

17. テール内形状保持装置（TKS）の開発

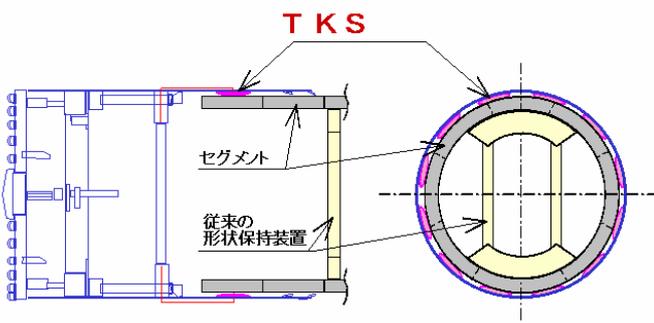
佐藤工業(株)：○篠宮 政幸、守山 亨
東京地下鉄(株)：藤木 育雄

1. はじめに

テール内形状保持装置（以下、TKSと呼ぶ）は、シールドテール内に取り付けた膨縮自在な膨張体を膨らませて、組立完了直後のセグメントリングを周囲から支持する形状保持機能を有する装置である。

従来のシールドでは組立完了直後のセグメントリングに形状保持装置を用いることができなかったが、TKSを用いることにより、組立完了直後のセグメントの不安定な状態を改善し、自重による変形の抑制や、掘進中のテールクリアランスの急激な変化に対する推力の分力の緩和効果などにより、セグメントのクラック発生の影響因子を排除することが可能になる。また、締結力の弱いセグメント継手の構造（突合せ継手等）を持つセグメントリングの組立精度の向上効果もある。

本報告は、TKSを構成する装置の概要を説明するとともに、各種試験から得られた計測結果を用いて推力の作用によるセグメントリングの変形を抑制するための膨張体の設計方法を紹介するものである。



図一1 従来の形状保持装置とTKS

表一1 従来の形状保持装置

項目	仕様	問題点
保持方法	上下拡張、上下および左右拡張による部分拡張	上下間の水圧差による変形位置を保持していない
保持位置	セグメント内部	セグメントの搬送、作業員の移動、測量等の障害
	組立直後のセグメントリングの後方1リング	組立直後のセグメントリングを保持していない

2. TKS開発の背景

(1) TKS開発の背景

組立完了直後のセグメントリングの周囲は無支持状態にあり、それがセグメントに与える影響を認めながらも、その影響を明確にできなかった。しかし、セグメントの幅広化や簡素化された継手の開発、また、シールドトンネルの大断面化が進められ、それに伴ってその影響が顕著に現れることが懸念される状況にある。

1) 従来の形状保持装置

セグメントリングは、トンネルの本体構造であることなどから、高い組立精度が要求される。リングの剛性による変形の抑制だけでは、経済性も含めて限界がある。このため、組立完了直後、裏込め注入時、注入材の固化時、地山の土水圧の作用時等、時系列的にみて最終の組立精度に与える影響を最小限にする方法として、機械的に変形を抑制できる形状保持装置の設置が要求される。従来の形状保持装置は、エレクター等のセグメントの組立装置との関係から、シールドテールの端部に設置せざるを得ないため、組立完了直後のセグメントリングに形状保持装置を用いることができなかった。表一1は従来の形状保持装置の問題点を示したものである。

2) セグメントの幅広化、継手の簡素化、シールドトンネルの大断面化

① 推力によるセグメントリングの変形

セグメントの製造コストの低減や施工速度の向上のため、セグメントの幅広化や簡素化を目的とした継手の開発が盛んに行われている。組立完了直後のセグメントリングの周囲は無支持状態にあるため、掘進時にシールドの姿勢が変化することによって、シールドジャッキ推力による鉛直方向分力がセグメントのクリアランスに生ずる角度分発生する。これによるモーメントでセグメントリングの変形の影響が顕著になるこ

とが考えられる。

②セグメントリングの高い組立精度

組み立てられたセグメントリングは、切羽側が若干開く、いわゆるラップ状になっているのが一般的である。セグメントの幅広化や簡素化を目的とした継手の場合は、ラップ状が顕著に現れると予想される。組立時の精度が最終精度に与える影響を考慮すると、組立時から高い組立精度が要求される。

③自重による断面力

シールド工法技術の進歩に伴って超大断面シールドトンネルの施工例も増えているが、大断面化によりセグメントリングの自重が増加するため、外荷重によって発生する断面力に比べ、組立完了直後の自重による断面力が支配的になることも予想される。このため、自重により発生する断面力を低減することが合理的と思われる。

(2) TKSの開発における課題

セグメントリングの内部に十分な施工空間を確保した上で、セグメントを精度よく組み立てることができ、組立後は直ちに当該セグメントを保持することが可能であること。また、シールドジャッキ推力によるセグメントリングの変形の影響、自重による断面力の低減等の問題をすべて解消できるセグメントの形状保持装置を開発することを課題とした。

3. TKSの概要

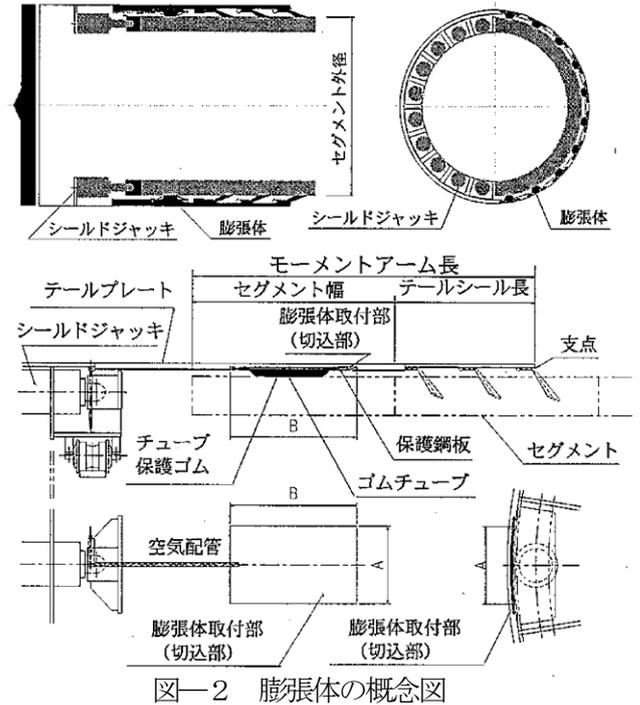
(1) TKSの概要

TKSはシールドテール内に取り付けた膨縮自在な膨張体を膨らませて、組立完了直後のセグメントリングを周囲から支持する形状保持機能を有する装置であり、テール内の形状保持システムを構成する装置は、セグメントリングを支持する膨張体とそれを制御する空圧制御装置からなる。図一2および図一3は膨張体の作動の概念図を示したものである。

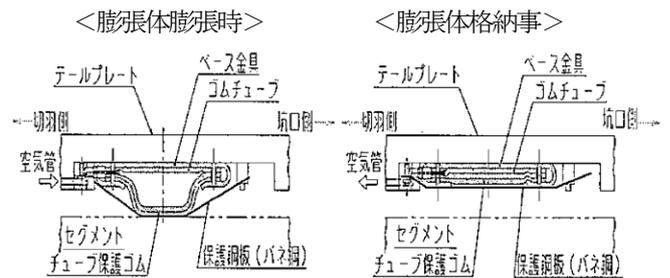
(2) システムを構成する装置

1) 膨張体

膨張体は以下に示すゴムチューブ、チューブの保護ゴム、保護鋼板から構成される。膨張体は圧縮空気により膨張し、強制排気により収縮させるもので、テール内に格納されている。テールの内面では、シールドジャ



図一2 膨張体の概念図



図一3 膨張体の作動概念図

ッキのスプレッダーが作動するため、スプレッダーの角で膨張体が損傷しないように、膨張体はスプレッダーの幅より小さくなっている。

①ゴムチューブ

ゴムチューブはテールプレート内に格納され、圧縮空気の送気と強制排気により膨張、収縮させる本体である。ゴムチューブはゴム板を折り曲げてチューブ状に加工された構造である。現時点においては空気圧力を最大0.35MPaとしている。

②チューブの保護ゴム

チューブの保護ゴムは、ゴムチューブに異物等があっても破れないようにするものである。また、ゴムチューブが破裂した場合には破裂音の低減を図る機能もある。

③保護鋼板

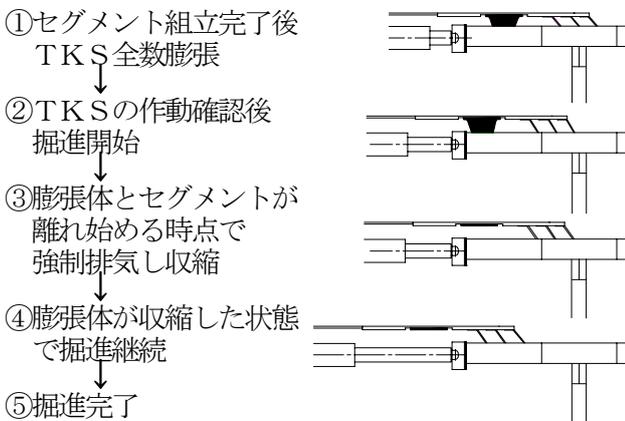
シールドの推進はセグメントリングを周囲から支持した状態で行なわれるため、膨張体とセグメントリングとの摩擦低減用に保護鋼板が用いられる。

2) 空圧制御装置

膨張体の膨張および収縮のための圧縮空気の送気、強制排気を制御する装置である。すべての膨張体を一括して制御することを基本とするが、膨張体ごとに制御する場合や膨張体をブロックに分割して制御する場合など、施工条件や施工方法により、一括制御以外の制御方法の組み合わせも設定できる。圧縮空気および強制排気の制御においては、坑内環境に配慮して、とくに排気時の消音対策が必要である。

(3) 掘進における膨張体の作動概念

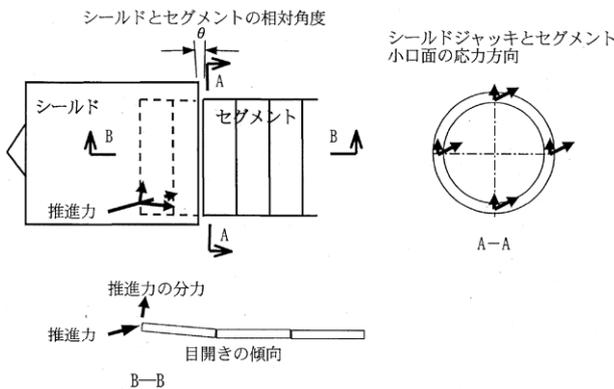
掘進における膨張体の作動の概念を以下に示す。



図—4 掘進における膨張体の作動概念

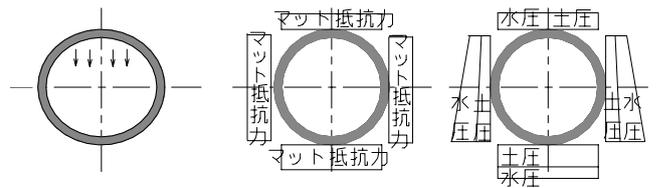
(4) TKSの使用による効果

①組立完了直後のセグメントリングを周囲から支持し、シールドジャッキの推進によるセグメントリングの変形を抑制して、セグメントのクラックおよび欠けの防止を図ることができる。



図—5 シールドとセグメントの相対角度に伴う変形概念

②セグメントの組立完了直後の自重によって発生する変形および応力の抑制を図ることができる(図—6参照)。
③セグメント間締結力の弱い継手構造(突合せ継手等)のセグメントリングの組立精度の向上を図ることができる。



図—6 荷重図

4. 膨張体の基本性能試験

(1) 試験項目

テール内形状保持システムを開発するにあたり、膨張体を構成する保護部材(チューブの保護ゴム、保護鋼板)、シールド掘進時のテールクリアランスおよび膨張体に作用させる空気圧力を変動因子と考え、膨張体の材料選定、膨張体性能の確認等を行うため表—2に示す試験を実施した。

表—2 試験項目

名称	試験目的	実験確認項目
単体試験	・気密性 ・復元性	膨張体の基本性能 ①膨らみ部の形状確認 ②チューブ保護ゴムの厚みによる相違の確認 ③保護鋼板の厚みによる相違の確認 ④膨張体内圧力の制御・保持状況 ⑤減圧時の膨張体形状(自然排気、強制排気)
		テール内での膨張体の膨張性能 ①設定最大圧力0.35MPaの確認 ②膨らみ幅部の形状確認(0.05MPaピッチ) ③チューブ保護ゴムの厚みによる相違の確認 ④保護鋼板の厚みによる相違の確認 ⑤膨張体内圧力の制御・保持状況 ⑥減圧時の膨張体形状(自然排気、強制排気)
複合試験	・気密性 ・耐圧性 ・復元性	推進時の膨張体の挙動 ①膨張体内圧力の確認 ②推進力の増加有無の確認 ③保護鋼板の厚みによる相違の確認 ④セグメントと膨張体の接触状況 ⑤膨張体内圧力の制御・保持状況 ⑥膨張体の擦れ状況(最終時)
		膨張体のセグメントの動きを抑制する効果 ①膨張体内圧力の確認 ②膨張体抵抗力によるセグメントの動き抑制状況及び押付位置による相違の確認 ③膨張体内圧力の制御・保持状況
		・簡便性 膨張体交換の作業性
摺動試験	・耐圧性 ・耐久性	膨張および摺動の耐久性能

(2) 試験で得られた成果

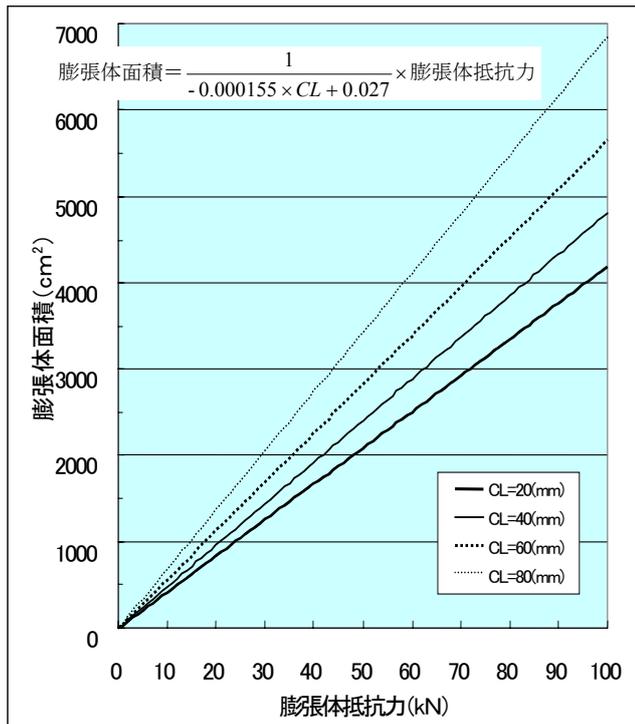
1) 膨張体の構成材料等

膨張体を構成するゴムチューブは、クロロプレン系のゴムで強度は450kg/2.5cmとし、チューブの保護ゴムは厚さ5mmのニトリロ・ブタジエンゴムとした。また、保護鋼板は厚さ0.6mmのパネ鋼とした。膨張体の空圧制御は電磁弁を利用し、排気は、膨張体のテールスキンプレート内への格納を迅速に行う必要があるこ

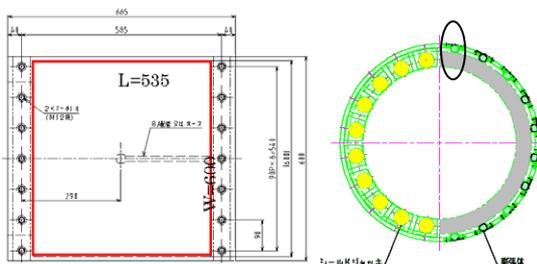
とから、負圧を利用した強制排気方式とした。

2) 膨張体の性能

テールクリアランスが一定で膨張体に作用させる空気圧力を変化させた場合も、空気圧力が一定でテールクリアランスを変化させた場合も、どちらの場合にも、膨張体の抵抗力はそれぞれの変化要因との間に一次の相関が成立していることが確認された。



図一七 膨張体の面積と膨張体の抵抗力



膨張体の面積は可動部分であり、例えば左図の太線の範囲である。一方、膨張体の抵抗力は1箇所あたりであり、例えば右図の楕円で示した部分である。

図一八 膨張体の面積と抵抗力の説明図

3) 膨張体の変形特性

膨張体を構成する材料が、ゴムおよび空気という膨縮自在に変形するものであることから、シールドジャッキの推進分力によるセグメントの動きを抑制する効果があることを試験から確認した。

セグメントの移動開始時点の推進分力に対して、モーメントの釣り合い式から必要な膨張体抵抗力を計算

し、それと試験値とを比較すると、概ね試験値が計算値の1.1倍程度の値を示していた。

4) 実機に装備する際の膨張体の面積の算出方法

試験から得られた結果をまとめ、膨張体の抵抗力と膨張体の面積との関係を求め、実機に装備する際の膨張体の面積の算出方法を定めた。

テール内面とセグメント外面との距離であるクリアランスの大きさにより、膨張体の接地面積は異なる。このため、要素実験から、クリアランス別に大きさの異なる2種類のゴムチューブの近似式を平均して、膨張体の抵抗力と膨張体の面積との関係を求めた。

図一七はそのようにして求めた両者の関係である。

*膨張体の面積の算定式の説明

$$\text{膨張体面積} = \frac{1}{-0.000155 \times CL + 0.027} \times \text{膨張体抵抗力}$$

試験から得られた2種類の膨張体の近似式から算出する。
作用空気圧0.35MPa、膨張体抵抗力 P_m (kN)、テールクリアランスを CL (mm)として、膨張体抵抗力とクリアランスの関係式は

a 膨張体 (600 ϕ ×535 ϕ) の抵抗力: $P_m① = -0.4770 \times CL + 86.16$ ・式①

b 膨張体 (380 ϕ ×535 ϕ) の抵抗力: $P_m② = -0.3261 \times CL + 55.82$ ・式②

膨張体抵抗力の比率 (a 膨張体の抵抗力 / b 膨張体の抵抗力) は、膨張体面積の比率 (a 膨張体の面積 / b 膨張体の面積) と同様の傾向を示しており、膨張体の抵抗力と膨張体の面積は1次の相関関係にあることが確認できた。

これより、これら2式の両辺を膨張体の面積で除し、単位面積あたりの膨張体の抵抗力 (膨張体の圧力) P_m' (kN/cm 2) に変換すると、

式①は、 $P_m' = -0.0001486 \times CL + 0.02684$ 式③

式②は、 $P_m' = -0.0001604 \times CL + 0.02746$ 式④

これら2式の傾き及び切片について、平均して1式にまとめると、

$P_m' = -0.0001545 \times CL + 0.02715$ 式⑤

ここで、式を安全側に丸めると、

$P_m' = -0.000155 \times CL + 0.027$ 式⑥

式⑥の両辺に膨張体の面積 A (cm 2) を乗じると、

$P_m' \times A = (-0.000155 \times CL + 0.027) \times A$ 式⑦

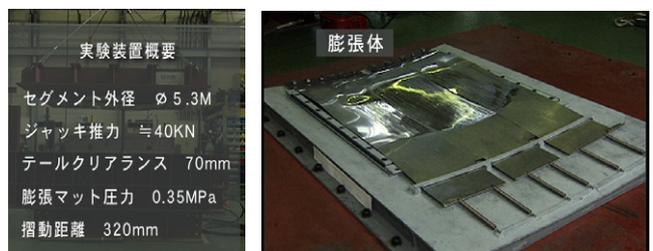
ここで、 $P_m' \times A$ は、膨張体の抵抗力 P_m になるので、

$A = \{1 / (-0.000155 \times CL + 0.027)\} \times P_m$ 式⑧

式⑧により、膨張体の抵抗力から、必要な膨張体の面積が算出される。

5) 摺動試験

摺動実験の概要と状況を写真で示す。



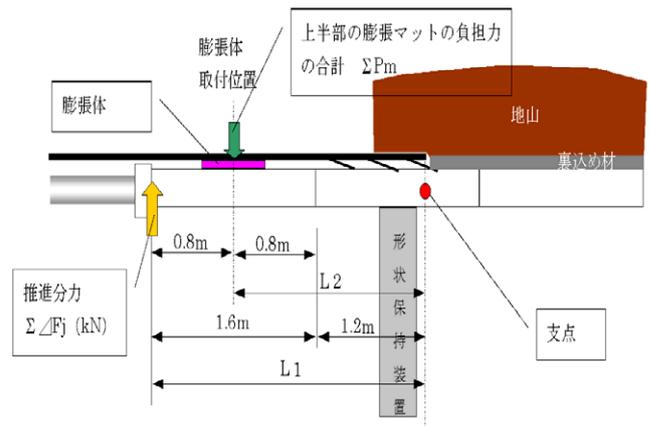
5. 膨張体の設計方法

膨張体の設計は、ジャッキ推力の作用によるセグメントリングの変形を抑制することを第一義として、影響が大きいと考えられるシールドとセグメントの相対角度に伴う推力による鉛直方向分力をTKSで吸収できることに着目して行う。

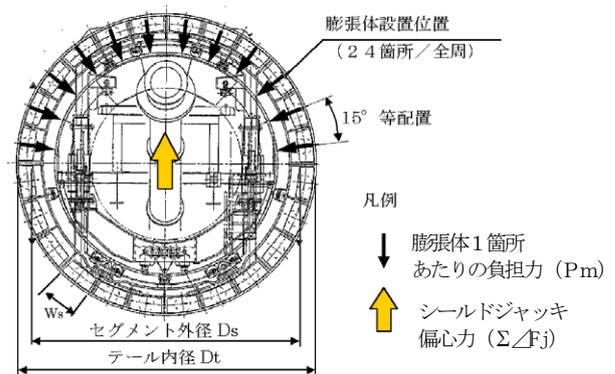
設計は膨張体の面積を算出することにある。膨張体の面積はテール端部を支点とする推進分力（セグメントリングを変形させる力）と、推進分力に対応する膨張体の抵抗力との釣り合いから算定する。以下には、膨張体の設計例を示す。

図一9は掘進時の膨張体とテールシールドおよび形状保持装置の位置関係を示したものである。掘進開始前のそれぞれの位置は、形状保持装置が前リングのほぼ中央に、テールシールドが形状保持装置の少し切羽側に、膨張体が組み立てたセグメントリングの中央にある。

図一10は横断面のイメージである。トンネル軸方向のテールとセグメントとの相対角度が生じて、シールドジャッキによる推進分力が上向きに作用し、上半部の膨張体で抵抗している時のイメージを示す。



図一9 縦断方向位置関係図



図一10 横断面のイメージ

(1) 設計条件

- ①セグメント外径 : $D_s = \phi 6,600 \text{ mm}$
- ②テール内径 : $D_t = \phi 6,660 \text{ mm}$
- ③テールクリアランス : $c = 30 \text{ mm}$
- ④シールドジャッキ本数 : $N_j = 24 \text{ 本}$
- ⑤シールドジャッキ推力 : $F_j = 2,000 \text{ kN}$
- ⑥スプレッダーの円周方向の長さ : $W_s = 65 \text{ cm}$
- ⑦セグメント幅 : 1.6 m
- ⑧膨張体を設計する時の取付位置をセグメントリングの中央とする。また、膨張体、推進分力の作用位置は図一9に示すとおりとする。
- ⑨シールドジャッキの常用推力は装備推力60%とする。
- ⑩トンネル軸方向のテールとセグメントとの相対角度は $\alpha = 0.5^\circ$ とする。

(2) 設計手順

①推進分力 (ΣF_j) の算定

$$\begin{aligned} \Sigma F_j &= 60\% \times F_j \times N_j \times \tan \alpha \\ &= 60\% \times 2,000 \times 24 \times \tan 0.5^\circ \\ &= 251 \text{ kN} \end{aligned}$$

②膨張体1箇所あたりの抵抗力 (P_m) の算定

図一9に示すテール端部を支点とする釣り合いの式および図一10に示す鉛直方向の力の釣り合いから以下のように算定する。

$$\begin{aligned} \Sigma F_j \times L_1 &= \Sigma P_m \times L_2 \\ \Sigma F_j \times (1.6 + 1.2) &= \Sigma P_m \times (1.2 + 0.8) \\ \Sigma P_m &= P_m \times \{2 \times (\sin 7.5 + \sin 22.5 + \sin 37.5 + \sin 52.5 + \sin 67.5 + \sin 82.5)\} \end{aligned}$$

上記の2式および推進分力より

$$\begin{aligned} P_m &= 1.4 / 7.7 \times \Sigma F_j \\ &= 1.4 / 7.7 \times 251 \\ &= 46 \text{ kN} \end{aligned}$$

試験結果から、算出された膨張体の抵抗力に1.1を乗じて、必要な膨張体の抵抗力 P_m を求めると、

$$\begin{aligned} P_m &= 1.1 \times 46 \\ &= 51 \text{ kN} \end{aligned}$$

③膨張体の面積の算定

膨張体の面積の算定式から算定する。

この設計例では、テールクリアランスが 30 mm であ

る。蛇行等によりクリアランスは計算上で最大 60 mm となるが、実際にはその反対側のクリアランスが 0 になることはない。そこで最少クリアランスは 10 mm 確保するものとした。したがって、施工時の最大クリアランスは 50 mm となる。

$$A = \frac{1}{-0.000155 \times CL + 0.027} \cdot P_m$$

$$= \frac{1}{-0.000155 \times 50 + 0.027} \cdot 51$$

$$= 2,649 \text{ cm}^2$$

ここに、

A : 膨張体の面積 (cm²)

CL : クリアランス (mm)

P_m : 必要な膨張体の抵抗力 (kN)

④膨張体の形状寸法の決定

膨張体の形状寸法は、円周方向の長さ、トンネル軸方向の長さおよび厚さを決める必要がある。

このシステムは、膨張体をテールプレート内に格納している。一方、シールドジャッキの先端の球座にはスプレッダーが装着されており、スプレッダーは自由に回転することができる (図-11 参照)。膨張体の円周方向の長さは、膨張体を保護するために、スプレッダーの角がテールプレートに接触しない長さにする必要がある。この円周方向の長さ、算定した膨張体の必要な面積からトンネル軸方向の長さが求まる。

本設計例の場合、スプレッダーの全幅 (円周方向の長さ) は、W=65 cm である。切り欠き幅を 50 cm とすると、トンネル軸方向の長さは、膨張体の必要な面積の 2,649 cm² から 2,649/50=53.0≒55 cm となる。

膨張体の厚さは 25 mm とし、膨張体を設置する部分の切り欠いたテールプレート厚 (=テールプレート厚 - 25 mm) を最後にチェックしておく必要がある。

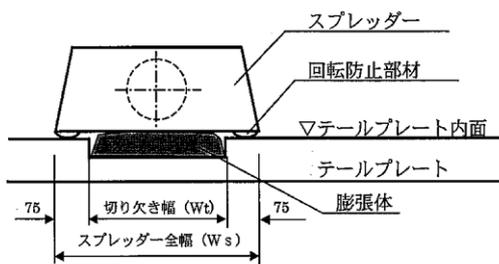


図-11 スプレッダーの概念図

6. TKSの効果の確認について

TKSは、東京地下鉄株の13号線 (池袋から渋谷に至る延長 8.9km) の全シールド工事で採用することとしている。

シールド工事は、複線シールド、駅シールド、単線シールドの全10工区からなり、使用するセグメントは、鉄道トンネル最大となる1.6mのセグメント幅である。トンネルの掘進は、平成17年度から順次開始する予定である。

TKSの効果の確認は、これらの全シールド工事において行う予定であり、確認項目は以下のとおりである。

①推進分力の吸収効果

推進分力の吸収を確認するために、セグメント内面にコンクリートひずみ計を設置して発生応力を計測する。

②組立の真円度

組み立てられたセグメントの真円度を把握するために、テールクリアランス計を用いて、TKSの作動の有無による違いを計測する。

③セグメントリングの自重による応力の低減

TKSを作動させることによるセグメントの自重による応力の低減効果を確認するために、セグメントにはひずみ計を設置して発生する応力の状態を計測する。

7. おわりに

開発したTKSは、従来できなかった組立完了直後のセグメントリングの形状保持を可能にするもので、建設コストおよびライフサイクルコストの縮減という社会ニーズにも合致した技術である。今後、セグメントの幅広化や継手の簡素化の開発がますます進められる中で、シールドトンネルの大深度化や大断面化への開発技術の一翼を担っていくものと期待している。

東京地下鉄13号線で十分な効果が確認されれば、再度報告する予定である。

最後にTKSの開発に際し、共同開発者である早稲田大学理工学部小泉淳教授 (東京地下鉄株: シールドトンネル調査委員会委員)、および協力していただいた石川島播磨重工業株、三菱ゴム株の関係各位に深く感謝申し上げます。