

セグメントの組立時における断面力の評価方法

HOW TO EVALUTE THE SECTION FORCE AT THE TIME OF ASSEMBLING OF THE SEGMENT

石村勝伸¹⁾・真下英人²⁾・石村利明³⁾

Katunobu ISHIMURA, Hideto MASHIMO and Toshiaki ISHIMURA

The segment costs form a large proportion of total tunnel construction, and that cost reduction is becoming a big issue. It is important to estimate the section force for the design which occurs at the stage in the process of assembling the segments correctly, because it account for almost one-half the total section force. In this paper, investigation about the segment behavior at the stage in the process of assembling segments were carried out on the basis of field measurement and numerical analysis were also carried out to establish the analysis model for the design.

Key Words: shield tunneling, lining design, field measurement

1. はじめに

シールドトンネルはセグメント製作費のトンネル工事費全体に占める割合が大きく、そのコストダウンが大きな課題となっている。コストダウンの方法として合理的なセグメント構造や継手構造の開発などが挙げられるが、最も重要なのは合理的なセグメント設計手法の確立と考えられる。さらには、今後の適用増加が予想される大断面シールドトンネルでは設計断面力全体の約半分程度が組立時に発生するため、セグメント設計における組立時の断面力の評価方法が非常に重要といえる。

本研究では、大断面シールドトンネルのセグメント組立過程の挙動把握を主点においた現場計測データの分析ならびにその分析結果に基づく覆工の骨組解析モデルの検討を実施した。また、骨組解析から得られた解析断面力と現場計測から得られた発生断面力との比較検討を実施することにより、セグメント組立時の荷重の取り扱い方法について検討を行った。

2. 計測トンネルの概要

現場計測を実施したシールドトンネルのトンネル諸元を表-1に示す。現場計測を実施したトンネルは外径4,750mmの中口径トンネル(Aトンネル)と外径11,800mm~11,900mmの大口径トンネル(B~Dトンネル)とである。

Aトンネルでは平板型RCセグメント(6分割)が採用されている。トンネルの土被りは1.2m程度である。セグメントの継手は楔式ピン結合(リグ'継手)と短ボルト結合(セグメント継手)とが採用されている。

- | | | | |
|---------------|-------------|--------------------|-------|
| 1) 正会員 | 独立行政法人土木研究所 | 基礎道路技術研究グループ(トンネル) | 交流研究員 |
| 2) 正会員 博士(工学) | 独立行政法人土木研究所 | 基礎道路技術研究グループ(トンネル) | |
| 3) 正会員 | 独立行政法人土木研究所 | 基礎道路技術研究グループ(トンネル) | |

Bトンネルでは平板型 RC セグメント (9分割)が採用されている。トンネルの土被りは51m 程度である。セグメントの継手はピン・ボルト結合(リグ継手)と短ボルト結合(セグメント継手)とが採用されている。

Cトンネルでは平板型 RC セグメント (9分割)を採用されている。トンネルの土被りは51m 程度である。セグメントの継手は長ボルト結合(リグ継手)と長ボルト結合(セグメント継手)とが採用されている。

Dトンネルでは平板型合成セグメント (タイル・キャスト鉄と鉄筋コンクリートとの合成構造、9分割)が採用されている。セグメントの継手はアンカージョイント結合(リグ継手)と水平楔結合(セグメント継手)とが採用されている。

表-1 計測トンネル諸元

トンネル名	Aトンネル	Bトンネル	Cトンネル	Dトンネル
シールド外径 (m)	4.88	12.14	12.04	12.040
シールド形式	泥上加圧式	泥水加圧式シールド	泥水加圧式シールド	泥水加圧式シールド
土被り H(m)	12.1	51.1	51.4	51.4
土被り比 H/D	2.5	4.2	4.4	4.3
地下水位(管頂より) (m)	7.3	37.1	38.4	38.6
トンネル上部の主な地質	洪積砂礫土層	洪積砂質土層	洪積砂質土層	洪積砂質土層
掘削部の主な地質	洪積砂礫土層	洪積砂質土層	洪積粘性土層	洪積粘性土層
セグメントの種類	平板型RCセグメント	平板型RCセグメント	平板型RCセグメント	鉄筋コンクリートと鉄骨鋼鉄との合成タイル
セグメント外径 D(mm)	4,750	11,900	11,800	11,800
セグメント内径 (mm)	4,300	10,600	10,600	10,870
セグメント厚さ (mm)	225	650	600	465
セグメント幅 (mm)	1200	1200	1200	1200
リング重量 (KN/リング)	98	716	658	602
セグメント分割数	6	9	9	9
セグメントの組み方	2リグ千鳥	2リグ千鳥	2リグ千鳥	2リグ千鳥
継手形式(セグメント継手)	ボルト結合	ボルト結合	長ボルト結合	水平楔方式
継手形式(リグ継手)	楔式ピン継手	ピン・ボルト結合	長ボルト結合	アウタージョイント
セグメント継手はね(MN・m/rad) (上段: 正曲, 下段: 負曲)	8.3	372.7	304	177
リグ継手はね(MN・m)	2.2	372.7	304	167
セグメント継手はね値算出方法	計算値	実験値	実験値	実験値
リグ継手はね値(MN・m)	1960	98.1	147.1	160
リグ継手はね値算出方法	計算値	計算値	計算値	実験値
計測断面	連続した2リング	連続した2リング	連続した2リング	連続した2リング
計測リング①断面目の計測項目	土圧計・水圧計	土圧計・水圧計	土圧計・水圧計	土圧計・水圧計
計測リング②断面目の計測項目	鉄筋応力計	鉄筋応力計	鉄筋応力計	鉄筋応力計・主桁応力計
計測開始時期	セグメント組立開始から	セグメント組立完了から	セグメント組立完了から	セグメント組立開始から
計測初期値	セグメント組立前	セグメント組立前	セグメント組立前	セグメント組立前

3. 現場計測結果の分析

現場計測結果の分析については、セグメント組立過程の挙動把握を主点においた計測を実施しているDトンネルを採用した。なお、計測は連続する2リングで実施しており、1リング目の計測リング①は鉄筋応力、主桁応力、土圧、水圧を、2リング目の計測リング②は鉄筋応力、主桁応力を計測した。また、施工時荷重のデータとしてシールドジャッキ推力、裏込め注入圧等を収集した。セグメント計器配置図を図-1、セグメント組立位置図を図-2に、計測リング①の組立時と後続リング組立時の円周方向鉄筋応力度と土圧計の計測結果を図-3に示す。

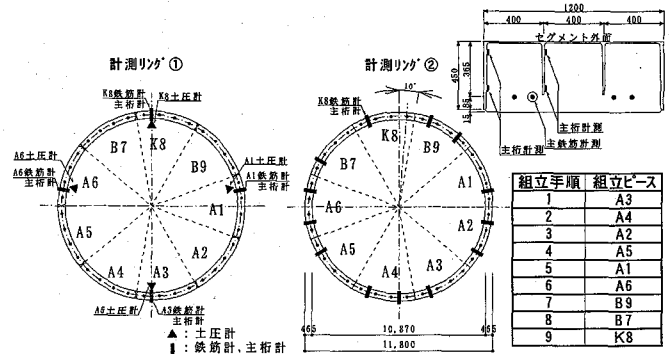


図-1 セグメントピースの分割図(Dトンネル)

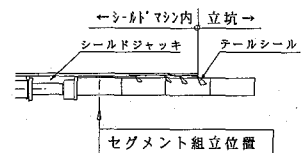


図-2 セグメント組立位置図

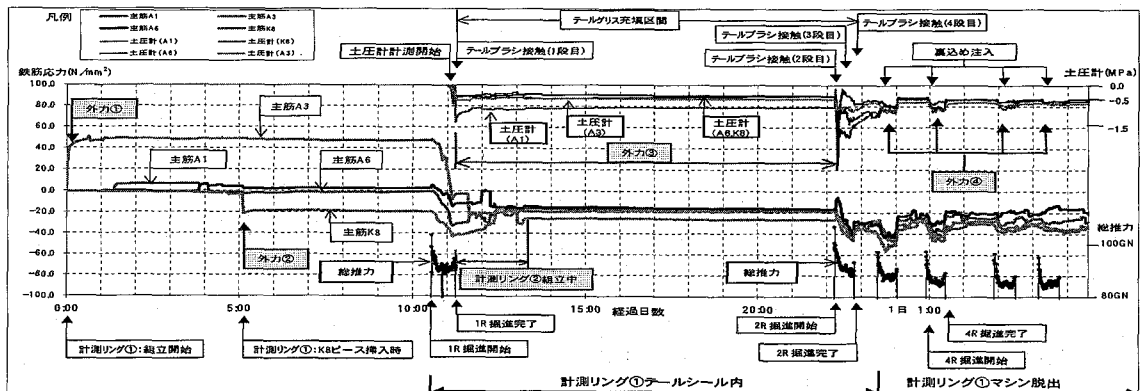


図-3 計測リング①の現場計測結果(Dトンネル)

計測リング①の組立直後から後続の4リング組立完了までの間が鉄筋応力の変動が大きくなっている。特に推進時のジャッキ総推力の変化と共に変動していることが分かる。このジャッキ総推力以外のセグメントに作用する主な外力は図中に示すとおり、A3 ピース設置時にジャッキ挿入等の施工時荷重による円周方向引張応力が作用(外力①)、軸方向挿入型 K8 ピース組立時にジャッキ挿入に伴う円周方向圧縮力等が作用(外力②)、1リング掘進開始直後からテールブラシ接触圧ならびにテールグリス充填圧の圧力を受ける(外力③)、シールドマシン脱出時に裏込め注入圧が作用(外力④)が挙げられる。

次に、Dトンネルの計測リング②における各セグメントピース組立時の現場計測値から算出した断面力を図-4 に示す。現場計測値から算出した覆工断面力は、各セグメントピース組立に伴って変動し、特に軸方向挿入型Kセグメント(組立リング②の最終設置ピース)を挿入することで、Kセグメントの両隣に位置するセグメントピースの覆工断面力に大きな変動(20°地点において約30KN・mから約330KN・m)を与えている。このことから、リング閉合時にはKセグメント組立挿入に伴うジャッキ推力等の施工時荷重が作用していることが分かる。また、リング閉合前の組立段階において覆工断面力は左右対称(100°地点において約200KN・mに対し260°地点において約0KN・m)となっていないため、セグメント自重以外にテール圧(ここでは、テールグリス圧やテールブラシ圧を総称してテール圧という)等の施工時荷重が作用していると推察される。

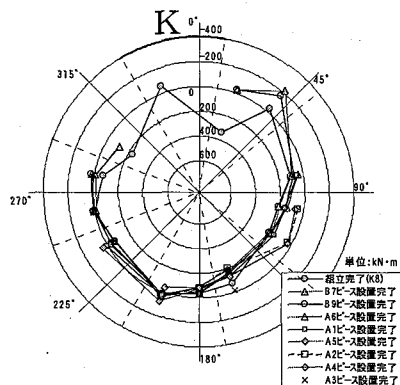


図-4 計測リング②の現場計測結果

4. 骨組解析による覆工断面力の検討

4.1 解析モデル

骨組解析にはセグメントを直線梁、セグメントのピース間継手を回転ばね、リング間継手をせん断ばねでモデル化した2リングはりばねモデル解析を使用した。一般的にセグメント自重の解析の場合、覆工を支持するばねは考慮しないケースが多いが、本研究ではテールブラシによる拘束やシールドジャッキによる押付け等の効果を考慮して仮想反力ばねで支持させるモデルとした。なお、骨組解析については、計測リング②の組立完了前と組立完了後の解析を実施した。骨組解析モデルを図-5に、検討対象セグメントの設置状況図を図-6に示す。骨組解析に用いる仮想反力ばねは、トンネル半径方向とトンネル接線方向の変位に応じて生じる反力として評価し、半径方向には圧縮の場合のみ生じるばね値(10MN/m³, 50MN/m³, 100MN/m³)を、接線方向には各法線方向ばね値の1/3を設定した。また、比較検討のために仮想反力ばねを考慮しない骨組解析についても計算を実施した。なお、骨組解析に用いる荷重は、セグメント自重のみの場合と、セグメント自重と現場計測の分析結果を参照してテール圧を考慮する場合とを設定した。図-7に計測トンネルの土圧計から求めたテール圧分布図を示す。

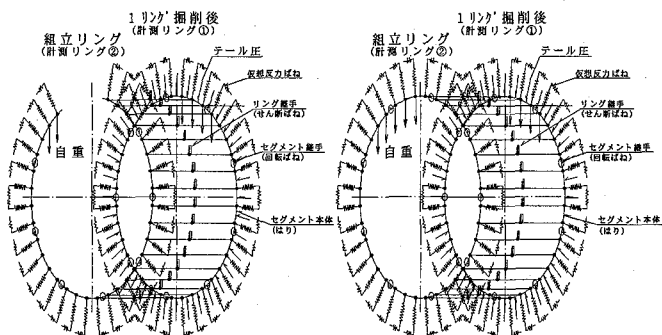


図-5 解析モデル(左側:組立完了前、右側:組立完了後)

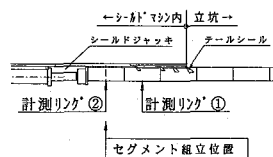


図-6 検討位置参考図

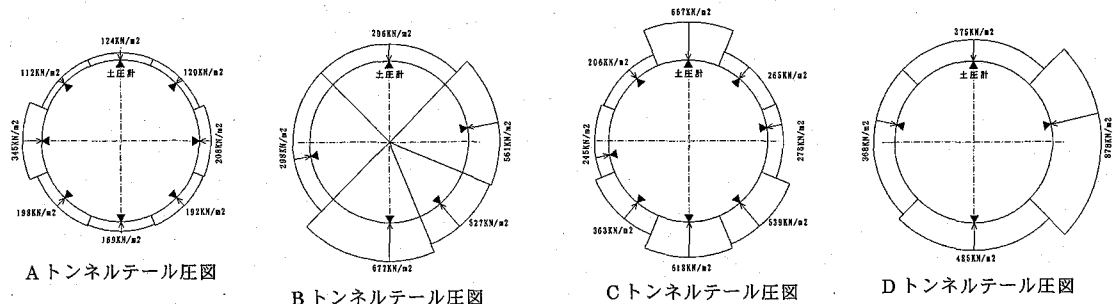


図-7 計測トンネルのテール圧分布図

4.2 骨組解析の覆工断面力の検討

骨組解析から得られた覆工断面力と現場計測値から求めた覆工断面力の比較検討を実施した。比較検討については、連続した2リングの覆工断面の応力計測を実施しているDトンネルを主に検討した。

(1) セグメント自重のみ考慮した解析結果

1) 計測リング②組立完了前の覆工断面力の検討

Dトンネル現場計測値から求めた断面力と骨組解析から得られた断面力の分布図を図-8に示す。図より計測リング①においては仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しない結果となったが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は概ね類似する結果となった。ただし、計測リング①については計測したデータ数が少なく、リング全体の類似傾向を確認するには至っていない。このことから、本研究においては参考程度に留めるものとした。一方、計測リング②については仮想反力ばねを考慮したモデルの解析断面力および仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力ともに現場計測結果の発生断面力とは類似しない結果となった。これより、セグメントの組立完了前にはセグメント自重以外の荷重が作用していることが考えられる。

2) 組立完了後の覆工断面力の検討

現場計測値から求めた断面力と骨組解析から得られた断面力分布図を図-9(Dトンネル)、図-10(A～Cトンネル)に示す。図-9より計測リング①においては仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しない結果となったが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は概ね類似する結果となった。一方、計測リング②については仮想反力ばねを考慮したモデルの解析断面力および仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力ともに現場計測結果の発生断面力とは類似しない結果となった。図-10よりAトンネ

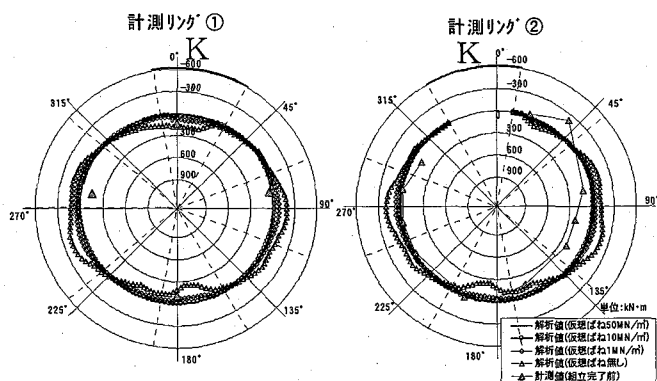


図-8 組立完成前の断面力分布図(Dトンネル:自重のみ考慮)

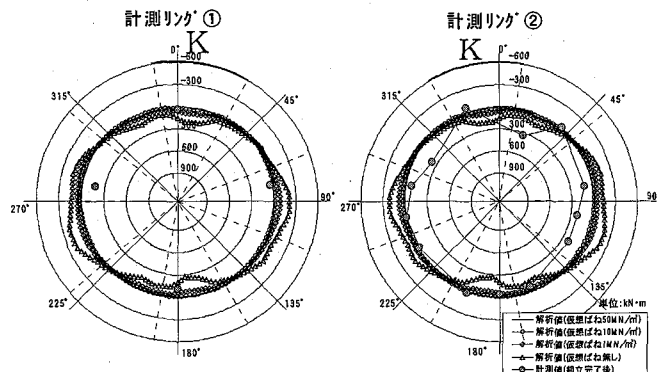


図-9 組立完成後の断面力分布図①(Dトンネル:自重のみ考慮)

ルについては仮想反力ばねを考慮しないはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しないが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は概ね類似する結果となった。一方、Bトンネルについては仮想反力ばねを考慮したモデルの解析断面力および仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力ともに現場計測結果の発生断面力とは類似しない結果となった。また、Cトンネルにおいては仮想反力ばねを考慮しないはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しないが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析結果と現場計測結果は、軸方向挿入型Kセグメントに隣接するセグメントピースを除いて概ね発生断面力が類似する結果となった。以上のことから、セグメントの組立時に作用する荷重においては、土被り、シールド径、継手形式等のさまざまな施工条件が組み合わさることにより、セグメント自重以外の荷重が作用することが考えられる。

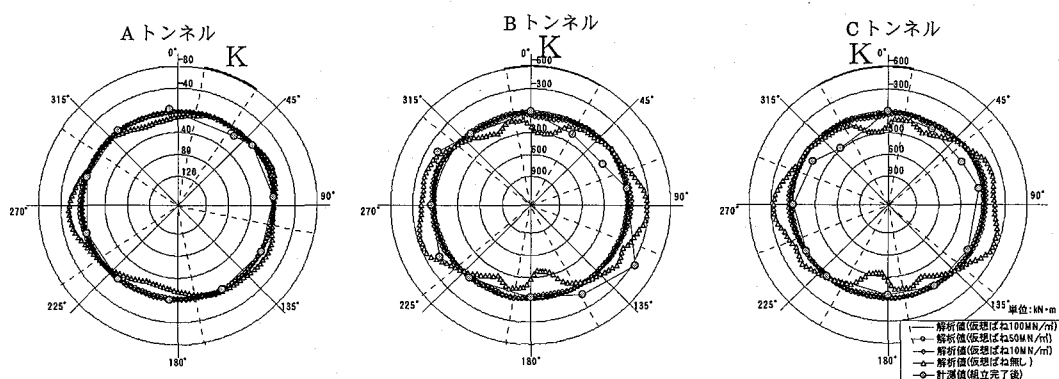


図-10 組立完成後の断面力分布図②(A～Cトンネル:自重のみ考慮)

(2)セグメント自重とテール圧を考慮した解析結果

1)組立完了前の覆工断面力の検討

Dトンネル現場計測値から求めた断面力と骨組解析から得られた断面力の分布図を図-11に示す。図より計測リング①においては仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しない結果となったが、仮想反力ばねを考慮したモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は概ね類似する結果となった。しかし、前述したようにデータ数が少ないため、参考程度に留めるものとする。また、計測リング②においては仮想反力ばねを考慮しないはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しない結果となったが、仮想反力ばねを考慮したモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は概ね類似する結果となった。このことから、セグメント組立完了前に作用する荷重には、セグメント自重の他にテール圧が作用していることが考えられる。

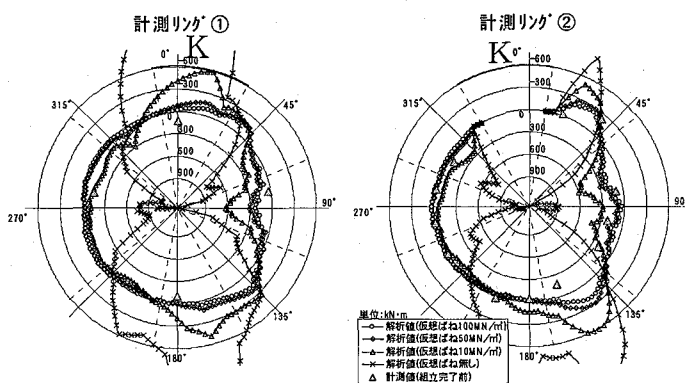


図-11 組立完成前の断面力分布図(Dトンネル:自重+圧を考慮)

2)組立完了後の覆工断面力の検討

現場計測値から求めた断面力と骨組解析から得られた断面力の分布図を図-12(Dトンネル)、図-13(A～Cトンネル)に示す。図-12より計測リング①においては仮想反力ばねを考慮しないモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しない結果となったが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は概ね類似する結果となった。また、計測リング②においては仮想反力ばねを考慮しな

いはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しない結果となったが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は、軸方向挿入型Kセグメントに隣接するセグメントピースを除いて概ね類似する結果となった。図-13よりAトンネルにおいては仮想反力ばねを考慮しないはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しないが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析結果と現場計測結果は、一部区間を除いて発生断面力が類似する結果となった。また、B、Cトンネルにおいては仮想反力ばねを考慮しないはりばねモデルの解析断面力と現場計測結果の発生断面力は類似しないが、仮想反力ばねを考慮したはりばねモデルの解析結果と現場計測結果は、軸方向挿入型Kセグメントに隣接するセグメントピースを除いて概ね発生断面力が類似する結果となった。以上のことから、セグメント組立時に作用する荷重については、土被り、シールド径、継手形式等のさまざまな条件が組み合わさることにより、セグメント自重の他にテール圧が作用する場合があることが考えられる。また、軸方向挿入型Kセグメントの影響を評価するには、トンネル軸方向の施工時荷重を考慮できる解析モデルを用いる必要があると考えられる。

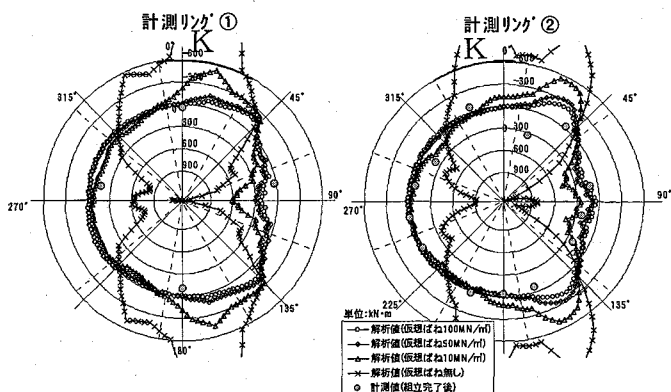


図-12 組立完成後の断面力分布図①(Dトンネル:自重+圧を考慮)

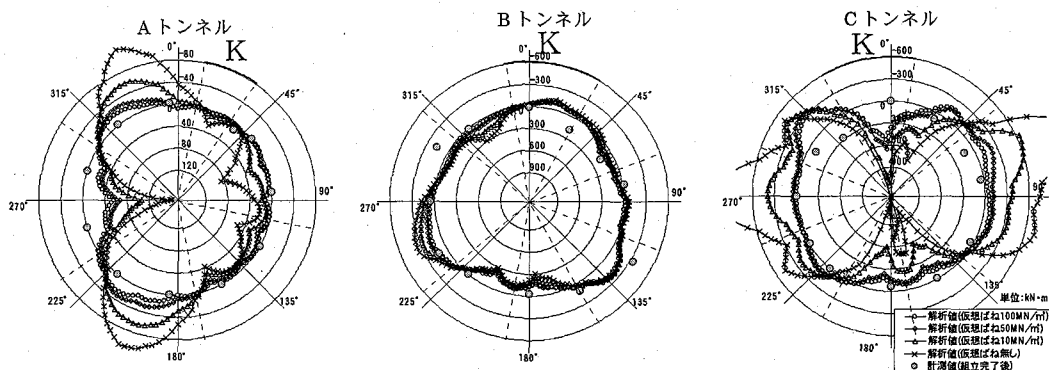


図-13 組立完成後の断面力分布図②(A～Cトンネル:自重+圧を考慮)

5. まとめ

今回の検討により、組立時において覆工に発生する断面力を評価するための解析方法に関して以下の知見が得られた。

- ①現場計測結果から得られた実現象を評価できる組立時の断面力の評価方法については、本検討のようにはりばねモデルを使用し、仮想反力ばねにより支持させる解析モデルが一つの方法である。
- ②セグメント組立時に発生する断面力の評価には、セグメント自重の他にテール圧の影響を考慮する必要がある場合がある。
- ③軸方向挿入型Kセグメント（組立リングの最終設置ピース）の影響を評価するには、トンネル軸方向の施工時荷重を考慮できる解析モデルを用いる必要がある。

今後の課題として、より多くの現場計測を実施してデータの集積を行い、組立時に発生する断面力を検証するとともに、テール圧等の施工時荷重のセグメントに与える影響を把握し、より合理的なセグメントの設計を進めていくことが必要である。