

軸方向挿入型コッター式継手の開発

山田 倫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)

大深度地下利用への期待の高まる中、シールド工法は重要な役割を担っていると考えられる。筆者らは、シールド工法の適用性を更に高めるため、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、この度実施工への採用が決定した。

本論文では、この新しいセグメントの概要と開発経緯を述べるとともに、φ3,780mm シールド機実機によるリング組立試験、継手正曲げ試験、継手負曲げ試験を実施し、スライドコッターセグメントの性能・施工性が確認さ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 高耐久性、長寿命化
- ④ 二次覆工省略
- ⑤ 幅広化

などが要求されている。

筆者らは、これらの要求に応えるべく下記の事項を満足するセグメントとして軸方向挿入型コッター式継手を用いたスライドコッターセグメントを開発した。

- ① 組立て同時締結
- ② 腐食要因との絶縁
- ③ 内面平滑化

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。(図-1) 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、次の通りである。

- ・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・穴埋め工の省略により、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

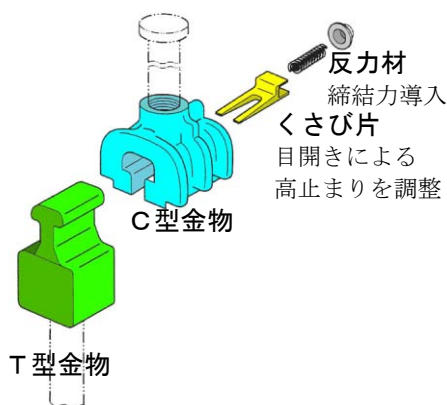


図-1 スライドコッター継手の仕組み

3. 開発の経緯

筆者らは、これまでに実証試験として、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、この度実施工へ適用する運びとなった。本論文では、改めて先の試験結果を報告するとともに、新たに実施工に向けて実施したシールド機実機を用いたリング組立試験及び実施工用セグメントを用いた継手曲げ試験（正曲げ・負曲げ）について報告する。

表-1 実施試験一覧

試験名	試験目的
継手金物単体試験	継手基本性能
締結確認試験	締結力，目開き
継手曲げ試験	継手曲げ性能
実物大リング組立試験	1ring 組立時間 組立精度
継手曲げ試験（正曲げ）	継手曲げ性能 セグメント耐力
継手曲げ試験（負曲げ）	継手曲げ性能 セグメント耐力

4. 性能試験

(1) 継手金物単体試験

a) 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。試験は、T型金物、くさび片及びC型金物との摩擦条件及び反力ゴムと締結力の相関関係を把握するため表-2 に示す試験ケースを設定した。

表-2 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

② 目開き閉鎖時締結力確認試験（金物単体）

締結前にT型金物とC型金物の間に2mm厚の鉄板を挟み、その後鉄板を撤去して目開きを閉じる。そのときのくさび片の戻り状況を確認する。

b) 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。

① 締結状況確認試験（金物単体）

全ての試験結果においてT型金物の挿入にくさび片が追従していることが確認された。また、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、計測値から摩擦係数を求めた結果を表-3 に示す。

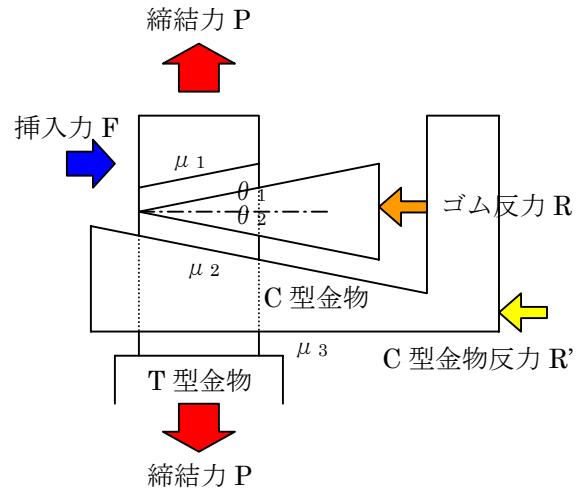


図-2 力の釣り合い模式図

$$P = \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} R \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

その結果、締結力とゴム反力の比（P/R）は、ゴムの材質に依らず、くさび片とC型金物との摩擦条件に依ることが確認された。

表-3 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
μ1	0.15	0.15	0.15	0.15
μ2	0.07	0.01	0.07	0.01

② 目開き閉鎖時締結力確認試験（金物単体）

試験の結果、目開き量に対するくさび片の移動量はおよそ10倍であった。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。

(2) 締結確認試験

a) 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。

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-4 に示すとおり、3 ケースとした。なお、シールド材ありのケースにおいては、

シール材を圧縮しながら挿入するケースと、圧縮した状態で挿入を行う2ケースとする。

表-4 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）

試験の概要図を図-3に示す。

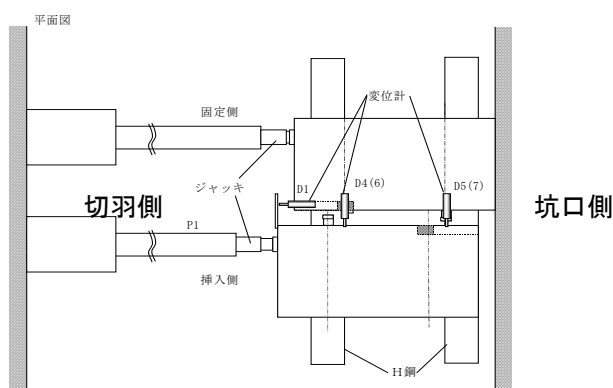


図-3 試験概要図

b) 試験結果

シール材を配置したケース2では、締結に伴いシール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、シール材のずれや剥離は見られなかった。

表-5から、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ル材であるためと考えられる。

表-5 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

この結果から、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ではその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、シール材の反発力により締結力が増加することが確認された。

(3) リング組立試験

a) 試験目的

本試験は、シールドマシン実機によるスライドコッターセグメントのリング組立試験により、セグメントの挿入・締結がスムーズに行え、安全で確実にリング組立できることを確認する。

b) 使用材料

- セグメント外径 : $\phi 3,650\text{mm}$ (6分割)
 - セグメント幅 : 1000mm
 - セグメント厚 : 200mm
 - セグメント継手 : スライドコッター継手
 - リング継手 : クイックジョイント
- (試験はストレートピン)

C型金物については、事前に実施したB-K-B平板セグメント供試体による施工性確認試験を踏まえC型金物の挿入口にテーパーを付ける改良を行った。

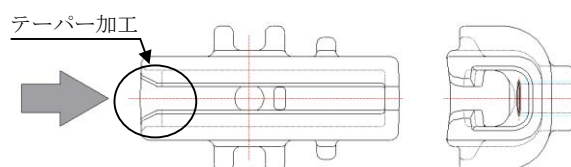


図-4 C型金物テーパー加工図

c) 試験概要

図-5に示す試験架台にシールド機及びガイドとなるセグメントリングを設置し、エレクトーにより把持から締結までの一連の動作を1リング組立完了まで行う。

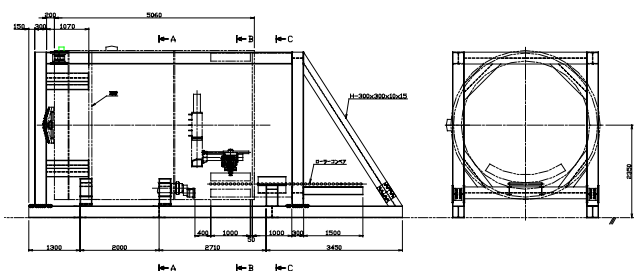


図-5 実物大組立試験概要図



写真-2 実物大組立試験状況図

d) 確認項目

- ・セグメントの挿入・締結動作の作業性
- ・組立時のシール材の影響(剥がれ・損傷の有無)
- ・リング組立作業サイクルタイム
(A2 セグメント設置済み状況から開始)
- ・真円度の計測



写真-3 実物大組立試験状況図

e) 試験結果

締結動作自体は非常にスムーズであり、位置合わせに要する時間の短縮が組立時間の短縮につながった。最終的な組立時間は 12 分 31 秒であった。なお、この数値は A2 セグメントを組んだ状態からの計測数値であるためリング当たりのサイクルタイムは 15 分/Ring 程度であると考えられる。

組立精度の計測結果を図-6 に示す。設計値を基準に水平鉛直それぞれ平均+2mm, +1mm であり十分な組立精度が得られた。また、シール材の剥離、損傷は認められなかった。

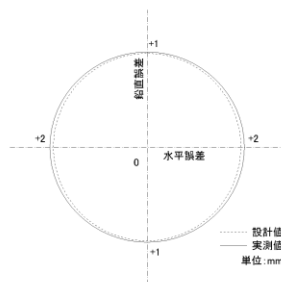


図-6 出来形計測図

本試験の結果、締結作業はセグメントをトンネル軸方向に移動させるだけなので、位置合わせ動作を機械化することで完全機械化が容易であると考ええる。

(4) 継手正曲げ試験

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継手部の開口量を測定し、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。

試験ケースは、表-6 に示す 3 ケースとした。

表-6 試験ケース一覧

ケース	反力材	シール材
1	スプリング	なし
2	A-95	なし
3	A-95	あり

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を表-7 に示す。

表-7 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 -900-8	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}	660
	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}	940
	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

載荷方法は、外径 $\phi 3,650\text{mm}$ 、厚さ 200mm、幅 1,000mm、6 分割の A セグメント 2 ピースを水平に組み立て、中央部 2 点載荷とする。支承部は両端可動とする。載荷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。

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 $4.4\text{cm}^2(1.1 \times 4.0)$ の継手とし、継手面に対して 2 個用いる。

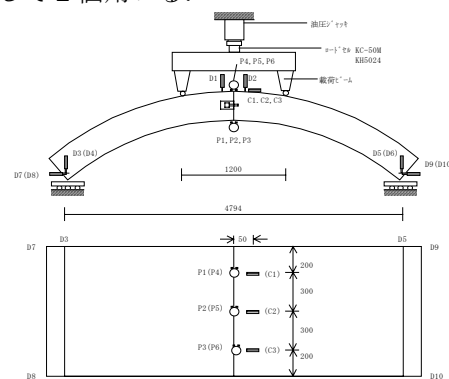


図-7 継手正曲げ試験概要図



写真-4 継手正曲げ試験状況

d) 設計荷重

①試験時の最大曲げモーメント：M

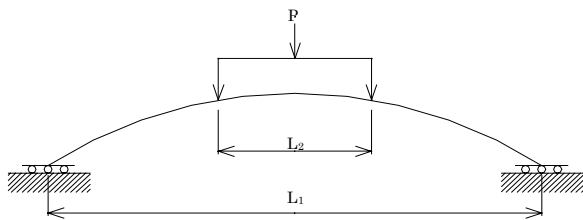


図-8 算定図

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。

$$M = \frac{P}{4}(L_1 - L_2) = 0.5258P \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (2)$$

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。

$$Md = 23.18 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

③設計破壊モーメント：Mud

設計破壊モーメントの算定は、「シールド工用標準セグメント解説、第3章標準コンクリート系セグメント 10.6(1)極限耐力」により行う。

$$Mud = 67.23 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

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]	44.1	127.9
曲げモーメント	[kN・m]	23.18	67.23

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。

$$\sigma_T = \frac{M}{Z_T} = \frac{0.5258 \times 10^6 \cdot P}{96.6 \times 10^3} = 5.4425 \cdot P \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} = \frac{5.4425 \cdot P}{210 \times 10^3} = 25.92 \times 10^{-6} \cdot P \quad (3)$$

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2.7から2.8であり、十分な耐力を有することが確認された。

表-11 試験結果

	計算値	ケース1	ケース2	ケース3
ひび割れ発生				
荷重 [kN]	—	44.1	44.1	40.0
曲げモーメント [kN・m]		23.18	23.18	21.03
設計荷重				
荷重 [kN]	44.1	—	—	—
曲げモーメント [kN・m]	23.18	—	—	—
破壊荷重				
荷重 [kN]	127.9	125.0	120.0	122.0
曲げモーメント [kN・m]	67.23	65.73	63.10	64.15
安全率	—	2.8	2.7	2.8

②T型金物とコンクリートのひずみ

T型金物とコンクリートの荷重—ひずみ関係をそれぞれ図-9、図-10に示す。

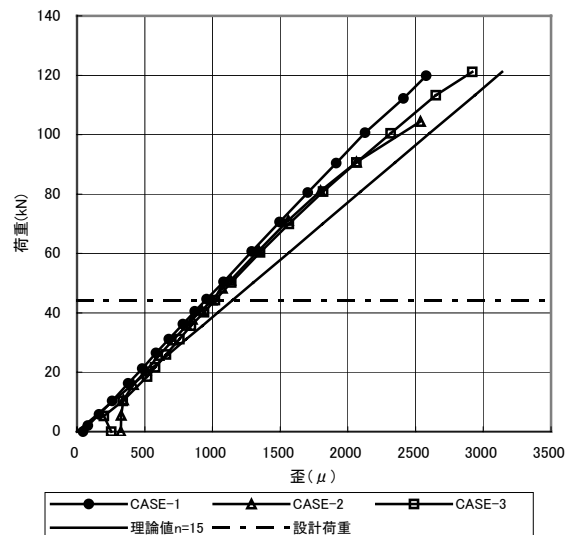


図-9 T型金物 荷重—ひずみ関係

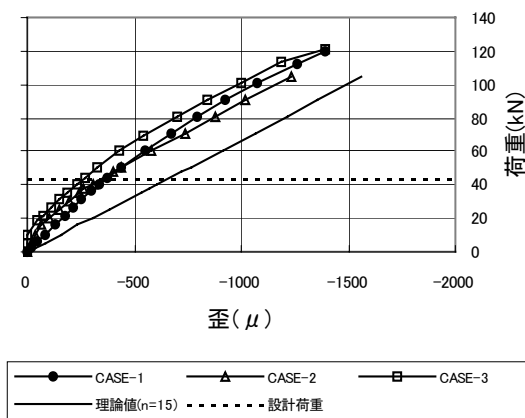


図-10 コンクリート 荷重－ひずみ関係

この結果から、T型金物、コンクリートともケース毎の差異は認められなかった。しかし、引張側コンクリートのひび割れ発生状況にシール材の有無によって差異が見られた。シール材を貼ったケース3を写真-5、シール材を貼らなかったケース1、ケース2をそれぞれ写真-6、写真-7示す。シール材を貼ったケースにおいては、他のケースに比べひび割れが広い範囲で分布していることが分かる。今回の試験では引張側コンクリートには計測器具を設置していないため、応力状態の把握が出来なかった。今後、数値解析を含め、引張側コンクリートの応力状態の解明を進めたいと考える。



写真-5 CASE-3 ひび割れ発生状況

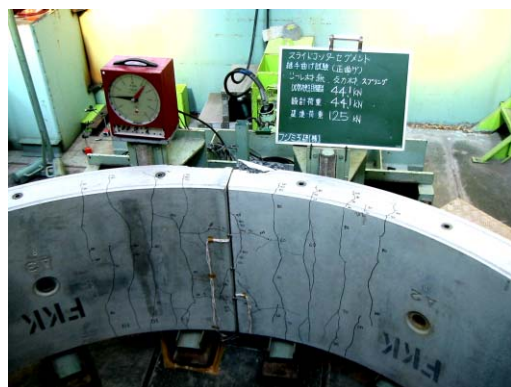


写真-6 CASE-1 ひび割れ発生状況



写真-7 CASE-2 ひび割れ発生状況

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-11に示す。

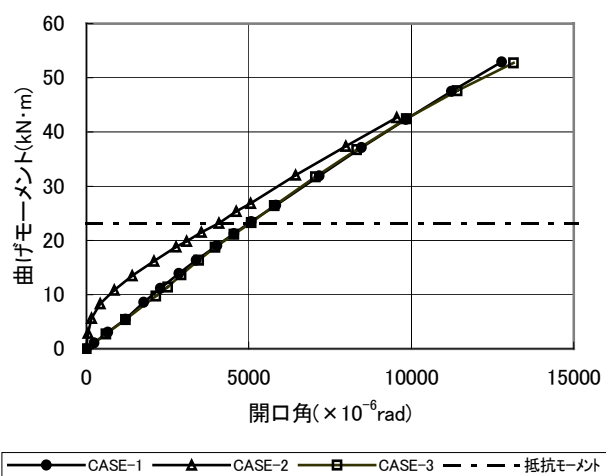


図-11 曲げモーメント－継手開口量関係

シール材を貼ったケース3において低荷重載荷時点にて初期目開きが急激に閉鎖する現象がみられた。そのため、図-11では初期目開きによる開口角を補正したうえで図化を行った。ケース1とケース3には差異が認められなかった。またケース2は図-9の示すとおり反力材の初期締結力により、低荷重載荷時点では開口角が広がらなかったと考えられる。

開口角と曲げモーメントの関係より、 $K\theta^*$ の算定を行った結果を表-12に示す。 $K\theta^*$ の算定は「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き(6.2継手の設計)」により行う。

$$K\theta = K\theta^* \times EI/Rc^2 \quad (4)$$

回転ばね定数は4,600～5,700kN・m/radを示した。本試験ではシール材条件のみ異なるケース2とケース3を比較した場合に差異が見られるが、ばね定数の過大評価はセグメント本体の発生断面力を低く見積もることにつながるため、 $K\theta^*=0.3$ 程度が妥当と考えられる。なお、ばね定数は継手位置や桁高等によるため、これらの条件が異なる場合には別途検討の必要があると思われる。

表-12 回転ばね定数（正曲げ）

	回転ばね定数 (kN・m/rad)	K θ *
CASE-1	4600	0.31
CASE-2	5700	0.39
CASE-3	4600	0.31

(5) 継手負曲げ試験

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継手部の開口量を測定し，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。

試験ケースは継手正曲げ試験と同様，表-6 に示す3 ケースとした。

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，継手正曲げ試験同様，表-7 に示すとおりとする。

c) 試験概要

正曲げに対する継手曲げ試験と同様の使用材料，載荷ピッチ，支承条件により，内空側より2点載荷にて試験を行う。

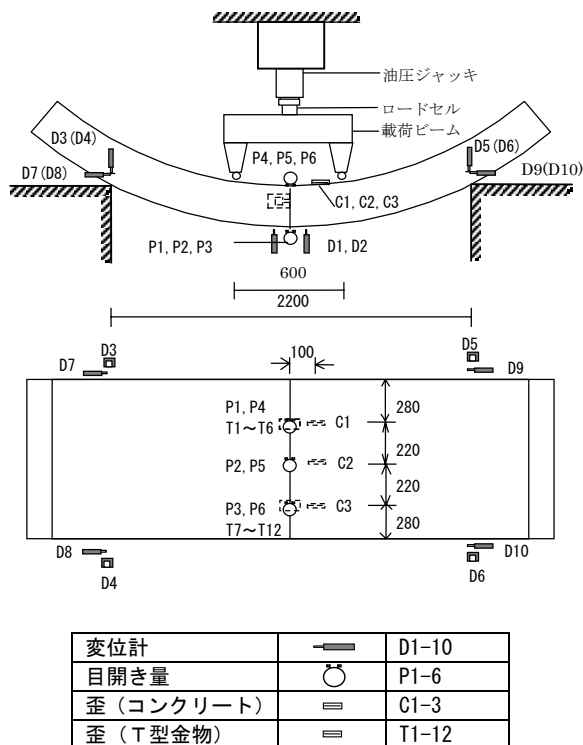


図-12 継手負曲げ試験概要図



写真-8 継手負曲げ試験状況

d) 設計荷重

①試験時の最大曲げモーメント：M

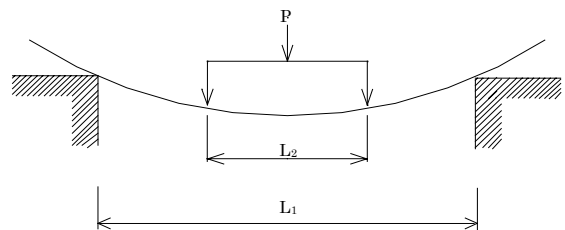


図-13 算定図

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。

$$M = \frac{P}{4}(L_1 - L_2) = 0.4000P \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

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。

$$M_d = 9.71 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

③設計破壊モーメント：Mud

設計破壊モーメントの算定は，正曲げ試験同様とする。

$$M_{ud} = 27.35 \quad [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

以上から，設計値をまとめると，表-13 のようになる。

表-13 設計値一覧

項 目	単位	設計時	破壊時
荷 重	[kN]	24.3	68.4
曲げモーメント	[kN・m]	9.71	27.35

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。

$$\sigma_T = \frac{M}{Z_T} = \frac{0.4000 \times 10^6 \cdot P}{40.4 \times 10^3} = 9.901 \cdot P \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_T} = \frac{9.901 \cdot P}{210 \times 10^3} = 4.715 \times 10^{-5} \cdot P$$

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全ケースにおいて3.1を上回った。

表-11 試験結果

	計算値	ケース1	ケース2	ケース3
ひび割れ発生				
荷重 [kN]	—	24.0	36.0	24.3
曲げモーメント [kN・m]		9.60	14.40	9.71
設計荷重				
荷重 [kN]	24.3	—	—	—
曲げモーメント [kN・m]	9.71	—	—	—
破壊荷重				
荷重 [kN]	68.4	77.2	76.5	77.0
曲げモーメント [kN・m]	27.35	30.88	30.60	30.80
安全率	—	3.2	3.1	3.2

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-14に示す。

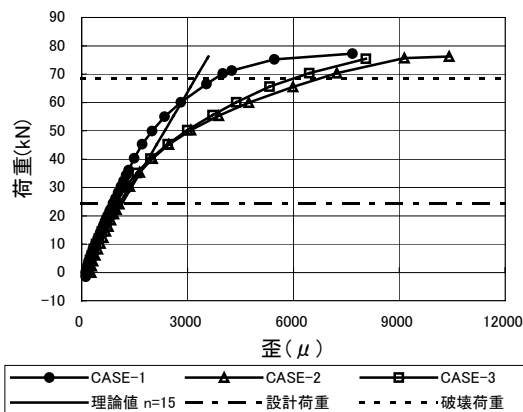


図-14 T型金物 荷重－ひずみ関係

この結果から、設計荷重以上を载荷した際に反力材をコイルスプリングとしたケース1が他のケースと異なる推移を示す。ケース1とケース2はシール材の有無の違いがあるが、シール材位置が引張側にあるため、実測値にほぼ差異は認められない。

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-15に示す。

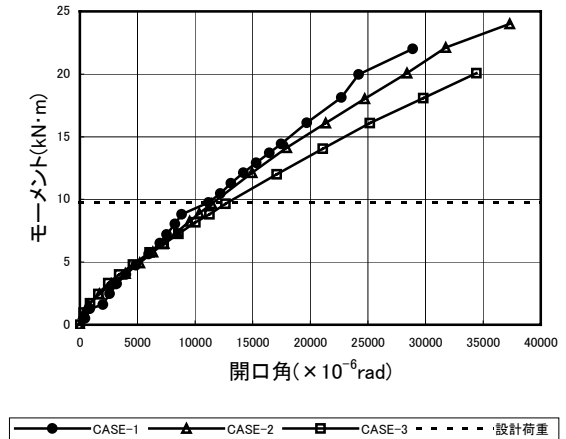


図-15 曲げモーメント－継手開口量関係

表-12 回転ばね定数（負曲げ）

	回転ばね定数 (kN・m/rad)	K θ *
CASE-1	873	0.08
CASE-2	842	0.07
CASE-3	762	0.07

シール材が引張側に位置するため、ケース毎の違いは認められなかった。

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。スライドコッターセグメントは現在、下水道工事への適用が決定している。

また、スライドコッターセグメントは、内面平滑であることから下水道、地下河川等の内水圧を受けるトンネルへの適用が考えられる。今後は、PC鋼より線によるプレストレス（軸力）導入技術と組み合わせさらなる効率化、低コスト化を目指す所存である。

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
- 2) 内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き，先端建設技術センター，2000年