

シールド工法用セグメントのインサート継手の開発

DEVELOPMENT OF AN INSERT HIGH STIFFNESS JOINT FOR SEGMENTS USED IN THE SHIELD TUNNELING METHOD

石川幸彦¹⁾・岡本達也²⁾・山森規安²⁾

Yukihiko ISHIKAWA、Tatsuya OKAMOTO and Noriyasu YAMAMORI

Segments used in accordance with the shield tunneling method need to be improved: 1) to reduce cost because the segments account for 30 to 40% of the total shield tunneling cost ; 2) to increase work efficiency because the time required for segment assembly accounts for most of the total construction period ; and 3) to increase stiffness and strength to allow use in soft ground.

After studying the use of screw-pin joints as segment joints ,which have already been shown to offer good work efficiency in assembly ,construction quality ,and cost-saving,the authors developed an insert high stiffness joint for segments constructed on soft ground-an improvement which is particularly useful-and confirmed its strength by a joint bending test.

Key Words : segment,segment joint,joint stiffness

1. はじめに

シールドトンネルの覆工は、数ピースに分割されたセグメントを、リングを形成するセグメント継手と、リング相互を結合するリング継手によって組み立てられる。

現在、トンネルの覆工を構成するセグメントには、①シールド工事費全体の3～4割を占めているための経済性の向上、②施工時間の過半を占めるセグメント組立て作業性の向上、③軟弱地盤に必要とされる剛性・強度の向上が求められている。そして、これらの課題を解決する鍵を握っているのが継手である。

すなわち、①セグメントの製作費のなかで継手金物が約2割を占めている、②セグメントの組立て作業性が継手構造に大きく左右される、③リングを形成するセグメント継手の剛性がセグメント単体の剛性に比べてかなり小さい。以上により、継手の経済性、組立て作業性、そして軟弱地盤に必要とされるセグメント継手の剛性の向上が重要となる。

このようなニーズにこたえるため、筆者らはまずリング継手に、ボルト継手方式の強度性能面とピン継手方式の組立施工面を融合した「平板形インサート継手」を開発した。¹⁾ この継手は、営団7号線(南北線)で試験施工を行い、セグメントの経済性、組立施工性および止水性・組立精度などの施工品質に良好な成果が得られた。この成果を踏まえて、インサート継手をセグメント継手へ応用する検討を行い、とくに改良のメリットが大きい軟弱地盤を対象に「アーチ形インサート継手」を開発した。

本編では、インサート継手の構造とアーチ形インサート継手に関する各種要素試験および実物大セグメント継手曲げ試験の概要について報告する。

1) フェロー会員 帝都高速交通営団 建設本部技術基準・技術開発担当

2) 正会員 俣熊谷組 土木本部土木技術部

2. インサート継手の構造と特長

2. 1 継手の構造

従来の平板継手が平板金物どうしをボルトとナットで締結しているのに対し、インサート継手は片側が従来の平板金物またはアーチ金物で、相手側のセグメントには、先端部に袋ネジを切ったインサート金物を埋め込み、ボルトを金物側からピン先端部のネジ穴に締め込む構造である。

(1) インサート側

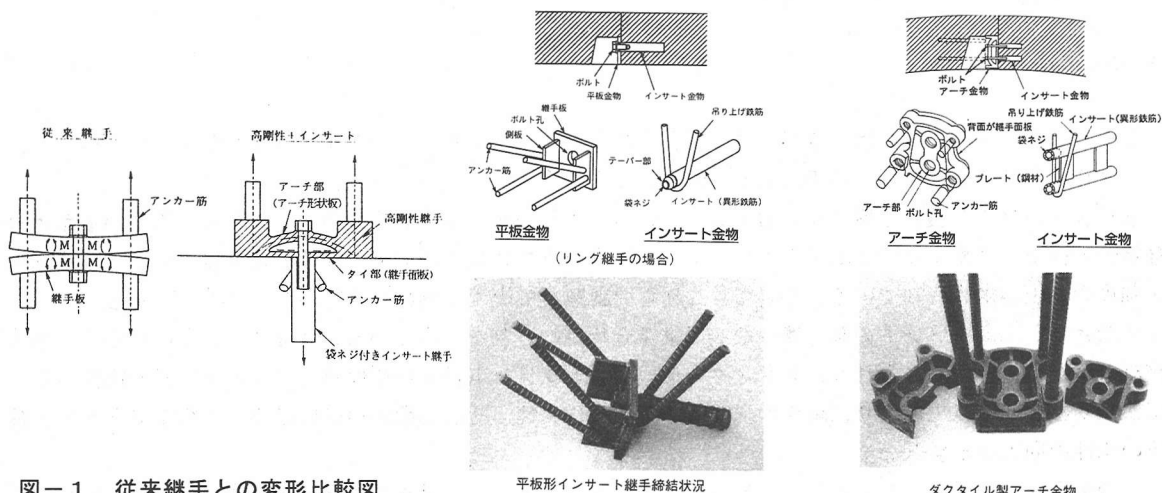
インサートの材料は異形鉄筋で、その内部にボルトをねじ込むための袋ネジを切っている。上下のインサートをプレートにより結合するとともに内径側のインサートに吊り上げ鉄筋を溶接している。継手に作用する引張力に対しては、インサート本体で抵抗し、せん断力に対しては、吊り上げ鉄筋で抵抗する機構である。インサートは、袋ネジのみが継手面に開口した状態でセグメント内部に埋め込まれている。

(2) 金物側

金物側は、従来の平板金物またはダクタイル製のアーチ金物を用いる。アーチ金物はタイドアーチ効果により、継手面板の曲げ変形が抑制されるため、曲げ変形しやすい平板金物に比べ、高い継手強度と剛性が得られる。図-1に従来継手との変形の比較を示す。アーチ金物は高い継手剛性が必要とされるセグメント継手、すなわち軟弱地盤、曲げモーメントが卓越する非円形断面や内圧が作用するトンネルなどに適用し、硬質地盤のように高い継手剛性が必要とされない継手には平板金物を用いることを基本とする。

また、リング継手の場合は、セグメントの組立性に配慮し、インサート先端をテーパーとして継手面より出っ張る構造とし、金物側には平板金物を用いる。

本継手の構造を図-2、3に示す。



2. 2 継手の特長

本継手には、次のような特長がある。

- ①片側が安価なインサート式のため、継手が経済的である。
- ②リング継手のピン（出っ張り）がガイドとなり、セグメントを効率的かつ高精度に組み立てられる。
- ③ボルトが短く扱いやすく、インサートの内部に袋ネジが切つてあるためナットがいらず組立時間が短縮できる。
- ④インサート式継手を使用することにより、片側のボルトボックスがなくなり断面欠損が解消される。

3. 継手剛性の検討

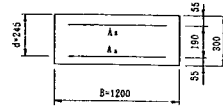
アーチ形インサート継手の開発実験の対象として、地下鉄単線クラスのRC平板形セグメントを選定し、必要な継手剛性（回転ばね定数 $K\theta$ （tfm/rad））を検討した。

継手剛性の目標値設定にあたり、はりばねモデル計算法による数値解析を行い、継手剛性と限界土被り、必要鉄筋比、変形量等の関係について考察した。

解析に用いたセグメントの各定数値を表－1に示す。リング継手は剛結とした。図－4は、セグメント継手の剛性とセグメント本体で決まる限界土被りの関係を示し、図－5は、セグメント継手の剛性とリングの変形量の関係を示している。これより、 $K\theta = 10,000$ tfm/rad以上では限界土被りや変形量の効果が小さく、むしろ、継手の経済性の低下が懸念されるため、回転ばね定数の目標値を $K\theta = 10,000 \sim 15,000$ tfm/radとした。なお、このクラスのセグメントに、従来多用されているダクトイル継手の回転ばね定数は、 $K\theta = 7,200$ tfm/rad（弁慶濠工区試験値）程度である。

表－1 定数値

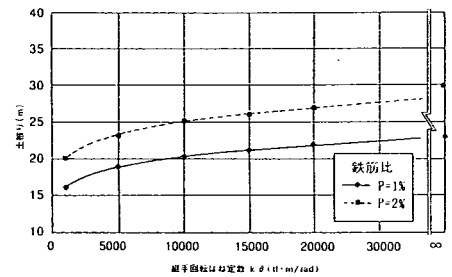
項目	値
セグメント外径	6,600 mm
セグメント板高	300 mm
セグメント幅	1,200 mm
分割数	6分割
弾性係数	3.9×10^4 kgf/cm ²
コンクリートの単位体積重量	2.65 tf/m ³
間方式圧係数	0.75
地盤反力係数	0
回転ばね定数	変数(tfm/rad) (正曲げ、負曲げとも同値)
せん断ばね定数	1.0×10^4 tf/m



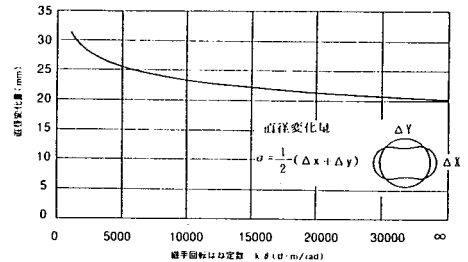
※鉄筋比 $P = \frac{A_s}{bd}$

$P = 1\%$ の場合 $A_s = 29.4 \text{ cm}^2$

$P = 2\%$ の場合 $A_s = 58.8 \text{ cm}^2$



図－4 継手剛性と限界土被り関係



図－5 継手剛性と直径変化量の関係

4. 継手強度試験

アーチ金物側、インサート側それぞれについて、継手引張試験とせん断試験を行った。インサート金物の構造は、図－6に示すA、B、Cの3タイプについて行い、強度性能、経済性、製作性を考慮して、Bタイプに改良を加えたものを用いて、継手曲げ試験を行った。要素試験結果をまとめて表－2に示す。

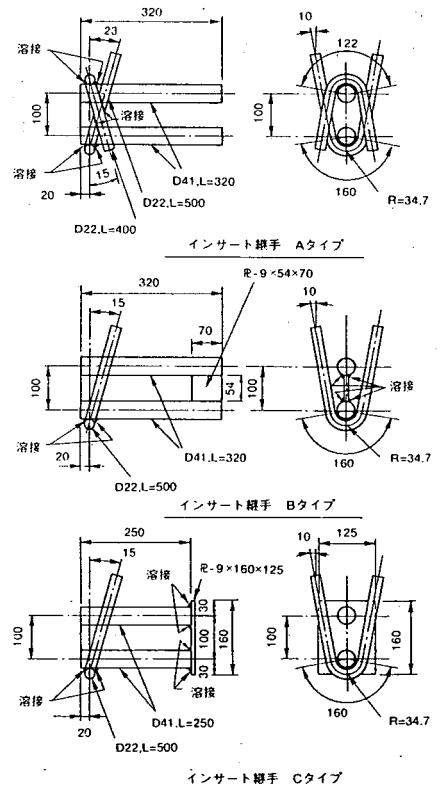
4. 1 継手引張試験

(1) 試験体および試験方法

アンカー筋やインサートの必要定着長さ、最適なインサート構造を決定することを目的に、継手引張試験を実施した。試験方法は、図－7に示すように試験体を支点として、継手の外径側および内径側のボルト孔の中心を、P C鋼棒を介してセンターホールジャッキにて引張ることにより、破壊まで載荷した。

(2) 試験結果と考察

①アーチ金物



図－6 インサート継手

荷重と変位の関係は、ボルト許容荷重レベルの25tf程度まで線形で、その傾きは、外径面側21tf/mm、内径面側で13tf/mmであった。これ以降は変位が急増し、74tfでアンカー筋の根元が降伏破壊して、載荷を中止した。

②インサート金物

引張りバネ定数は約100tf/mmとなり、高剛性継手の5倍以上であった。ボルト許容荷重の2倍程度の45tf以降は変位が急増し、70tf前後でインサートのネジ部が降伏破壊したため載荷を終了した。変形および強度についてタイプによる有意な差は見られなかった。初亀裂は7～18tf載荷時に、各タイプともに内径面のインサート直下に見られ、その後、タイプAとBは荷重の増加とともに、インサート口元から内径面の広い範囲に細かいひびわれが発生した。一方、タイプCのひびわれは、アンカープレートが溶接されているインサート端部あたりに集中して発生した。設計荷重22.0tf時におけるインサート金物本体（D41）とアーチ金物のアンカー筋（D22）の発生応力度は許容応力度の70～80%であり、それぞれの鉄筋径の妥当性が確認された。

4.2 継手せん断試験

(1) 試験体および試験方法

上下のインサート結合の力学的効果や、せん断補強の必要性を把握し、最適なインサート構造を決定することを目的として、継手せん断試験を実施した。試験方法は、図-8に示すようにインサート継手にボルトをねじ込み、門型フレームを介して、このボルトをセグメント内径面側に押すことにより、インサート継手にせん断力を載荷した。

(2) 試験結果と考察

変位量は、ボルトのせん断許容荷重17tf時で約1.4mm、せん断バネ定数で約15tf/mmであった。これ以降荷重が増大してもせん断バネ定数は、引張りバネ定数ほど急激に低下することがなく、40tf前後でインサート下部コンクリートがせん断破壊した。破壊時には、各タイプともに内径側に比べ外径側のインサートが内径側に大きく変形していたが、Aタイプの変形量はB、Cタイプに比べ少なかった。これは、Aタイプでは、外径側インサートの口元に配置したアンカー筋および上下のアンカー筋どうしの結合により、せん断耐力が増加したためである。

以上の試験結果と経済性、製作性を考慮して、Bタイプを基本構造とし、さらに2本のインサートの一体性を向上するために継手面に近い位置でも鋼板で結合することとした。インサート継手の構造を図-9に示す。

表-2 要素試験結果

	引張試験			せん断試験		
	インサート金物			インサート金物		
	A	B	C	A	B	C
初亀裂発生荷重 (tf)	5.0	7.0	18.0	11.0	3.5	2.5
破壊荷重 (tf)	61.4	72.3	71.0	74.0	47.4	25.0
目盛 (tf)	58.8			42.3		
ばね定数 (tf/mm)	28.2	104.5	90.9	17.1	15.5	15.6

(注)目盛・ばね定数に使用するボルトは27(φ12)25mmの耐力

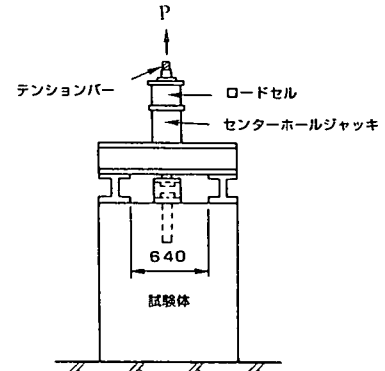


図-7 引張試験方法

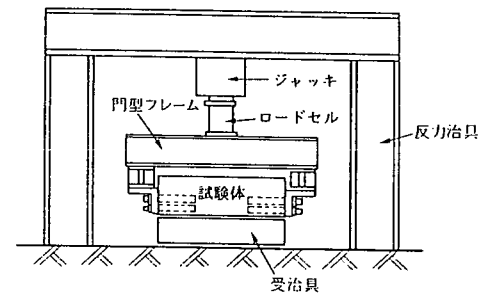


図-8 せん断試験方法

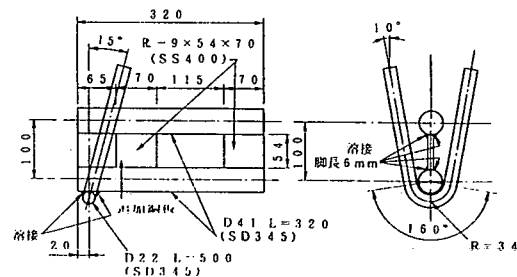


図-9 インサート継手の改良

4.4 継手曲げ試験

(1) 試験体および試験方法

インサート継手の強度・剛性・破壊性状を確認し、十分な強度性能を有することを実証することを目的に実物大の継手曲げ試験を実施した。

試験体は、地下鉄単線クラスの平板型RCセグメント（セグメント外径φ6,600mm、桁高300mm、幅1,200mm）とした。試験は継手ボルトの締め付け力を変えることにより、正曲げおよび負曲げそれぞれについて次の4ケースを行った。

ケース1、2、3：それぞれの許容応力度の80、60、100%で締結し設計荷重まで載荷

ケース4：許容応力度の80%で締結し破壊まで載荷

載荷方法は両端を可動支点とした2点載荷とし、継手の設計荷重（ボルトの許容応力に達する曲げモーメントで正曲げ4.4tf、負曲げ6.9tfである。）までは0.5tfピッチ、それ以降は1.0tfピッチで載荷した。図-10に継手曲げ試験載荷方法を示す。計測項目は、継手目開き量、ボルト軸力、インサート金物のひずみおよびアーチ金物のアンカー筋のひずみとした。

(2) 試験結果および考察

① 試験経過

正曲げ試験では、各ケースとも設計荷重4.4tfまで、ひびわれなどの異常は見られなかった。破壊まで載荷したケース4（80%）は、8.0tf時にリング継手のボルトボックス隅角部からセグメント幅方向にひびわれが発生した。16tf過ぎにはアーチ金物のアンカー筋が降伏し、22.3tfで外径面側のコンクリートが圧壊し、最終荷重に至った。最終荷重の設計荷重に対する比率は5.1であった。

負曲げ試験では、各ケースとも設計荷重6.9tfまで、ひびわれなどの異常は見られなかった。破壊まで載荷したケース4（80%）は、23.0tf時にセグメント外径面側のリング継手の位置にセグメント弧長方向のひびわれが発生した。25.0tfでインサート継手のネジ部が降伏し、27.0tfでアーチ金物のアンカー筋の根元付近が降伏、36.2tfで内径面側のコンクリートが圧壊し、最終荷重に至った。最終荷重の設計荷重に対する比率は5.2であった。

② 回転ばね定数

図-11に曲げモーメントと回転角の関係を示す。回転ばね定数は図-12に示すように許容曲げモーメントにおける割線勾配（許容モーメント M_a 時の継手回転角 θ_a と原点を結んだ直線の傾き）より算定した。許容応力度の80%でボルトを締結した場合、設計荷重時の回転ばね定数 $K\theta$ は、正曲げで10,400tfm/radであり、従来継手の回転ばね定数7,200tfm/rad

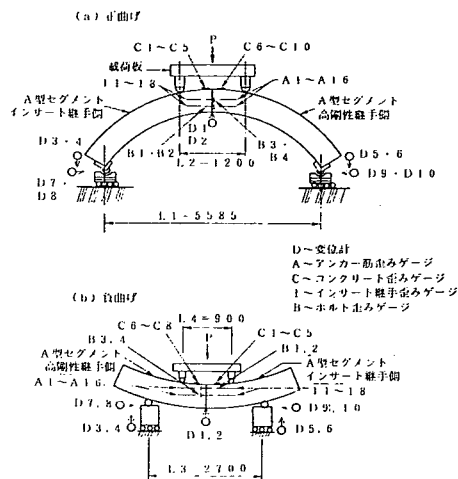


図-10 継手曲げ試験載荷方法

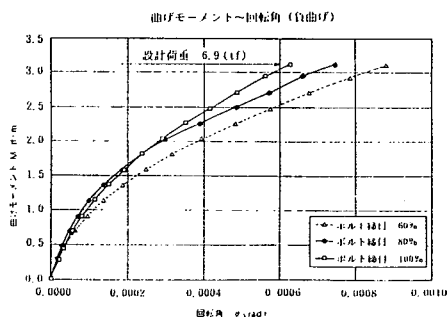
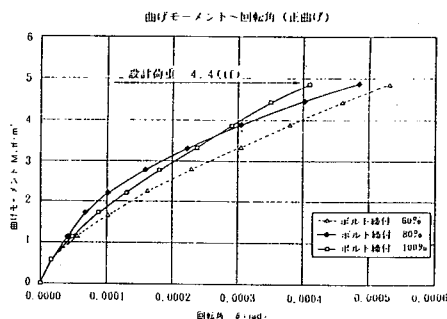


図-11 曲げモーメントと回転角の関係（正曲げ、負曲げ）

$$\text{回転ばね定数 } K\theta = \frac{Ma}{\theta_a} \quad (\text{tf} \cdot \text{m/rad})$$

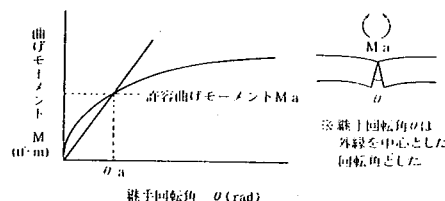


図-12 回転ばね定数

の1.4倍であった。負曲げの回転ばね定数は4,100tfm/radであった。また、表-3に示すようにボルトの初期締め付け力が高い程、高い曲げ剛性が得られた。

③従来継手との比較

表-4に継手の曲げ剛性、ひび割れ耐力・破壊曲げモーメントの従来継手との比較を示す。本継手の曲げ剛性、ひび割れ耐力、終局耐力は従来継手に比較して1.4～1.6倍高いことが確認できた。

5. まとめ

試験結果をまとめるとつぎの通りである。

- ①許容応力度の80%でボルトを締結した場合、設計荷重時において正曲げ10,400tfm/rad、負曲げ4,100tfm/radの回転ばね定数を得た。目標値とする正曲げ10,000～15,000tfm/radを満足する性能が得られた。
- ②ボルトの初期締め付け力は継手曲げ剛性に影響し、締結力が高いほど高い回転ばね定数が得られることが判明した。
- ③インサート金物は、強度性能、経済性、製作性を考慮し、Bタイプを基本として、2本のインサートの一体性を高める目的で、口元と端部付近の2箇所を鋼板で結合するなどの改良を加えた。

本報告は、地下鉄単線クラスを対象とした開発について述べたが、すでに複線クラスのRC平板形および中子(A)型への適用実験⁴⁾も終了しており、営団7号線谷町工区および埼玉高速鉄道への採用が決定している。写真-1は、セグメント継手にアーチ形インサート継手、リング継手に平板形インサート継手を用いた複線RC平板セグメントの実施例である。今後、実工事での施工結果について別途報告する予定である。

6. 参考文献

- 1) 祝田・中山・阿部・佐藤・山森：自動化対応・急速施工用セグメントの開発と施工、トンネル工学研究発表会論文報告集、第2巻、1992.10
- 2) 沼澤・山森・大長・鱈田：RC平板型セグメント用高剛性継手の開発、土木学会第51回年次学術講演会、1996.9
- 3) 沼田・岡本・大長・鱈田：高剛性継手を用いたRC平板型セグメントの継手曲げ試験結果について、土木学会第51回年次学術講演会、1996.9
- 4) 石川・村松・木戸・佐野・宇田川：軟弱地盤用中子型セグメントの改良について、土木学会第52回年次学術講演会、1997.9

表-3 初期ボルト締め付け力と回転ばね定数

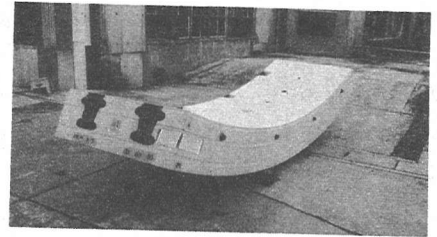
	初期ボルト締め付け力		
	60%	80%	100%
正曲げ	9,100	10,400	11,800
負曲げ	3,500	4,100	4,900

単位：tf・m/rad

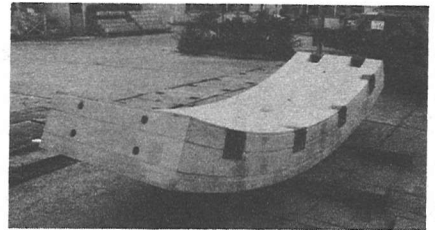
表-4 従来継手との比較
(継手曲げ試験・正曲げ)

	アーチ形インサート継手	従来型ダクトイル継手 ※2
継手の曲げ剛性(回転ばね定数) $K\theta$ (tfm/rad)	10,400(1.4)※1	7,200
ひび割れ発生曲げモーメント M_c (tf・m)	8.8(1.6)※1	5.5
破壊曲げモーメント M_b (tf・m)	24.4(1.4)※1	17.8

※1:従来型に対する比率
※2:井原工区試験値



(坑口側から見る)



(切羽側から見る)

写真-1 インサート継手セグメント