

シールドテールとの競りによる セグメントへの影響

小山 幸則¹・水原 勝由²・管 茜椽³

¹フェロー会員 立命館大学客員教授 総合科学技術研究機構 (〒113-0034 東京都文京区湯島一丁目8-4)
E-mail: yukinori.koyama@gmail.com

²正会員 株式会社 地域地盤環境研究所 東京事務所(〒113-0034 東京都文京区湯島一丁目8-4)
E-mail:mizuhara@geor.co.jp

³株式会社 地域地盤環境研究所 東京事務所(〒113-0034 東京都文京区湯島一丁目8-4)
E-mail:kan@geor.co.jp

近年, セグメントの設計は, 省力化やコスト縮減を図るために, セグメントの薄肉化や幅広化, 簡略化された継手の採用が多くなっている. しかし一方では, セグメント耐力減少の可能性が増加し, 施工時荷重の増加や施工的に厳しい条件によっては, セグメントの不具合(ひび割れ等)が顕在化してきている.

本研究では, シールドテールとセグメントリングに競りが生じ, この状況でセグメントに施工時荷重が作用した場合を三次元解析で再現し, セグメントの応力挙動とセグメントの健全性に与える影響について考察する.

Key Words: shield tunnel, tail clearance, scraping and thrusting between shield tail and segments, stress behavior, shield machine posture

1. はじめに

近年, シールドトンネルでは経済性を求めて, セグメント設計においてセグメントの薄肉化や幅広化, 簡略化された継手の採用が多くなっている. しかし一方では, 合理化されたセグメントの施工直後でのひび割れ発生が顕在化していることが最近の研究で明らかになっている¹⁾. これらのひび割れの多くは, テール通過中のジャッキ推力や裏込め注入圧などの施工時荷重やテールとセグメントの局所的接触(競り)に一因があると言われている. また, ひび割れなどの不具合は, セグメントの長期的な耐久性, 耐荷性能の低下をもたらす要因となっている.

著者らは, 裏込め注入材のテールシール内への侵入固結によるテールクリアランス(以後, クリアランスという.)の縮小が, シールドテールとセグメントの局所的な競りを生じさせることに着目し, 局所的な競りがセグメントの健全性に与える影響を三次元解析から評価した. その結果, クリアランス縮小位置付近は, セグメント継手周りのせん断応力を増加させ, セグメントの不具合を生じさせ, 健全性を低下させる可能性が高くなることを示した²⁾.

本報告では, 前報²⁾と同じ解析条件および解析モデルを用い, トンネル線形が変化する初期段階(曲線および縦断勾配の変化点付近)で, トンネル軸とシールドマシン軸が角度差(以後, 軸差角という.)を持った状態やシールドの急激な姿勢変化を想定した三次元解析を行い, クリアランスの縮小やジャッキ推力の偏芯載荷, テールシールのセグメント押し付け荷重等が掘進中のセグメント応力挙動および健全性に与える影響について検討を行った.

2. 解析条件および解析モデル²⁾

(1) セグメント

解析に用いるセグメント仕様は, 外径8400mm, 高さ400mm, 幅1600mmの鉄筋コンクリート平板型セグメント, セグメント継手はスライドコッター, リング継手はピンとした. セグメントの材料物性を表-1, 許容応力度を表-2に示す.

表-1 セグメントの物性値

材料	設計基準強度 f_{ck} (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	ポアソン比 ν
コンクリート	51	41	0.17
鉄筋SD345	-----	200	-----

表-2 セグメントの許容応力度(N/mm²)²⁾

材料	許容圧縮 σ_{cn}	許容せん断 τ_{al}	許容引張 σ_{st}
コンクリート	19	0.76	-----
鉄筋SD345	-----	-----	200

(2) 地盤条件

シールドとセグメントの位置関係を図-1に示す. テール通過後のセグメント外周を支持するのは硬化した裏込め注入材および地盤であり, 裏込め注入材の硬化は図-1中のR4からとした. セグメントR4-R6の3リング間は, 強度発現過程を考慮した裏込め注入材と地盤の合成ばね支承(全周ばね)とした.

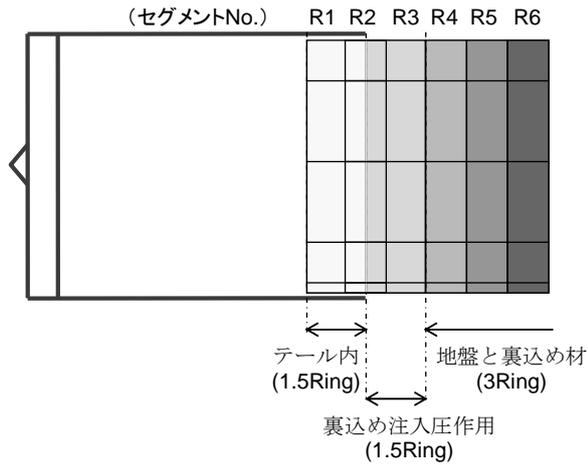


図-1 セグメントの位置関係

表-3 裏込め注入材と地盤の合成ばね (kN/m)

	法線方向Kn	接線方向Ks
R4	8,333	2,778
R5	11,905	3,968
R6	21,429	7,143

地盤と硬化した裏込め注入材の地盤ばね（合成ばね）を表-3に示す。地盤は非常に密な砂質土とした。

(3) 継手

解析に用いたセグメント継手およびリング継手の剛性値を表-4、表-5に示す。図-2にセグメント継手の曲げモーメントと継手回転角の関係を示す。図-3はリング間継手面法線方向の構成則である。

表-4 セグメント継手

回転剛性 (kN・m/rad)	K_{m1}	∞	第1 勾配
	K_{m2}	67,000	第2 勾配
軸剛性(kN/m)	K_n	1×10^{10}	-----
せん断剛性(kN/m)	K_s	1×10^{10}	-----

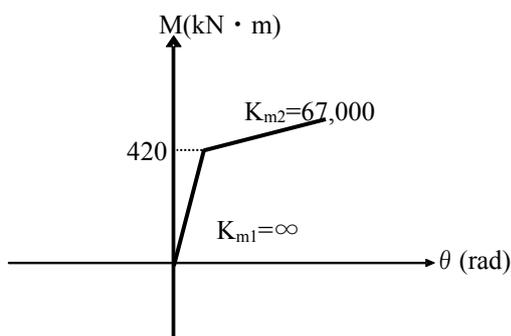


図-2 セグメント継手の曲げモーメントと回転角の関係

表-5 リング継手

継手面	法線方向剛性 (kN/m)	K_n	∞	圧縮状態
	閉口最大量(mm)	V_{mc}	0	
	引張強度(kN/m ²)	σ_t	0	
	定数	ε	1,000,000	
ピン	軸引張剛性(kN/m)	K_t	360,360	引張状態
	せん断剛性(kN/m)	K_s	5,000	

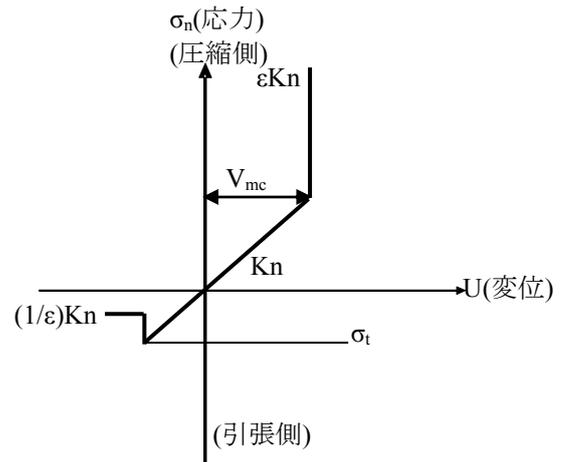


図-3 リング間継手面法線方向の構成則

(4) テールシール

解析上のテールシール構造を図-4に示す。テールシールは、ブラシ2段配置とし、ブラシに挟まれた区間全周に裏込め注入圧と同じ圧力がグリス圧として作用するとともに、クリアランスの変化やグリス圧の変化に追従し、セグメントに対してブラシ押し付け力が変化する。クリアランスの変化は、主に掘進時のジャッキ推力の作用によるセグメントリングの変形やセグメントリングとシールドマシンの軸差角、シールドの姿勢変化、テールシール圧、また裏込め注入材のテールシール内への侵入固結が考えられる。解析では、テールブラシを非線形の剛性特性を有するジョイント要素とすることで、クリアランスの変化をモデル化している。テールブラシの係数一覧表を表-6に示す。

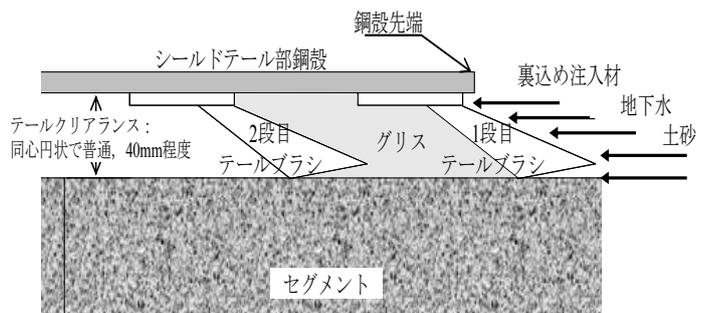


図-4 テールシールの構造

表-6 テールブラシの係数一覧表

法線方向	法線方向 (kN/m)	K_n	167	実験値
	閉口最大量 (mm)	V_{mc}	40	縮小なし
	引張強度 (kN/m ²)	σ_t	0	-----
	定数	ε	10,000	-----
ずれ方向	ブラシ剛性 (kN/m)	K_s	56	1/3 K_n
	摩擦係数	$\tan\phi_1$	0.02	縮小なし
		$\tan\phi_2$	0.5	縮小あり
	粘着力(kN)	c	0	-----
定数	ε	1/10,000	-----	

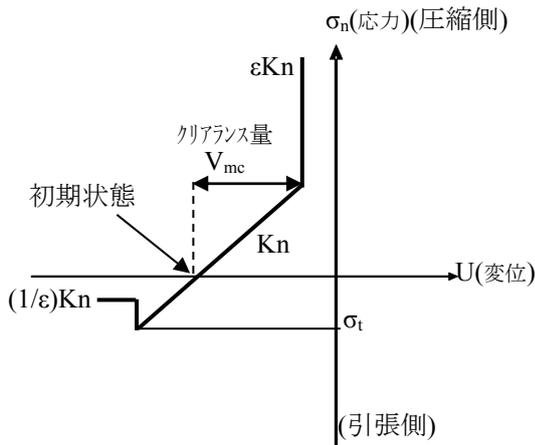


図-5 テールシールブラシ法線方向構成則

テールブラシの法線方向の構成則を図-5に示す。テールブラシの変形量がクリアランス量 (V_{mc}) 以内の場合は、ブラシ剛性 K_n を保持するが、クリアランス量を超えてからは剛性が急激に大きくなる。例えば、クリアランスに一切固結物が無いような場合（縮小なし）は、ブラシ剛性 K_n を有しながら、クリアランス量 $V_{mc}=40\text{mm}$ まで変形が許されることとなる。逆に、全クリアランスに裏込め材などが充満・固結し、変形ができないような場合は、クリアランス量 $V_{mc}=0\text{mm}$ となることで、剛性が無限大となり、ジャッキ推力を加えることでテールとセグメントの競りの影響を表現できる。また、引張状態となった場合は、剛性が零(0)に近いものとなる。

テールブラシには、直応力に応じた摩擦力が作用し、それが静止摩擦力を超えるとずれが生じる。シールド掘進開始直前までのテールブラシずれ方向（トンネル軸方向のずれ）の剛性は、法線方向の剛性の 1/3 とし、トンネル円周方向のずれは微小であるため、考慮しないこととした。

(5) 要素分割

図-6にシェル要素でモデル化したセグメントの全体図を示す。縦断方向全長9.6m(6R@1.6m)をモデル化範囲とし、テールブラシが位置するR2を32分割、その他は16分割とし、周方向について112分割とした。セグメントの主鉄筋方向断面および配力筋方向断

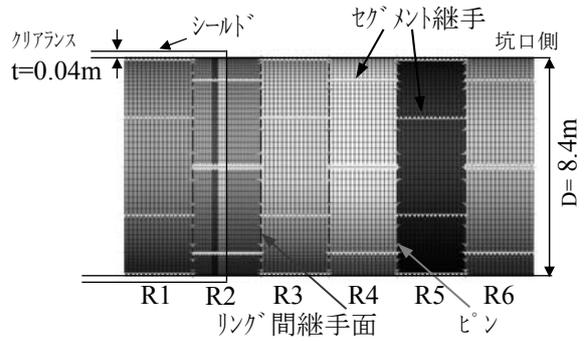


図-6 要素分割全体図

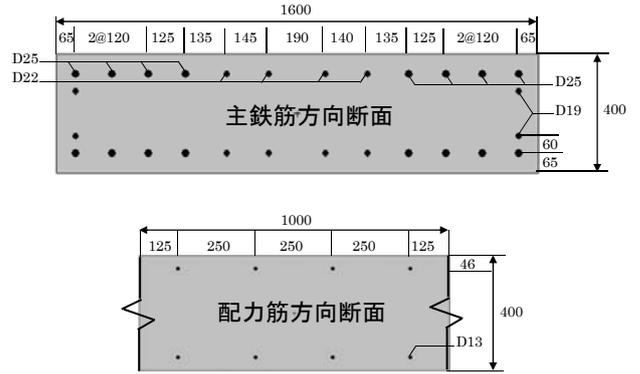


図-7 セグメント断面(mm)

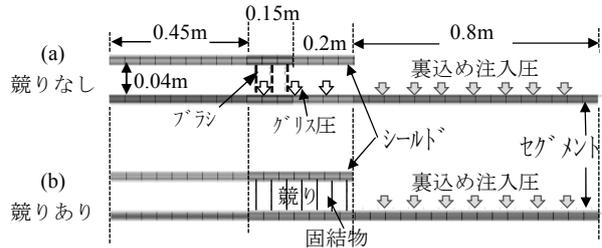


図-8 R2断面拡大図

面の断面寸法、鉄筋寸法、配筋は図-7に示すように設定した。

テールブラシは図-8に示すように0.15m範囲とし、クリアランスが零(0)でない場合は、図中(a)のグリス圧の作用範囲はブラシ範囲を含めシールド鋼殻端部までの0.35m範囲、それより地山側では裏込め注入圧が作用することとした。クリアランスに競りが発生した場合は、図中(b)のようにブラシ位置からシールド鋼殻端部までの範囲が固結物で充填した状態（グリス圧は作用しない）とした。

境界条件は、①シールド鋼殻を固定、②R4～R6の地盤ばね（地盤側）を固定、③R6の坑口側のトンネル縦断方向を固定、とした。

(6) 荷重条件

解析は掘進中とし、テール通過前後のセグメントに作用する荷重は、ジャッキ推力、テールシール圧（ブラシ圧+グリス圧）、裏込め注入圧とした。

a) ジャッキ推力

ジャッキ推力は最大装備推力3,000kN/本、ジャッキ28本とし、推力の50%(1500 kN/本)、75%(2250 kN/本)、90%(2700 kN/本)の3パターンとした。

b) ジャッキパターン

ジャッキ推力がセグメントに作用する荷重位置は、ジャッキ押し付け位置とし、解析では28本ジャッキを全て使用する全押しパターンとした。

c) グリス圧および裏込め注入圧

グリス圧と裏込め注入圧は同圧とし、図-9に示すようにトンネル天端圧を250kN/m²、深度方向に単位体積重量15kN/m³の圧力相当が増加して作用する荷重分布とした。グリス圧および裏込め注入圧が作用する範囲は、クリアランス零(0)の範囲を除く、テールブラシ位置からR3までの範囲とした。

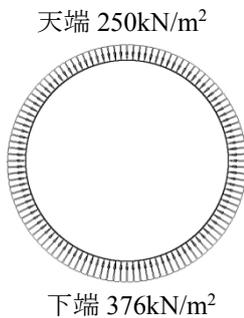


図-9 裏込め注入圧およびグリス圧の分布

3. 軸差角による影響解析と結果

(1) テールクリアランスの縮小

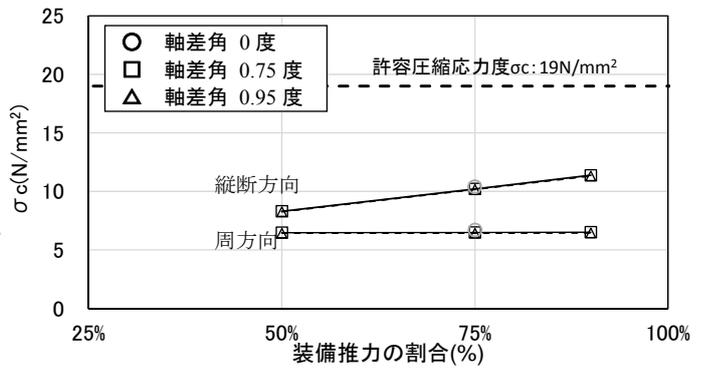
軸差角による影響解析では、シールドとセグメントが軸差角を持ち、局所的な競りが生じた状態での掘進を想定したものである。局所的な競りは、天端およびインバート位置の±15°の範囲でクリアランス量が0mmである状態とした。

(2) 解析ケース

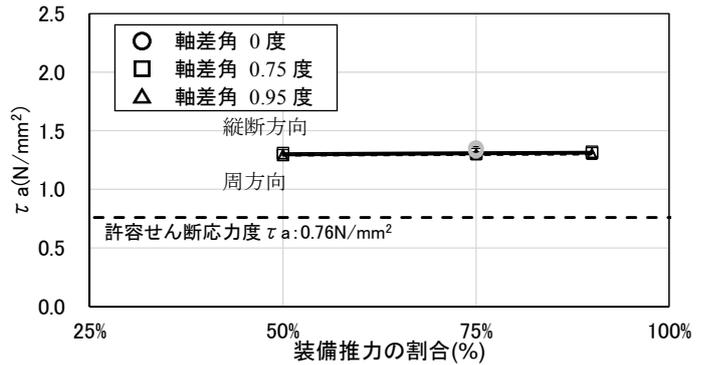
解析ケースは、表-7に示すように軸差角(上下角)を2パターン、ジャッキ推力を最大装備推力に対して3パターンの計6ケースである。

表-7 軸差角の影響解析ケース

No.	テールクリアランス	軸差角(上下角)	ジャッキ推力 kN/本		
			50%	75%	90%
Case1	上下30度(0mm)	0.75度	1,500	-----	-----
Case2			-----	2,250	-----
Case3			-----	-----	2,700
Case4		0.95度	1,500	-----	-----
Case5			-----	2,250	-----
Case6			-----	-----	2,700



(a) 軸差角による圧縮応力度と推力の関係



(b) 軸差角によるせん断応力度と推力の関係

図-10 軸差角による応力度と推力の関係

(3) 解析結果

図-10に解析Case1~6のセグメントの最大圧縮応力度および最大せん断応力度と推力の関係を示す。なお、図中には軸差角(0度)で推力75%の結果²⁾を合わせて記載する。

(a)最大圧縮応力は、全解析ケースでクリアランス縮小位置付近に発生したものである。縦断方向の圧縮応力は、推力の増加に伴い軸圧縮応力のみが増加し、曲げ圧縮応力の変化は殆どない。周方向では、軸・曲げ圧縮応力ともに殆ど変化していない。また、縦断および周方向ともに、軸差角による違いは殆ど見られない。

(b)最大せん断力は、全解析ケースのクリアランス縮小位置付近で許容せん断応力度を超えるせん断力が発生するが、軸差角および推力の大きさによる違いは殆ど見られない。許容せん断応力度を超えた要因は、軸差角や推力によるものではなく、上部30度にクリアランス縮小範囲(固定部)があり、その縮小範囲が支点となり、その状態にグリス圧や裏込め注入圧が上向き(上下差圧)の荷重として作用していることによるものと考えられる。

4. シールド姿勢変化による影響解析と結果

当初、シールドテールとセグメントに局所的な競りが発生し、その状態でジャッキ推力が偏芯荷重(軸差角による)として作用した場合や競りによる摩擦に対抗する過大な推力を作用させた場合にセグメン

トの不具合が生じ、健全性を低下させる可能性が高くなると考えていた。しかし、先の解析結果では、推力の増加に伴いセグメント縦断方向の圧縮応力は増加するが、軸差角や推力の大きさが与えるセグメントへの曲げやせん断応力への影響が小さいことがわかった。これは、クリアランス40mm縮小範囲内では発生する軸差角(0度~0.95度)が非常に小さいため、軸差角に伴う推力のセグメント法線方向作用分力が小さく、セグメントの曲げやせん断応力に与える影響が限定的になるためと考えられる。

しかし、実際のセグメントでは、ひび割れや欠け等が生じることがある。そこで次に、セグメントの健全性を損なわせる要因となる法線方向の荷重として、シールドの急激な姿勢変化(ピッチング変化)に着目し、その影響について検討を行った。

(1) シールド姿勢の変化

シールド掘進中やセグメント組立時のジャッキ引き抜き等でシールドの姿勢が急激に変化することがある。シールド姿勢が急激に変化した場合、テールシールド部では、姿勢変化に伴ってクリアランスが増減する。クリアランスが零(0)に達し、さらにそれ以上の姿勢変化が生じた場合、セグメントには、シールド鋼殻からテールシールド部を介して押し付け荷重(モーメント荷重)が作用する。同じ姿勢変化でもシールドの姿勢が何処を中心として回転するかでクリアランスの変化量や押し付け荷重の大きさが異なる。切羽位置を中心に回転するほどクリアランスの変化が大きくなり、テールシールド位置に回転の中心が近づく程、押し付け荷重が大きくなる。場合によっては推力以上の荷重が押し付け荷重として作用することが考えられる。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-8に示す。解析ケースでは、シールド姿勢変化をクリアランスの変化および押し付け荷重の変化とし、上部30度範囲で変化させた。ジャッキ推力は全ケース75%(2250 kN/本)とした。

上部30度範囲のテールシールド圧は、グリス圧とクリアランスを考慮したテールブラシ剛性による押し付け荷重3ケース(Case7~Case9)、クリアランスが零(0)に達してからのシールド鋼殻による押し付け荷重4ケース(Case10~Case13)である。なお、実際のクリアランス量が零(0)に達してからの押し付け荷重を想定することは難しいため、1,000~7,000 kN/m²(7,000kN/m²×0.825m²=5,775kN)までの荷重を順次増加させて載荷することとした。この荷重による載荷位置のセグメント法線方向変位をクリアランス超過変位と呼ぶことにする。

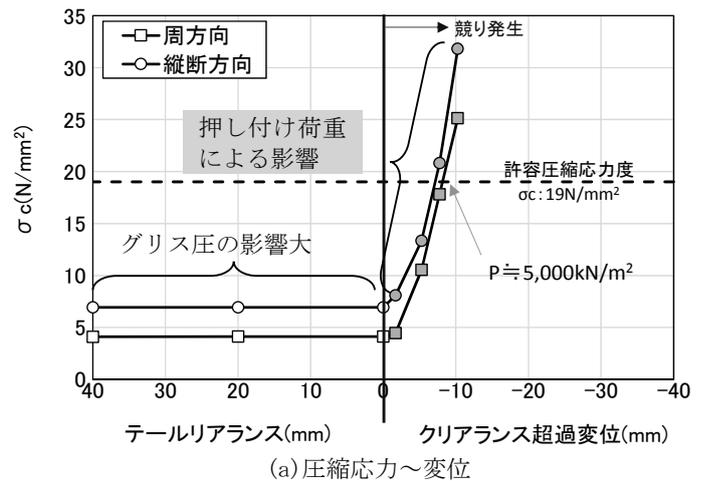
(3) 解析結果

クリアランスおよびクリアランス超過変位と最大圧縮応力度および最大せん断応力度の関係を図-11に示す。

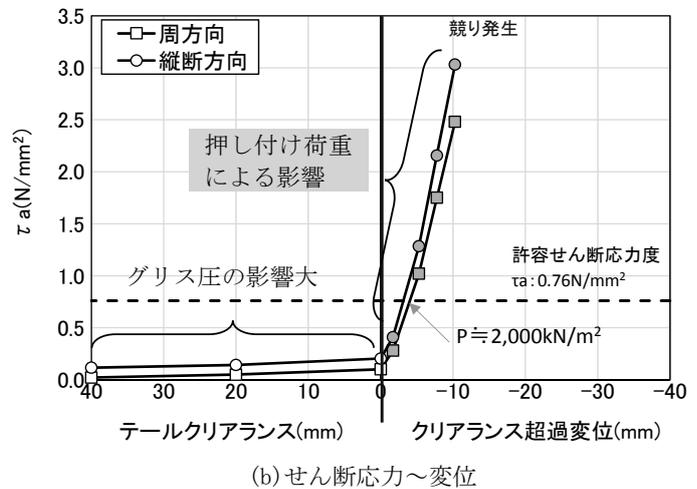
(a) 最大圧縮応力はクリアランスが零(0)に達する

表-8 シールド姿勢変化の影響解析ケース

No.	テールクリアランス (mm)	上部 30 度範囲の テールシールド圧	
	上部 30 度	押し付け荷重 P(kN/m ²)	グリス圧
Case7	40	0	上端: 250kN/m ² (図-9 参照)
Case8	20	288	
Case9	0	566	
Case10	0	1,000	0
Case11		3,000	
Case12		5,000	
Case13		7,000	



(a) 圧縮応力~変位



(b) せん断応力~変位

図-11 応力度と変位の関係

までは殆ど増減しないが、クリアランスが零(0)に達してからのクリアランス超過変位では、急激に圧縮応力が増加する。Case7~Case9では、セグメント周方向に作用するグリス圧による軸圧縮応力が支配的であることに対し、Case10~Case13では、押し付け荷重による曲げ圧縮応力の増加である。

(b) 最大せん断応力も圧縮応力と同様な傾向であり、クリアランスが零(0)に達してから急激にせん断応力が増加する。

クリアランス超過変位による圧縮応力、せん断応力の変化は、共にシールドとセグメントに競りが発

生し、その後の姿勢変化が要因で応力増加することを示すものである。特に、せん断応力度に対して最も厳しくなり、押し付け荷重 $P \approx 2,000 \text{ kN/m}^2$ 程度（クリアランス超過変位-4mm程度）で本解析条件での許容せん断応力度を超える結果となっている。

(4) 考察

シールド姿勢変化による影響解析結果からは、クリアランスが零(0)に達してからの姿勢変化がセグメントの健全性を急激に低下させる要因となることが判明した。その場合、せん断応力度が最も先行して破壊に至るが、瞬時に生じることが多いシールド姿勢変化を考えると、圧縮破壊を含め、全ての破壊形態が生じることが考えられる。

図-12は解析結果から、クリアランスが40mmの設計値を確保している状態と既に上部30度範囲に競りがある状態について、姿勢変化（ピッチング）と縦断方向のせん断応力度との関係で示したものである。姿勢変化に伴うクリアランスの変化は、シールド長 $L=10.0\text{m}$ 、姿勢変化の回転中心を切羽中心と仮定したもので、姿勢変化が4.3%（0.23deg）でテール端部のクリアランスが零(0)になる。

クリアランス40mmの設計値を確保している場合は、4.3%が姿勢変化の余裕代（最大安全率）である。裏込め注入材のテールシールド内への侵入固結等でクリアランスが縮小することで安全率が低下し、シールドテールとセグメントに局所的な競りが生じた状態では、わずかな姿勢変化でセグメントに不具合を生じさせ、健全性を低下させる可能性が高くなると考えられる。

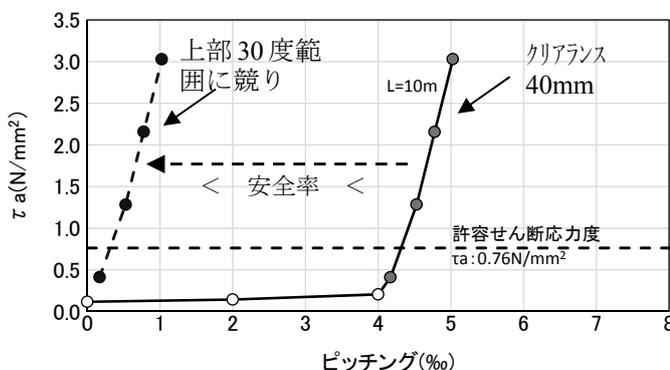


図-12 縦断方向のせん断応力度～ピッチングの試算

5. まとめ

本研究では、セグメントがシールドテールを通過する際の競り現象に着目し、セグメントの応力および健全性に影響を与える要因を把握するための三次元解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- ①クリアランス縮小（競り発生）は、局所的なセグメント断面力の増減要因となり、セグメントの不具合発生の可能性を高くする。
- ②クリアランス縮小付近は、せん断応力度に対して最も厳しい状態となる。
- ③テール内で起こりうる軸差角は小さい。そのため、推力の増加は、トンネル縦断方向の軸圧縮応力を増加させるが、セグメント法線方向への影響は限定的である。
- ④クリアランスの縮小により、シールド施工時荷重に対するセグメント健全性の安全率が低下する。
- ⑤クリアランスが縮小し、競りが発生した状態では、わずかなシールド姿勢変化でセグメントに不具合を発生させる可能性が高くなる。

本報告の解析は、シールド姿勢変化に伴う押し付け荷重を定量的に示したものではないが、シールド施工時のセグメントの健全性を低下させる一要因を概ね再現するものと考えている。

近年のセグメントは、経済性や薄肉化により、配力鉄筋やせん断補強筋等が減少していることが考えられる。こうしたセグメントは、セグメント耐力を減少させ、セグメントの競りや施工時荷重の増加、施工的に厳しい条件によっては、セグメントの不具合（ひび割れ等）が発生する可能性をより高くするものと考えられる。

本報告が今後のシールド施工やセグメントの設計に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー第17号シールドトンネルの施工時荷重, p.69, 2006
- 2) 小山幸則, 水原勝由, 菅 茜様：シールドテール内のセグメント挙動, トンネル工学研究論文・報告集第9巻, p.299~306, 2013

(2014. 9. 15受付)

INFLUENCES ON SEGEMENTS BY THE SCRAPING AND THRUSTING WITH THE SHIELD TAIL

Yukinori KOYAMA, Katsuyoshi MIZUHARA and Shimon KAN

In late years the segment designs tend to small thickness, wide breadth and simplified joint with the aim of saving labor and cost. However the defect of segment is increasing due to construction loads, also causing the load bearing capacity reducing.

In this study, we focused on the scraping and thrusting between shield tail and segments. As a result, around tail clearance reduction range that sectional force greatly change, and the shear force is most severe. Thrust force and angle by axis of tunnel and shield, the difference of two factors bring limited influence on segments. Finally, the results suggest shield posture changing due to machine pitching may carry large pressing loads and reduce segment's soundness.