

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

STRESS MEASUREMENT OF CONCRETE TUNNEL LINING BY STRAIN RELEASING METHOD.

大寺 伸幸¹⁾・真下 英人²⁾・関 伸司³⁾
Nobuyuki OHTERA¹⁾, Hideto MASHIMO²⁾ and Shinji SEKI³⁾

It is difficult to install the effective stress meter or strain gage for ECL(Extruded Concrete Lining)method with the continuous concrete placing compared with the case of the conventional concrete lining. The strain releasing method has been firstly introduced to the stress measurements in ECL and authors discuss about the corresponding results. The three-axis rosette gauge is installed on the surface of concrete and acting stresses are released through cutting of its surrounding. The major and minor principal stresses are evaluated based upon the measured strains.

Key Words: shield tunnel, Extruded Concrete Lining, strain releasing method, steel fiber reinforced concrete

1. はじめに

場所打ちライニング工法は、セグメントを用いず、シールドのテール部でフレッシュコンクリートを打設し、トンネルの覆工を直設構築する工法であり、一般にはECL工法と呼ばれている。

都市域の未固結地盤においてECL工法を適用する場合、覆工コンクリートに鉄筋あるいは鉄骨を補強部材とした「サイクル打設方式」が多く採用されてきたが、経済性や工期短縮を推進するために、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)等を用いた「連続打設方式」の適用を図る必要が生じてくる。

連続打設方式のECL工法では、事前に覆工中に有効応力計や鉄筋にひずみ計を取り付けて、覆工内部のひずみ(発生応力)を計測することが困難である。しかしながら、構築された覆工の安全性の確認あるいは覆工に作用している荷重(土圧・水圧)を推定し、ECL工法のさらなる適用性を広げるためにも、覆工に発生している応力を推定する必要があった。

本報告は、岡南共同溝工事において、覆工内面側の発生応力を推定するために、岩盤の初期地圧や鋼材などの応力測定で実績のある「応力解放法」に着目し、現場で比較的簡便に覆工応力の推定が可能となる測定方法について検討し、鋼繊維補強コンクリートで構築された覆工に適用した結果を報告するものである。

2. 計測概要

2.1 工事概要

岡南共同溝工事は、岡山市内の一般国道2号線下に構築されたトンネルで、施工方法は、現地への適用性

-
- | | |
|-----------|---------------------|
| 1) 正会員 | 建設省中国地方建設局岡山国道工事事務所 |
| 2) 正会員 工博 | 建設省土木研究所トンネル研究室 |
| 3) 正会員 | 清水建設(株)土木本部技術第二部 |

や経済性等を含めた技術検討を行った結果、地盤のゆるみを抑え、地盤沈下や周辺構造物への影響を最小限にすることが可能となる E C L 工法が採用された。トンネル周辺地盤は洪積砂礫層であり、計測付近の土被りは約 15～16m (2.3～2.5D) で、トンネル中心位置での水圧は約 160kN/m²である。

一次覆工の設計覆工外径、内径および覆工厚さはそれぞれ、6.5m、5.9m、および 0.3m である。(図-1)

2.2 計測手法

応力解放法は、計測するコンクリートの表面にひずみゲージを貼り付け、周辺部をコンクリートカッタ等で切欠いて応力を解放したときのひずみの変化量から、発生応力を推定する手法である。この場合、切削深さを大きくすることができれば、オーバーコリングと同様に応力をほぼ解放することが可能になるが、覆工の健全性を考えると、この切削深さを計測精度が低下しない範囲で小さく抑える必要がある。

既往の研究¹⁾によると、スリットの切削深さDと切削長さLとの比が 0.3 のときに、覆工表面の応力がほぼ解放されるとされているので、切削長を 100mm とし、切削深さが 30mm とときのひずみを採用した。(最大切削深さを 50mm とした)

計測方法は、計測する位置に 3 軸ロゼットゲージ (ゲージ長 60mm) を貼り付け、周辺部をコンクリートカッタで 5mm 毎に順次切削してひずみを計測し、切削深さ 30mm ときの 3 方向のひずみ成分から、最大主ひずみと最小主ひずみを求めた。図-2 に切削部の詳細図を示す。

2.3 計測位置

計測位置は表-1 に示す通り 2 箇所を選定し、切削試験はコンクリート打設後約 6 ヶ月経過した時期に実施した。

測定点は、解析値と比較するために各断面において、トンネル周方向では 7 点 (インバートを除く約 45 度ピッチ) とし、軸方向に 3 断面、計 21 測点で実施した。

図-3 に計測箇所の断面図を、図-4 に計測箇所の平面図をそれぞれ示す。

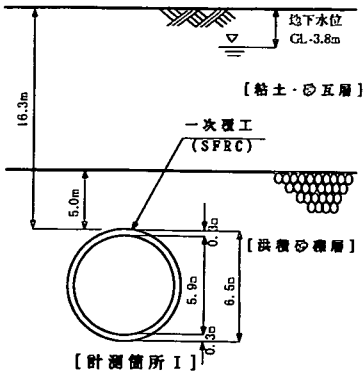


図-1 共同溝断面図

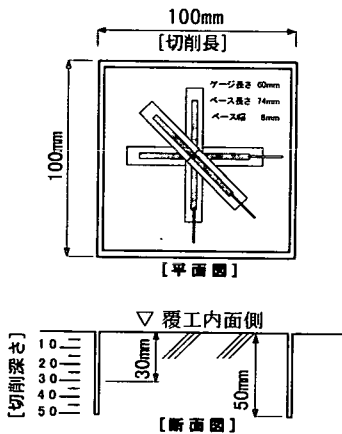


図-2 切削部詳細図

表-1 計測断面比較表

	計測箇所 I	計測箇所 II
計測位置	発達立坑から 約 270m	発達立坑から 約 1450m
土被り	16.3m	14.9m
覆工打設時期	1997. 1. 16	1998. 4. 28
計測時期	1997. 8. 6	1998. 11. 20
覆工表面温度	25.0℃	21.0℃
圧縮強度 (7 日)	57～58N/mm ²	58～60N/mm ²
備考	3 断面	3 断面

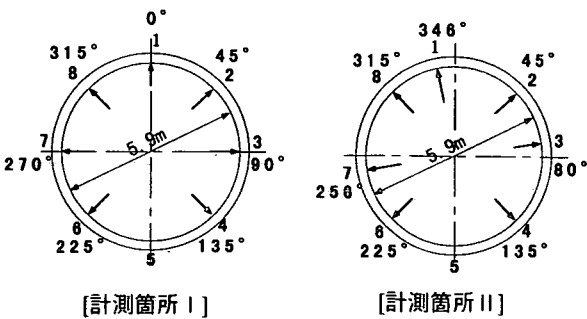
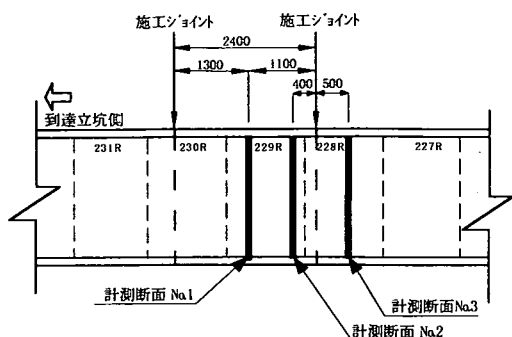
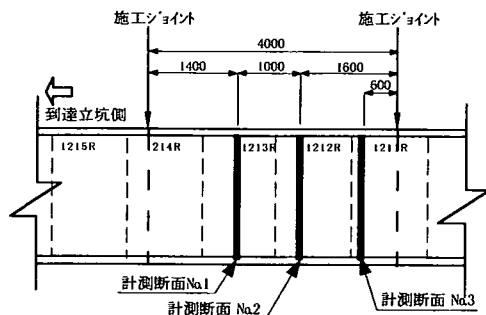


図-3 計測箇所断面図



[計測箇所Ⅰ]



[計測箇所Ⅱ]

図-4 計測箇所平面図

2.4 計測されたひずみの分析

応力解放法により計測されたひずみは、覆工の内面側に発生しているもので、外荷重（土圧、水圧等）によるひずみ以外に次のようなひずみが含まれているものと考えられる。

(1) 計測されたひずみ (ϵ)

= 拘束ひずみ（温度、乾燥、自己収縮）+ **外荷重ひずみ** + 切削時の摩擦熱 + etc

(2) 最大主ひずみ ($\epsilon_{\max}$)

= 拘束ひずみ（温度、乾燥、自己収縮）+ **外荷重ひずみ** + 切削時の摩擦熱 + etc

(3) 最小主ひずみ ($\epsilon_{\min}$)

= 拘束ひずみ（温度、乾燥、自己収縮）+ 切削時の摩擦熱 + etc

ここで、図-5に示す通り、最大主ひずみは覆工周方向、最小主ひずみは覆工軸方向に発生することになるので、以下に示す3項目の仮定を設定し、(2)最大主ひずみ ($\epsilon_{\max}$) と(3)最小主ひずみ ($\epsilon_{\min}$) の差から、覆工周方向の外荷重に起因するひずみの近似値が得られるものと考えた。

- ① 覆工に作用する外荷重は、トンネル縦断方向で変化しないものとし、外荷重による覆工軸方向のひずみは発生しないと仮定
- ② 覆工の周方向と軸方向の拘束度の違いはないと仮定
- ③ 施工ジョイントから計測位置までの距離の違いはないと仮定

以上の条件に基づき、計測された主ひずみから外荷重による応力 (σ) を(式-1)に示す通り算出した。

■最大主応力 : $\sigma_{\max} = \{E / (1 - \nu^2)\} \cdot (\epsilon_{\max} + \nu \epsilon_{\min})$

■最小主応力 : $\sigma_{\min} = \{E / (1 - \nu^2)\} \cdot (\epsilon_{\min} + \nu \epsilon_{\max})$

■外荷重による応力 : $\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
 $= \{E / (1 + \nu)\} \cdot (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min})$
 ----- (式-1)

ここに、 ν : ポアソン比

(0.235: 試験結果から設定)

E : コンクリートのヤング係数

(41kN/mm²: 圧縮強度から設定)

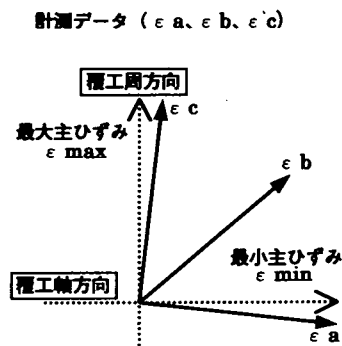


図-5 主ひずみの概念図

3. 計測結果

3.1 事前検討

(1) 切削熱による影響

今回使用した3軸ロゼットゲージは、抵抗線ゲージ（コンクリート用で線膨張率 $11.8\mu/\text{℃}$ ）ではあったが、切削熱によるコンクリート表面の温度上昇量（ $2.5\sim 5.0\text{℃}$ 程度）を考慮し、コンタクトゲージとの出力差について確認試験を実施した。試験結果、コンクリート温度が 16℃ から 36℃ の間では、メーカーの補償値（ $-1.8\mu/\text{℃}$ ）以下であり、実用上無視できる値であると判断し、温度補正は実施しなかった。

(2) 切削位置の近接による影響

切削して解放される応力は、切削するスリットの順番や切削位置の接近による影響を受けることが考えられたため、図-6に示すように2カ所のゲージを覆工軸方向に並べて切削試験を実施した。試験結果、解放ひずみ曲線（主ひずみ-切削深さ曲線）がほぼ同一になり、切削深さ 30mm で解放される主ひずみも一致することが判明した。

したがって、切削する条件の違いによって測定された結果の違いは殆どなく、再現性の高い測定方法であることを確認した。（図-6、図-7）

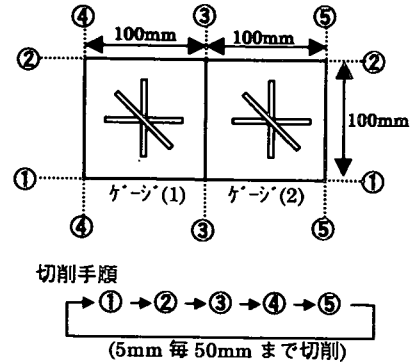
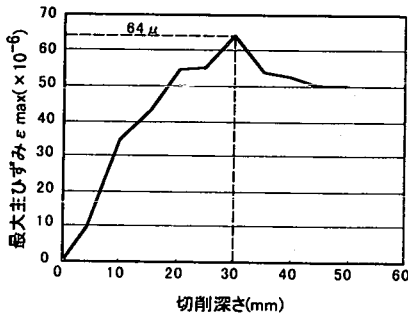
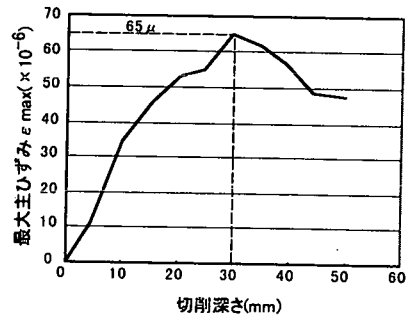


図-6 切削位置近接試験



[ゲージ(1)]



[ゲージ(2)]

図-7 ひずみ測定例（切削深さ-最大主応力）

3.2 計測データの分析

(1) 主ひずみ

計測された最大主ひずみと最小主ひずみを図-8に示すが、その特徴は次の通りである。

[計測箇所Ⅰ]

- ・最大主ひずみは、 135度 と 225度 付近でばらつきが大きい。
- ・最小主ひずみは、計測断面 No.1 の値がゼロに近い。
- ・主ひずみの差の最大値は、計測断面 No.2 (225°) で 86μ である。 [$\epsilon_{\max}=100\mu$, $\epsilon_{\min}=14\mu$]
- ・最大主ひずみが最も大きいのは、計測断面 No.3 (135°) である。 [$\epsilon_{\max}=103\mu$, $\epsilon_{\min}=24\mu$]

[計測箇所Ⅱ]

- ・最大、最小主ひずみ共に計測箇所Ⅰよりばらつきが少ない。
- ・主ひずみの差の最大値は、計測断面 No.1 (80°) で 38μ である。 [$\epsilon_{\max}=56\mu$, $\epsilon_{\min}=18\mu$]
- ・最大主ひずみが最も大きいのは、計測断面 No.2 (256°) である。 [$\epsilon_{\max}=64\mu$, $\epsilon_{\min}=40\mu$]

(2) 発生応力

計測された最大主ひずみと最小主ひずみの差から求めた応力分布図を図-8に示すが、この図から以下のことが判る。

〔計測箇所Ⅰ〕

- ・外荷重により覆工に発生する最大応力は、 2.9N/mm^2 である。〔計測断面 No.2(225°)〕
- ・計測値は、外荷重を「水圧+自重」と想定した場合の解析値に比較的近いが、計測断面 No.1 以外は多少のばらつきが見られる。
- ・覆工内面に発生している応力は全て圧縮である。(拘束ひずみを加えた最大応力は 4.7N/mm^2)

〔計測箇所Ⅱ〕

- ・外荷重により覆工に発生する最大応力は、 1.3N/mm^2 である。〔計測断面 No.1(80°)〕
- ・計測値は、外荷重を「水圧+自重」と想定した場合の解析値よりも小さい値となる。
- ・覆工内面に発生している応力は全て圧縮である。(拘束ひずみを加えた最大応力は 3.2N/mm^2)

ここで、比較のための解析値は、「完全剛性一様リング」の全周ばねモデルで、荷重条件は、「自重+水圧」および「自重+水圧+土圧 (1.5D)」とし、水圧は覆工の法線方向に作用させた。また、覆工厚さについては、設計覆工厚さ 300mm に対して、超音波計測で測定された平均値の結果から 350mm とした。なお、この値は、設計覆工厚にシールドマシンのスキンプレート厚 50mm を加えた値 (実打設厚) と同じである。

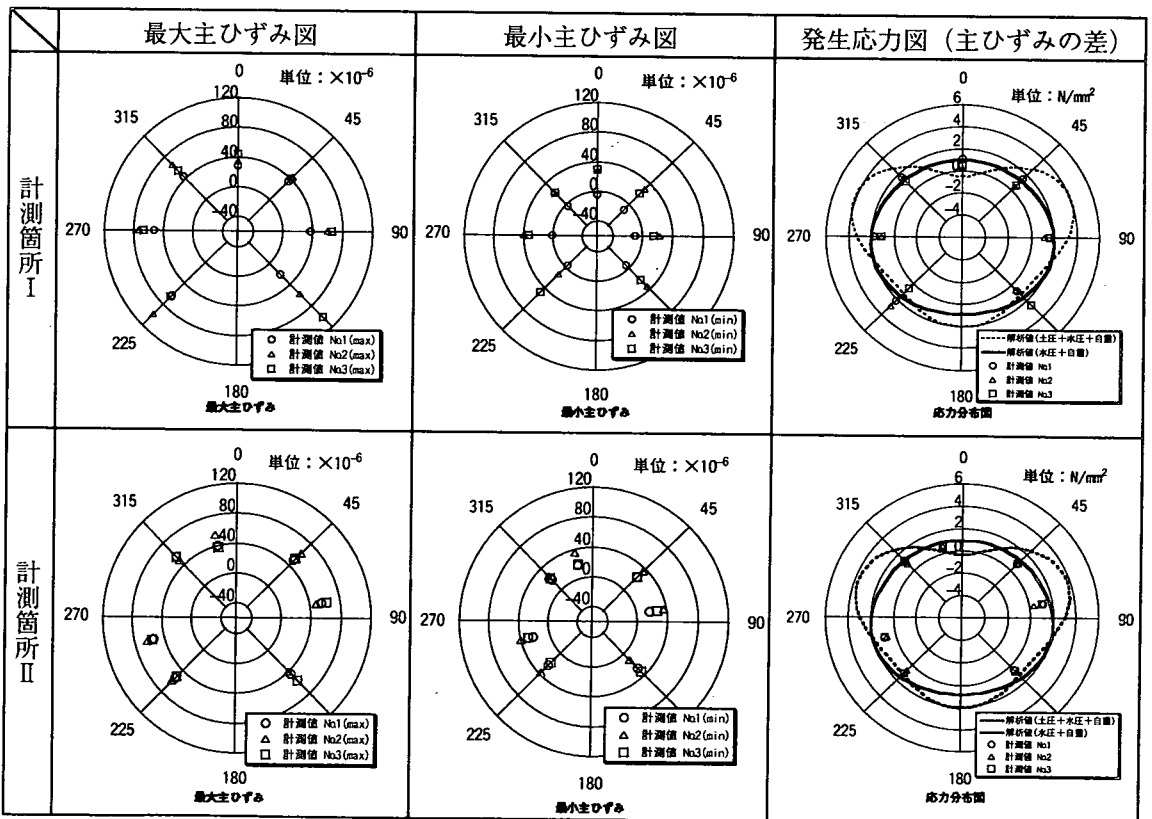


図-8 最大・最小主ひずみと発生応力図

表－２ 発生応力（主ひずみの差）と解析値比較表

測定位置		計測箇所Ⅰ					計測箇所Ⅱ				
		解析値(N/mm ²)		発生応力(N/mm ²)			解析値(N/mm ²)		発生応力(N/mm ²)		
		土圧+水 圧+自重	水圧+ 自重	断面 No.1	断面 No.2	断面 No.3	土圧+水 圧+自重	水圧+ 自重	断面 No.1	断面 No.2	断面 No.3
1	0°	-0.5	1.0	1.1	0.2	0.5	0	1.0	0.7	0.6	0.6
2	45°	2.7	1.3	1.5	0.5	0.6	2.5	1.2	0.8	0.9	0.9
3	90°	3.3	2.0	1.6	1.3	1.7	3.6	1.8	1.3	0.4	1.1
4	135°	1.3	1.6	0.9	0.8	2.6	1.2	1.6	0.6	0.9	0.8
6	225°	1.3	1.6	2.2	2.9	0.6	1.2	1.6	1.1	0.8	1.1
7	270°	3.3	2.0	1.7	1.1	1.1	1.9	2.1	1.0	0.8	0.9
8	315°	2.7	1.3	1.6	1.4	1.1	2.5	1.2	1.2	0.8	1.1

注記) 表中の数字の正は圧縮、負は引張応力を示す

４．結果と考察

今回の計測結果と解析値とを比較すると、計測断面毎に多少のばらつきがあるものの、外荷重を「自重+水圧」とした値に近い結果になり、覆工には土圧が作用していないことになる。このことは、ECL工法の最大の特長である「フレッシュコンクリートを加圧して空隙を充填し、地山に密着させる」ことに起因し、周辺地盤を緩めることなく、地盤反力を積極的に評価できる可能性を示唆していることになる。

また、覆工内面の応力は全て圧縮応力で引張応力は発生していないことが確認された。さらに、計測された3方向のひずみ値は全て小さくほぼ一様な分布を示すため、少なくとも覆工の内面側に大きな応力は発生しておらず、覆工は安全であると考えられる。

一方、応力解放法の適用性については、当初想定していたよりもデータのばらつきは少なく、覆工応力の推定には有効な手段であると考えられ、今後施工される同種工事への展開が期待される。

５．おわりに

本報告では、現位置で簡単に応力を計測できる一つの手法として、応力解放法を適用した結果をまとめた。計測の結果、

- ① 覆工内面の応力は全て圧縮応力であった。
- ② 覆工に作用している外荷重は、「自重+水圧」に近い結果が得られた。

しかし、今回の計測結果から直ちに覆工の設計に用いる外荷重を設定するには、外荷重による発生応力を求める際の設定条件や計測されたデータ数が少ないこと等、まだいくつかの課題が残っている。

今後、応力解放法による計測手法の確立を図るため、室内試験等の基礎的実験を行い、曲げモーメントが作用する場合の影響や鋼繊維補強の混入による影響を明らかにしたいと考えている。

最後に、本計測の実施にあたり、ご指導をいただいた「岡南共同溝施工管理技術検討委員会（委員長：今田徹東京都立大学教授）」の関係各位に深く謝意を表します。

参考文献：

- 1) 樋口・神田・三木：コンクリート部材中の応力推定法、土木学会論文集、No.585/V-38,11-18,1998.2