

戦-19 施工時荷重を考慮したセグメント設計に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 23

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：角湯克典、石村利明、森本智

【要旨】

本研究は、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、トンネル掘進に伴う施工時荷重の影響を把握し、この影響を考慮した合理的なセグメント設計方法について検討するものである。本年度は、文献調査を行い施工時荷重がセグメントに与える影響について整理するとともに、硬質地盤中におけるシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、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した。さらに、施工時荷重の代表的な一つである裏込め注入圧がシールドトンネルに与える影響を把握するための裏込め注入実験を実施した。

キーワード：シールドトンネル、施工時荷重、現場計測、裏込め注入

1. はじめに

近年、大都市圏の大深度地下において道路を始めとするシールドトンネルの建設が見込まれている。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・セグメント組立て時にジャッキ推力、裏込め注入圧、エレクター操作荷重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。

本研究は、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、トンネル掘進に伴う施工時荷重の影響を把握し、この影響を考慮した合理的なセグメント設計方法について検討するものである。本年度は、文献調査を行い施工時荷重がセグメントに与える影響について整理するとともに、硬質地盤中におけるシールドトンネルの現場計測結果の分析を行い、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した。さらに、施工時荷重の代

表的な一つである裏込め注入がシールドトンネルに与える影響を把握するための裏込め注入実験を実施した。

2. 施工時荷重がセグメントに与える影響

施工時荷重がセグメントに与える影響を把握するため、文献調査^{1) 2)}を行い、施工時荷重が原因によりセグメントに発生する現象を表-1に整理した。ここで、施工時荷重とは、シールドトンネルを建設する際にセグメントの組立てから裏込め注入材が硬化し長期的に安定するまでの間にセグメントに作用する一時的な荷重とした¹⁾。

表より、セグメントに作用する施工時荷重は、各施工時期によりさまざまであり、主に、セグメントを組み立てる際に発生する自重やエレクターの操作荷重、シールド掘進する際に発生するジャッキ推力、テールシールを通過する際に発生するテールシール圧、テールグリズ圧（ここでは、以下「テール内荷重」という）テールシール通過後に発生する裏込め注入圧などがある。特に、大深度に建設される大断面のトンネルでは、セグメントの大型化・幅広化によるセグメント自重の増大、高水圧に対応するためのジャッキ推力やテール内荷重、裏込め注入圧の増加などの影響が大きいものと考えられる。また、急曲線施工を伴うトンネルでは、ジャッキ推力の偏心作用、セグメントとテールの競り力の発生などの影響が考えられる。

これらの施工時荷重が原因によりセグメントに発生する代表的な現象としては、トンネル縦断方向のひび割れ、セグメント隅角部の欠け、継ぎ手部コンクリートはく離、

表-1 施工時荷重によりセグメントに発生する現象

施工時期	想定される施工時荷重	セグメントに与える影響	イメージ図	セグメントに発生する現象		
				①	②	③
セグメント組立時	・自重	・大断面のトンネルではセグメント自重が大きく、既設リングに荷重として作用する。				
	・セグメント組立てによる荷重	・既設リングに変形等がある場合、セグメント組立時に過度な押し付けや競りが発生する。特にKセグメント挿入時のリング閉合する時に大きな荷重が作用する。 ・エレクター操作によっては衝撃的な荷重がセグメントに作用する。		○	○	
	・シール材反力	・シール材の反発力により、局所的に過度の圧縮力が発生する。		○	○	
	・ボルト締結力	・過度な締結力によって、継ぎ手部の変形やボルトの切断が発生する可能性がある。特にセグメントの目開き、目違いがある場合に顕著である。				◎
掘進時	・ジャッキ推力	(1) 急曲線施工の場合 ・ジャッキ推力がセグメント図心から偏心することにより、偏荷重が発生する。直線部においてもスプレッドの位置により偏荷重が作用することがある。 ・テールクリアランスが不均一となるため、裏込め注入材のシールドへの固着、セグメントとの競りなどが発生し、局所的な荷重が作用する。			◎	◎
		(2) セグメント組立て誤差がある場合 ・目違いや目開き、セグメントの傾きが発生した状態で、シールド推進した場合に偏荷重が作用する。		◎	◎	
テールシールド内	・テールシールド内 ・テールグリス圧 ・シールドとの競り	(1) テール通過時 ・セグメントがテール部を通過する際に、テールプランクからテールグリス圧、テールグリス圧による荷重が作用する。特に大深度の場合に大きな荷重となる。			◎	
		(2) 急曲線施工の場合 ・片側のテールクリアランスが大きくなり、テールシールド内に裏込め注入材のシールドへの固着、セグメントとの競りなどが発生し、局所的荷重が作用する。		◎	◎	◎
テールシールド通過後	・裏込め注入圧	・裏込め注入は外水圧以上の圧力で注入するため、セグメントに大きな荷重が作用する。特に大深度の場合に大きな荷重となる。 ・裏込め材のゲルタイムが極端に短い場合、注入材の閉塞を招いて過大な偏圧が作用することがある。				◎

凡例：◎可能性が高い ○可能性がある

セグメントに発生する現象

現象①	現象②	現象③
トンネル縦断方向ひび割れ 継ぎ手部コンクリートはく離、漏水	セグメント隅角部の欠け、漏水	継ぎ手部ひび割れ、はく離、漏水

漏水などがある。

3. シールドトンネルの施工時荷重の実態把握

3.1 検討方法

硬質地盤（土丹）を通過する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図-1、表-2に示す。現場計測は、計測リング（以下、325Rと表記）でセグメントに作用する圧力、水圧、鉄筋応力度を計測した。325Rの計測器設置位置は図-2のとおりである。

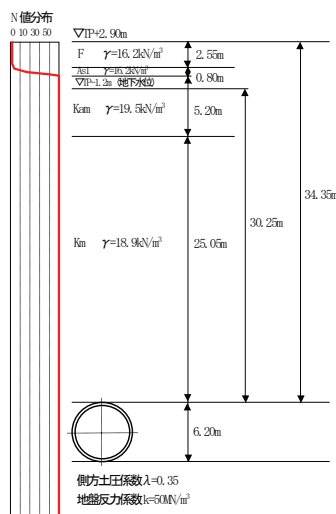


図-1 トンネル位置と地盤条件

表-2 シールドトンネル諸元

シールド外径(mm)	6360
シールド形式	泥水加圧式
土被りH(m)	34.4
土被り比H/D	5.5
地下水位(m) (トンネル頂部より)	30.3
トンネル上部の主な地質	洪積粘性土
掘削部の主な地質	洪積粘性土
セグメントの種類	平板型RCセグメント
セグメント外径D(mm)	6200
セグメント内径(mm)	5700
セグメント厚さ(mm)	250
セグメント幅(mm)	1300
セグメント分割数	6分割
セグメントの組み方	2リング千鳥組み
継手形式(セグメント継手)	突合わせ継手
継手形式(リング継手)	ピン継手

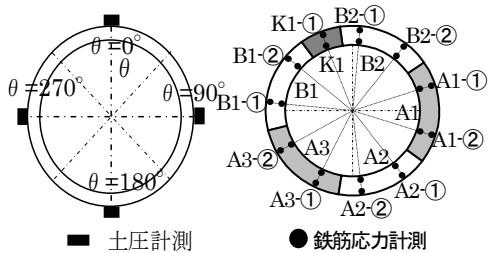


図-2 計測リング(325R)の計測器設置位置

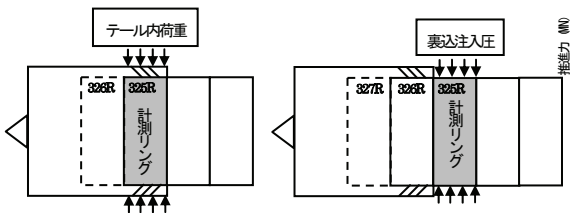


図-3 シールドと計測リングの位置関係

計測結果の分析は、トンネル施工時の各段階における計測結果の変化から、どの段階でどのような大きさの施工時荷重がトンネルに作用するのかを把握した。また、計測はセグメント組立て前から実施しており、セグメント組立てによる施工時荷重の影響を分析した。なお、計測リングの位置とシールドマシンの位置関係は図-3に示すとおりであり、シールドマシン内には2リング分のセグメントリングが留まる。325Rから1リング先のセグメント(326R)掘進時にテールシール反力、テールシールグリス圧、ジャッキ推力等が作用する。また、裏込め注入はセグメント注入孔からの即時注入方式を採用しており、325Rから2リング先のセグメント(327R)掘進時に裏込め注入圧が作用する。

3.2 現場計測結果

3.2.1 シールド掘進時のデータの変化

325R組立て後12時間経過までのセグメントに作用する圧力を図-4に示す。図より、325Rがテール内に存在するときはテール内荷重が、計測リングがテールから脱出した後は裏込め注入圧が作用している。裏込め注入圧は、裏込め注入が行われるトンネル掘進中に上昇し、掘進停止後に掘進前の状態に戻る。裏込め注入圧の影響は、テール脱出直後が最も大きく、徐々にその影響が小さくなり、その後、変動がわずかとなる。最終的には、裏込め注入圧の影響は徐々に低下し、圧力は一定値に収束する。鉄筋応力についても同様な挙動を示した。

3.2.2 セグメント組立て時およびシールド掘進時の影響

本トンネルは、セグメント組立て前から計測を実施している。そこで、各ピースのセグメント組立て時の影響を確認した。また、あわせてシールド掘進時の影響につ

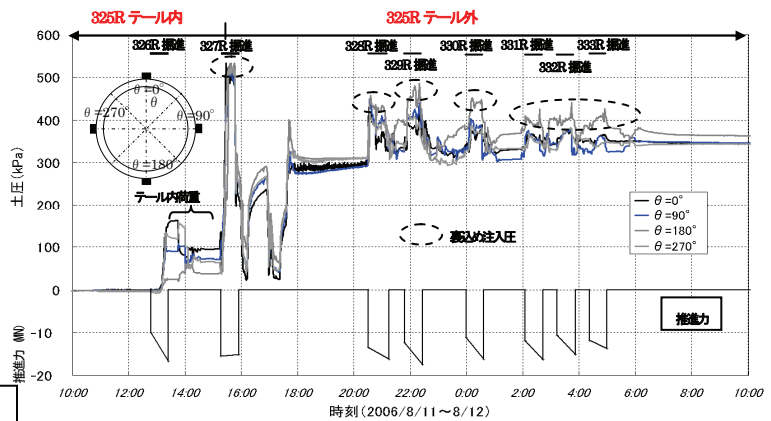


図-4 325R 組立て後 12 時間経過までの圧力の変化

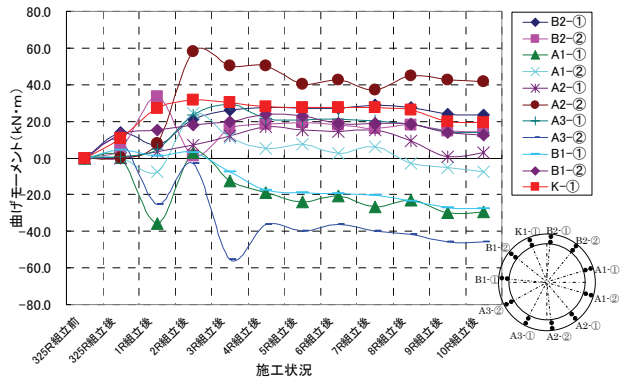


図-5 各リング組立て後における断面力の変化

いても分析した。

図-5 に計測リング (325R) の鉄筋計のデータをもとに組立て初期からの断面力の変化を示す。断面力は、計測リングから 4 リング～5 リング程度先までのリングを組み立てるまで大きく変化している。この変化は、表-1 で整理した施工時荷重のうち、テール内およびテール脱出後における施工時荷重の影響によるものと考えられる。

3.2.3 計測セグメント組立て時の断面力

次に、この断面力の変化の要因の一つと考えられるセグメント組立て時、シールド掘進時について、各リングそれぞれのセグメント組立て前後、シールド掘進前後の断面力の増分を抽出し、それぞれの要因が断面力に与え

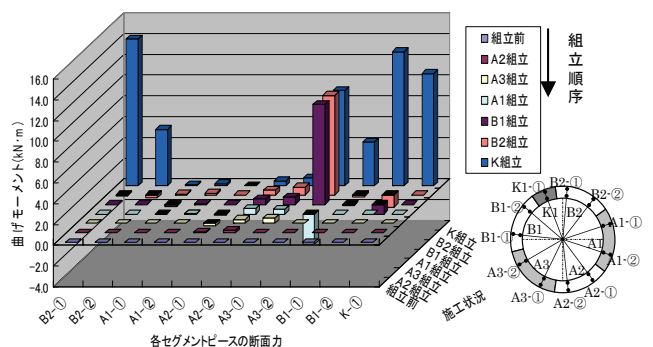


図-6 セグメントピース組立て時の断面力

る影響を確認した。図-6に計測リングのセグメントを組み立てる際の断面力の変化を示す。これより、セグメントの各ピースを組み立てる際においても断面力が変化していることが分かる。特にリングを閉合するための最後のセグメントピースである K セグメントを挿入する際に K セグメント周辺ピースの断面力が急激に増加していることが分かる。セグメント組立て前後、シールド掘進前後の断面力の増減分の抽出方法は図-7に示す考えで行った。

3.2.4 セグメント組立てによる影響

図-8、図-9にセグメント組立て前後の断面力の増減分とこれらの増減の累積を示す。セグメント組立てによる断面力の増減分は、計測リングを組み立てる時よりも次リングを組み立てた時のほうが変化が大きいことが分かる。また、この断面力の変化は一部の測点を除いて4~5リング程度組立て先まで顕著であり、それ以降のセグメント組立てによる断面力への影響は小さくなっている。これらより、新規に組み立てるセグメントの自重や既設リングの組立て精度や変形状況が、隣接するリングに大きく影響を与えていることが考えられる。

3.2.5 シールド掘進による影響

図-10、図-11に各リング掘進前後の断面力の増減分とこれらの増減の累積を示す。掘進時により断面力は、1

~4 リング程度先のリング掘進時まで増減が見られる。特に、1~2 リング先のリング掘進時に非常に大きいことが分かる。計測セグメントとシールドとの位置関係は、図-2に示したとおりであり、325R を基準に1 リング先の掘進時にテールシールド反力、テールグリス圧、ジャッキ推力等が、2 リング先の掘進時に裏込め注入圧が作用している。このことから、これらの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が大きく影響していると考えられる。

以上より、セグメント組立てによる影響は、新規に組み立てるセグメントの自重、既設リングの組立て精度や変形状況によって、隣接する4~5リング程度まで影響を与えることが分かった。また、掘進により断面力は、1

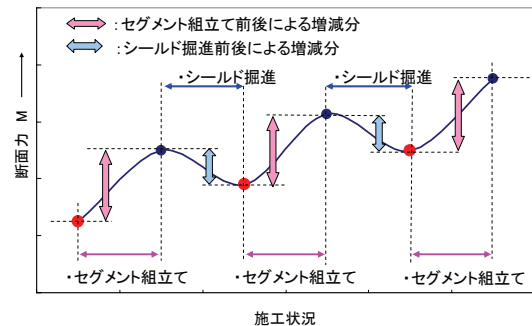


図-7 断面力の増減分抽出の考え方

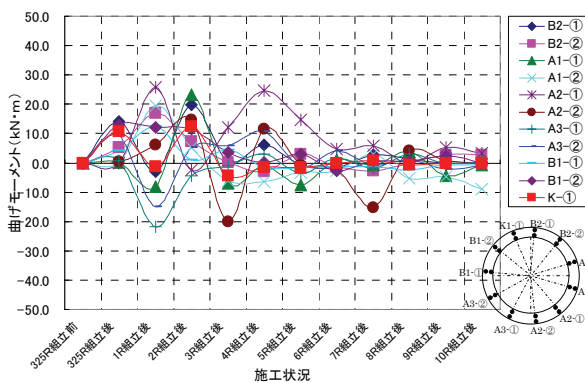


図-8 各セグメント組立前後の断面力の増減分

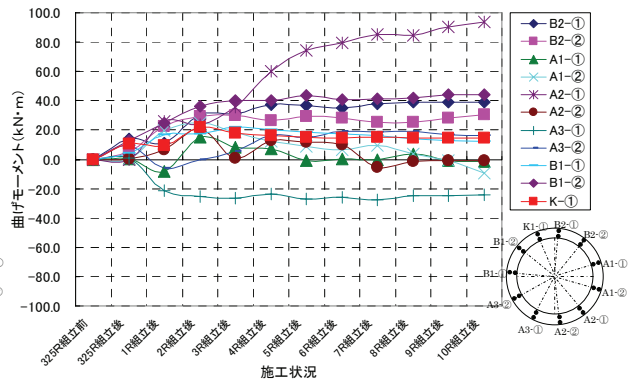


図-9 各セグメント組立前後の断面力の増減分の累積

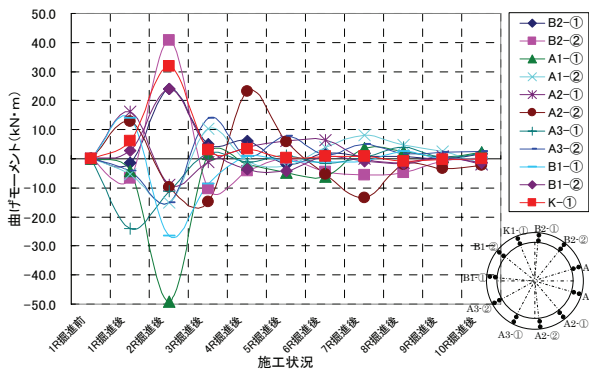


図-10 各リング掘進前後の断面力の増減分

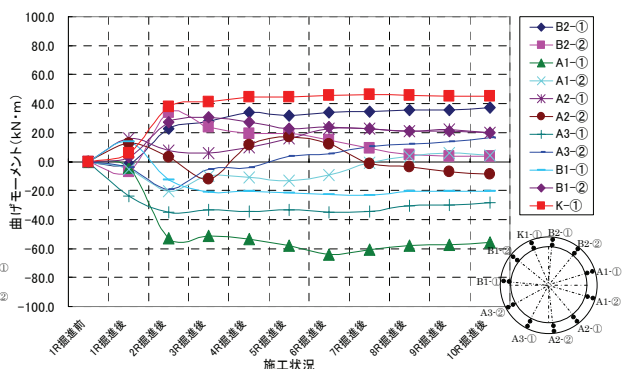


図-11 各リング掘進前後の断面力の増減分の累積

～4リング程度先のリング掘進時まで増減するが、変化の主な要因はテール部通過、裏込め注入圧によると考えられる。

4. 裏込め注入圧がシールドトンネルに与える影響

施工時荷重の中でも裏込め注入圧がセグメントに与える影響が大きいことが、現場計測結果の分析から確認できた。また、土丹などの硬質地盤中における現場計測結果の分析によれば、裏込め注入圧による施工時荷重が裏込め注入時のみならず、その影響が長期的に残留することが指摘されている³⁾。そこで、裏込め注入による一時的な圧力上昇がセグメント覆工に与える影響を把握するための実験を実施した。

4.1 実験方法

実験は、図-12 に示すような実験装置を用いた。装置底面をセグメント覆工と考えて、セグメント覆工と接触する面に設置した厚さ 100mm の引き抜き部を引く抜くことでシールド掘削におけるテールポイドを模擬し、その部分に裏込め注入材を注入して各種の計測を行った。裏込め注入は、裏込め注入ポンプの仕様および実験装置の密閉性の関係から、一定の圧力保持が困難であったため、引き抜き部を引き抜きながらテールポイド部分に裏込め注入材で充填した後、裏込め材が硬化する前の可塑状の状態において、引き抜きジャッキの押し戻しを行うことにより目標圧力とした 0.2MPa まで圧力を高めた。

実験は、表-3 に示す地盤条件の異なる 2 ケースとした。各地盤の作成方法は、ケース 1 の標準砂は密度が一定に

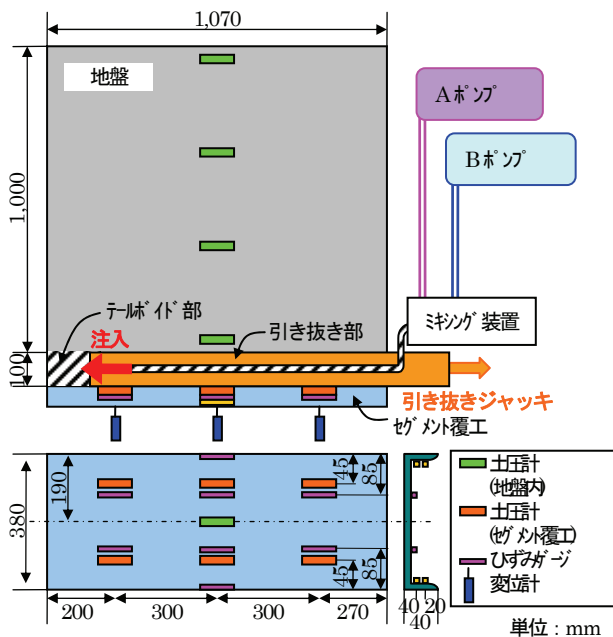


図-12 裏込め注入実験の概要図

なるように高さ約 50cm から砂を落下させた。ケース 2 の粘性土は表-4 に示すようにクレイサンドを主体とした配合および練り混ぜを行った後に 3 日間の養生を行った。なお、裏込め注入材は水ガラスを用いた 2 液性の可塑性材料とし、ゲルタイム約 20 秒の表-4 に示す配合とした。

実験に用いた各材料の一軸圧縮強度は図-13 に示すとおりである。

表-3 実験ケース

実験 NO.	地盤材料	裏込め注入圧(MPa)
ケース 1	標準砂	0.2
ケース 2	粘性土	

表-4 粘性土の配合 (1m³ 当たり)

材料	単位	粘性土
水	kg	588
セメント	kg	29.025
クレイサンド	kg	1020.975
流動化剤	ℓ	18

表-5 裏込め注入材配合 (1m³ 当たり)

	材料	単位	数量
A 液	硬化剤	kg	230
	助剤 S	kg	25
	安定剤	kg	1
	水	ℓ	825
B 液	水ガラス	ℓ	84

表-3 各材料の一軸圧縮強度

材令	単位	裏込め注入材	粘性土
1 日	kN/m ²	6300	20.1
3 日	kN/m ²	1221.0	27.0
7 日	kN/m ²	1659.0	37.5

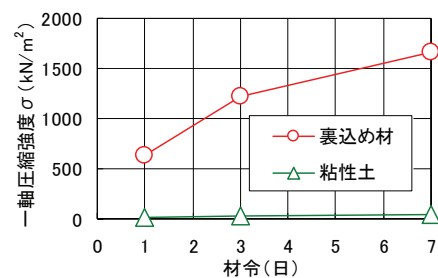


図-13 各材料の一軸圧縮強度

4.2 実験結果

図-14 に各ケースについて、目標圧力 0.2MPa に達した後のセグメント覆工の中央部に設置した 2 つの土圧計の値を示す。いずれのケースにおいても目標圧力に達した後に圧力が減少する傾向を示す。特に、ケース 1 の気乾状態の標準砂は目標圧力に達した後、急激に低下して約 1 時間後にはほぼゼロとなる。これは、標準砂の単位体積重量 14.7kN/m³、含水比 0.165% であり、間隙比、飽和度がそれぞれ 0.8、0.5% であるため、裏込め注入材

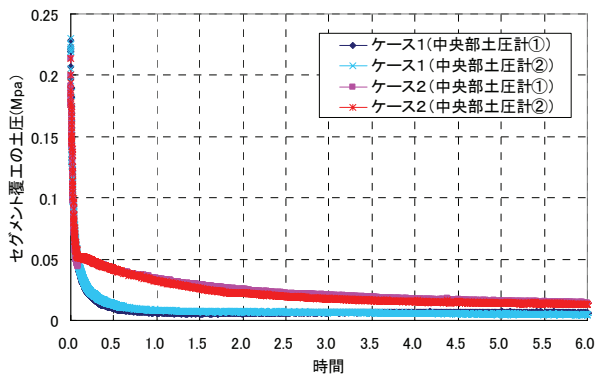


図-14 セグメント覆工に作用する土圧

が標準砂の間隙中へ回り込むとともに、その水分が砂中に浸透したために圧力の急激な低下が生じたものと考えられる。一方、ケース2の粘性土は、初期の圧力低下の傾向は同様だが、0.05MPa付近からの圧力の低下は標準砂に比べて遅くなっており圧力が収束するまでに約6時間程度を要した。0.05 MPa 付近で圧力低下の勾配が異なった理由としては、本実験装置の密閉度が低かったために高圧力時に地盤および裏込め注入材の水分等の漏れが生じたためであると考えられる。したがって、水分の漏れ等が生じていなければ、もう少し高い圧力で安定したものと推察される。また、粘性土が標準砂のように急減な圧力低下が生じないのは、粘性土の透水係数が小さいために裏込め注入材の地盤への回り込み、地盤中への水分の浸透が行われにくいことによるためと考えられる。図-15 に各ケースについて、セグメント覆工中央部で計測したひずみゲージの値から覆工に作用する幅方向の曲げモーメントの変化を示す。曲げモーメントも両ケースのセグメント覆工に作用する土圧の減少と近似した減少傾向を示した。

上記の結果より、一時的な圧力上昇が減少していく過程は、周辺地盤の間隙の状態や透水係数の大小などによって異なるものと想定される。一般に、裏込め注入材は、ゲルタイムが数十秒で可塑状となった後、2液を混合してから約40分程度から硬化し始める。したがって、裏込め注入圧が減少しない状態で裏込め注入材が硬化した場合、すなわちセグメント覆工が裏込め注入圧により変形した状態で裏込め注入材が硬化した場合は、周辺地盤の状態によってはその影響が残留する可能性があることが考えられる。特に、周辺地盤が土丹のような硬質地盤の場合は、裏込め注入圧によってトンネルが変形した状態でテールボイド部の裏込め注入材が硬化することで、その状態の変形が保持されることになるため、セグメントに発生する断面力もそのまま残留する可能性が高くなると考えられる。

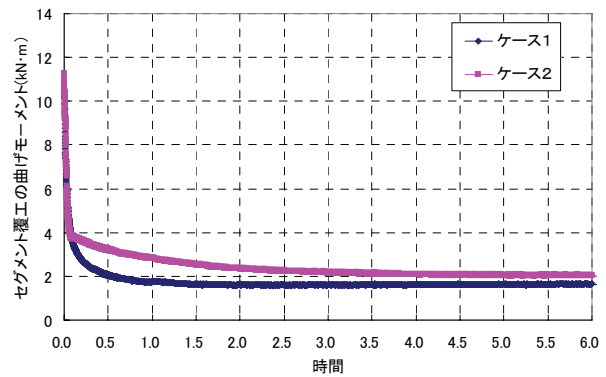


図-15 セグメント覆工の曲げモーメント

今後は、施工時荷重の長期的な残留を含めて、地盤条件や注入圧毎に裏込め注入がセグメントに与える影響について検討を行う必要がある。

5. まとめ

硬質地盤中におけるシールドトンネルの現場計測結果等の分析を行い、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の実態把握、施工時荷重の代表的な一つである裏込め注入圧がシールドトンネルに与える影響を把握するための裏込め注入実験により以下のことが分かった。

- ①セグメント組立てによる影響は、新規に組み立てるセグメントの自重、既設リングの組立て精度や変形状況によって、隣接する4~5リング程度まで影響を与える。
- ②掘進時により断面力は、1~4リング程度先のリング掘進時まで増減するが、変化の主な要因はテール部通過、裏込め注入圧によると考えられる。
- ③裏込め注入圧によるセグメントへの影響は、地盤条件によって異なり、裏込め注入材が浸透しにくい粘性土の場合は裏込め注入による断面力が残留する可能性がある。

今後は、セグメント組立て、テール通過時の施工時荷重の定量的な評価とともに、施工時荷重の長期的な残留を含めて、地盤条件や注入圧毎に裏込め注入がセグメントに与える影響について検討を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針、平成21年2月
- 2) (社)土木学会：トンネル・ライブラリー17 シールドトンネルの施工時荷重、平成18年10月
- 3) 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、平成20年11月

STUDY ON SEGMENT DESIGN OF SHIELD TUNNEL IN CONSIDERATION OF CONSTRUCTION LOADS

Abstract : This research aims to establish the rational design method, considering construction loads in advance of excavation, in order to design high-durability segment constructed by shield tunneling method in good ground condition.

In FY 2008, the influence of construction load on segments was studied and the mechanism of load acting on was grasped through the analysis of measurement data in site with shield tunneling in good ground. The results were obtained as follows;

- 1) Setting up new segment influenced on the next 4 or 5 rings by its self load, by the accuracy of setting up past segments and situation of deformation.
- 2) Cross section force with advance of excavation fluctuated by the excavation of 1 through 4 rings forward and the main reasons of fluctuation were influenced by passing shield tail part and the pressure of back filling.
- 3) Influence of back filling pressure on segment was varied from ground condition and cross section force by back filling tended to remain in the cohesive soil, in which back filling material was hard to permeate.

In future, the influence of back filling on segment in various ground conditions and injection pressures will be examined through the quantitative evaluation of setting up segment and construction load in passing tail part, and the long-term residue of load.

Key words : Shield tunnel, Construction loads, back filling, in-site measurement