

(70) 吹付けコンクリート覆工の軸応力測定結果と計測上の問題点

大林組技術研究所

○ 山下 幸 夫

同 上

藤 原 紀 夫

1. まえがき

吹付けコンクリートはN A T Mの主要な支保材のひとつであり、掘削直後のトンネル壁面に施工されて、一次覆工として地山を支保する重要な役割を担っている。そのため覆工に発生する応力を正確に把握することは、施工管理の面からも、また設計にフィードバックして安全で経済的なトンネルを構築するうえからも極めて重要である。ところが筆者らのこれまでの研究で、吹付けコンクリート覆工の応力測定結果が使用計器によって大きく異なることが明らかになった。特にグレーツェル社製ブレッシャーセル（以下、応力セルとよぶ）を用いた場合の指示値が、実際に作用する応力よりも低いように思われる。

応力セルの応答性については畠ら¹⁾が検証試験を実施し、載荷応力に対して比較的よい応答があることを報告している。ただし、これはモルタルおよび石膏内に埋設したものであり、筆者らが吹付けコンクリートで供試体を作成して載荷応答試験を行った結果では、指示値は載荷応力の70%以下の値しか示さなかった。また旭川トンネルで同一断面・同一位置に応力セルとコンクリート有効応力計（東横エルメス製、以下、有効応力計とよぶ）を埋設して計測した結果でも、前者の方が低い指示値を示している。吹付けコンクリートの特殊性が原因となっているものと考えられる。

応力セルは我国にN A T Mが導入されて以来、現在でも多くの現場で使用されている。それだけに、吹付けコンクリートに埋設した場合の応答性が悪いことが確認されると、過去に測定された多くのトンネルの計測データと計測結果の解釈にも影響を及ぼす可能性があり、また今後の計器選定にも影響を与えかねない問題を含んでいる。ここでは旭川トンネルで得られた覆工軸応力の測定結果と検証結果について述べる。

2. 二種類の計器を用いた覆工軸応力の現場測定結果～旭川トンネルでの測定例

旭川トンネルは未固結地山に施工される延長860mの道路トンネルである。トンネルの概要および掘削時の挙動についてはすでに報告している。²⁾³⁾ここでは施工管理の一環として、有効応力計により吹付けコンクリート覆工の応力測定を行っているが、土被りの増加とともに最大で20MPa(204kgf/cm²)を超える軸応力の発生がみられた。そのため覆工応力の確認と使用計器の検証を目的として、応力セルを同一断面に並置して、二種類の計器を用いて軸応力の測定を行なうことにした。

図-1に測定位置でのトンネル断面図を示す。吹付けコンクリートは厚さ20cmで、一次(5cm)と二次(15cm)に分けて施工される。また1mピッチで鋼製支保工が全周に建込されている。応力セルと有効応力計は上半断面の一次吹付け施工後、トンネル天端および左右肩部の3箇所に、それぞれ図-2に示す位置に埋設した。

図-3は軸応力の経時変化を示したものである。この図から明らかなように、覆工軸応力の測定結果は使用する計器によって異っており、応力セルの指示値がすべての測点で有効応力計よりも低いことが分かる。最終軸応力は表-1に記載しているが、有効応力計の指示値を基準とした場合、応力セルのそれは

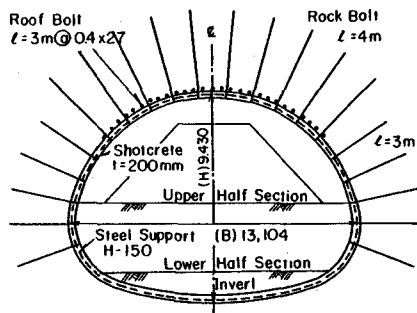


図-1 トンネル掘削断面図 (SP.612)

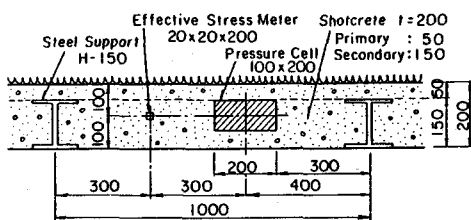


図-2 応力計の取付け位置

天端で57%,左右の肩部ではこれよりも更に低く3~21%の応答しか得られていないことになる。

軸応力は天端が最も大きく、有効応力計で10.1MPaの指示値が得られている。測定位置はトンネルの終点側に近く、土被りが浅くなっているため軸応力もピーク時に比べると減少している。また左肩部の軸応力が右肩部に比べて大きくなっているのは、地表面が左下りに傾斜しているため、偏圧的な荷重が作用していることが原因と考えられる。他の計測断面でも同様の傾向が認められた。

3. 使用計器の検証

応力セルの検証については畠ら¹⁾が実施している。モルタルおよび石膏ブロック内に応力セルを埋設して載荷応力に対する応答を調べたものである。載荷重は10~50 t(10 tピッチ)をそれぞれ最大荷重とし、各段階ごとに載荷・除荷を繰返して測定を行なった。図-4はその結果をモルタル供試体の場合について示している。指示値は載荷応力と必ずしも一致しないものの、比較的よい応答を示していると言える。石膏の場合も同様の結果が得られている。したがって応力セルは、計器自体の応答性については問題がないと考えられる。

一方、図-5はコンクリート供試体を用いた有効応力計の検証結果を示したものである。この計器は被測定コンクリートと同じ材料をコア内部に詰め、コンクリート柱を介してロードセルにより荷重を測定する構造となっている。計器の見掛けの弾性係数が被測定コンクリートと常に一致するため、材令による力学的性質の変化の影響を受けにくいという特長がある。受圧面も20×20 mmと小さい。図から明らかなように、有効応力計もまた載荷応力に対する応答が良いことが分かる。

4. 吹付けコンクリート供試体による応力セルの載荷応答試験

吹付けコンクリートがモルタルおよび通常のコンクリートと異なる点は、圧送された材料をノズルを介して吹付けることにある。跳返りが生じやすく、また締固めを行なわないためにポーラス(多孔質)になりやすい。一次覆工は実際にはこのような材料で構成されている。しかも薄肉構造となっている。

筆者らはこのような覆工の状況を反映させるため、吹付けコンクリートで薄肉供試体を作成して応力セルの応答性を調べた。図-6に供試体の形状・寸法を示す。厚さは150 mm(供試体No.1,2)と200 mm(No.3,4)の2種類とした。

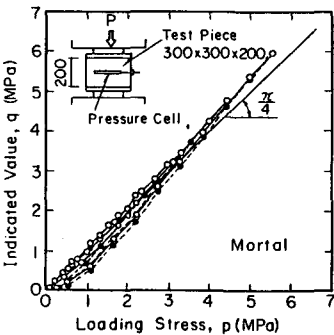


図-4 応力セルの載荷応答試験結果(畠ら¹⁾)

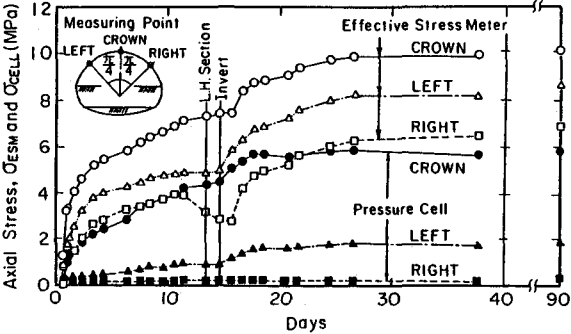


図-3 覆工軸応力の経時変化

表-1 軸応力の測定結果(計器の違いによる指示値の相違)

Measuring Instrument	Axial Stress, Final Values (MPa)		
	Left	Crown	Right
① E.S. Meter	8.57	10.14	6.87
② Pressure Cell	1.83	5.81	0.23
②/①×100 (%)	21.4	57.3	3.3

* E.S. Meter Effective Stress Meter

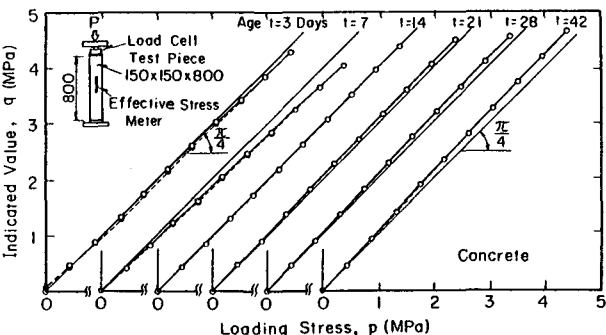


図-5 有効応力計の載荷応答試験結果

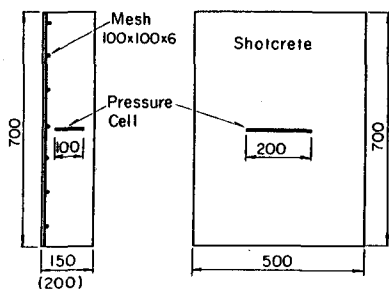


図-6 吹付けコンクリート供試体

図-7に載荷応答試験の結果を示す。応力セルは載荷初期の段階から低い指示値しか示さず、吹付けコンクリートの中では応答性が悪いことが理解される。一般的な傾向として、供試体にクラックが発生したあと急激に指示値が上昇する現象が認められるが、これはコンクリートの局部的な破壊により受圧面に応力集中が生じているためである。載荷応力に対する応答を正確に表わしているものではない。No.3の供試体では最終的に載荷応力よりも高い指示値が得られているが、これも同じ理由によるものと考えられる。

図-8は応力セルの指示値を、載荷応力に対する百分率で表わしたものである。応力集中がないと思われる5MPaまでの応力レベルでは、70%以下の応答しか示していないことが分かる。なおNo.1の供試体は極端に指示値が低くなっているが、試験終了後の観察から、受圧面で図-9に示すような品質不良部が確認された。この品質不良部は受圧面のほぼ半分を被りもので、試験結果に大きな影響を与えているものと思われる。受圧面の状況次第では、応力セルの計器としての信頼性が著しく低下することを示すものであり、注目される。

5. 弾塑性解析による覆工軸応力の解析

旭川トンネルの計測断面(S.P.612)で、実際に覆工に発生している軸応力を確認するため、FEMによる二次元弾塑性解析を行なった。ここではトンネル壁面の変位が測定されている。そこで、変位が実測値に合うように地山物性値を変えてシミュレーション解析を行ない、そのときの軸応力を求めることにした。変化させる定数は地山の弾性係数(E)と側圧係数(K_0)とした。

図-10はトンネルの先端直上で測定された地山変位の特性曲線である。上半断面を掘削し覆工が施工されるまでに22%、ロックボルト打設と変位計測が開始されるまでに35%の変位が生じていることになる。解析はこれらの作業手順および掘削段階を考慮したステップ解析によった。地山はDrucker-Pragerの降伏基準による平面ひずみ要素とし、吹付けコンクリートと鋼製支保工は弾性ビーム要素でモデル化した。

表-2に壁面変位の対比と、解析に用いた入力定数の一部を示す。解析値と実測値はA測線で合わないものの、その他の測線では良くシミュレーションできている。吹付けコンクリートの弾性係数(E_{ORT})は土屋⁵⁾によって詳しく研究され、若材令から高い弾性係数を示すことが報告されている。そのため、ここでは E_{ORT} の経日的変化は考慮せず、各解析ステップを通じて同じ値を使用した。表-3は覆工に発生する最終軸応力を、解析値と実測値とを対比して示し

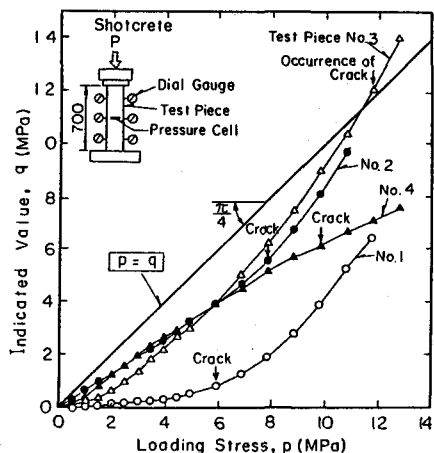


図-7 吹付けコンクリート供試体による載荷応答試験結果

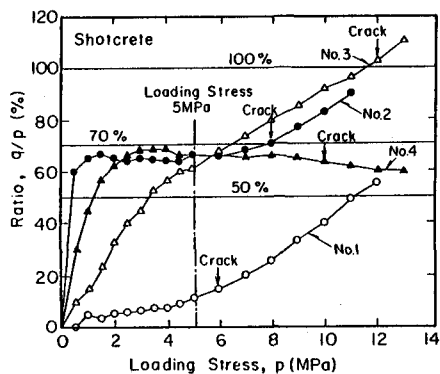


図-8 $p \sim q/p$ の関係

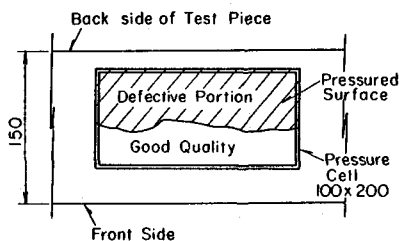


図-9 受圧面の状況(供試体No.1)

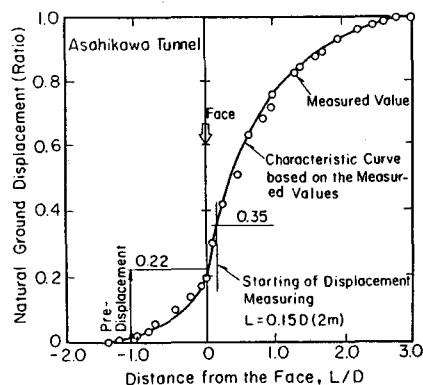


図-10 地山変位の特性曲線

たものである。有効応力計による測定結果は解析値に対して天端で97%,左右の肩部で75~93%程度となっている。図-10に示す先行変位(0.22)が厳密には切羽到達時点のものであり、吹付けコンクリートの施工がこれよりも若干遅れることを考慮すると、有効応力計は実際にはかなり良い応答を示していることが推察される。

6. まとめ

ここでは旭川トンネルで得られた覆工軸応力の計測結果をもとに、応力セルと有効応力計を用いた場合の指示値について検証を加えてきた。その結果明らかになった点をまとめて示すと次のようである。

1) 応力セルと有効応力計をトンネル内の同一断面に並置して測定した結果では、前者が常に低い指示値を示した。有効応力計を基準とした場合、トンネル天端では約60%,それ以外の測定では3~21%の指示値しか得られていない。

2) 有効応力計の指示値はFEM解析で求めた軸応力と比較的よく一致している。

3) 応力セルはモルタル供試体に埋設して載荷応答試験を行った結果では応答性がよいことが確認された。ただし吹付けコンクリート供試体では載荷応力に対して70%以下の応答しか示さない。

以上の結果から、応力セルが特に吹付けコンクリートの中で十分な応答を示さないことが明らかになった。セル周辺に跳返りによる不良部または空隙が生じやすく、受圧面が接触不良になることが原因と考えられる。旭川トンネルの実測データで、天端よりも肩部に埋設した計器の指示値が極端に低くなっているのは、受圧面が水平に近くなるため、不良部がより発生しやすくなるためであろう。受圧面の接触不良で計器の応答性が著しく低下することは、4章(図-7~9)からも明らかである。計器の持つ本来の機能というよりは、むしろ受圧面の大きさに支配される問題であると思われる。

なお、ここでは有効応力計を吹付けコンクリート供試体に埋設した検証試験は実施していない。今後はこの計器も含めて、多くの応力計について検証を行って行く必要があると考えている。

参考文献

- 1) 畠, 谷本, 西原, 刈谷; トンネル覆工内応力計の検定, 土木学会関西支部年講, 54年6月
- 2) 山下, 藤原; 土被りの違いによるトンネル周辺地山の变形特性について, 土木学会第41回年講, 61年11月
- 3) Y.Yamashita, T.Fujiwara; An Example of Measurements on the Behaviors of Oblate and Large Section Tunnel in Unconsolidated Ground. FMGM, 2nd International Symposium, April, 1987(投稿中)
- 4) 木村, 藤原, 山下; 載荷重に伴うブレッシャーセルの応答試験(成田新幹線取香トンネル), 鉄道建設公団, 大林組技術研究所・技術レポート, 57年1月
- 5) 土屋; ロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法の設計に関する研究, 学位論文, 1986年5月

表-2 解析値と実測値との対比(変位)

Measuring Lines	Final Displacement (mm)		Remarks	Input Data
	Analysis	Measured		
T	15.12	15		$K_0 = 0.90$ $E = 700 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ $C = 0.2 \text{ (")}$ $\theta = 35 \text{ (deg.)}$ $\gamma_1 = 1.85 \text{ (tf/m}^3\text{)}$ $E_{CRT} = 2.0 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ $ESTL = 2.1 \times 10^6 \text{ (")}$
C	30.40	30.38		
A	7.35	12.61		
B	7.09	7.28		

表-3 解析値と実測値との対比(覆工軸応力)

Axial Stress	Final Values (MPa)		
	Left	Crown	Right
① Analysis Values	9.24	10.47	9.19
② E.S. Meter	8.57	10.14	6.87
③ Pressure Cell	1.83	5.81	0.23
②/① x100 (%)	92.7	96.8	74.8
③/① x100 (%)	19.8	55.5	2.5

(70) MEASURED RESULTS OF AXIAL STRESS IN SHOTCRETE LINING AND PROBLEMS IN MONITORING

Yukio YAMASHITA and Toshio FUJIWARA
Technical Research Institute, Ohbayashi Corp.

ABSTRACT

Shotcrete plays an important role as a primary lining in ground surface, when applied to a tunnel wall surface following excavation. It is one of the main support members of NATM. For this reason, it is extremely important for construction management and safe and economical tunnel construction/design feedback to accurately assess the stress occurring within lining.

However, it was made clear in the Asahikawa tunnel, as a result of measurements from two different types of instruments, embedded in the same section and the same position of the shotcrete lining, that the indicated values varied greatly with different instruments. The instruments used were as follows; Pressure Cell made by GLÖTZL (West Germany) and Effective Stress Meter made by TOYOKO ELMES (Japan).

This paper looks at the above mentioned measured and analyzed results of the lining axial stress using FEM elasto-plastic analysis, and examines the results of instruments from the loading response test. The items clarified are as follows:

- 1) As a result of measurements in which both the Pressure Cell and Effective Stress Meter were placed in the same section of the tunnel, the former always indicated lower values. When the Effective Stress Meter is adopted as a reference, approximately 60 % of the indicated values were obtained from the tunnel crown portion, and only 3 – 21 % of the indicated values were obtained at other measuring points.
- 2) The indicated values from the Effective Stress Meter coincide relatively with the axial stress obtained by the FEM analysis.
- 3) Results from the Pressure cell when embedded in a mortar test piece, upon which a loading response test was performed, confirmed a good responsibility. However, loading stress tests upon the shotcrete test piece produced only 70 % response.

Based on the above results, it became clear that the Pressure Cell did not show sufficient responsibility especially in the shotcrete. It is considered that imperfect contact with the pressure surface is produced by a defective portion and cavity, as a result of bounce around the cell. The stress cell is used in many tunnel work sites in Japan. As there are many problems including those mentioned above when the stress of shotcrete lining is measured, close attention must be paid to the method of embedding and interpretation of the measured results.