

応力解放法を用いた 場所打ちライニングコンクリートの応力計測

Stress Measurements of cast-in-place concrete by Strain Releasing Method

飯田廣臣¹・井浦智実²・知本康男³・千代啓三⁴

Hiroomi Iida, Tomomi Iura, Yasuo Chimoto and Keizo Chishiro

¹フェロー会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 工務統括役 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

E-mail:h.iida@jr-tt.go.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 北陸新幹線第二建設局 工事第二課
(〒930-0856 富山市牛島新町5-5 インテックビル12F)

³基礎地盤コンサルタンツ株式会社 北海道支社 技術部 (〒003-0807 札幌市白石区菊水7条2-7-1)

⁴正会員 工修 熊谷・東洋・大本・井上共同企業体 (〒034-0102 青森県十和田市大沢田字早坂24-1)

A new tunneling system “SENS” was applied to Sambongihara tunnel in Tohoku Shinkansen and this project is going on now.

Though primary lining is made by cast-in-place concrete in “SENS”, this method is not so popular that there are quite few cases that inner stresses are measured. So, we set strain gages into placed concrete and measured inner stresses. (We call this ‘setting strain gages method’.) But it was expected that inner stresses were measured and confirmed by another method, because many factors such as creep influenced strain of concrete. From this point of view, we measured strain of concrete by ‘Strain Releasing Method’.

This paper explains measuring process and consequence by ‘Strain Releasing Method’. And we compare strains by setting strain gages method and ‘Strain Releasing Method’ and evaluate both measuring method.

Key Words : Cast-in-place concrete, Strain releasing method, ECL method, Stress measurements

1. はじめに

東北新幹線三本木原トンネルでは、場所打ちライニング工法を用いた新しいトンネル構築システム“SENS”を適用して施工を進めている。¹⁾

“SENS”では、場所打ちライニング工法を用いた一次覆工に対し、NATMにおける吹付けコンクリートと同様に、一次支保材としての機能を期待している。場所打ちライニングコンクリートを用いて覆工構築を行った事例はECL工法で見られるが、施工実績が十分ではなく、コンクリート内部の応力を計測した事例はほとんど見られない。

このため、三本木原トンネルではひずみゲージを打設直後のコンクリート内に埋め込み、内部ひずみの変化を測定した。この結果、内部ひずみのデータを取ることができたが、コンクリートのクリープなど外荷重以外にひずみに影響を与える要

因が多くあり、計測結果を別の方法で確認することが求められた。

そこで、応力解放法を用いて内部ひずみ計測結果を確認した。

以下に、応力解放法による計測方法を説明し、その結果を示す。また、応力解放法による結果とひずみゲージによる結果を比較し、両者の計測結果の評価を行う。

2. 三本木原トンネルの概要

(1) 工事の概要

a) 施工の経緯

三本木原トンネルは、東北新幹線(八戸・新青森間)に位置する延長4,280mの新幹線複線断面トンネルである。このうち、八戸方から3,014.8mの区間には、新工法“SENS”を適用して掘削するこ

とした。

b) トンネル断面

トンネルの断面を図-1に示す。図のように、一次覆工の外径は11.44mで、覆工厚は、0.33mである。一次覆工の内側に防水シートを張り、さらにその内側に厚さ0.3mの二次覆工を打設している。

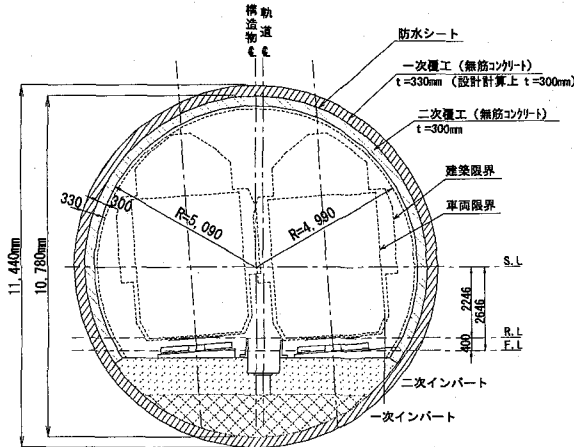


図-1 トンネル横断面図

(2) 場所打ちライニング工法²⁾

一次覆工コンクリートは、図-2に示すように、フレッシュな状態で地山と内型枠、妻型枠に囲まれたテールボイドに加圧した状態で打設される。コンクリートは内型枠脱型までに強度の発現が必要(1日強度15N/mm²)となる。また、地下水を含んだ地盤に打設するため、水中不分離性も求められた。このため、表-1のように、特殊増粘剤と早強セメントを用いた基本配合とした。

表-1 コンクリート基本配合設計

W/C %	S/a %	単位量(kg/m ³)				特殊 増粘剤A,B W×%	特殊 分散剤 C×%
		W	C	S	G		
35	38	190	543	597	948	4.00	3.2

※セメントは早強セメントを使用

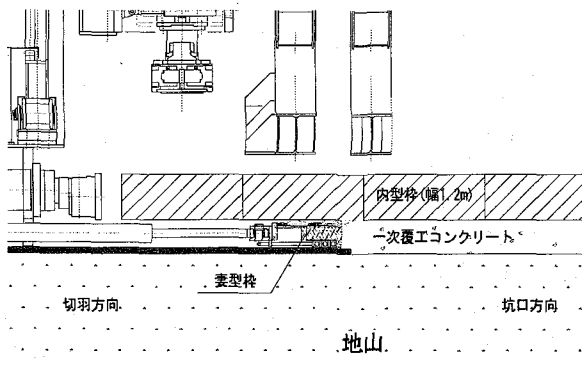


図-2 コンクリート打設位置

(3) ひずみ計を用いた内部ひずみの計測

場所打ちライニングに発生する応力を計測するために、コンクリート内にひずみ計を押し込み、直接ひずみを測定した³⁾。ひずみ計はテールブラスが通過した後にコンクリートに押し込んだ。

3. 応力解放法の測定原理と解析方法

(1) 座標系の定義

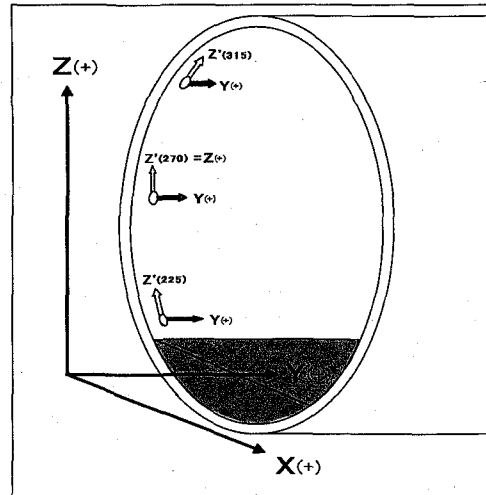


図-3 座標系の定義

今後の議論を進めるため、図-3に示すように座標系を定義する。図のように、Z軸は鉛直方向、Y軸はトンネル掘進方向、X軸は水平方向を示す。また、後で説明する二次元計測においては、各計測ポイントでの円周方向をZ'軸とし、時計周りの方向を正とした。

(2) 応力解放法の測定原理

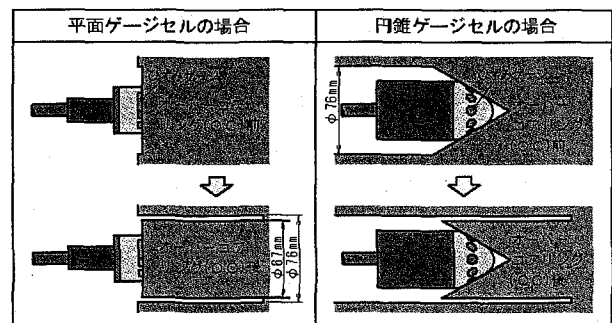


図-4 オーバーコアリングイメージ

応力解放法は、岩盤に作用している応力を推定する方法として実績のある計測方法で、岩盤やコンクリートの一部分の拘束を強制的に解放した際に生じるひずみの変化からその物体に発生してい

た応力を測定する方法である。場所打ちコンクリートに対しても応力測定を行った事例がある。今回の計測では、コンクリート面にひずみゲージを貼り付け、その周辺を円形にオーバーコアリングすることによって解放する。図-4にオーバーコアリングのイメージを示す。

また、今回の計測では、ひずみ計を二次元的に配置する方法と三次元的に配置する2種類の方法を用いる。以下でそれぞれの方法について、詳しく説明する。

(3) 二次元計測の方法

a) ひずみゲージ

二次元計測で使用するひずみゲージを図-5に示す。図のように、ひずみゲージは平面上のそれぞれ4つの方向を計測できるように直径40mmの樹脂モールドに貼り付けられている。計測では、ひずみゲージAがZ'軸方向の測定をできるように貼り付けた。

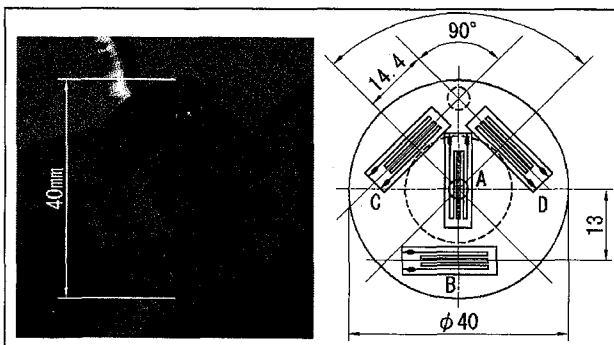


図-5 二次元計測用平面ゲージセル

b) 計測の手順

二次元計測と三次元計測は同一孔で実施しており、図-6はその位置関係を示している。計測の手順は次のとおりである。

- ① コンクリート表面に平面ゲージセル（直径40mm）を接着剤で確実に貼り付け一体化させる。
- ② 平面ゲージセルの外周を内径67mmのコアドリルでオーバーコアリング（深さ80mm）する。
- ③ 測定後、採取したオーバーコアから変形定数を求めるための小径コア（ $\phi 23\text{mm}$ ）を抜き出す。

コアドリルは、回転軸からケーブルを引き出し、オーバーコアリング中のひずみ変化を計測できる構造とした⁴⁾。これにより、ひずみの変化が収束したことを確認している。

c) 解析の手順

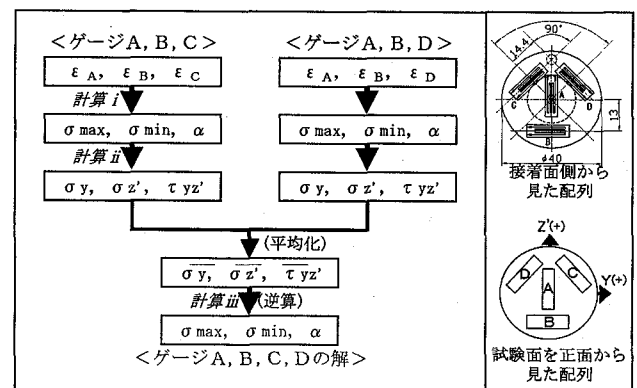


図-7 二次元計測の解析フロー

二次元計測による解析フローを図-7に示す。フローにしたがって計算手順を説明する。

まず、3方向のひずみ計測値（ゲージA,B,C）から主応力と主応力方向を計算する（計算i）。次に主応力をY-Z座標に変換する（計算ii）。

応力状態を計算するには、最低3方向のひずみを測定する必要があるが、今回の計測では4方向のひずみを測定している。このため、ゲージA,B,C

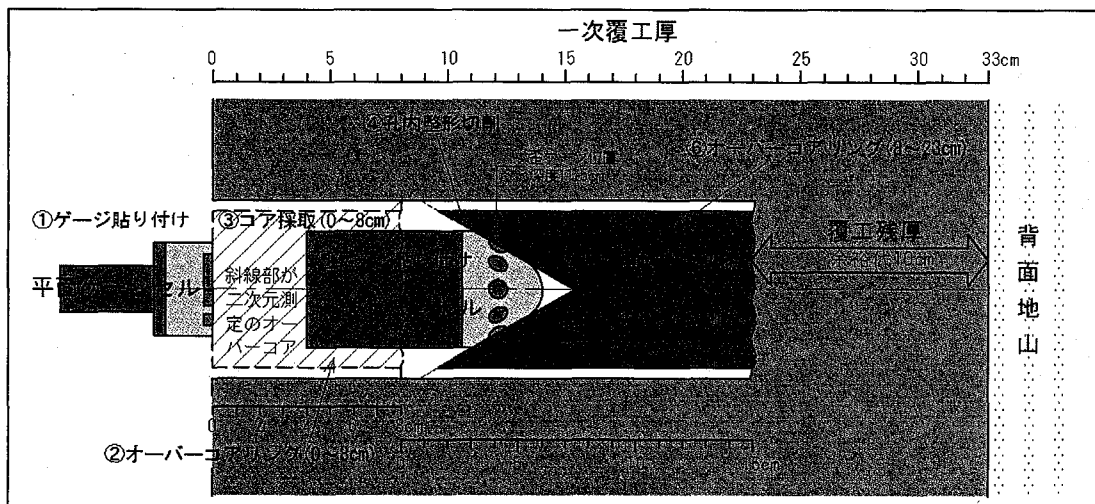


図-6 計測手順と位置

の組みとゲージA,B,Dの組みに分けて、それぞれY-Z座標での応力成分を計算し、平均値を各測点での計測値とした。

最後に、Y-Z座標での応力成分の平均値から主応力と主応力方向を逆算した。

応力に換算する際のコンクリートの弾性定数は、現位置で採取したコアから供試体を作成し、室内実験（繰返し一軸圧縮試験）から算定した。

(4) 三次元計測の方法

a) ひずみゲージ

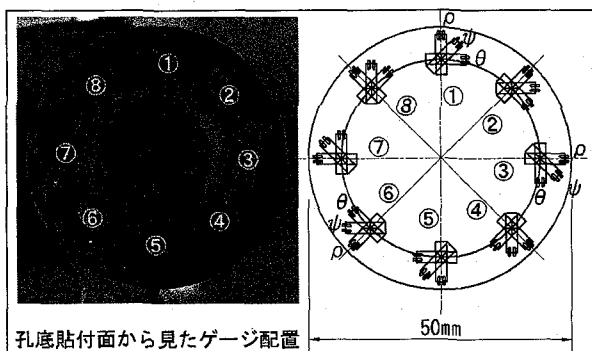


図-8 三次元計測用円錐ゲージセル

コンクリートの表面ではなく、部材内部のひずみを測定する場合、円筒状にコンクリートを切削し、二次元計測で使った平面ゲージセルを貼り付けて応力を解放すると、隅角部に応力集中が生じ測定値に影響を与えることが懸念される。このため、三次元計測では、図-6のように先端が円錐状にとがった形状の樹脂モールドにロゼットゲージを貼り付けた円錐ゲージセルを使用する。円錐ゲージセルには、図-8のように3枚1組のロゼットゲージが45°ピッチに8箇所貼り付けられている。ロゼットゲージは、円錐斜辺方向（ ρ 方向）、円周方向（ θ 方向）、2つと45°に交わる方向（ ψ 方向）となるように取り付けられている。ひずみゲージが覆工表面から11.5cmの位置となるように貼り付けた。

ひずみ計は、ひずみゲージ①と⑤がZ'軸と一致するように取り付ける。

b) 計測の手順

三次元計測は、二次元計測のコアを採取した後に、同一孔で行った。計測手順は以下のとおりである。

- ④ 覆工表面から8cmの深さまでコアが採取された箇所を孔底研磨ビットで再度削って樹脂モールドと同じ寸法の円錐形に仕上げる。
- ⑤ 研磨した場所に円錐ゲージセルを貼り付ける。
- ⑥ 円錐ゲージセルの外周をコアドリルでオーバ

ーコアリングする（深度8cm～23cm）。

- ⑦ オーバーコアリング後、弾性定数測定のための供試体を採取する。

三次元計測でも、オーバーコアリング中のひずみ変化を確認している。

c) 解析の手順

任意の点における応力状態 $\{\sigma\}$ は、次のように6つの未知数で表される。

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\} \quad (1)$$

一方、計測値は、合計24点（8箇所×3点）のひずみが得られている。

$$\{\beta\} = \{\beta_{1\theta}, \beta_{1\rho}, \beta_{1\psi}, \dots, \beta_{8\theta}, \beta_{8\rho}, \beta_{8\psi}\} \quad (2)$$

24点のひずみの計測値は、コンクリートが等方均質性を有しているとみなせば、幾何学的な位置関係から弾性定数Eと測定方程式マトリクスAを用いて式(3)で表すことができる。

$$E \cdot \{\beta\} = A \cdot \{\sigma\} \quad (3)$$

(24行×1列) (24行×6列) (6行×1列)

式(3)を用いて24点の測定値から6つの未知数である最確値 $\{\sigma\}$ を算出する。この手順で計算された最確値 $\{\sigma\}$ を使って最小二乗法により正規化した理論曲線を得ることができる。理論曲線と計測値の比較をおこなうことにより、計測値の確かさを確認できる。

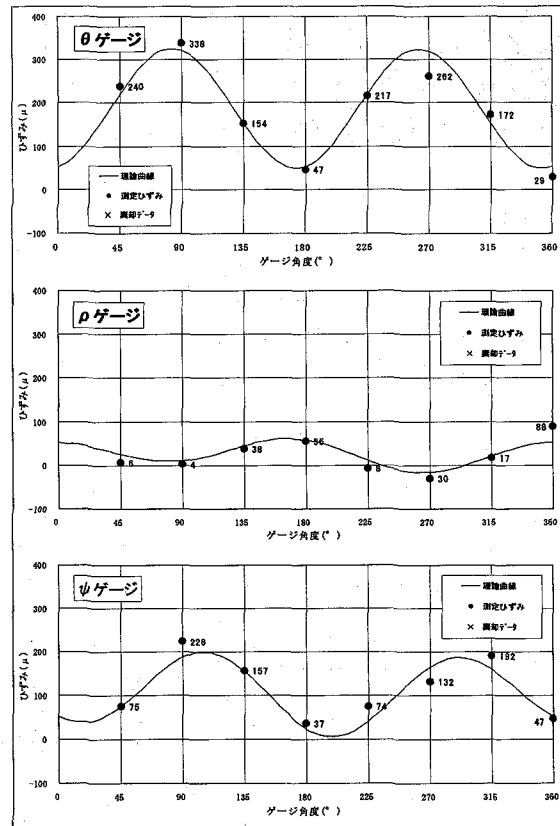


図-9 最小二乗法による理論曲線と計測値

図-9で、A-0点での理論曲線と計測値を比較する。この結果、両者はよく一致しており、今回の

各計測値の信頼性は高いといえる。一般に理論曲線との整合性が低いゲージの測定値がある場合は、その測定値を棄却して再度最確値の計算を行う。

(5) 三本木原トンネルへの適用

a) 計測位置と測点

計測を行ったポイントを図-10に示す。計測は、A断面：617k546.4m地点とB断面：617k614.8mの2箇所で行った。また、計測は左半分の4点(0°, 225°, 270°, 315°)で実施したが、A断面では二次元計測を行った後に三次元計測を行った。一方、B断面では、二次元計測のみを実施した。

計測ポイントにクラックが見られた場合は、トンネル軸方向にずらした位置で測定した。

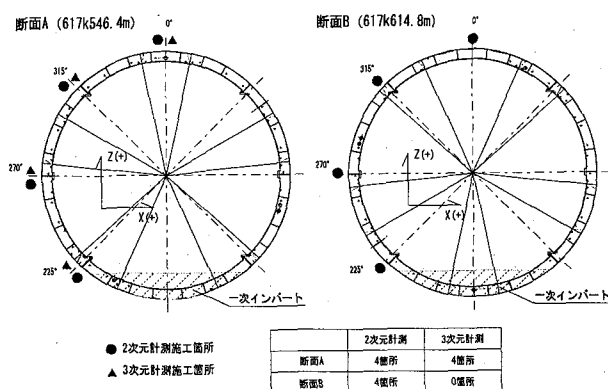


図-10 計測点と計測項目

b) 地質条件と施工条件

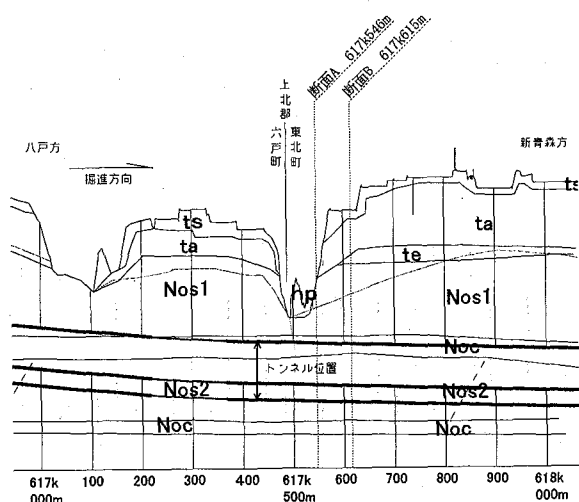


図-11 計測断面の地質条件

表-2 計測断面の地質・施工条件

計測断面		地盤条件		施工条件	
		土被り	地下水位	打設圧力	測定日 材齢
断面	距離程	m	GL-m	SL(Mpa)	
断面A	617k546m	11.71	-4.96	0.358	40日後
断面B	617k615m	26.15	-16.64	0.376	25日後

図-11、表-2のように、この地点は、トンネルが沢部から抜け出す箇所で、土被りがA断面では11.7m、B断面では26.2mとなっている。計測地点の掘削対象地山は、洪積粘土層(Noc)と洪積砂質土層(Nos2)で構成されており、比較的堅固な地盤である。

一方、計測位置でのコンクリート打設圧力は約0.4MPaでほぼ一定している。また、計測を行った時点でのコンクリート材齢は断面Aで40日、断面Bで25日が経過していた。

4. 応力解放法による測定結果

(1) 二次元計測の結果

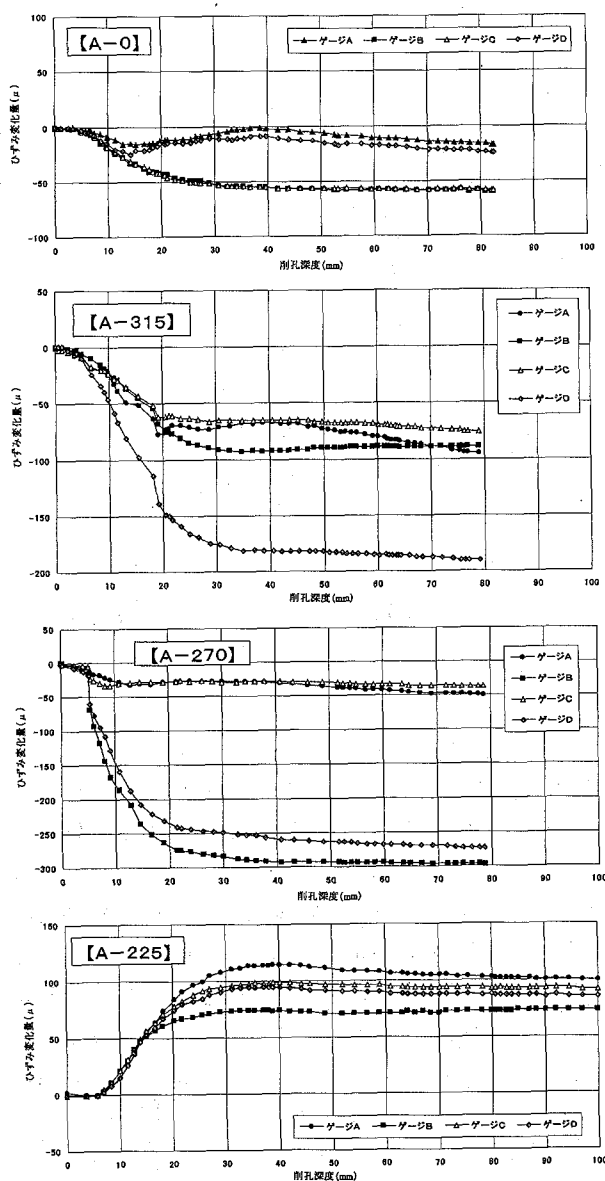


図-12 二次元計測における解放ひずみ曲線

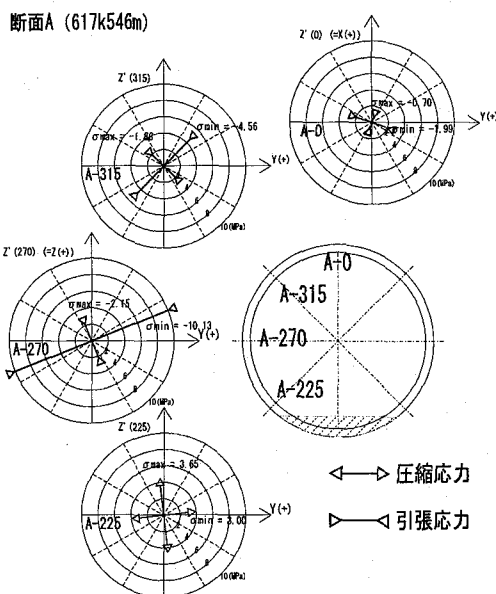


図-13 二次元計測結果 (A断面)

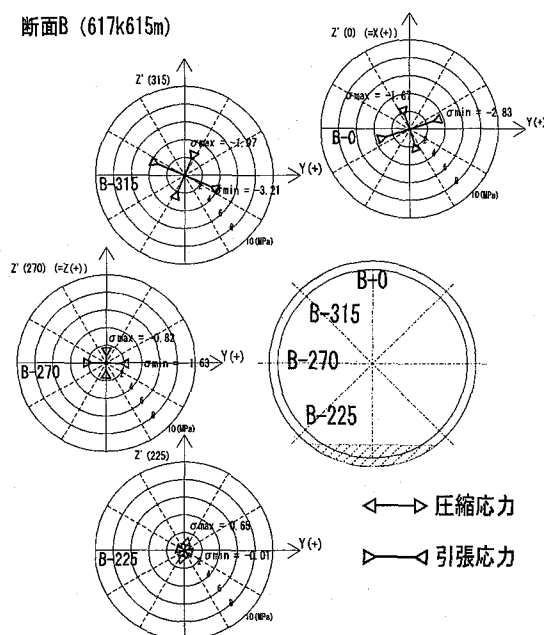


図-14 二次元計測結果 (B断面)

3章で説明したように、今回の計測では、オーバーコアリングを行っている途中のひずみ変化を計測している。ひずみ変化を示した解放ひずみ曲線の例としてA断面の結果を図-12に示す。横軸はオーバーコアリングの削孔深度、縦軸はひずみの変化量を示している。ひずみの変化量が正になる場合は、応力解放にともなうひずみ量が増加したこと、すなわち、コンクリートが膨張し、解放前に圧縮応力が発生していたことを意味する。

図-12によると、削孔深度が40mm程度までは、ひずみが徐々に変化してきているが、削孔深度が70mm程度になるとひずみがほとんど変化しない。

このため、最終の10データを平均し収束値とした。

このように、各測点に対し、収束値を読み取り、解析手順にしたがって算定した主応力を図-13、図-14に示す。二次元計測の結果について特徴を以下にまとめる。

- A,B断面ともに、 0° 、 315° 、 270° では、最大・最小主応力はすべて引張応力となっている。検出された主応力のうち最も大きな引張応力は、A断面では、A-270で-10.13MPa、B断面では、B-315で-3.21MPaであった。
- 225° では、A,B断面ともに最大主応力として圧縮応力が検知された。A断面では3.65MPa、B断面では0.65MPaであった。
- 最小主応力方向はY軸方向となっており、トンネル軸方向に引張応力が卓越していることを示している。

(2) 三次元計測の結果

三次元計測の解放ひずみ曲線の例としてA-0の結果を図-15に示す。また、図-16に、各測点のZX平面における主応力を示す。これらの図より確認できる事項を以下にまとめる。

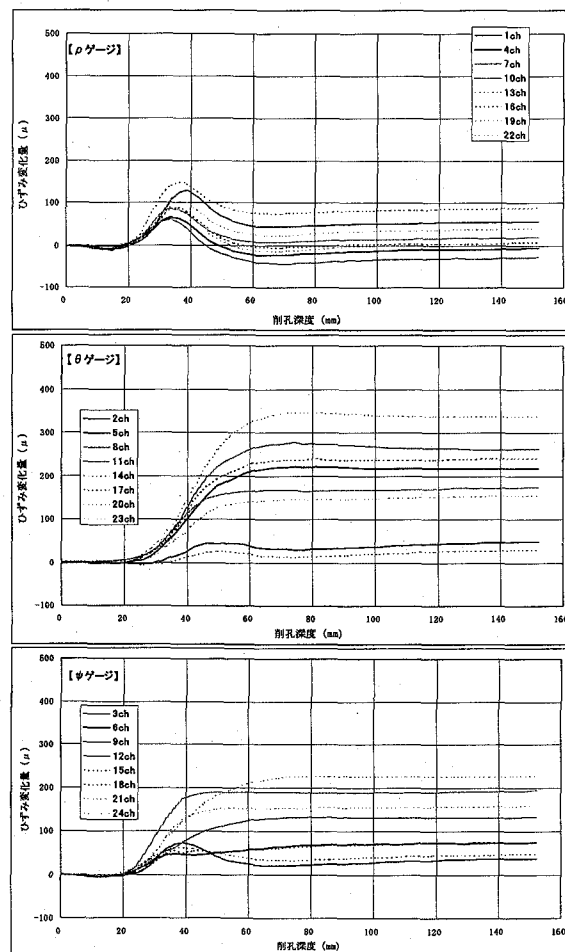


図-15 三次元計測における解放ひずみ曲線

- オーバーコアリング中のひずみは、削孔深さが40～60mmのときにピーク値をとり、100mm程度で収束する。
- 各測点での主応力方向はすべて一次覆工円周方向となっている。また、主応力はすべて圧縮応力となっている。
- 主応力の値は3～5MPaで、A-225の位置が最も小さくなっている。

断面A (617k546m)
三次元計測

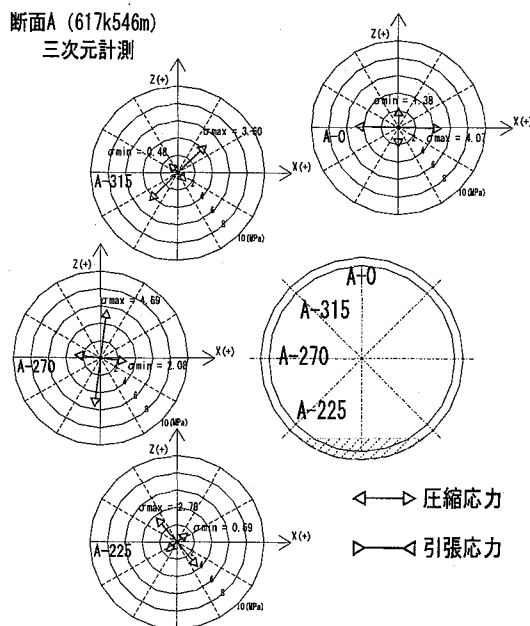


図-16 三次元計測結果 (A断面)

5. 応力解放法による測定結果の評価

(1) 二次元計測の評価

覆工はリング構造で土水圧を支持する構造物であるため、一般に圧縮応力が卓越するが、二次元計測では、覆工表面の多くの箇所で引張応力が検出された。また、ひずみの収縮量も300 μ 程度のももあった。このような計測結果が得られた要因として次の事項が考えられる。

- ① シールド推進力の影響 (本工法では、推進力は内型枠とコンクリートの付着により得る)
- ② コンクリートの乾燥収縮の影響

コンクリートの乾燥収縮のようにコンクリートに等方的なひずみを与える要因の影響を考察するため、荷重に起因する応力 σ_f を抽出する。抽出はトンネル周方向のひずみ ϵ_A とトンネル軸方向のひずみ ϵ_B を用いて、次式より算出した⁶⁾。

$$\sigma_f = E/(1+\nu) \times (\epsilon_A - \epsilon_B) \quad (4)$$

計算した結果を表-3に示す。これによると、荷重に起因する応力は多くの場所で圧縮応力となっ

ているが、A断面の315°で引張応力が検出されている。また、測定位置や測定断面による応力のばらつきが大きく傾向を見出せない。このため、乾燥収縮のみで今回の計測結果を説明することは難しく、他の要因も作用しているものと考えられる。

表-3 荷重にともなう応力の抽出結果

断面位置		A断面 (617k546m)				B断面 (617k615m)			
測定番号		A-0	A-315	A-270	A-225	B-0	B-315	B-270	B-225
ヤング率	E (MPa)	28,200	28,200	28,200	29,100	28,600	28,600	28,600	29,300
ポアソン比	ν	0.212	0.212	0.212	0.235	0.206	0.206	0.206	0.216
解放ひずみ	ϵ_A (μ)	-16	-91	-47	101	-43	-54	-17	20
	ϵ_B (μ)	-59	-89	-296	74	-82	-90	-51	-3
	ϵ_C (μ)	-58	-74	-35	93	-48	-77	-5	-1
	ϵ_D (μ)	-23	-189	-271	87	-77	-39	-3	14
荷重にともなう応力 σ_f		1.00	-0.05	5.79	0.64	0.92	0.85	0.81	0.55

※ 解放ひずみ量の正値は応力解放により伸びる変形を示し、負値は縮む変形挙動を示す。
※ 応力値の正値は圧縮応力が内在することを示し、負値は引張応力が内在することを示す。

解放ひずみ曲線は連続的に変化し、Y軸（トンネル掘進方向）に卓越した引張応力が観測されていることから、計測結果は覆工表面に発生したひずみを反映していると考えられ、今後、そのメカニズムを明らかにする必要がある。

(2) 三次元計測の評価

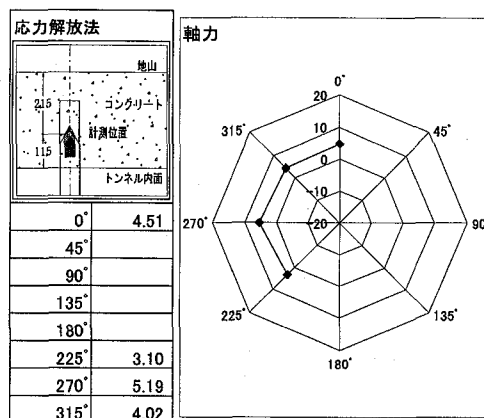


図-17 三次元計測から推定した軸力の分布

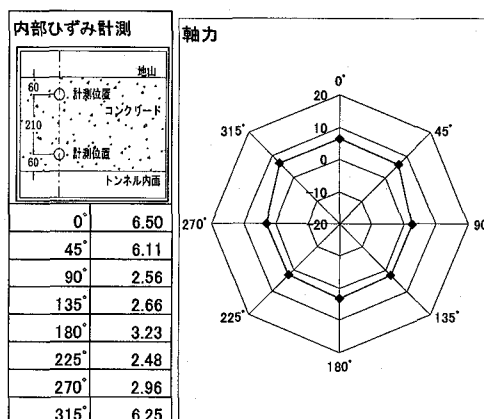


図-18 内部ひずみ計測から推定した軸力の分布

内部ひずみ計測の結果と応力解放法による計測

結果を比較するために、表-4で、ひずみゲージで計測した応力と応力解放法で計測した応力を比較する。内部ひずみ計測では、覆工内面から60mmと270mmの深さのひずみを計測しており、これらの値から計算した。また、それぞれの計測は異なる距離程で実施しており、施工条件の違いも表に示す。表-4の値を用いて、覆工表面から115mmの深さでの応力の分布を図-17と図-18に示す。

表-4 応力計測値の比較

		ひずみゲージによる計測			応力解放法
		h=0mm※	h=115mm※	h=330mm※	h=115
応力計測値 (N/mm ²)	0°	7.90	6.50	3.88	4.51
	45°	5.46	6.11	7.32	—
	90°	0.20	2.56	6.98	—
	135°	5.81	2.66	-3.22	—
	180°	4.24	3.23	1.35	—
	225°	3.91	2.48	-0.18	3.1
	270°	3.99	2.96	1.03	5.19
	315°	6.23	6.25	6.28	4.02
施工条件	距離程	616k203.7m			617k546.4m
	土被り	17.76m			11.71m
	地下水位	GL-7.46m			GL-4.96m

これらのデータより、応力解放法による測定とひずみゲージのよる測定は異なる施工条件で実施されているが、測定値のオーダーはほぼ同じとなった。また、両者ともSLよりも下側の応力が小さくなる傾向が見られた。

6. おわりに

以上の議論から確認できた事項をまとめる。

- 二次元、三次元計測の両方で、オーバーコアリングにともなうひずみは連続的に変化しており、ばらつきのない解放ひずみ曲線が得られた。また、削孔深さ80～100mmで収束しており、オーバーコアリングにともなうひずみの変化を確実に測定することができた。
- 三次元計測では、各ひずみゲージの計測値が理論値と一致し、信憑性が確認できた。これは、計測の対象となったコンクリートの粗骨材の最大径が13mmと小さく、コンクリートの均質性が高かったことが要因に挙げられる。
- 二次元計測では、トンネル掘進方向(Y軸)の引張応力が検出された。この原因は明らかでないが、コンクリートの乾燥収縮や施工時荷重が影響しているものと考えられる。
- 三次元計測では、覆工の円周方向に卓越した圧縮応力が確認された。これは、リング構造の覆工に外力が作用して発生した軸力を測定したものであると考えられる。
- 三次元計測で得られた覆工内部の応力値は、

異なる距離程でひずみゲージを用いて計測した結果とほぼ同じオーダーの値であった。

コンクリートのひずみは、乾燥、クリープなど外力以外の影響を受ける。また、弾性定数も時間とともに変化する。このため、コンクリートに作用する外力に起因する応力を抽出することは非常に難しい。その点、応力解放法は、これら外力以外に起因するひずみがほぼ収束してからの計測となるため、外力に伴う発生応力の計測法としては他の方法に比べ優れている。

今回の計測では、信憑性の高いデータが得られ、さらに、内部ひずみ計測とも類似した結果となった。このため、応力解放法と内部ひずみ計測結果の信頼性が確認できた。

しかし、計測実績が十分ではなく、覆工表面に引張応力が発生したメカニズムを解明する必要があることから、同様の施工において、覆工深さ方向の応力の変化を計測するなどデータを蓄積して、場所打ちライニングを用いた覆工の地山支保メカニズムをさらに明らかにしていきたい。

謝辞：最後になりましたが、今回の計測の計画、実施、成果の取りまとめにあたり、小山幸則先生をはじめ、「財団法人地域地盤環境研究所」の皆様にご多大なご指導・ご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯田・磯谷・井浦・川嶋・小西：シールドを用いた場所打ち支保システムの施工，トンネル工学研究報告集第14巻，pp195-202，2004年11月
- 2) 千代・川嶋・井浦：シールドを用いた場所打ち支保システムの開発と適用，平成17年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集，pp141-146，2005年11月
- 3) 飯田・井浦・小山・水原・千代：シールドを用いた場所打ち支保の内部ひずみの計測，トンネル工学研究報告集第15巻，pp331-338，2005年11月
- 4) 森・岩野・中畠・田仲・竹原：改良コアドリルを用いた応力測定，第40回地盤工学研究発表会，pp961-962，2005年7月
- 5) 土木学会岩盤力学委員会：初期地圧測定方法の現状と課題，1992
- 6) 大寺・真下・関：応力解放法を用いた場所打ちライニングの応力計測結果とその考察，トンネル工学研究論文・報告集第9巻，pp331-338，1999年11月