

軸方向挿入型コッター式継手の開発

近藤和正¹・野本康介¹・野田賢治¹・森 孝臣²

¹正会員 前田建設工業株式会社 土木本部 土木設計部 (〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-26)

²正会員 フジミ工研株式会社 セグメント技術部 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-11-18 光邦ビル)

大深度地下利用は、今後の社会資本整備の方向性の一つとして捉えられており、これを実現するためにシールド工法は重要な役割を担っていると考えられる。しかし、その適用にあたっては、長距離高速施工技术の開発、覆工体の耐久性の向上、コスト縮減などを推進する必要がある。このような現状を背景として、高速化・コスト縮減・内面平滑化を目指し、軸方向挿入型コッター式継手(スライドコッター)を用いた新しいセグメントを開発した。本論文では、この新しいセグメントについて、継手構造の概要と継手性能試験を実施し良好な結果が得られたのでここに報告する。

キーワード：シールドトンネル、セグメント継手、ボルトレス、二次覆工省略、内面平滑、高速化、軸方向挿入

1. はじめに

近年、公共工事におけるコスト縮減が要求される中、シールド工事においても「コスト縮減」は必要不可欠な技術課題となっている。このような背景のもと、シールド工事のセグメントには、

- ①セグメント組立の自動化・省力化
 - ②高速施工
 - ③製造コストの縮減
 - ④内面の平滑化による二次覆工省略
- などが要求されている。

筆者らは、これら要求事項を満足する新しいセグメント間継手を開発し、継手金物単体試験、実物大セグメントによる継手曲げ試験および施工性確認試験を実施した。これにより、従来のセグメントと同等の継手部の耐力を有することと、スムーズにかつ確実に締結できることを確認したので、ここに報告する。

2. 継手の特長

スライドコッターセグメントには、相対するセグメント継手面にT型金物とC型金物がそれぞれ配置されており、リング継手には、ワンタッチ式のクイックジョイントを採用している(写真-1)。

この継手の締結原理は、1/20のテーパーを持つT型金物をC型金物に挿入すると、C型内部にあるくさび片下部反力材の反発力により初期締結力が導入される仕組みとなっている。この反力材にはポリウレタンゴムを用い、セグメントリング組立後、地山とのなじみにより目開きが閉じた時、ゴムの復元力によりくさび片を押し戻し、締結力を保持する。また、このくさび片のスライドで製作誤差と施工誤差を吸収する構造となっている。

本セグメントの特徴は、次のとおりである。

- ・リング継手とセグメント継手が同時に締結される

ため、組立時間が大幅に短縮される。

- ・締結作業が不要なため、従来のエレクターで組立でき、省人化が図れる。
- ・継手がトンネル内面に露出しないため、平滑な内面となり、耐久性が向上する。
- ・高速施工、省人化、二次覆工省略、継手金物の簡素化によりコストダウンが可能である。



写真-1 スライドコッターセグメント

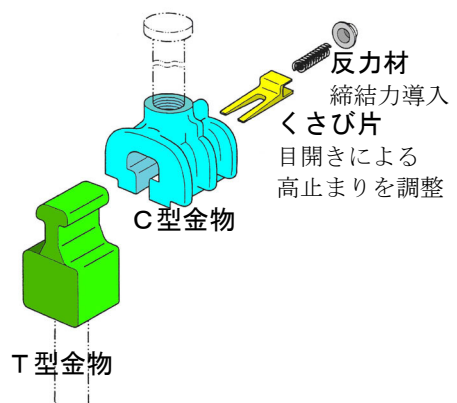
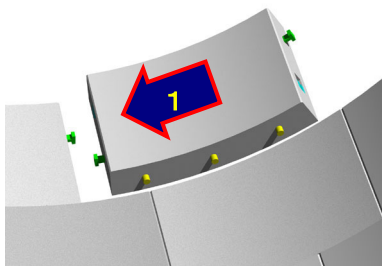


図-1 スライドコッター継手の仕組み

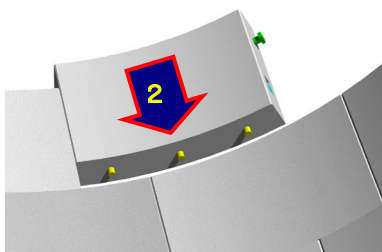
3. 組立手順

このセグメント継手は、T型金物をC型金物内に挿入し、スライドさせて締結する。組立時においては、セグメントピースをトンネル周方向に合わせて、軸方向にスライドさせるだけで組立が完了する。組立手順を図-2に示す。

①セグメント面を合わせる



②軸方向に挿入する



③締結が完了する

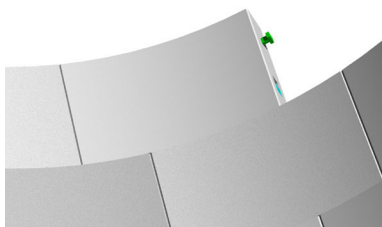


図-2 組立手順

4. 性能試験

今回開発したセグメント間継手の性能を確認するため、表-1に示すように、各種試験を実施した。以下に、試験概要とその結果を述べる。

表-1 性能試験一覧

試験名	試験目的
継手金物単体試験	継手基本性能
締結状況確認試験	締結力，目開き
施工性確認試験	B-K-B挿入締結動作
継手曲げ試験	継手曲げ性能，セグメント耐力

(1) 継手金物単体試験

a) 試験目的

試験目的は以下のとおりとする。

- ・スライドコッター継手の組立性能を確認する。単純化した構造でゴム材質・摩擦係数の条件を変えた結果を比較することにより、セグメント間継手締結時における継手部の挙動および継手金物に発生する応力状態のメカニズムを解明する。
- ・試験を繰り返して行うことにより、現象の再現性を確認する。
- ・実現場で組立時に目開きが生じ、その後地山とのなじみなどで目開きが閉鎖した時に、くさび片の戻りにより締結が保持される機構を確認する。

b) 使用材料および許容応力度

試験に用いる金物は、設計引張力 100kN タイプとし、T型、C型金物の勾配は1/20とする。

反力材として用いるゴムの材質はポリウレタンである。各材料定数は、表-2に示すとおりとする。

表-2 使用材料定数および許容応力度

項目			設定値 [N/mm ²]
鋳鉄 FCAD -900A	降伏点応力度	σ_{sy}	600
	許容引張応力度	σ_{sa}	240
	許容圧縮応力度	σ_{sa}'	290
	ヤング係数	E_s	170×10^3
T型金物 SCM435 8.8相当	降伏点応力度	σ_{ty}	640
	許容引張応力度	σ_{ta}	240
	ヤング係数	E_t	210×10^3
くさび片 SCM435	降伏点応力度	σ_{ty}	640
	許容引張応力度	σ_{ta}	240
	ヤング係数	E_t	210×10^3
反力材	材質：ポリウレタンゴム		硬度 A98
			硬度 D70

c) 試験概要

①締結状況確認試験（金物単体）

T型金物とC型金物をアムスラー試験機で図-3のように挿入して組み合わせ、スライドコッター継手の組立状況を確認する。載荷点としてはT型金物を直接押す。

試験は、くさび片とC型金物との接触面の摩擦係数による変化を確認するためテフロンシートを挟んだものと、締結状況確認試験同様グリスを塗布したものとを、ゴムの材質を変え2ケースずつ実施した。試験ケースを表-3に示す。

表-3 試験ケース

ケース	ゴム材質	接触面
1	A98	グリス
2		テフロン
3	D70	グリス
4		テフロン

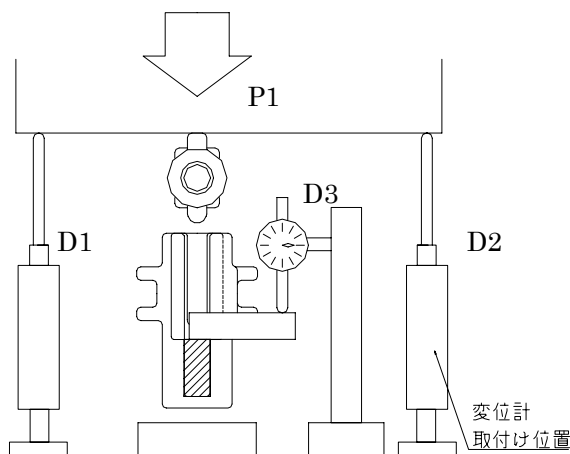


図-3 試験概要図

②目開き閉鎖時締結力確認試験（金物単体）

T型金物とC型金物の間に2mm厚の鉄板を挟み、アムスラー試験機で①と同様に挿入してスライドコッター継手を締結する。締結後に固定治具でT型金物の高さを固定する。その後C型金物の後ろからハイテンション用のレンチを用いて長ボルトを締め上げT型金物の頭を押すことで、C型とT型の隙間を拡げて鉄板を撤去しやすくする。鉄板撤去後に長ボルトを緩め、T型の高さはそのまま目開きを閉じる。そのときのくさび片の戻り状況を確認する（図-4）。

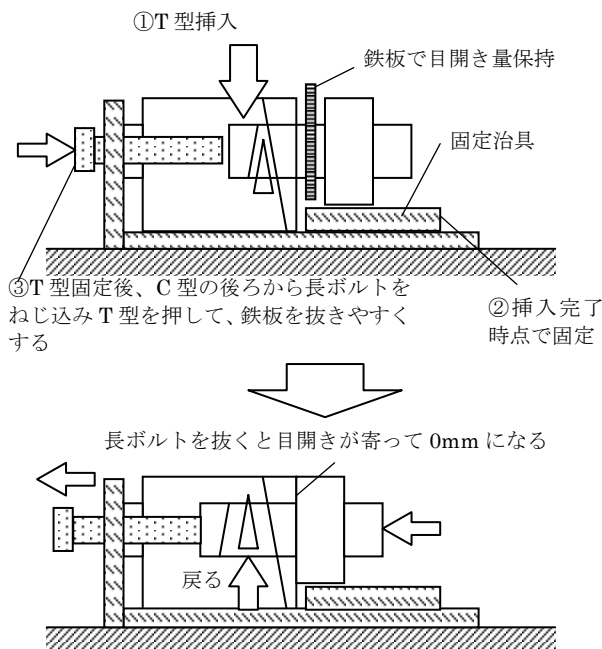


図-4 試験方法模式図

d) 試験結果

各試験とも、繰り返して試験を実施したところ、再現性は確認された。以下に、各試験について結果をまとめる。

①締結状況確認試験（金物単体）

試験結果のうち、ケース1の挿入力とT型金物移動量およびくさび片移動量の関係を図-5に示す。

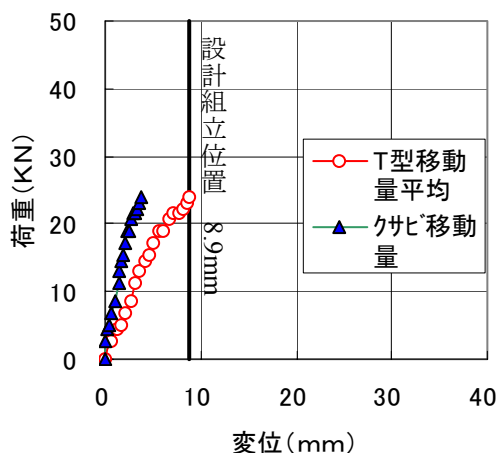


図-5 荷重－変位図

全ての試験結果が図-5に示すような挙動を示しており、この結果からT型金物の挿入にくさび片が追従していることから、想定通りの挙動をしていることが確認された。

ここで、図-6に示すような継手締結時の力の釣り合いから締結力とゴム反力の関係式(1)を導き、全ケースの設計組立位置での計測値とそれらから各接触面の摩擦係数を求めた結果を表-4に示す。

表-4 試験結果一覧

実験結果	1	2	3	4
	A98	A98	D70	D70
	グリス	テフロン	グリス	テフロン
ゴム反力 R[kN]	3.75	4.22	10.32	7.73
締結力 P[kN]	45.74	30.49	121.88	56.36
P/R	12.2	7.2	11.8	7.3
μ_1	0.15	0.15	0.15	0.15
μ_2	0.17	0.11	0.17	0.11
$\tan\theta_1$	1/20=0.05			
$\tan\theta_2$	1/20=0.05			

この結果から、締結力とゴム反力の比（P/R）は、ゴムの材質に関わらず、グリスでは約12、テフロンでは約7となっている。また、 μ_2 の値がグリス塗布よりもテフロンの方が小さくなっていることから、接触面の摩擦条件による違いが確認された。なお、ケース3では締結力が許容を超えており、硬度D70のゴム材では過剰な締結力が発生してしまうことから、今回試験に用いた継手の反力材としては適していないといえる。

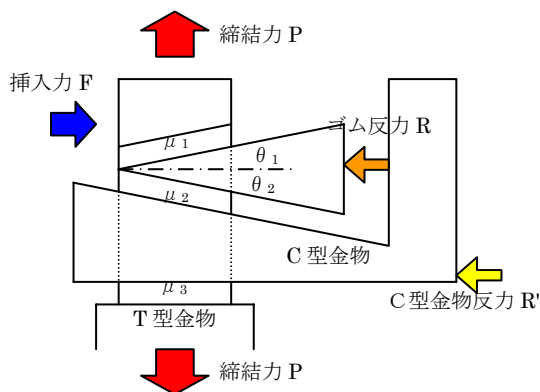


図-6 力の釣り合い模式図

$$P = \frac{1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2 + \mu_1 - \mu_2} R \quad (1)$$

②目開き閉鎖時締結力確認試験（金物単体）

くさび片の戻り量と目開き量の関係を図-7 に示す。

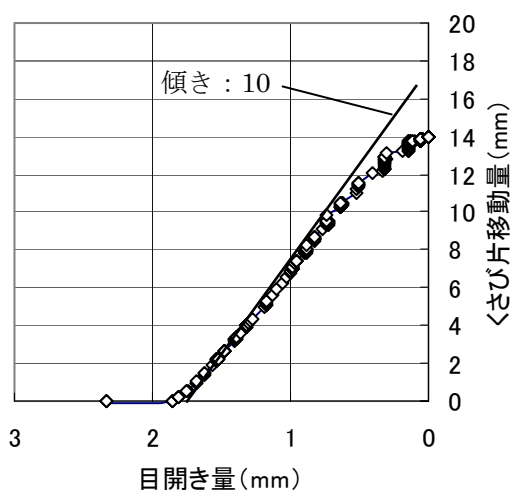


図-7 くさび片移動量と目開き関係

この結果から、目開きが閉じると同時にくさび片が反力材により押し戻されることが確認された。またその傾きはおよそ 10 となっており、くさび片のテーパが片面 1/20, 両面で 1/10 であることから、理論通りの挙動を示しているといえる。

(2) 締結確認試験

a) 試験目的

セグメントに埋設固定した状態でセグメント継手の締結時における状況を、締結力、目開き量、継手金物の応力状態から把握する。

b) 使用材料定数および許容応力度

表-5 に示すとおりとする。

表-5 使用材料定数および許容応力度一覧

項 目			設定値 [N/mm ²]
コンクリート $\sigma_{ck}=48$	許容圧縮応力度	σ_{ca}	18
	ヤング係数	E_c	39×10^3
鉄筋 SD345	降伏点応力度	σ_{sy}	345
	許容引張応力度	σ_{sa}	200
	許容圧縮応力度	σ_{sa}'	200
	ヤング係数	E_s	210×10^3
鋳鉄 FCAD-900A	降伏点応力度	σ_{sy}	600
	許容引張応力度	σ_{sa}	240
	許容圧縮応力度	σ_{sa}'	290
	ヤング係数	E_s	170×10^3
T型金物 8.8 相当	降伏点応力度	σ_{ty}	640
	許容引張応力度	σ_{ta}	240
	ヤング係数	E_t	210×10^3
アンカー筋 10.9 相当	降伏点応力度	σ_{sy}	900
	許容引張応力度	σ_{sa}	380
	ヤング係数	E_s	210×10^3

c) 試験概要

実際のセグメント組立を想定し、スライドコッター2組を埋設固定した1対の平板セグメントの片側を固定し、もう一方をジャッキで押し込み締結する。その際、押し込む側のセグメントは前後左右自在に移動できる状態にする。

計測項目はジャッキ推力による挿入力、セグメント目開き量、目違い量、T型金物ひずみ、くさび片移動量、ゴム反力とする。

試験ケースは、表-6 に示すとおり、3 ケースとした。

表-6 試験ケース一覧

ケース	条 件
1	シール材なし（目開き 0mm）
2	シール材あり（事前圧縮なし）
3	シール材あり（事前圧縮）

ケース 1 は、理想的な状態を想定し目開き 0mm で供試体をセットした後、締結を行う。

ケース 2 は、実際のセグメントの組立を想定してシール材を配置し、シール材が接する状態（目開き約 3.5mm）で供試体をセットした後締結を行う。これにより組立に伴うシール材のつぶれ状況およびシール材による影響を確認する。

ケース 3 は、ケース 2 同様シール材を配置し、緊張ジャッキでシール材を潰した状態（目開き約 1.5mm）で供試体をセットした後締結し、完了後緊張ジャッキをゆるめる。これにより組立完了後、シール材反力による締結力への影響を確認する。

試験の概要図を図-8 に、試験状況を写真-2 に示す。

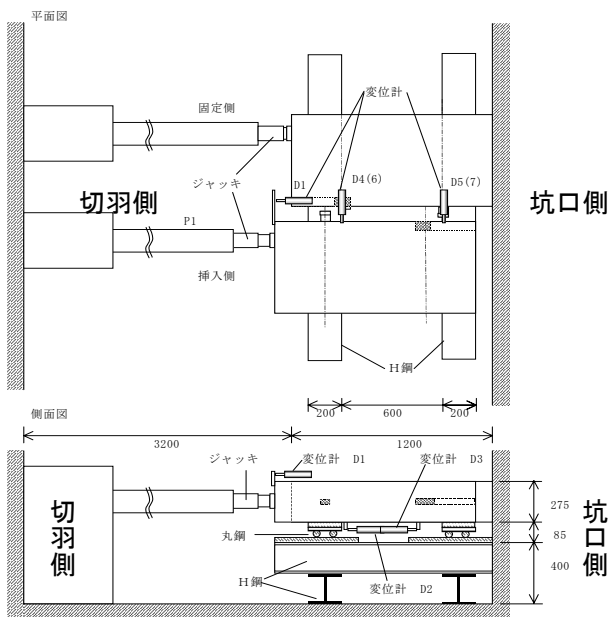


図-8 試験概要図

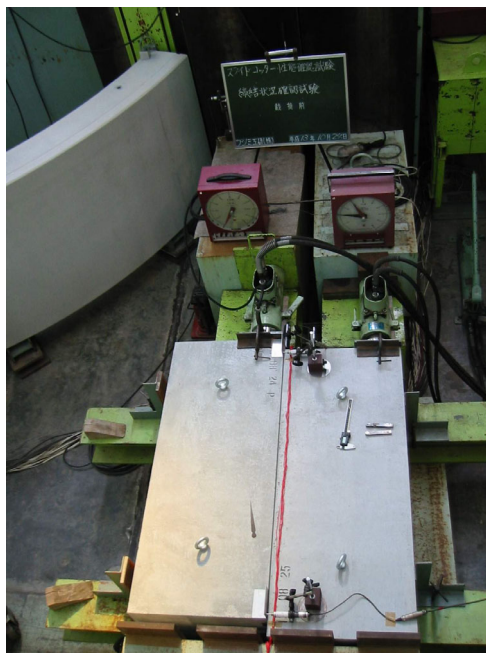


写真-2 試験状況

d) 試験結果

シーラ材を配置したケース 2 では、締結に伴いシーラ材を潰しながら初期目開きを引き寄せる効果を確認した（約 3.5mm→約 0.5mm）。その際、シーラ材のずれや剥離は見られなかった。

試験結果から得られたデータのうち、挿入力、締結力、ゴム反力に着目してデータをまとめると、表-7 のとおりとなる。

表-7 からわかるように、各ケースによる発生締結力の差はあまり見られなかったが、挿入力に差がみられた。これは接触面がケース 1 ではコンクリートであるのに対し、ケース 2、ケース 3 では滑材を塗ったシーラ材であるためと考えられる。

表-7 試験結果

ケース	継手位置	挿入力 [kN]	締結力 [kN]		ゴム反力 [kN]
			締結時	除荷時	
1	切羽	51.4	65	47	5.4
	坑口		64	50	8.1
2	切羽	22.3	67	56	5.6
	坑口		45	37	4.3
3	切羽	25.7	56	47→55	4.0
	坑口		37	33→43	2.8

また、除荷しても締結力が保持されていることが確認された。なお、締結力の若干の低下は、ジャッキ推力時の偏心によるものと思われる。また、ケース 3 では締結完了後緊張ジャッキをゆるめた結果、締結完了時以上の締結力が発生した。このことから、シーラ材の反発力により締結力が增加することが確認された。

ここで、各々の継手について、締結完了時の締結力とゴム反力の比を求めたものが図-9 である。

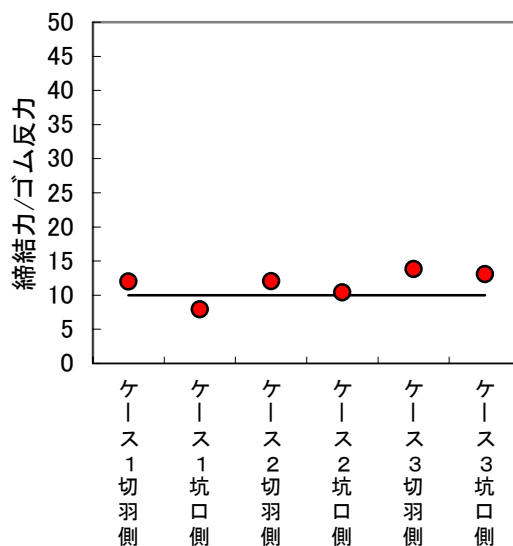


図-9 締結力ーゴム反力関係

この結果から、締結力／ゴム反力≒10 という結果が得られた。これは、継手金物単体試験の結果とほぼ一致しており、ゴムの圧縮特性の把握により締結力を管理可能であることがわかった。

この関係から T 型金物の力の釣り合い、くさび片の力の釣り合い、C 型金物の力の釣り合いを各々求め、

（くさび片の移動量ーシーラ材の潰れによるくさび片の戻り量）×ゴムの弾性係数 k_R = ゴム反力 R

を代入することにより次式を得る。

$$P = \left\{ \frac{\tan \theta_1}{\left(\frac{(\mu_1 \cos^2 \theta_1 - \mu_2 \cos^2 \theta_2) \tan(\theta_1 + \theta_2)}{k_R} + \frac{1 - \mu_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1}{ks} \right)} \right\} d \quad (2)$$

また、ゴム反力 R 、挿入力 F は P の関数なので、(2)式を代入して求まる。概略値は以下の通りである。

$$\begin{aligned} R &\approx (\mu_1 - \mu_2)P \\ F &\approx (\mu_1 + \mu_3)P \end{aligned} \quad (3)$$

式中の記号は、図-10 に示す本試験の締結状況模式図と同一とする。

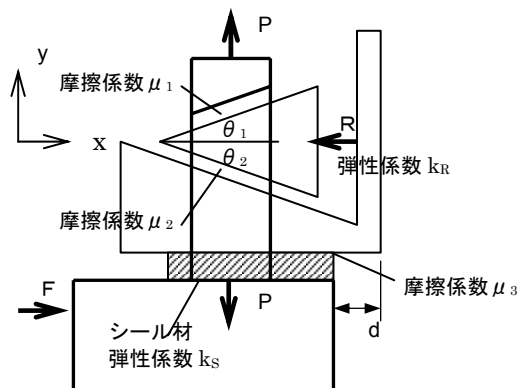


図-10 締結模式図

各接触面の摩擦係数を仮定し、挿入量を変数とする理論式を導き、今回の試験結果との比較を試みた。一例として、ケース 2 の結果を図-11 に示す。

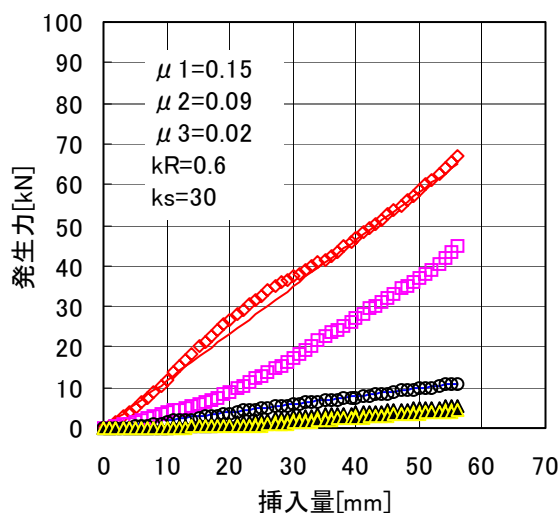
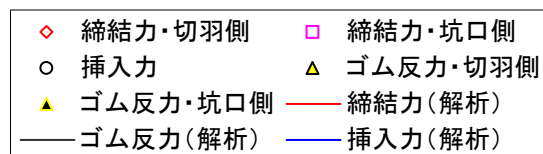


図-11 理論値との比較

この結果から、実測値と理論値は非常に良い整合が取れていることがわかった。推定される摩擦係数値も一般的に見て妥当な値であることから、スライドコッター継手が理論通りの挙動を示しているといえる。なお、ゴム反力係数 k_R 、シー ル材反発力 k_S は、それぞれ事前に試験した結果を一次近似して用

いている。

(3) 施工性確認試験

a) 試験目的

スライドコッター継手は T 型金物、C 型金物ともセグメントに埋設固定されている。組立誤差はくさび片の移動により吸収する構造となっている。

施工性確認試験では、K セグメントの挿入、締結動作がスムーズに行われることを確認する。

b) 試験概要

試験供試体は B1, B2 および K 型の 3 種類であり、B1 型、B2 型の継手面には C 型金物が、K 型の継手面には T 型金物がそれぞれ継手面に対して 2 箇所設置されている。なお供試体は鋼製である。

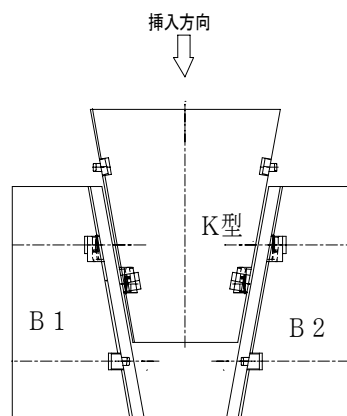


図-12 試験概要図

試験方法は、図-12 に示すように定盤の上に B1, B2 型供試体をセットし、両供試体の間にクレーンで吊り下げた K 型供試体を自重のみで挿入する。

試験は、表-8 に示すとおり、目開きを 0mm～5mm、目違いを 0mm～2mm の範囲で 4 ケース実施した。また、写真-3 に試験状況を示す。

表-8 試験ケース

ケース	目開き量	目違い量
1	0mm	0mm
2	-4mm	0mm
3	両側+2mm ずつ	2mm
4	片側+5mm	2mm



写真-3 試験状況

c) 試験結果

試験結果を表-9に示す。

表-9 試験結果一覧

ケース	挿入状況
1	挿入可能
2	B1, B2 を押し広げて挿入可能
3	挿入可能
4	挿入可能

全てのケースで挿入可能であることから、本セグメントは施工誤差に対して十分な機能を有していることが確認された。

(4) 継手曲げ試験

a) 試験目的

曲げモーメントによる継手断面のコンクリート圧縮応力度、T型金物に発生する引張り応力度及びセグメントの変位量を測定し、設計計算時における継手断面理論と比較することにより、所定の継手性能を有しているかを確認するとともに、セグメント破壊時の断面耐力を測定することで設計値に対する安全率を求める。

b) 使用材料定数および許容応力度

使用材料定数および許容応力度は、表-5に示すとおりとする。

c) 試験概要

荷重方法は、外径φ5,700mm、厚さ275mm、幅1,000mm、6分割のA型セグメント2ピースを水平に組み立て、中央部2点荷重とする。支承部は両端可動とする。荷重ステップはひび割れ発生まで5kN、それ以降は10kNピッチとし、測定項目は、ひび割れ発生状況、変位およびひずみ、破壊荷重とする。

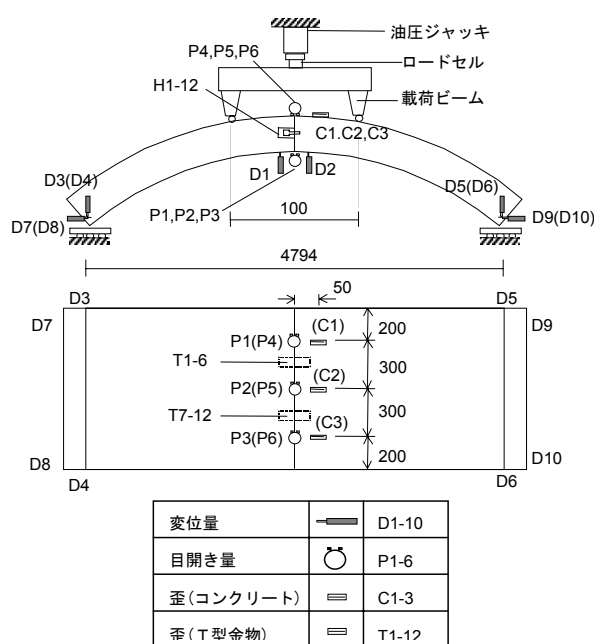


図-13 試験概要図

試験に用いるスライドコッター継手は、T型ウェブ断面積4.4cm²(1.1×4.0)の継手とし、継手面に対して2個用いる。

d) 設計荷重

①試験時の最大曲げモーメント：M

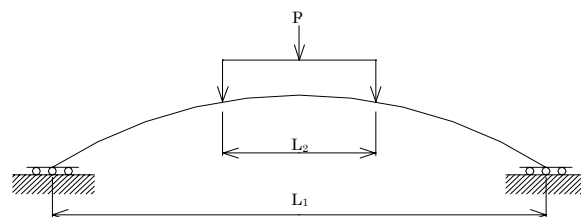


図-14 算定図

試験時の最大曲げモーメントMは、上図を参照し、下式により算出する。

$$M = \frac{P}{4}(L_1 - L_2) = 0.8985P \quad [\text{kN} \cdot \text{m}] \quad (4)$$

②設計曲げモーメント：Md

設計曲げモーメントは、継手を鉄筋とみなした単鉄筋RC断面の軸力N=0時の抵抗モーメントとする。

$$Md = 28.08 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

③設計破壊モーメント：Mud

設計破壊モーメントの算定は、「道路橋示方書・同解説、コンクリート橋編（平成8年度版）2.2.4部材断面の破壊抵抗曲げモーメント」により行う。

$$Mud = 78.17 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

以上から、設計値をまとめると、表-10のようになる。

表-10 設計値一覧

項目	単位	設計時	破壊時
荷重	[kN]	31.3	87.0
曲げモーメント	[kN・m]	28.08	78.17

④ひずみに対する理論値

T型金物に発生するひずみに対する理論値は、以下のように算定する。

$$\sigma_T = \frac{M}{Z_T} = \frac{0.8985 \times 10^6 \cdot P}{117.0 \times 10^3} = 7.679 \cdot P \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} = \frac{7.679 \cdot P}{210 \times 10^3} = 36.57 \times 10^{-6} \cdot P \quad (5)$$

e) 試験結果

継手曲げ試験の結果、以下のことが確認された。

①セグメント耐力

試験結果を表-11に、試験状況を写真-4に示す。破壊形態は、継手金物降伏による圧縮側コンクリートの圧壊であった。また、この試験の設計荷重に対する安全率は3.4であった。

表-11 試験結果

	荷 重 [kN]		曲げモーメント [kN・m]	
	計算値	実測値	計算値	実測値
ひび割れ発生荷重	—	25.0	—	22.46
設計荷重	31.3	—	28.08	—
破壊荷重	87.0	107.0	78.17	96.14

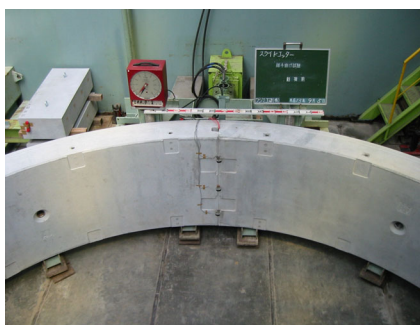


写真-4 試験状況

この結果から、本セグメントは十分な耐力を有することが確認された。

②T型金物のひずみ

T型金物の荷重-ひずみ関係を図-15に示す。

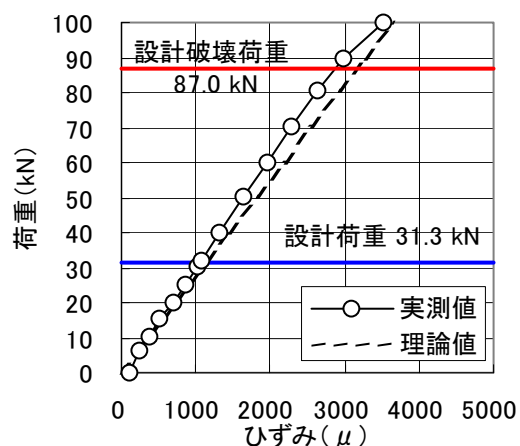


図-15 T型金物 荷重-ひずみ関係

この結果から、理論値と実測値がほぼ一致していることがわかる。従って、本セグメントが理論通りの継手性能を有していることが確認された。

③回転ばね定数

試験から得られたデータから、継手部に作用する曲げモーメントと継手開口量の関係を図-16

に示す。

図中、波線は、梁ばねモデル解析による計算結果である。解析モデルは、セグメント本体を梁要素、セグメント継手を回転ばねとする線形梁ばねモデルとする（図-17参照）。

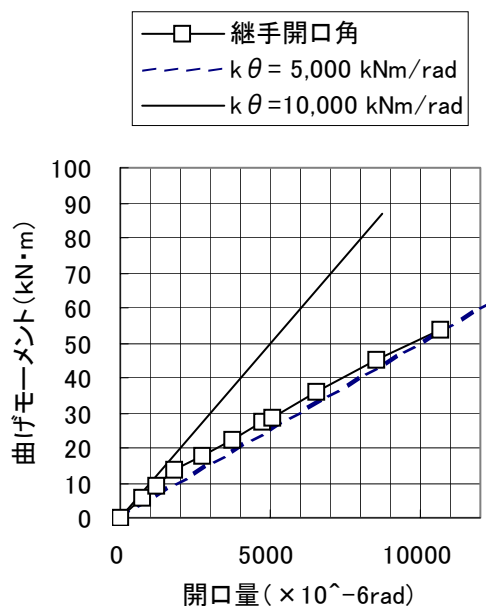


図-16 曲げモーメント-継手開口量関係

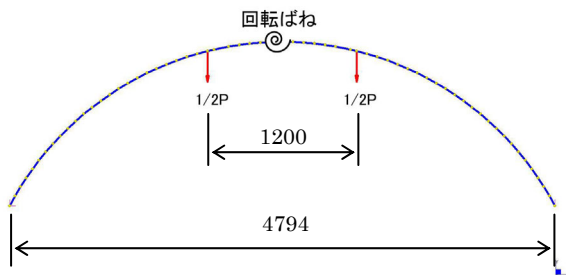


図-17 解析モデル

解析ケースは、回転ばね定数 k_{θ} を 5,000 kN・m と 10,000 kN・m の2ケースとした。

この結果から、今回の試験では k_{θ} は概ね 5,000 kN・m～10,000 kN・m の範囲にあることが確認された。

5. おわりに

以上の結果から、スライドコッターセグメントがシールドトンネルの一次覆工体としての基本性能を有していることが確認された。

今後は、試験施工に向けて更に研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説，土木学会，1996年