は所定の位置に正確に押込まれていること、ひずみ計回りにもコンクリートが十分充填でき空隙が生じていないことを確認した。

実施工では、コンクリート打設圧力が試験に比べて大きくなると予想されるが、今回の押込み装置を用いることで、短時間にひずみ計を所定の位置へ正確に設置することが可能であり、作業性についても問題ないと判断した。

(2) 載荷試験

載荷試験は、押込み装置によって設置したひずみ計が、コンクリート内部のひずみを精度良く検出できること、ひずみ計支持台が計測値に影響を与えないことを検証するために行った。

a) 供試体

押込み試験で作成した供試体 (330×400×900) を用い、打設から 1 週間経過した後に載荷を行った。脱型後 (48 時間後)、載荷しない間は、室温 20℃ 湿度 60% の養生室で供試体をビニール等でラッピングし、保湿した状態で養生を行っている。

b) 載荷試験

載荷試験は、アムスラー試験機により、供試体長手方向に 5N/mm² の圧縮応力が発生する 660.0kN (=0.005×330×400) までの荷重を 50kN ピッチ、14 ステップの載荷除荷過程を 2 サイクル行った。

d) 試験結果

図-8 に載荷試験結果を示す。図中の「上段図のひずみ-荷重測定値」は横軸に載荷荷重、縦軸にひずみ値を示す。また、下段図の「荷重応力-計測応力測定値」は、横軸に載荷荷重を供試体断面積から換算した荷重応力、縦軸にひずみ計計測値とコンクリートの変形係数 ($E_c=2.85 \times 10^4 \text{N/m}^2$) から換算したコンクリート応力を示す。

試験の結果では、ひずみ計 1、ひずみ計 2 で計測値が異なっている。これは、載荷板の平行性等から曲げモーメントが作用したものと考える。試験結果から逆算すると供試体には 18kN・m 程度の曲げモーメントが作用したことになる。

一方、ひずみ計 1 と 2 の平均値で見ると、荷重とひずみ及び荷重応力と計測応力がともに直線関係であることがわかる。また、平均計測応力値は、荷重応力とほぼ同じ値を示していることがわかる。したがって、押込み装置で設置したひずみ計は、コンクリートの内部応力を精度良く計測でき、ひずみ計支持台についてもひずみ値に影響を与えないことが検証できた。

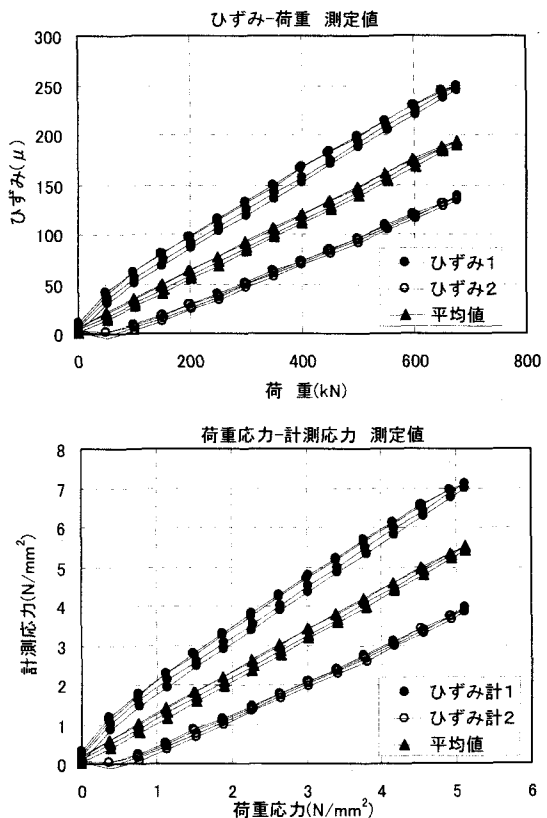


図-8 載荷試験結果

5. 熱ひずみと自己収縮ひずみの補正

コンクリートは、水和反応熱によりコンクリート温度が上昇する。コンクリートが液状～固体になる過程では、コンクリートひずみが零(0)であっても温度上昇に伴ってひずみ計が熱膨張し、見かけのひずみ値が発生する。また、硬化が進行するに伴ってコンクリートは自己収縮する。これらは、外力以外によって発生したものであり、設計法を評価するためには、これらのひずみ値と実際のライニングひずみとを分離する必要がある。

本計測法では、ライニング内の応力および温度を計測するとともに、ダミー計測を行う。ダミー計測では、ライニング計測位置のトンネル坑内で、場所打ちライニング施工時に、同じコンクリートで供試体を作成し、コンクリート内部のひずみと温度を同時に計測する。このダミー計測で得られるひずみ値は、熱ひずみ及び自己収縮によって発生するひずみと考えられることから、熱ひずみと自己収縮ひずみは、式(1)によって補正を行う。

$$\varepsilon = (\varepsilon_c - \varepsilon_d) + \alpha_t(t_c - t_d) \quad \text{式(1)}$$

α_t : 1℃あたりのダミーひずみ変化量

ε : ライニング真ひずみ

ε_c : ライニング計測ひずみ

ε_d : ダミー計測ひずみ

t_c : ライニング内部温度

t_d : ダミー温度

ここでのダミー供試体とライニングのコンクリート硬化時間をできるだけ近似させる必要があるため、養生条件を同じとし、ダミー供試体は、厚さをライニング厚と同じ、幅及び長さを1mとした。

6. おわりに

場所打ち支保の内部ひずみ計測方法の開発に際し、室内実験により場所打ちライニングの応力(ひずみ)計測が可能であることを検証した。

本計測方法は、押込み装置を使用することにより、以下の特長が挙げられる。

- ①ひずみ計をコンクリート打設直後の内部に押込み設置ができる。
- ②ひずみ計を安全かつ任意の正確な位置への設置できる。
- ③コンクリート硬化過程で発生するひずみを高精

度に計測できる。

- ④設置時に複雑な作業がなく、作業性にすぐれている。

また、本計測方法を適用することで、場所打ちライニングの施工過程における応力(ひずみ)を計測することが可能となり、ライニングの応力発生メカニズムを把握するための有効な手段になるものと考ええる。

今年の11月頃、今回開発した計測方法を用い、三本木原トンネルの場所打ちライニング計測を行う。その結果については、別途報告を行う。また、その計測結果をもとに、設計法の妥当性の検証を行うとともに、場所打ちライニングの合理的な設計法についても検討を進め、報告したいと考えている。

謝辞:最後になりましたが、本計測方法の開発にあたってのご指導はもとより、本原稿のとりまとめに際して多くの御助言を賜りました「財団法人 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室」の関係各位に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 蓼沼慶正、磯谷篤美、須澤浩之、芳賀 宏、野々村嘉映：含水末固結地山トンネルにおける切羽安定方策、トンネル工学研究論文・報告集 VOL.13, pp201-206, 2003.
- 2) 磯谷篤美：含水末固結地山トンネルにおける地下水位低下工法と掘削—東北新幹線 三本木原トンネル—、日本鉄道施設協会誌第41巻第4号, pp47-49, 2003
- 3) シールド工法技術協会：ECL—技術資料—, 2003.
- 4) 峯本 守、鬼頭 誠、田代美樹男、梶原雄三：北陸新幹線秋間トンネルの調査解析に基づく掘削覆工併進工法の覆工設計手法に関する研究、土木学会論文集, No.510/VI-26, pp175-192, 1995.
- 5) 大寺伸幸、真下英人、関 伸司：応力解放法を用いた場所打ちライニングの応力計算結果とその考察、トンネル工学研究論文・報告集 VOL.9, pp331-336, 1999.
- 6) 園田徹士、谷口裕史、萩原 勉、山上 清、伊勢亀悦男：鋼枠と高充填性コンクリートを用いた場所打ち覆土工法の実証実験報告、トンネル工学研究論文・報告集 VOL.4, pp293-304, 1994.