

施工時荷重作用時のセグメントの挙動について

Behavior of Segments under Shield Tunnel Construction

斉藤仁¹・中島崇²・高橋晃³・竹内友章⁴・白井伸一⁵

Jin Saito, Takashi Nakashima, Akira Takahashi, Tomoaki Takeuchi, Shinichi Shirai

^{1,2,5}正会員 東京電力株式会社東扇島火力発電所 (〒210-0869川崎市川崎区東扇島3番地)

E-mail:saito.jin@tepeco.co.jp

^{3,4}正会員 東京電力株式会社建設部土木建築技術センター (〒100-0011東京都千代田区内幸町1丁目1-3)

The design of the segments under tunnel construction is not specified clearly. Conventionally, it is thought that the damage of segments under tunnel construction is caused by precision at the time of assembling of segments. However, it is not argued about a factor of assembling precision of segments in detail, and it is thought that it is based on an erector-operator's skill. Then, in order to analyze the factor of assembling precision, we decided to measure behavior until it escapes from a machine tail after assembling of segments. As a result, while the behavior of the segments assembled in sufficient precision changed every moment according to the load under tunnel construction, it turned out that it may be damaged in the process.

Key Words : shield tunnel, behavior of segments, load under construction

1. はじめに

現在、シールドトンネルセグメントの施工時荷重に対する設計は、規定された荷重・解析モデルはほとんどなく、設計者が施工条件を判断して設計している状況にある¹⁾。しかしながら、近年では大深度トンネルのように、施工時荷重が他の荷重条件(例えば、常時荷重、地震時荷重)に対して大きくなるような場合があることから、施工時荷重に対する設計の重要性が高まりつつある²⁾。

施工時荷重によるセグメントの損傷要因の一つとして従来から挙げられるものに、セグメント組立後の精度がある。例えば、図1-1に示すように、目開きのある状態でジャッキ推力が作用することにより、セグメントにクラックや割れ欠けが生じるという場合である。しかしながら、このセグメントの組立精度はエレクターオペレーターの技術への依存度が大きいと考えられ、本質的な発生要因や対策については、十分な議論がなされていない。

一方、本論で示す現場においても、施工時荷重により図1-1に示すような損傷が見受けられたが、この発生要因の一つは、精度良く組立てられたセグメントがその後のジャッキの押し引き、テールシールド

拘束圧等の施工時荷重の作用により、微小な動きを生じることにあることが、現場におけるセグメントの挙動観察からわかった。

そこで、施工時荷重の作用によって生じる微小なセグメントの挙動を分析するために、組立直後からKセグメントを中心とした目開き、目違いの自動計測を実施した。本論は、この計測結果に基づく挙動の分析および損傷の可能性について考察するものである。

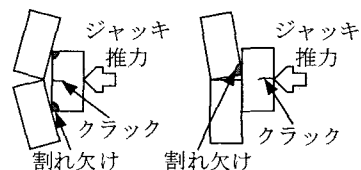
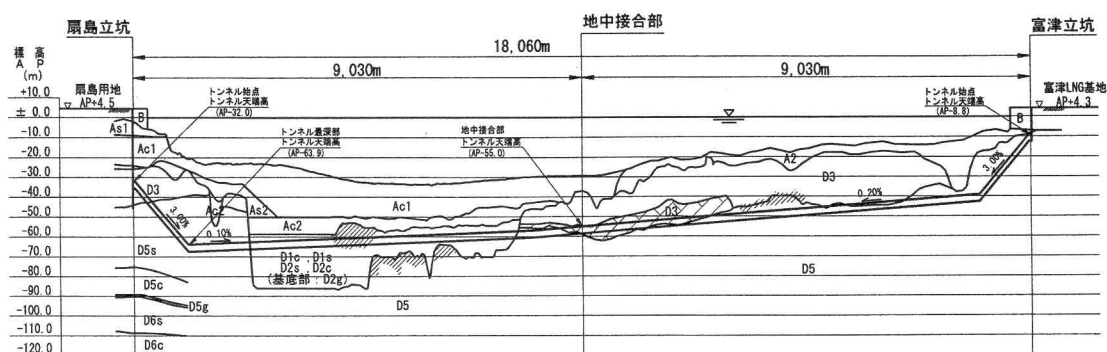


図1-1 施工時荷重によるセグメントの損傷例

2. 工事概要およびセグメント、シールドマシンの諸元

(1) 工事概要

当該工事(東西連係ガス導管新設工事)は図2-1に



示すように、神奈川県東扇島火力と千葉県富津火力のLNG基地間を東京湾下の海底シールドトンネルにより連係するもので、扇島側(扇島工区)、富津側(富津工区)からそれぞれ延長9km(仕上がり内径3.0m、外径3.44m)のシールド掘進を行い、東京湾の中央部で地中接合するものである。このうち、本論で示す計測結果は扇島工区によるもので、当該工区は、最大水圧0.7MPaで、かつ全線の約9割以上が海面下50m以深の大深度に位置し、ジャッキ推力等の施工時荷重が大きいことが特徴となっている。

(2) セグメント、シールドマシンの諸元

本工事では、長距離、高水圧という条件のみならず、平均月進500m以上の高速施工を実現することを条件とし、セグメントおよびシールドマシンを設計した。それぞれの諸元を示す。

図2-2 シールドマシン

3. 計測計画

現場におけるセグメントの挙動観察の結果、セグメントの挙動が顕著に見受けられたのはKセグメントであった。また、図3-1に示すように、セグメントの損傷部位の割合は、Kセグメントあるいはそれに隣接するBセグメントに多いことがわかる。したがって、精度良く組立られたセグメントはマシンテール内において施工時荷重の作用を受け、特にKセグメントが大きく挙動し、Kセグメントあるいはそれに隣接するBセグメントにおいて損傷することが推察できる。したがって、今回の挙動計測はKセグメントを中心に実施することとした。

挙動の分析は、目開き計および目違い計を用いて評価することとし、図3-2に示す継手部(図中の数字は測点番号を示す)それぞれに目開き計、目違い計を各々設置した。計測開始時期は、測点①～⑥では組立直後、測点⑦、⑧では次リング組立直後とした。なお、計測断面はセグメントの挙動を定量的に評価するために4断面とした。各計測断面の施工条件を表3-1に示す。

1	2	4	5	3	5	8	0	4	2	1	2	1	1	1
0	A1	0	0	B1	0	1	K	1	1	B2	0	0	A2	0
4	0	6	3	3	12	3	1	4	4	2	12	1	0	2

(a) 割れ欠け(総数1,712箇所, 調査リング7,380)

2			8			22			12			0		
0	A1	0	1	B1	6	14	K	13	5	B2	3	0	A2	0
1			5			6			2			0		

(b) クラック(総数1,617箇所, 調査リング7,380)

図3-1 セグメントの損傷部位の割合(単位: %)

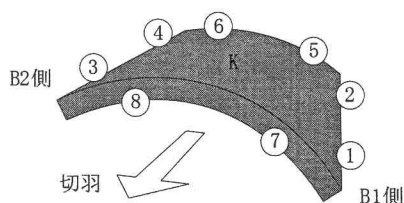


図3-2 計器設置位置(測点番号)

表3-1 計測断面の施工条件

計測断面	Ring No.	延長(m)	掘進方式	切羽水圧(MPa)	総推力(kN)
A	3,126	3,751	同時	0.65	8,300
B	5,376	6,451	逐次	0.63	7,700
C	6,458	7,749	逐次	0.63	8,300
D	7,131	8,557	逐次	0.62	8,400

4. 施工時荷重の作用状況

施工ステップ毎のシールドマシン、計測リング、および地山の位置関係を図4-1に示す。各ステップにおいて計測リングに作用する主な施工時荷重は、トンネル軸方向(以下、軸方向と略す)にはジャッキ推力およびリング間シール材反発力、トンネル周方向(以下、周方向と略す)にはピース間シール材反発力、半径方向には2リング目掘進中からテールシール拘束圧となる。したがって、これらの施工時荷重の作用が複合してセグメントの挙動に影響を与えるものと考えられる。それぞれの荷重の作用状況、大きさ、および挙動への影響度について示す。

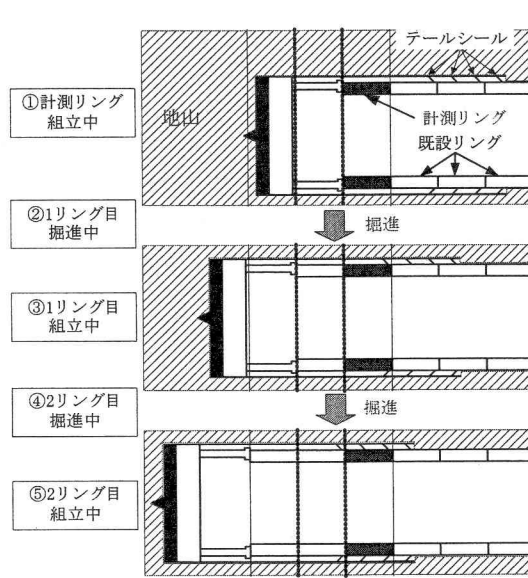


図4-1 施工ステップ毎のシールドマシン、計測リング、地山の位置関係

(1) ジャッキ推力

掘進中に計測リングに作用するジャッキ推力は、1リング目掘進中ではジャッキが直接作用することから、その影響が最も大きくなると考えられる。この場合のジャッキ推力およびその作用点を表4-1に示す。なお、計測断面Aについては、同時掘進を実施したことから、掘進中にKセグメントに作用するジャッキ推力およびその作用点に変化するため、ここでは割愛した。

表4-1から、ジャッキ推力は計測断面により異なるものの、いずれの場合もKセグメントにはほぼ全数のジャッキが作用していることから、Kセグメントの挙動に影響を及ぼすような作用ではない。

表4-2 組立ステップ毎のジャッキ推力およびその作用点(計測断面B)

ステップ	I A1組立前	II A1組立時	III A2組立前	IV A2組立時	V B2組立前
ジャッキ推力	456kN/本	456kN/本	456kN/本	456kN/本	491kN/本
ジャッキ作用点					
ステップ	VI B2組立時	VII B1組立前	VIII B1組立時	IX K組立前	X K組立時
ジャッキ推力	491kN/本	531kN/本	531kN/本	456kN/本	456kN/本
ジャッキ作用点					

※ジャッキ作用点のうち、●：切羽水圧保持ジャッキの作用点を示し、○：は組立時の押込ジャッキを示す

表4-1 掘進中のジャッキ推力とその作用点

計測断面	B	C	D
ジャッキ推力	592kN/本	461kN/本	700kN/本
ジャッキ作用点 (●：作用点)			

組立中に計測リングに作用するジャッキ推力は、掘進中と同様、1リング目組立中に最も影響が大きくなると考えられる。1リング目組立中のジャッキ推力およびその作用点は組立てのステップにより表4-2に示すように推移する(計測断面Bの場合を代表して示す)。なお、各ステップのジャッキ推力は、その総和が切羽水圧に対する保持力であることから、切羽水圧をステップ毎の使用ジャッキ本数で除し算出している。また、組立時の押込ジャッキの圧力は約200kN/本である。

例えば、表4-2のステップVIIのように、Kセグメントの端部1箇所におのみジャッキが作用する場合がある。したがって、組立中のジャッキ推力はKセグメントに軸方向の偏圧を作用させる場合があり、掘進中のジャッキ推力より挙動に影響を及ぼす可能性が高い状態であると考えられる。

(2) テールシール拘束圧

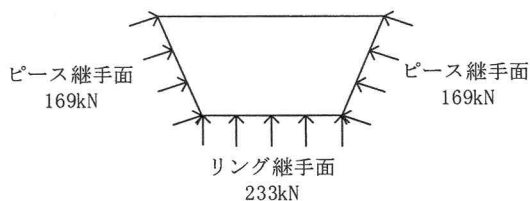
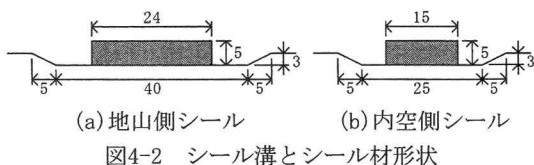
施工ステップに伴うテールシールとセグメントの位置関係は図4-1に示したとおりで、計測リングは2

リング目掘進中から徐々にテールシール拘束圧が半径方向に作用し始め、これにより、周方向に軸力が導入される。なお、その作用圧力は、パッド式土圧計による計測結果から切羽水圧とほぼ同等(0.62～0.65MPa)であった。また、結果として導入される軸力は約1,000kN/mとなる。

(3) シール材反発力

シール材反発力は、リング継手面では軸方向にピーズ継手面では周方向に作用する。止水性能は地山側シール1段のみで満足する設計を行っているが、当該工事は高水圧下のため、内空側にもシール材を配置している。図4-2にそれぞれのシール溝およびシール材の形状を示す。また、継手面上に作用するシール材反発力(地山側、内空側の合力)を図4-3に示す。

図4-3に示すように継手面に作用する反発力は大きく、シール材の封入には継手の締結力に併せジャッキ推力やテールシール拘束圧が必要となる。そのため、軸方向あるいは周方向の拘束力が小さい場合には目開きが発生することとなる。なお、シール材反発力は目開き0mm時(圧縮率40%)の初期接面応力3.92N/mm²から算出したもので、水膨張圧や応力緩和等は考慮していない。



5. 計測結果および損傷の可能性

各計測値の経時変化を図5-1に示す。図5-1から考察した挙動分析結果を表5-1に示す。なお、図5-1は計測断面Bの計測結果を用いたが、他の計測断面の結果についても、ほぼ同様な挙動であった。

表5-1に示したように、セグメントの挙動は複合する施工時荷重の作用方向に従って刻々と変化することがわかった。顕著な動きは1リング目組立中に見受けられたが、この過程でも特に挙動が大きかったステップVI～VIIおよびVII～VIII(表4-2)への移行時の挙動を分析し、損傷の可能性について考察する。

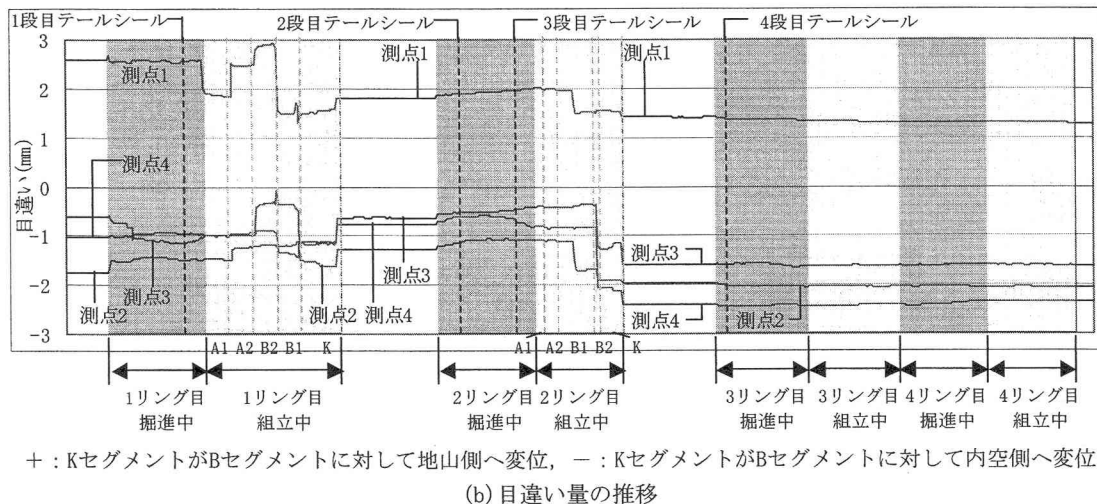
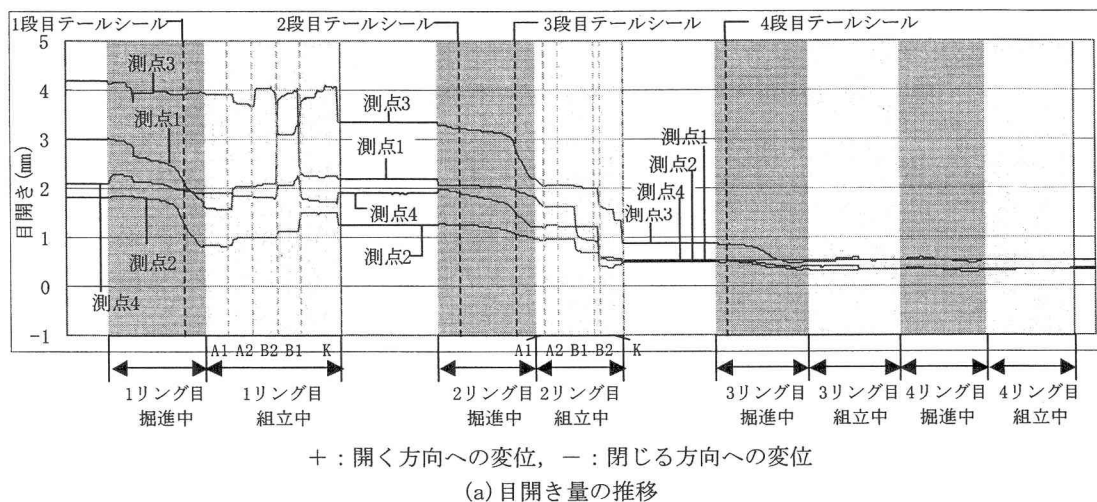


図5-1a 測点①～④(ピース間継手部)の経時変化(計測断面B)

(1) ステップVI～VIIへの挙動

ステップVI～VIIへの変化は、表4-2に示したように、Kセグメントからジャッキが引き戻される過程であり、ステップVIIのKセグメントは軸方向の拘束力が小さいとともに、中心軸に対して偏芯して作用する状態となっている。このステップの移行に伴う各計測値の変化量を図5-2に示す。なお、図5-2は計測断面BおよびCを代表して示した。

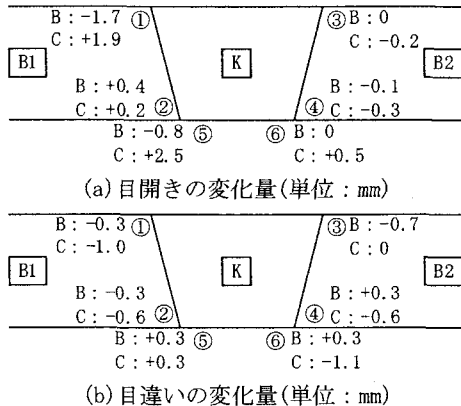


図5-2 ステップVI～VIIへの変化量(符号は図5-1と同様)

図5-2の目開きの変化量から、KセグメントはB1セグメント側にスライドする傾向が見られ、特に計測断面Cの結果では、時計周りに回転を伴いながらスライドする傾向が見られる。また、同図目違いの変化量から、Kセグメントは内空側に落ち込む傾向が見られ、その量は切羽側の方が大きくなっている。

目開きの変化は、図5-3に示す施工時荷重の作用状況から説明することができる。図5-3に示すように、ステップVIIのKセグメントには、B2セグメント側1箇所ジャッキ推力が作用するとともに、シール材反発力が作用する。これらの荷重はKセグメントを時計周りに回転させようとする方向に作用する。一方、回転に抵抗する継手のうち、ピース継手については、軸方向に拘束力を持たない構造であることから、計測結果に見られる挙動を示したものと考えられる。また、目違いの変化は、目開きを生じる過程で、Kセグメントが半径方向に動くスペースが生じる。この際、Kセグメントの自重により内空側に落ち込む挙動を示したものと考えられる。なお、Kセグメントには継手角(12°)を設けているため、内空側に落ち込み易い形状となっている。

(2) ステップVII～VIIIへの挙動

ステップVII～VIIIへの変化は、表4-2に示したように、

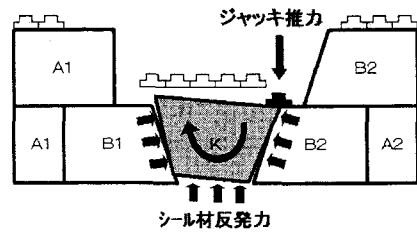


図5-3 ステップVIIの施工時荷重

組立られたB1セグメントを介してKセグメントにジャッキ推力が作用することから、ステップVIの状態に戻る過程と言える。このステップの移行に伴う各計測値の変化量を図5-4に示す。

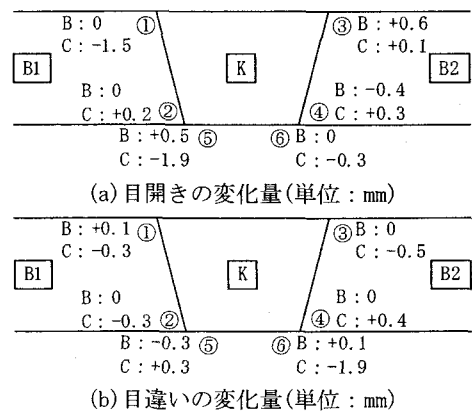


図5-4 ステップVII～VIIIへの変化量(符号は図5-1と同様)

ステップVIIIの状態はステップVIと同様になるため、ステップVI～VIIへの変化量が戻るものと考えられるが、結果として戻っていないことが図5-4からわかる。目開きの変化については、図5-2で特に顕著な変化量を示した測点については、戻る傾向が見られるものの、いずれも目開きは残留する傾向にある。目違いの変化については、ほとんどの測点においてさらにKセグメントが内空側に落ち込む変化を生じている。つまり、荷重の作用状況は一連のステップの移行前の状態になるものの、挙動の変化量は累積し、最終的な出来形が形成されることがわかる。

(3) 損傷の可能性

図3-1で示したように、Kセグメントの損傷は隅角部の割れ欠け、ピース継手面からのクラック、リング継手面からのクラックの発生率が高い。前述した一連の挙動から、それぞれの損傷の可能性について示す。

a) 隅角部の割れ欠け

図5-5に示すように、Kセグメントの隅角部は隣接するセグメントと点接触するような状態になる。この状態から軸方向力であるジャッキ推力が作用することにより、割れ欠けが発生するものと考えられる。

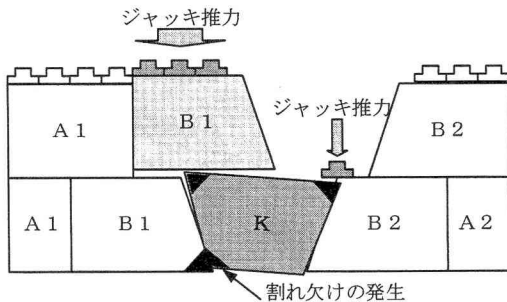


図5-5 隅角部の割れ欠け

b) ピース継手面からのクラック

図5-6に示すように、Kセグメントのピース継手は雌金物に雄金物が接触するような状態になる。この状態からジャッキ推力が作用することにより、雌金物が押し広げられ、ピース継手面からのクラックが発生するものと考えられる。

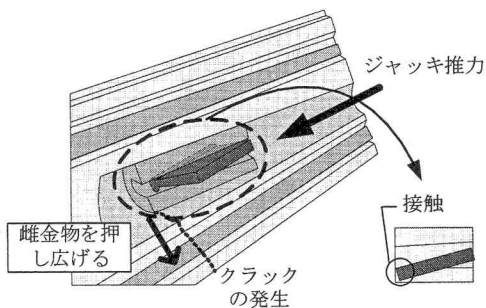
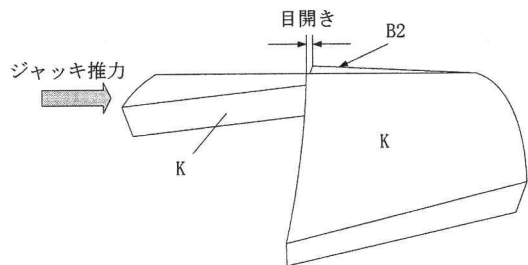


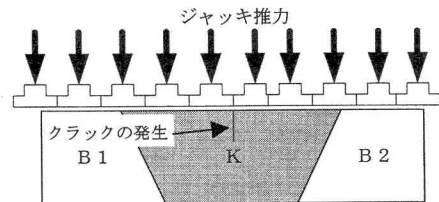
図5-6 ピース継手面からのクラック

c) リング継手面からのクラック

ステップIX、Xに示す1リング目Kセグメントの組立ての際、そのリング継手面の接触面である計測リングのKセグメントとB2セグメントは、図5-7に示すように、円周方向に同一面上になく、どちらかの接触面に目開きが生じる。そのため、KセグメントとB2セグメントとの間に支点が生じ、図1-1で示したように、1リング目Kセグメントを組立てる際(ステップX)、あるいは2リング目掘進中にジャッキ推力が作用することにより、1リング目Kセグメントのジャッキ作用面であるリング継手面からクラックが発生するものと考えられる。



(a) Kセグメント組立時のリング継手面



(b) リング継手面からのクラック

図5-7 リング継手面からのクラック

6. まとめ

今回の挙動計測結果から、組立てられたセグメントはマシンテール内で様々な施工時荷重が変動して作用することにより、微小な挙動を繰り返すとともに、変位が累積し最終出来形になることを数値的に評価することができた。特に、セグメントの挙動は複合する施工時荷重それぞれの大きさや作用方向に従っていることがわかった。また、このような挙動の中で損傷する可能性があることも示唆することができた。

このような挙動を本質的に抑制するには、セグメントの形状、継手の構造、および継手の剛性等のバランスが重要になるものと考えられる。今後は、今回の挙動をシミュレートする解析モデルを構築し、挙動および損傷の可能性についてパラメータスタディーを実施し、施工時荷重に対する設計の一側面として、バランスを考慮する設計法について考察を加えていく予定である。

参考文献

- 1) トンネル標準施工方書[シールド工法編]・同解説、土木学会、pp. 47-49、1996
- 2) シールドトンネルの施工時荷重に関する研究[中間報告会 資料]、土木学会トンネル工学委員会技術小委員会シールドトンネル施工時荷重検討部会、2005