

シールドトンネルの施工時荷重の影響 に関する一考察

石村利明¹・真下英人²・森本 智³・角湯克典³

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: ishimura@pwri.go.jp

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

³独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

良好な地盤に建設されるシールドトンネルの長期耐久性に優れたセグメント設計を行うためには、施工時荷重によるセグメントへの影響を把握することが重要である。本報文は、砂質土層の硬質地盤中に施工された2本のシールドトンネルを対象にした現場計測結果の分析を行い、軸力・曲げモーメントの挙動等からトンネル掘進に伴う施工時荷重がどの段階でどの程度作用しているのかについて実態を把握するとともに、多リングはりーばねモデルを用いた骨組み構造解析を行い、形状保持装置による内部荷重を含む施工時荷重等がセグメント覆工に与える断面力について検討を行った結果を報告するものである。

Key Words : shield tunnel, construction loads, in-site measurement, beam-spring modeling considering many rings

1. はじめに

大深度地下などの良好な地盤に建設されるシールドトンネルに作用する荷重は、水圧が主であり土圧が非常に小さいことが明らかになってきている。このため、従来の土圧、水圧などの外力だけを対象にした設計ではセグメントを薄肉構造とすることが可能となる。しかし、セグメントにはシールド掘進時のジャッキ推力、セグメント組立て時のエレクター操作荷重、形状保持装置による荷重、裏込め注入圧などの施工時荷重が一時的に作用することとなり、薄肉構造となった場合には、これら施工時荷重の影響によりセグメントの欠け、ひび割れ等が発生する可能性がこれまで以上に高くなり、将来の維持管理にかかるコスト増加や長期耐久性の面で問題となる。したがって、現在のセグメント設計では考慮できていない施工時荷重によるセグメントへの影響について把握し、この影響を考慮した長期耐久性の高いセグメント設計法を確立することが必要である。

本報文は、砂質土層の硬質地盤中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、軸力・曲げモーメントの挙動等からトンネル掘進に伴う施工時

荷重がどの段階でどの程度作用しているのかについて実態を把握するとともに、多リングはりーばねモデルを用いた骨組み構造解析を行い、形状保持装置による内部荷重を含む施工時荷重等がセグメント覆工に与える断面力について検討を行った結果を報告するものである。

2. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

(1) 検討方法

主な掘削地盤として洪積砂質土層および洪積砂礫土層の硬質地盤を通過する2本のシールドトンネルの覆工に設置した土圧計、水圧計および鉄筋応力計から得られる現場計測結果をもとに、シールドトンネルの施工時荷重の実態を把握した。分析を実施したシールドトンネルの位置と地盤条件および諸元をそれぞれ表-1、図-1、図-2に示す。また、各シールドと計測リングとの位置関係は図-3、図-4に示すとおりである。なお、各シールドの1リングあたりの掘進からセグメント組立てのサイクル時間はAシールドで約3時間30分、Bシールドで約1時間30分であった。

表-1 シールドトンネル諸元

トンネル名	A	B
シールド外径(m)	13.23	12.04
シールド形式	泥水加圧式	泥水加圧式
土被りH(m)	21.8	51.35
土被り比H/D	1.6	4.3
地下水位(管頂より)(m)	9.4	38.42
掘削部の主な地質	洪積砂質土層 洪積砂礫土層	洪積砂質土 洪積粘性土層
セグメントの種類	平板型RCセグメント	RCと γ タタリ鋼鉄との合成セグメント
セグメント外径D(m)	13.00	11.80
セグメント内径(m)	11.90	10.87
セグメント厚さ(m)	0.55	0.465
セグメント幅(m)	1.2	1.2
セグメント分割数	10	9
セグメントの組み方	2リング千鳥	2リング千鳥
継手形式(セグメント継手)	ボルト・金物結合	水平楔方式
継手形式(リング継手)	ボルト・金物結合	アンカージョイント方式

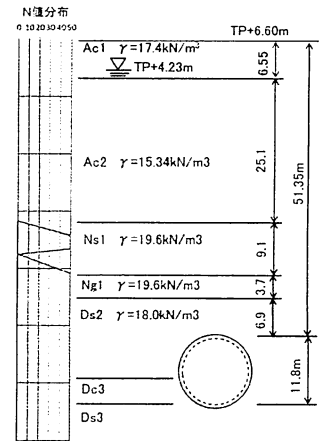
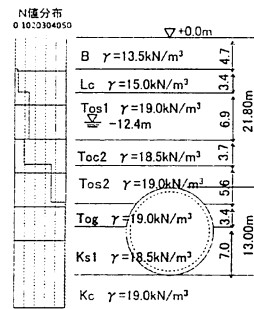


図-1 Aシールド概要図

図-2 Bシールド概要図

(2) 現場計測結果

a) Aシールド掘進時における断面力の変化

図-5にAシールドのセグメント組立て時から10リング後の掘進・組立までのセグメントに発生する断面力(曲げモーメント, 軸力)の変化を示す。図には、図-6に示すような考えに基づいて、各リングの掘進に伴うセグメント組立前後、シールド掘進前後の各断面力の増減分を整理し、各施工時における影響を把握した。

図より、掘進に伴う曲げモーメントの変化は、セグメント組立て時は約30～50kN・m程度と小さく、その後徐々に増加し5R(R:リング)組立後で最大となり、その後ある一定値に収束する傾向を示す。この変化の主な

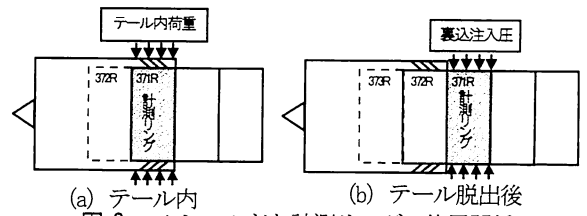


図-3 Aシールドと計測リングの位置関係

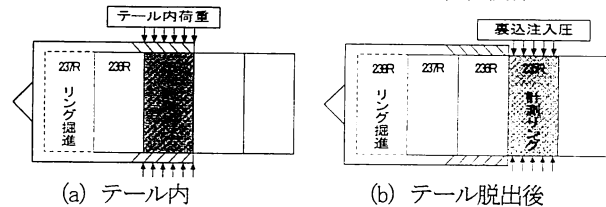
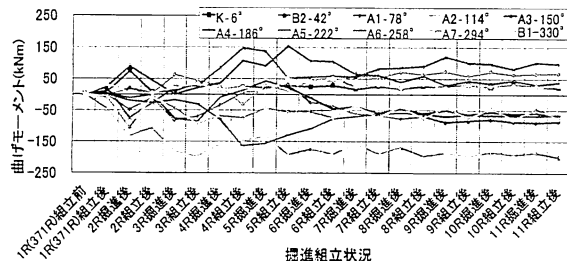
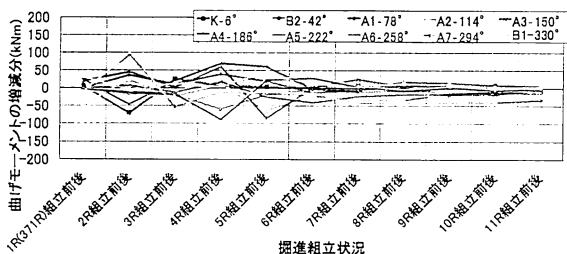


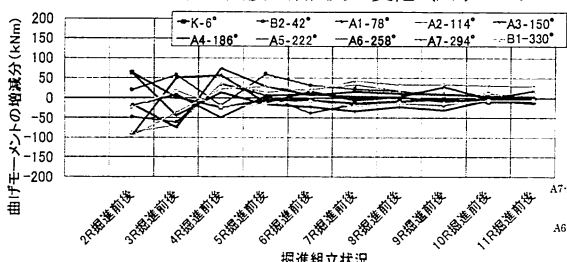
図-4 Bシールドと計測リングの位置関係



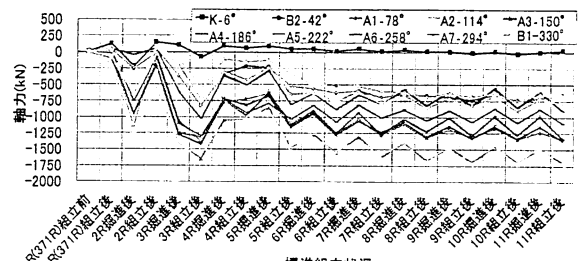
(a) 掘進に伴う断面力の変化 (曲げモーメント)



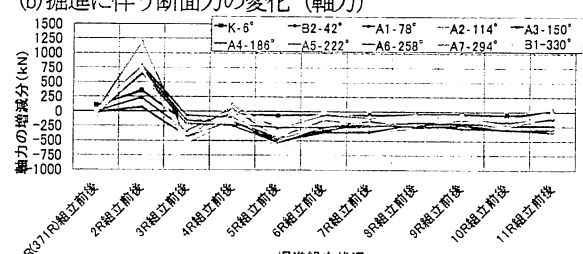
(c) セグメント組立前後の断面力の変化 (曲げモーメント)



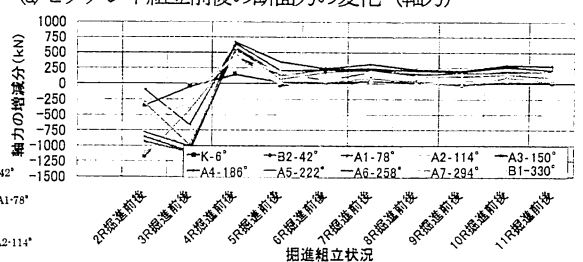
(e) シールド掘進前後の断面力の変化 (曲げモーメント)



(b) 掘進に伴う断面力の変化 (軸力)



(d) セグメント組立前後の断面力の変化 (軸力)



(f) シールド掘進前後の断面力の変化 (軸力)

図-5 Aシールドの掘進に伴う断面力の変化

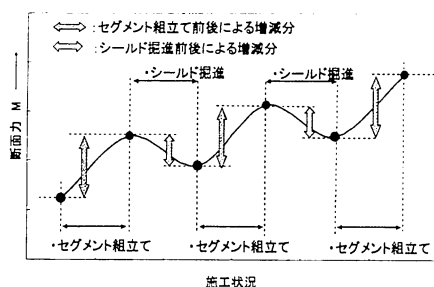


図-6 断面力の増減分抽出の考え方

要因は、計測リングがテール部を通過することや裏込め注入圧が大きく影響していると考えられる。

セグメント組立前後の曲げモーメントは、概ね 5R 組立前後まで大きく変化しており、計測リング (371R) 組立て時の約 30～50kN・m の値よりも、後続のセグメント組立を行うことにより ± 100 kN・m 程度の比較的大きな曲げモーメントの変化が生じており、セグメント組立の影響が大きく現れている。後続のセグメント組立前後に断面力が発生する要因としては、隣接するリングがリング間継手で連結されていることにより、他リングで作用している荷重、もしくは一時的に作用した荷重等により発生する断面力の伝達等が考えられる。

シールド掘進前後の曲げモーメントは、5R 掘進・前後程度まで大きく変化している。図-3 に示した計測セグメントとシールドとの位置関係から、計測リング (371R) を基準とすると、主として 1～2 リング後の掘進時にテール圧 (テールシール反力・テールグリス圧) やジャッキ推力等が、2～3 リング後の掘進時に裏込め注入圧等が作用しており、曲げモーメントの変化はこれらに影響によるものと考えられる。

次に、掘進に伴う軸力の変化は、セグメント組立て時から概ね 8R～9R 組立前後・掘進前後まで増減を繰り返しながら、ある一定値に収束する傾向を示す。セグメント組立前後、シールド掘進前後の軸力を見ると、それぞれ 5R 組立前後および 5R 掘進前後までの軸力が大きく変化し、それ以降の軸力の変化は、セグメント組立前後で正方向 (引張側) に、シールド掘進前後で負方向 (圧縮) の傾向を示している。ここでの特徴的な変化として、2R 組立前後、4R 掘進前後で軸力が引張側に移行していることが分かる。2R 組立前後での引張り側への移行の主な要因は、一つは次リングのセグメント組立による影響が、もう一つは、セグメントを組立てるためにセグメントを設置する部分の推進ジャッキを一端戻す作業を伴うため、推進ジャッキによってセグメントに作用していた軸方向の荷重が解放されることによって、トンネル横断面に作用している荷重状態等が変化することによると考えられる。

また、4R 掘進前後の移行は、通常、大断面のシール

ドではトンネルの断面を真円に保持するための補助装置として、セグメントがシールドから地山側に脱出する付近に形状保持装置が設置されている。これにより、トンネル内部からリングの上下方向に荷重が作用しているものと考えられる。この内部荷重の影響により 4R 掘進前後で軸力が引張り側へ移行しているものと考えられる。

以上に示した掘進時の断面力の変化より、計測リングがテール部を通過することや裏込め注入圧による影響のほか、後続のセグメント組立て、推進ジャッキによる拘束力の解放、形状保持装置によるトンネル内部からの荷重もセグメントに発生する断面力に影響していると考えられる。

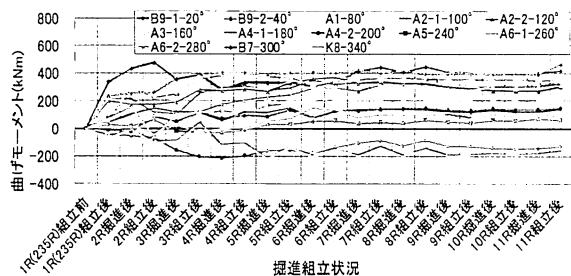
b) B シールド掘進時における断面力の変化

図-7 に B シールドのセグメント組立て時から 10 リング後の掘進・組立までのセグメントに発生する断面力の変化、各リングのセグメント組立前後、シールド掘進前後の断面力の変化を示す。

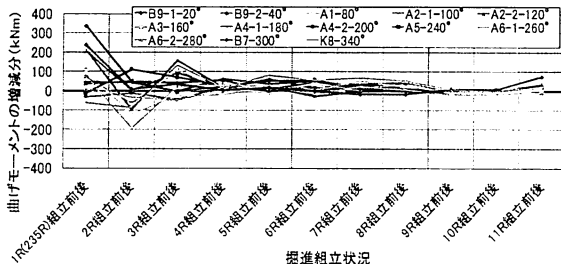
図より、掘進に伴う曲げモーメントの変化は、A シールドと同様にセグメント組立て時から徐々に増加し 4R 掘進後で最大となり、その後、ある一定値に収束する傾向を示す。断面力の大きさは、計測リングのセグメント組立時に最大 300 kN・m 程度の曲げモーメントが発生しており、A シールドに比較して非常に大きい値となっている。セグメント組立てによる曲げモーメントの変化は概ね 3R 組立程度まで、掘進前後の曲げモーメントの変化は概ね 6R 掘進程度までとなっている。

次に、掘進に伴う軸力の変化は、曲げモーメントと同様にセグメント組立時から最大 3000kN の大きな軸力が発生しており、10R 組立・掘進程度まで増減を繰り返しながら、ある一定値に収束する傾向を示す。A シールドと同様に 2R 組立前後で引張り側へ軸力が移行しているものの、形状保持装置によるジャッキ作用による引張り側への移行は、圧縮側の軸力の絶対値が大きく、ほとんど認められない。

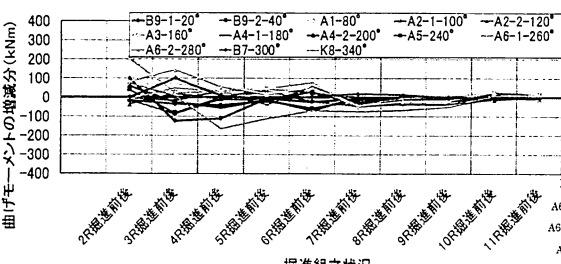
ここで、セグメント組立て時の発生断面力について、A シールドとの違いについて考察する。前述のとおり曲げモーメントと軸力ともに、A シールドでは非常に小さく、B シールドで非常に大きい値を示した。この違いは、リング継手構造による影響があるものと推察される。リング継手構造については、A シールドはボルト締結式、B シールドは楔方式を用いており、組立直後の締結力の違いが表れたと考えられる。すなわち、ボルト締結式は、ボルトの締結力や継手ボックスのボルト孔とボルトとの余裕代等により組立直後に継手の剛性が発揮されずにリング間の断面力の伝達が小さいのに対し、楔方式は組立直後から継手の剛性が有効になるためと考えられる。



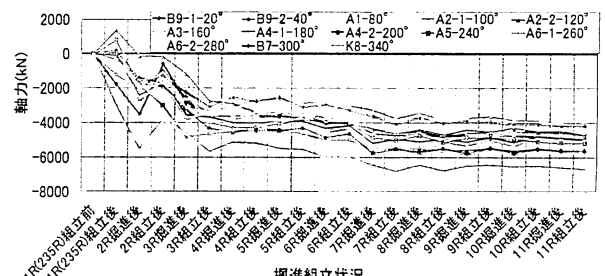
(a) 掘進に伴う断面力の変化 (曲げモーメント)



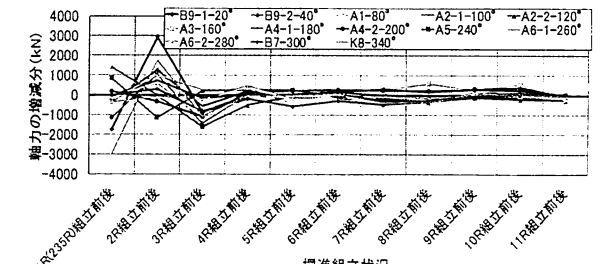
(c) セグメント組立前後の断面力の変化 (曲げモーメント)



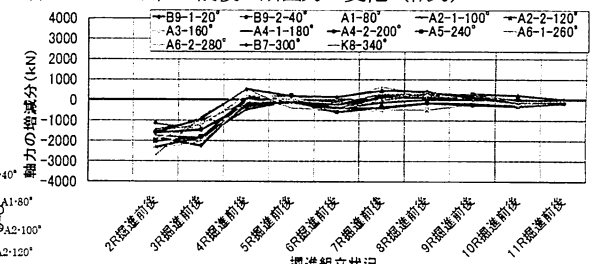
(e) シールド掘進前後の断面力の変化 (曲げモーメント)



(b) 掘進に伴う断面力の変化 (軸力)



(d) セグメント組立前後の断面力の変化 (軸力)



(f) シールド掘進前後の断面力の変化 (軸力)

図-7 Bシールドの掘進に伴う断面力の変化

3. 多リングはりばねモデルによる施工時荷重の評価

(1) 検討方法

本解析は、シールド掘進に伴ってセグメント覆工に一時的に作用する施工時荷重がセグメントに発生する断面力にどの程度の影響を与えるかを把握することを目的として実施した。解析モデルは、図-8に示すはりばねモデルを用いた骨組み構造モデルを基本とし、施工時荷重の影響が小さくなると考えられる30リングまでをモデル化した。検討にあたっては、図-9に示すように、セグメントの自重のほか、これまで一般的な施工時荷重として考えられているテール圧（テールブラシ圧、テールグリス圧）および裏込め注入圧の各施工時荷重に相当する解析リングに同時に作用させた場合、各施工時荷重を単独で作用させた場合の解析を行い、隣接するリングに発生する断面力の大きさを把握したうえで、各施工時荷重が隣接リングに与える影響を加味したセグメントの断面力について検討した。なお、シールド外の裏込め注入圧を載荷したリング以外のセグメントリングに対しては、外力として明らかに作用している荷重として静水圧を作

用させた。また、各リングの地盤反力ばねの値は、セグメントの拘束状態を考慮し、表-2に示す考え方に基いて設定した。なお、シールド外のリング（4もしくは5リング目以降）の地盤反力ばねは、2次元FEM解析に基づく方法¹⁾によって算出した値を用いることとし、裏込め注入材の硬化過程を考慮して、当該シールドのテールボイドの厚さに相当する要素に1リングのサイクル

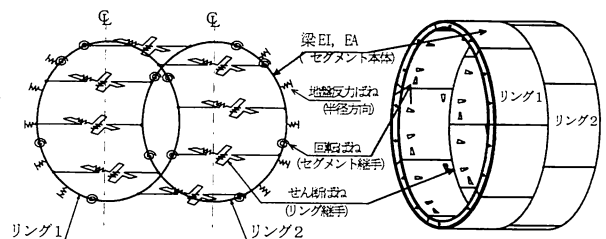


図-8 骨組み構造解析モデル

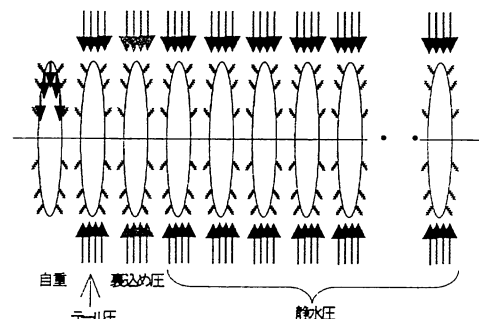


図-9 多リングはりばねモデルと載荷重

表-2 シールドトンネル諸元

着目 リング	施工時荷重または 外力	地盤反力ばね (MN/m^2)		状態・地盤反力係数の 設定の考え方
		A シールド	B シールド	
セグメント組立て Aシールド : 1リング Bシールド : 1リング	自重・組立	0	0	シールドテール内にある。基本的には隣接セグメントのリング継手による拘束、推進ジャッキによる拘束等が考えられるが、前者はリング継手ばねで評価されていると考えられるので、地盤反力は考えない。
シールド内 Aシールド : 2リング Bシールド : 3リング	テール圧	5	5	シールドテール内にある。テールブラシ、テールグリス圧により拘束されている。これまでの解析結果を参考に設定する。
シールド外 Aシールド : 3リング Bシールド : 4リング	裏込め注入圧	0	0	シールドテールを抜けて、地盤側へ出た状態。裏込め注入材を所定の圧力で注入した状態。裏込め注入材は注入後1時間程度以内であり、また硬化していないため地盤反力は考えない。
シールド外 Aシールド : 4リング以降 Bシールド : 5リング以降	静水圧	2次元 FEM 解析による結果 (13~14 の範囲) で変化	2次元 FEM 解析による結果 (3~6 の範囲) で変化	地盤側へ出た状態。トンネル周辺は裏込め材料を介して地盤反力を伝達する。各リングともに、注入後の時間に応じた裏込め注入材の強度が異なるため、裏込め注入材の硬化過程を考慮した地盤反力ばねの設定を行う。

時間を考慮した経過時間毎に各リングの裏込め注入材の変形係数を与えたときの地盤反力ばねを算出した。

(2) 検討結果

a) 各リングの断面力に与える各施工時荷重の影響

Aシールドを対象として、各施工時荷重等をそれぞれ該当するリングに載荷した場合の発生断面力の変化を図-10に示す。ここで、図中の(a)(b)はセグメント自重を1リング目に載荷したときの各リングに発生する断面力を、(c)(d)はテール圧、(e)(f)は裏込め注入圧、(g)(h)は静水圧をそれぞれの該当リングに作用させたときの各リングに発生する断面力を示している。各図より、各施工時荷重等によって、リング継手の添接効果等により曲げモーメントおよび軸力が伝達することにより、載荷リング以外の断面力へ影響を与えていることがわかる。

なお、Bシールドの解析結果については、各施工時荷重による断面力の大きさは異なるが、荷重を載荷するリング以外の隣接するリングへの断面力の影響は同様な結果が得られた。

b) シールド掘進時における断面力の変化

各施工時荷重、静水圧によって作用するリング以外の隣接するリングに影響を与えていることが分かった。ここでは、各施工時荷重、静水圧を加味した場合の各リングに発生する断面力について検討する。図-11、図-12に各施工時荷重等を加味した場合のセグメントの断面力を示す。ここで、図中の(a)(b)は各施工時荷重をそれぞれ該当リングに作用させた場合を加味して、セグメント自重、テール圧、裏込め注入圧、静水圧によって各リングに発生する断面力の合計値を示している。なお、自重によって発生する断面力は、1リング目のみの載荷による解析値であるので各リングに発生する断面力を求める際には後ろのリングの影響をそれぞれ累積している。

図より、両トンネルともに1リング目から曲げモーメント、軸力がある程度発生していることが分かる。その後、曲げモーメントについては、Aシールドは5リング程度、Bシールドは10リング程度までの間に、軸力については両トンネルともに5リング程度までの間に大きな変動が生じた後、ある一定値に収束する傾向がある。

軸力が収束する値は、両トンネルともに概ね計測値と近似している。一方、曲げモーメントが収束する値は、両トンネルともに最大の断面力等の値は必ずしも一致していないものの、計測値と類似した傾向を示している。ただし、組立てから5リング程度までの挙動は、曲げモーメントについては、計測値はセグメント組立て直後の値は小さく、その後、徐々に増加してある値に収束する傾向があるが、解析値はセグメント組立直後から大きな値が生じている。軸力については、計測値は2リング組立前後、4リング掘進前後で引張側へ推移しているが、解析値は引張側への変化は見られない。なお、Bシールドで2~3リング目で曲げモーメント・軸力が大きいのは、土圧計で計測されたテール圧が大きな偏荷重であり、その値を載荷したことによる。

ここで、Aシールドのセグメント組立てから5リング程度までの曲げモーメント・軸力の値が計測値と近似していない要因を考察する。計測値の軸力が一時的に引張側に移行していることを考えると、トンネル内部から外部の方向に何らかの荷重が作用しているものと想定される。現在、考慮している施工時荷重以外にトンネル内部から外部の方向に作用する施工時荷重としては形状保持装置による荷重があり、以下に形状保持装置の荷重による影響を検討する。

c) 形状保持装置等の内部荷重による断面力の影響

計測結果より、シールド掘進時の断面力の変化は、計測リングがテール部を通過することや裏込め注入圧による影響、後続のセグメント組立による影響のほか、形状保持装置等による内部荷重も影響していると考えられた。ここでは、Aシールドを対象として、形状保持装置を作用させるリングに内部からの荷重によって、どの程度の断面力を発生させるかを検討する。すなわち、前述の図-9に示した3リング目に内部から荷重を作用させたときの発生断面力を把握する。内部荷重は、上下方向に天端と下端から左右45°の範囲に150kN/m、200kN/m、300kN/mとし、他の解析条件は前記と同様とした。

図-13に主な計測点の結果を示す。図より、内部荷重が大きくなると各リングの曲げモーメント、軸力に与える影響が大きくなることがわかる。内部荷重によっては、前述のテール圧、裏込め注入圧の施工時荷重により発生する断面力以上の断面力が発生しており、内部荷重の影響は無視できないものと考えられる。

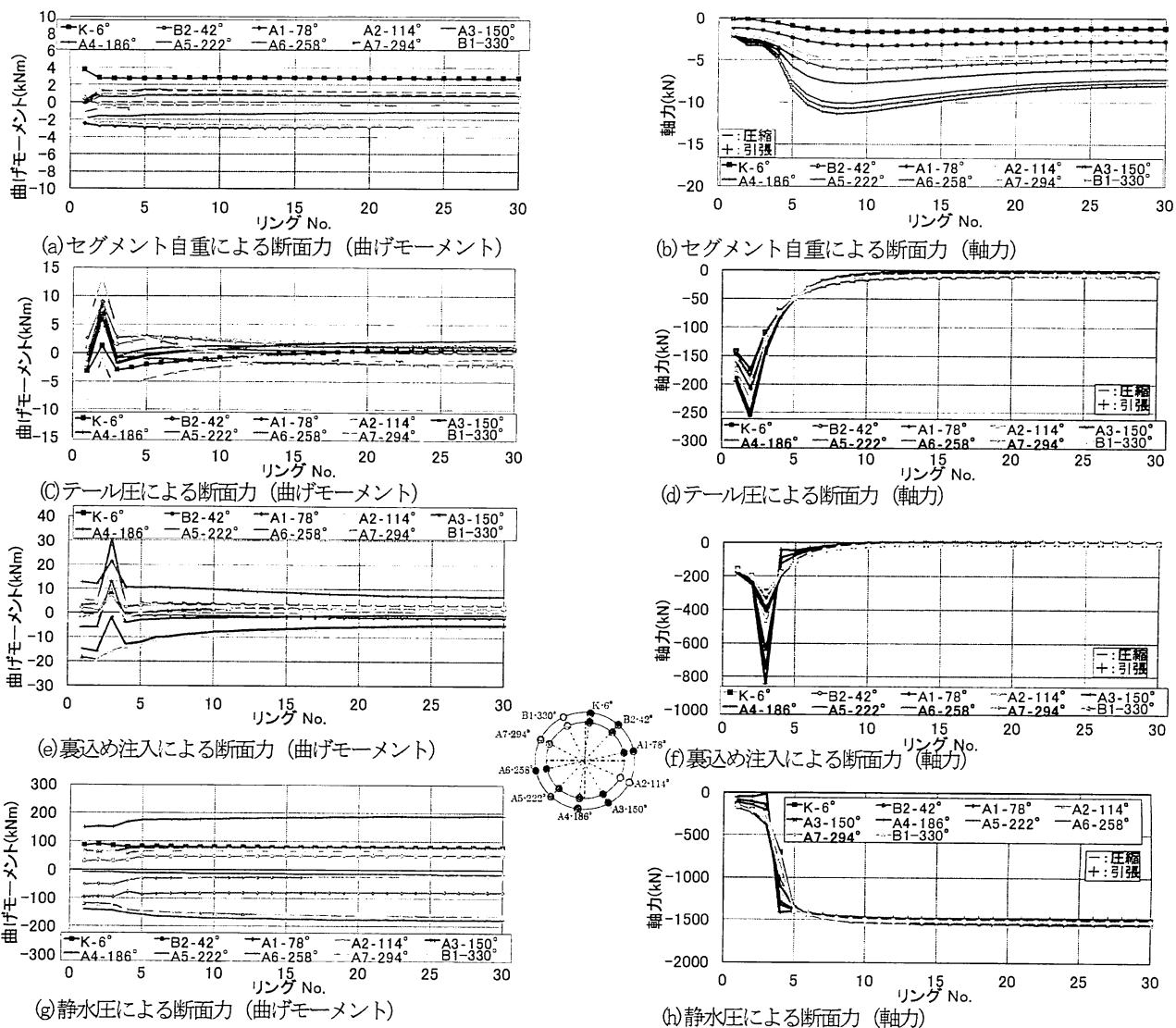


図-10 各施工時荷重等による発生断面力 (Aシールド)

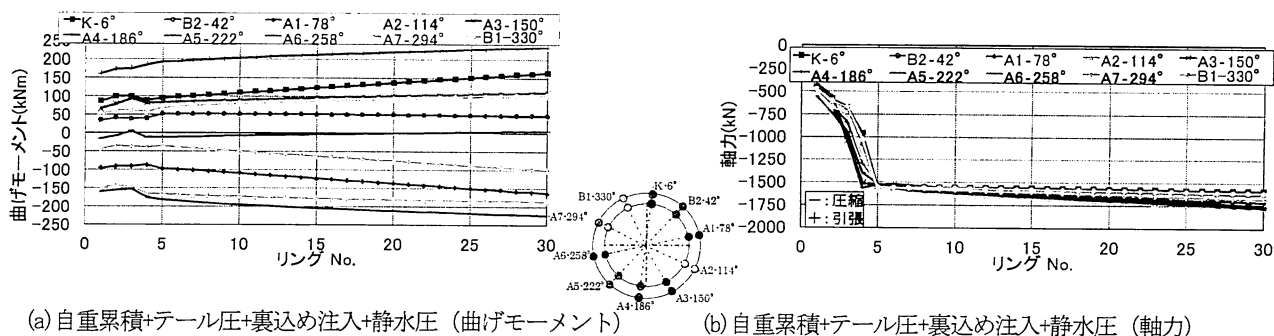


図-11 シールド掘進における断面力の変化 (Aシールド)

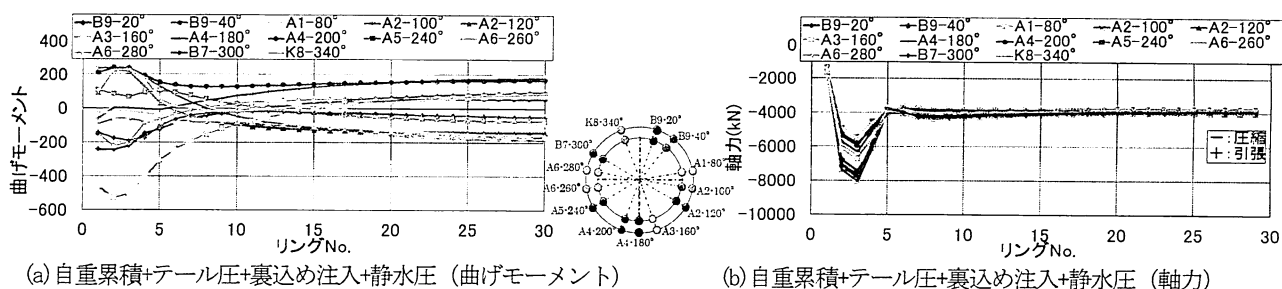
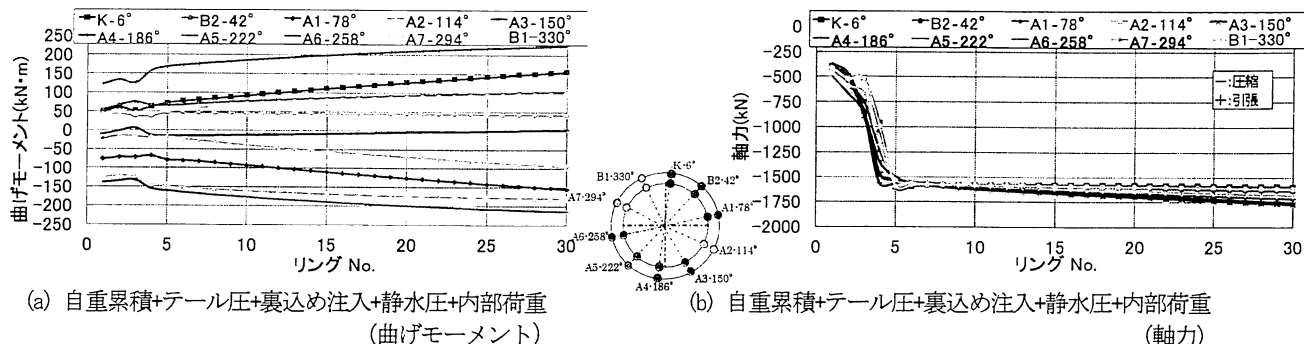
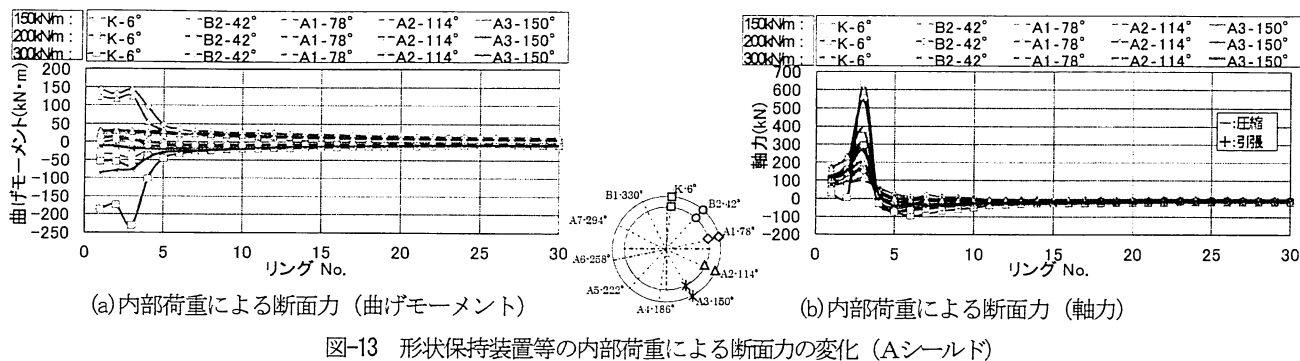
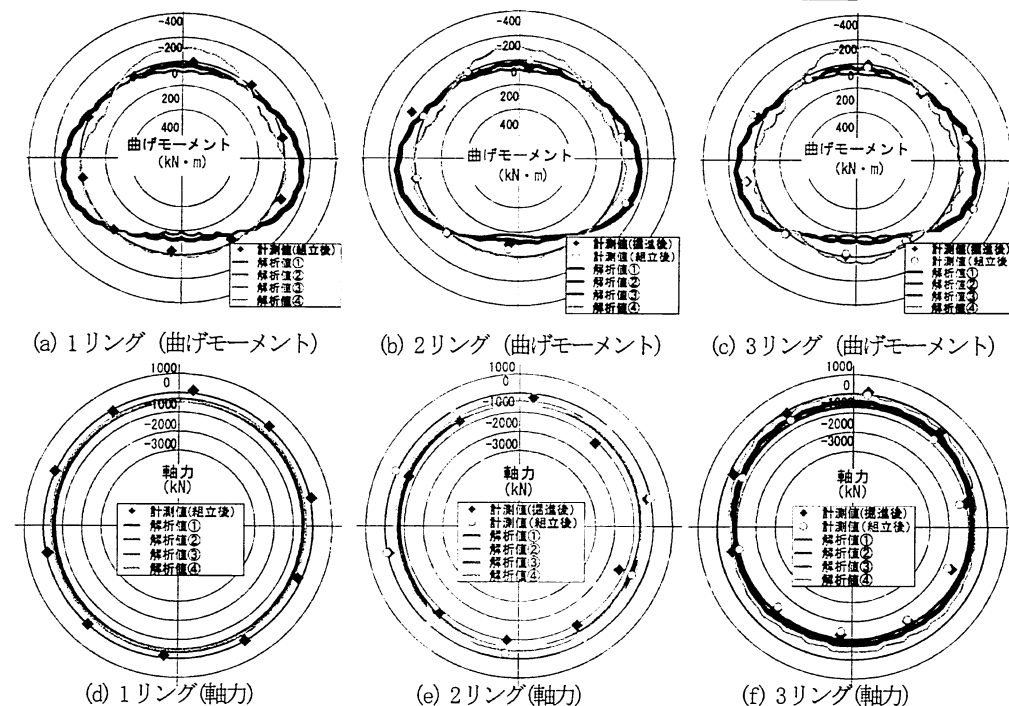


図-12 シールド掘進における断面力の変化 (Bシールド)



解析値①: 自重累積+テール圧+裏込め圧+静水圧	解析値②: 解析値①+内部荷重 150kN/m
解析値③: 解析値①+内部荷重 200kN/m	解析値④: 解析値①+内部荷重 300kN/m



当該シールドでの形状保持装置の油圧ジャッキ能力は最大約150kN/m程度である。内部荷重が150kN/mの場合のシールド掘進における断面力の変化について図-11と同様に整理した結果を図-14に示す。内部荷重が150kN/mでは、曲げモーメント、軸力ともに、内部荷重を載荷した3リングおよびその周辺のみが図-11の内部荷重を考慮しない場合に比べて計測断面力に若干近づいているものの、軸力の特徴的な結果である4リング

付近の引張側へ変化する傾向など、一致しない部分がある。次に、上記の結果を用いて、施工時荷重が作用する1リング、2リング、3リングの各リングの断面力について、隣接リングに与える影響を加味した断面力（解析値①）および解析値①に形状保持装置による影響を加味した断面力（解析値②～解析値④）と計測値との比較を計測値との比較を図-15に示す。

図より、曲げモーメント、軸力ともに内部荷重を大

きくすることでその変化が大きくなっていることが分かる。軸力については内部荷重を載荷した3リングを除いて内部荷重による顕著な変化はみられない。曲げモーメントについては、1～3リングともに150kN/mを考慮した解析値②では内部荷重を考慮しない解析値①と比べて顕著な変化は見られないが、内部荷重を200kN/m、300kN/mと大きくすると、その変化が現れ、計測値に近似する傾向にあることが分かる。本結果から計測値に近似する内部荷重としては200kN/m～300kN/mの値であることが推察され、形状保持装置の影響を考慮することで、各解析値は計測値と近似する傾向にあることが分かる。内部荷重としては、形状保持装置による荷重のほか、後続台車の重量などが考えられるため、今後、これらの荷重等についても考慮することで、さらに計測断面力に近似するものと考えられる。

以上より、本解析下において、セグメント組立後から施工時荷重が作用する後続のリング周辺までを対象とした施工時荷重による各リングに発生する断面力の評価を行う場合には、形状保持装置等による内部荷重を考慮することで計測結果に近づくことが分かった。

4. まとめ

砂質土層の硬質地盤中に施工された2本のシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、軸力・曲げモーメントの挙動等からトンネル掘進に伴う施工時荷重がどの段階でどの程度作用しているのかについて実態を把握するとともに、多リングはりーばねモデルを用いた骨組み

構造解析を行い、形状保持装置による内部荷重を含む施工時荷重等がセグメント覆工に与える断面力について検討を行った結果、以下のことが分かった。

①リング間継手の形式の違いによるセグメント組立て直後の継手剛性の差により発生断面力が異なり、ボルト継手は小さく、楔嵌合継手は大きくなる傾向があると考えられる。

②掘進時の断面力の変化は、計測リングがテール部を通過することや裏込め注入圧による影響のほか、後続のセグメント組立て、形状保持装置によるトンネル内部からの荷重も影響していると考えられる。

③本解析下において、セグメント組立後から施工時荷重が作用する後続のリング周辺での施工時荷重による各リングに発生する断面力の評価を行う場合には、形状保持装置等による内部荷重を考慮することで計測結果に近づくことが分かった。

今後は、各施工時荷重の定量的な評価を行うために、内部荷重による断面力の影響、施工時荷重によって発生する断面力の残留等をどのように加味するかの検討を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 石村利明，真下英人：硬質地盤中のシールドトンネルの作用荷重に関する一考察，トンネル工学報告集，第18巻，pp235-242，2008

A STUDY ON THE LOAD OF SHIELD TUNNEL CONSTRUCTED IN THE HARD GROUND

Toshiaki ISHIMURA, Hideto MASHIMO, Satoshi MORIMOTO
Katsunori KADOYU

This paper describes, shows the situation of the load during excavation, acting on segments was examined with the measurement data in site with two shield tunnels in good ground and the cross section force influenced by the load during excavation was studied through the numerical analysis with frame model. The results were obtained as follows. The load from the circle-keeping system of segment should be considered when the cross section force for each rings cross section force should be evaluated by the modeling with the action of the loads during excavation around the area of subsequent rings which the load during excavation acted.