

トンネル軸方向挿入組立ダクティルセグメントの開発

Development of the Axial-Slide Ductile Segment

中島 誠三¹⁾・秋山 真次¹⁾・八坂 光洋²⁾・佐藤 宏志³⁾・向野 勝彦³⁾

Seizou NAKAJIMA, Sinji AKIYAMA, Mitsuhiro YASAKA, Hiroshi SATO, Katsuhiko MUKUNO

We have developed a ductile cast iron segment which is prepared new type structural joints for easy and rapid building of a shield tunnel. Wedge type AS joint between segments and hole-in-anchor type anchor joint between rings made it possible for us to 1 pass building to the tunnel axial direction.

We describe, in this report, about element technology which have developed this time, efficiency evaluation by actual size segments and trial building results in railway tunnel.

Key Words: shield tunnel, ductile segment, AS joint, anchor joint, AS segment

1. はじめに

都市機能の複雑化、地下空間の高度利用に伴い、近年のシールドトンネルは大深度化、大断面化及び長距離化の傾向にある。このような状況の中で、シールドトンネルの覆工に関しても経済性、生産性、安全性及び品質の向上を目的として、施工性のよいセグメントの技術開発が最優先課題となってきた。

このような課題に対して、ダクティルセグメントで従来のボルト方式に替えて「楔の原理」を用いたトンネル軸方向挿入組立セグメント（Axial Slide セグメント、以下ASセグメントと呼ぶ）の開発を行った。

2. ASセグメントの考え方

楔を利用したボルトレスセグメントはRCセグメントで実用化されているが、セグメントを位置決めしたあとでトンネル法線方向に楔を打ち込む方式である。¹⁾

それに対してASセグメントは、セグメント継手としてトンネル軸方向に楔を打ち込む方式であり、セグメント継手、リング継手とも、あらかじめセグメントに取り付けておくため、以下に示す特長がある。

- (1) トンネル軸方向に押し込むだけで組立ができる。
(この組立方式を以下1パス組立と呼ぶ)
- (2) エレクターとシールドジャッキにより組立可能であり、組立用の特別な装置を必要としない。
- (3) 内面平滑な二次覆工省略セグメントが可能である。
- (4) ボルト式以上の継手剛性が得られ、止水性が高い。

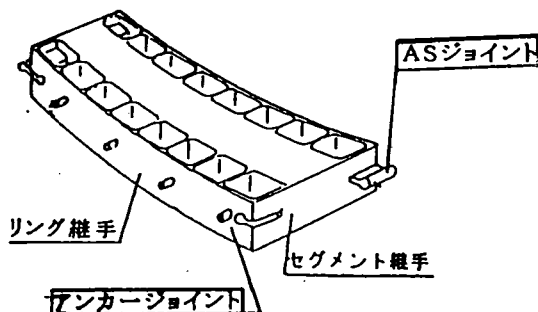


図-1 ASセグメントの概念図

1) 正会員 帝都高速度交通営団

2) 正会員 前田建設工業(株)

3) 正会員 (株)クボタ

- (5) 組立後、トンネルの内外面に継手が露出しない。
- (6) 従来のボルト方式に比べて省力化、急速施工が可能である。また、自動組立にも対応しやすい。

3. 要素技術の開発

3. 1 新型継手の開発

3. 1. 1 セグメント継手 (ASジョイント)

(1) 締結機構

セグメント継手は継手剛性の確保と内面平滑を実現するため、トンネル軸方向に挿入する楔方式の継手構造とし、ASジョイントと名付けた。(図-2)

セグメント本体4隅に設けられた先広がりのテーパ穴およびスリットとAS金物から構成されている。

継手締結は、隣接するセグメントを突き合わせることで形成される先広がりの穴に、同様のテーパをつけたAS金物をトンネル軸方向に挿入することで、隣接セグメントが引き寄せられ締結が完了する。

AS金物とセグメントの材質を表-1に示す。AS金物の楔の角度は、材料間の摩擦係数と楔の原理から1/20の勾配に設定した。²⁾ 図-3にこの設定における金物の単体挿入試験結果を示すが、押し込み時にはAS金物に継手を締結する力(プレストレス)が発生し、除荷しても緩みが生じておらず、方式の有効性が確認できた。

表-1 セグメント及びAS金物の材質(単位: N/mm²)³⁾

	材 質	許容応力度	引張強さ
セグメント	FCD500	190	500
AS金物	FCD900A	(200)	900

注) FCD900Aの許容応力度はAS金物の特性を考慮して便宜的に設定したものである。

(2) 性能の安定化

① メカリリーフ方式の考え方

セグメント継手に要求される性能としては、継手の締結力とASジョイントによる締結力の安定性を確保することである。ASセグメントでは、1) 1パス組立としセグメントの押し込みだけで締結力を確保する、2) 増し締めを不要とする、3) 各構成要素の製作精度による締結性能のばらつきを防ぐため、図-4に示すメカリリーフ式ASジョイントを考案した。

本方式では、AS金物をセグメントに剛に取り付けるのではなく移動可能とし、後端にバックアップ材を取り付けている。バックアップ材は図-5に示すように一定

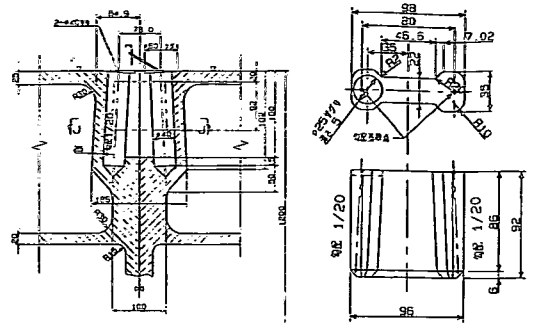


図-2 ASジョイント

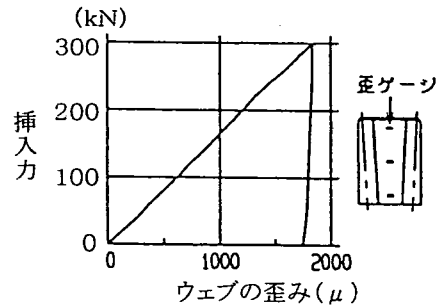


図-3 AS金物挿入試験結果

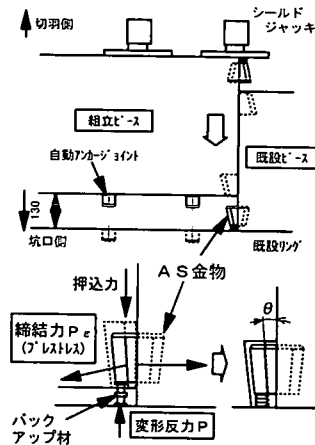


図-4 メカリリーフ式ASジョイント

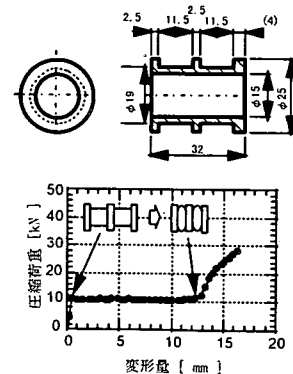


図-5 バックアップ材

の力で座屈変形を続ける特性を持ち、継手の嵌合強さに応じてAS金物が移動することにより均一な締結力を確保できる。図-4にAS金物に働く力の釣り合いを示すが、AS金物に発生する締結力 P_ε は(1)式のようになり、バックアップ材の変形荷重 P に比例する。

$$P_\varepsilon = P \cdot \frac{\cos^2 \theta - \mu^2 \sin^2 \theta}{(1 + \mu^2) \sin^2 \theta} \quad (1)$$

P : バックアップ材の変形荷重

μ : AS金物とセグメントの摩擦係数

θ : AS金物のテーパ角

②プレストレス発生確認試験

メカリリーブの有効性を確認するため実大セグメント（外径 6.6m、桁高 0.25m、セグメント幅 1.2m）を試作し、図-6に示す装置により実験を行った。図-7にASジョイントに発生する締結力の推移を示す。

既設リングへの接近に伴い締結力が増加するが、締結完了の手前で締結力が安定することが確認できた。

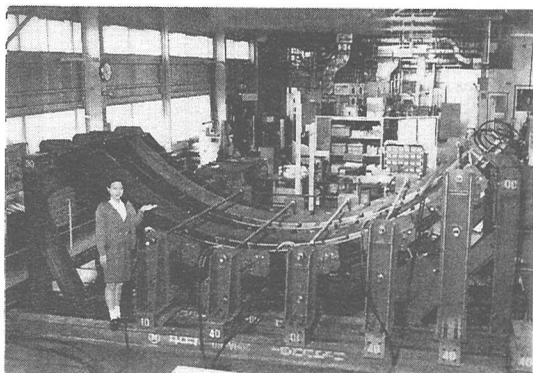


図-6 実験装置

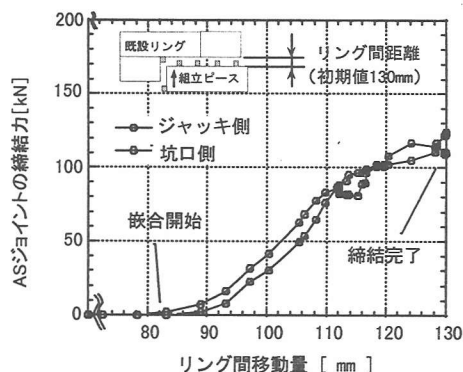


図-7 ASジョイント締結力の推移

③プレストレスのコントロール

バックアップ材の変形荷重は形状寸法を変えることにより自由に設定する事ができる。設定荷重を4種類変えて締結したときのAS金物に発生するプレストレスの変化および継手間の目開き量の変化を図-8に示すが、(1)式のように設定荷重によりプレストレスがAS金物の許容応力度程度までコントロールでき、またプレストレスの増加により継手間目開き量もなくなっていくことが確認できた。

3. 1. 2 リング継手（アンカージョイント）⁴⁾

(1) 締結機構

リング継手は、ホールインアンカーボルトの締結機構を利用して、アンカージョイントと名付けた。このことによりワンタッチ締結と内面平滑化を可能にした。

図-9に示すように、スリーブ、およびウェッジを内蔵したハウジングから構成され、セグメントをトンネル軸方向に押し込むことにより、スリーブがハウジング内に入り、ウェッジによりスリーブが押し広げられ、ハウジングと密着して締結される。このとき、ウェッジのテーパ角はスリーブとウェッジの摩擦角より小さく、またウェッジはボルトと分離しているため、引張荷重が作用してもウェッジが脱落せず締結状態を保つことになる。今回の継手配置では、ハウジングを継手面から突出させて取り付け、継手自身に位置決めガイド機構を持たせるとともに、有効断面の大きいハウジングでせん断力を保持できるようにした。

(2) 性能の安定化

①締結性能の安定化

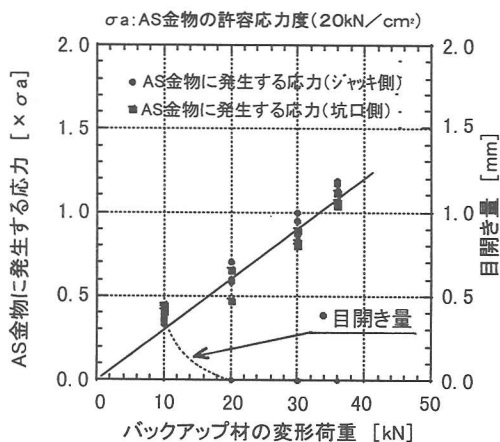


図-8 プレストレスのコントロール

リング継手に要求される性能としては、シールドジャッキ推力で圧入でき、また安定した締結性能が得られることである。これらを満足させるため、ASジョイントと同様な考え方にに基づき、ウェッジを剛に固定せず、一定の力で座屈変形するカラーで支持している。今回試作したアンカージョイントの単体試験結果として締結時の必要圧入力と締結後の引張性能を図-10、11に示すが、剛に固定した場合に比較して、製作精度に関わらず安定した圧入力と引張性能を実現できることが確認できた。

② 継手の相互干渉の防止

ASセグメントの組立では、セグメント継手、リング継手が同時に締結されるため、それらが相互干渉する恐れがある。今回はASジョイントを主、アンカージョイントを従の関係とし、図-9に示すように、継手の軸心がずれても締結可能になるよう、ハウジングを継手面板方向に移動可能とする調心機能を持たせた。図-6に示す実験装置で組立試験を行った結果、確実にセグメント間がメタルタッチしていくことからその有効性が確認された。

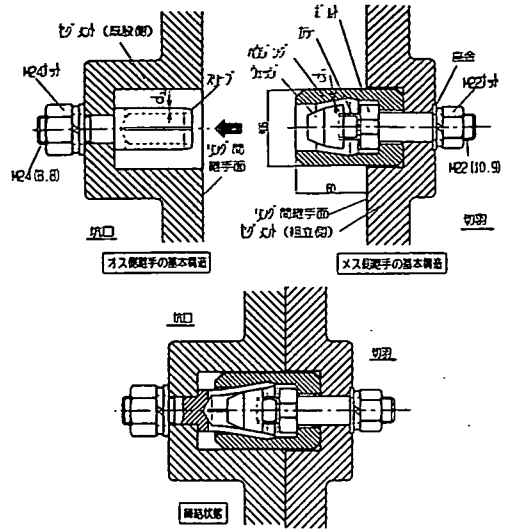


図-9 アンカージョイント

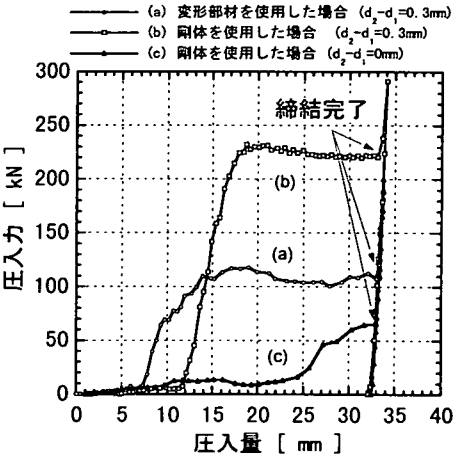


図-10 圧入力の推移

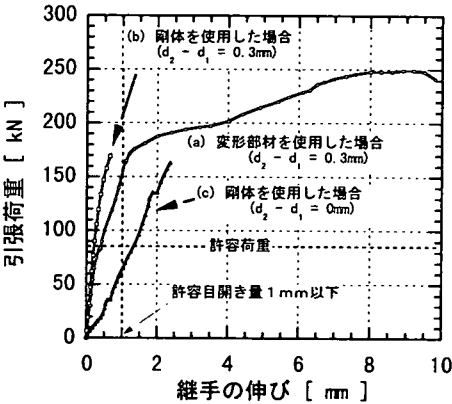


図-11 引張性能

3. 2 ASセグメント設計の検討

3. 2. 1 ASセグメントリングの設計

ASセグメントは継手構造として楔方式を採用したものであるが、ボルト方式と同様にリングの設計は、「はりーばねモデル計算法」の適用が可能と考えられる。つまり、ASジョイント部を回転ばね、アンカージョイント部をせん断ばねに評価して、セグメントの千鳥組及び継手部の剛性を考慮した設計を行う。

3. 2. 2 ASジョイント設計の考え方

セグメント継手として用いるASジョイント部にはボルト方式と同等以上の強度及び剛性を持たせる。

(1) ASジョイントの強度および継手配置の考え方

AS金物はコンパクトな設計を可能とするため材質はオーステンパ球状黒鉛鉄铸件 (FCD900A) とする。AS金物は継手部に作用する断面力 (M、N) に対して主にウェブの引張りで抵抗するが、ウェブ断面寸法 (t、L) は金物を配置した位置における抵抗モーメントより図-12に示す計算式に基づき設定する。

継手配置については正曲げ及び負曲げにおいてボルト方式と同等の継手剛性を確保するため、350H平板型セグメントを用い、ASジョイントの位置を桁高方向で内側：外側を5:9、6:8及び7:7の3水準について継手曲げ試験を実施した。その結果を図-13に示すが、正及び負曲げ共にボルト方式と同等の剛性にするには7:7の位置が最も良いことが分かった。⁵⁾ このことから通常のセグメントでは、桁高中央部に1段配置する事を基本的な指針とした。

(2) ASジョイント部の剛性評価

ASジョイント継手部の回転ばね定数 (K_θ) はボルト方式の村上-小泉理論⁶⁾に準拠して算出することを試みた。このため、ASジョイント部について継手板を図-14に示す様な有効幅を持つ格子梁に置換することとした。有効幅の計算は次の通りであり、この式に基づき回転バネ定数が算出可能となる。

(K_θ = 継手部の曲げモーメント ÷ 継手回転角)

格子梁の有効幅: $be1 = (rw + t2/6) \times 2$

$be2 = L + t2/6 \times 2$

(L : AS金物長さ)

(3) 設計法の検証

ASセグメントのセグメント継手部の設計法を検証するため、350Hセグメントをモデルとして計算、実験及びFEM解析の3種類の方法で回転バネ定数を算出し評価を行った。

FEM解析についてはASジョイント部について、1) 目開き量及び分布の把握、2) ジョイント周辺部の強度や応力集中の把握、3) 金物の位置や長さ等をパラメーターとしたシミュレーション解析を目的とし、解析モデルは図-15に示すような継手曲げ試験と同様の平板型セグメント(1200W×350H)、及びAS金物を3次元四面体要素でモデル化し、継手面にGAP要素を用いて接触を考慮した。

3つの結果を表-2に示す。計算値は金物挿入部分の変形を主としているため最も大きい値となるが、各々の値は近似しており、今回検討した設計法の妥当性が検証された。

3. 2. 3 アンカージョイント設計の考え方

リング継手であるアンカージョイントにもボルト方式と同等以上のせん断強度及び剛性(せん断ばね定数)を持たせる必要がある。リング当たりの継手の数については、

1) アンカージョイントのせん断強度は有効断面の大きいハウジングで保持でき、ボルト方式の2倍以上に設定できる、2) アンカージョイント取付ピッチを従来のボルト方式の2倍に広げても、構造計算上も問題はなく、止水性についても問題ないことから、ボルト方式の1/2を基本とした。

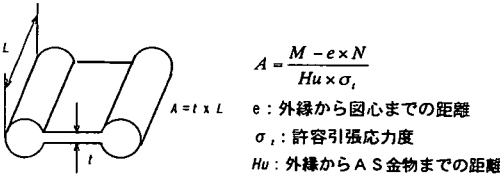


図-12 AS金物

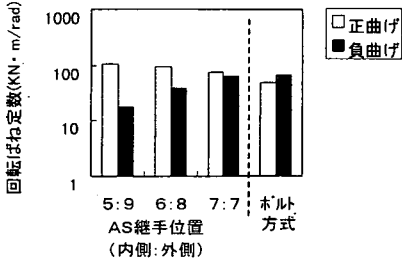


図-13 ASの継手位置と回転ばね定数

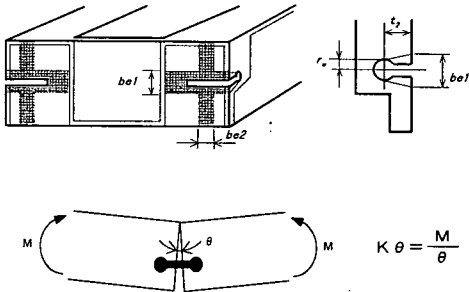


図-14 ASジョイントの剛性計算モデル

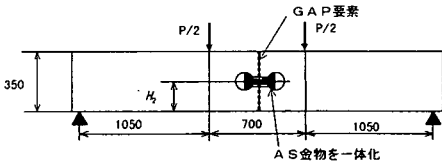


図-15 FEM解析モデル

表-2 回転ばね定数の比較

種別	(MN・m/rad)	
	正曲げ	負曲げ
計算値	120.9	25.6
実験値	106.3	18.0
解析値	79.2	20.7

3. 3 組立方式の開発

3. 3. 1 1パス組立の考え方

ASセグメントでは、エレクターおよびシールドジャッキを用いてセグメントを押し込むだけで組立可能な「1パス組立」をめざした。6分割セグメントでの継手配置および組立方式を図-16 に示すが、あらかじめ継手を取り付けておくことにより従来のボルト方式に比べ工程を短縮化でき、安全な作業が行える。

この方式における主な課題は、押し込むだけで締結できる継手機構と、セグメントの位置決めの簡易化であり、継手機構については前述した機構によりその解決を図った。

3. 3. 2 位置決めの簡易化

1パス組立における組立工程の中では、エレクターによるセグメントの位置決めが重要なポイントとなる。

セグメントの位置決めは、旋回、昇降、摺動とピッチング、ローリング、ヨーイングの6自由度により決定される。しかし、通常のエレクターでは、その操作自由度の制約およびオペレータによるマニュアル操作が基本となることから、ASセグメントでは図-17 に示すガイド機構を設け、軸挿入の簡易化を図った。

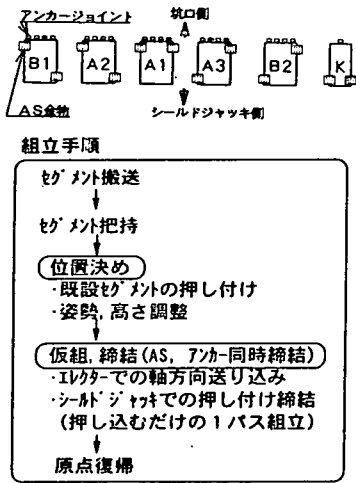


図-16 組立方式

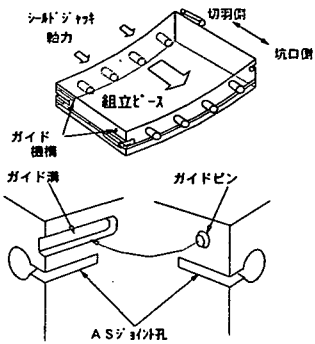


図-17 ガイド機構

4. 実大セグメントでの性能評価

実物大セグメントによる性能評価を行うため、地下鉄単線用セグメント（外径 6600mm、桁高 250mm、セグメント幅 1200mm）を試作し、表-3 に示す評価を行った。

ここでは継手曲げ試験結果について述べる。

試験方法は、セグメント2体をASジョイントで接合し、平面上で両端可動支持として2点集中載荷し、セグメント継手部の剛性を示す回転ばね定数を評価した。

なお、ASジョイントのプレストレスは許容応力度の80%とした。試験結果を図-18、表-4 に示すが、回転ばね定数はボルト方式と同等であり、ASジョイント継手部の剛性は十分確保されることを確認した。

表-4 回転ばね定数

	ASセグメント	ボルト方式
継手部 回転ばね定数 (MN・m/rad)	20.5	16.1

表-3 実物大セグメント性能試験

区分	試験項目	試験目的
継手性能	継手曲げ試験	継手部強度・剛性の確認
	止水試験	継手部止水性能の確認
施工性	リング仮組立試験	仕上り寸法・真円度確認
	標準セグメント組立試験	組立手順、組立精度確認
	Kセグメント組立試験	組立手順、組立精度確認

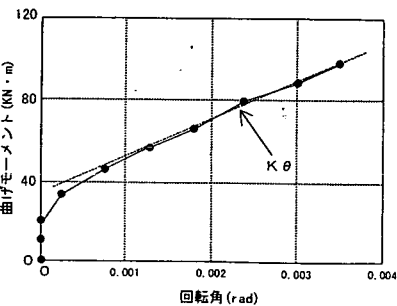


図-18 継手曲げ試験結果

5. 試験施工 7)、8)

最終確認として、実トンネルでのASセグメントの施工性および性能評価を行うため、試験施工を実施した。今回は同一区間でボルト方式も施工を行い比較を行った。

5. 1 試験施工の概要

- (1) 施工場所：営団7号線麻布台B線工区
 - (2) 施工者：前田・白石建設工事共同企業体
 - (3) 線形：平面-320mR、縦断-上り2.4%
 - (4) 土質：上総層群の細砂が主体
 - (5) セグメントサイズ：φ6600×250H×1100W
 - (6) リング数：合計24リング
(標準11R、異形11R、調整2R)
 - (7) 施工時期：1997年11月18日～25日
- 施工状況を図-19に示す。

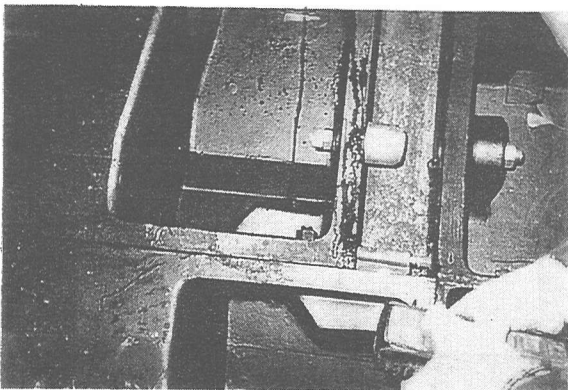


図-19 試験施工状況

5. 2 試験施工の結果

(1) 組立性

- ① ASセグメントは想定した手順で1パス組立が可能であった。また組立には特別な装置は必要なかった。
- ② セグメント継手面のガイド機構およびアンカージョイントのガイドが有効に機能し、セグメントの位置決めが容易に行えた。
- ③ 組立に必要な作業者はエレクターのオペレータ、セグメントの位置確認者およびジャッキオペレータの3名であった。
- ④ ASセグメントは組立時にボルト締め作業が不要で、しかもエレクターから離れて作業ができるため、作業員の安全性が向上した。

(2) 組立時間

ASセグメント及びボルト方式について、セグメントの組立に要する時間の比較を表-5に示す。

表-5 セグメント組立時間

項目	ASセグメント	ボルト方式
対象リング数	15	3
作業内容	セグメント搬送 位置決め 継手締結 リフト復帰	セグメント搬送 位置決め ピ-ス間ボルト仮締め リング間ボルト仮締め リフト復帰 ボルト本締め
平均組立時間 (比率)	25分23秒 (68%)	37分20秒 (100%)
Min.	23分40秒	34分45秒
Max.	27分40秒	41分10秒
作業員数	3人	4人
組立時間・人 (比率)	76.1分・人 (51%)	149.3分・人 (100%)

この結果、組立に要する工数(時間×人)はボルト方式の51%という結果で、その有効性が実証された。

(3) セグメントリングの出来形

① 真円度(図-20)

真円度(上下と左右の内径寸法測定値の差)はASセグメントが1.0~2.5mm、ボルト方式が22.9~17.6mmとなり、ASジョイントの継手剛性が高いことを実証された。

② セグメント間目開き(図-21)

ASセグメントは組立時及び裏込注入後共に、ほとんど0mmで、ASジョイントの締結力によりシール材が圧縮されて、継手面がメタルタッチしている。このことから楔方式の継手が有効に機能してい

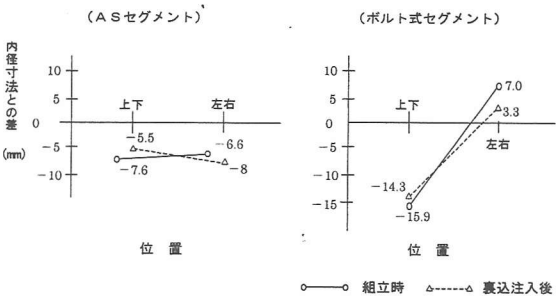


図-20 真円度測定結果(平均値)

ると考えられる。

④止水状況

試験施工部分には約 0.2MPa の水圧が作用していたが、ASセグメント及びボルト方式共に継手部等からの漏水は無かった。

⑤AS金物の応力度

ASセグメント1リングについて、10カ所のAS金物に歪ゲージを貼り、AS金物ウェブの発生応力度を計測した。応力度の傾向としては、組立時に平均的に所定の引張り応力度が発生した。地山に出た後、水圧等が作用すると、なじみ等の影響で約1割低下する傾向がみられたがその後安定し、今回開発したASジョイントのメカリリーフ機構が有効に作用し、ASジョイントはほとんどゆるまないことが実証された。

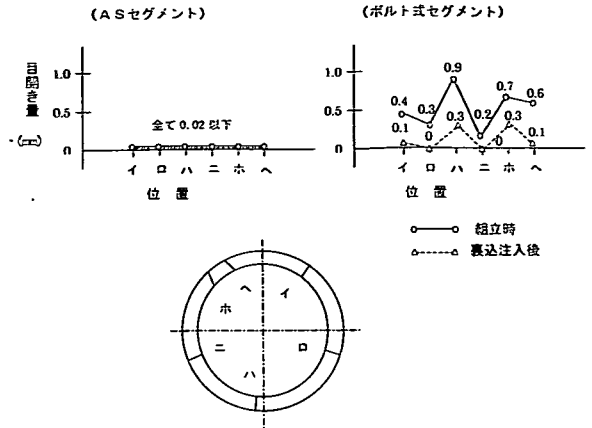


図-21 セグメント間目開き測定結果（平均値）

6. まとめ

今回、施工性のよいダクタイルセグメントとして、継手を事前に取り付けトンネル軸方向に押し込むだけで組立を可能とするASセグメントを開発したが、以下のことがいえる。

- (1) トンネル軸方向に押し込むだけで締結できる継手として、セグメント継手についてはASジョイント、リング継手についてはアンカージョイントを開発し、目標性能を満足することを確認した。
- (2) 事前に取り付けるセグメント継手へのプレストレス導入方法として、メカリリーフ式ASジョイントを開発したが、その有効性が確認できた。
- (3) ASセグメントの設計法として、ASジョイント継手部を所定の有効幅を持つ格子梁に置換することにより「はりばねモデル計算法」が適用できることを確認した。
- (4) 実トンネルでの試験施工により以下のことが確認できた。

- ① ASセグメントはボルト方式に比べて、組み立てやすく、また組立工数を約半分に低減できる。
- ② ASセグメントは、真円度、目開き等のトンネル品質が高く、止水性にも優れている。

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重なご助言、ご指導をいただいた早稲田大学村上名誉教授、早稲田大学小泉教授に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 喜田他：コッター・クイックジョイントセグメントの実施工，トンネル工学研究発表会論文・報告集 Vol. 3, 1993. 11
- 2) 石川他：ダクタイルセグメント用トンネル軸方向挿入型継手構造の開発(その1)，土木学会第50回年次学術講演概要集Ⅲ, 1995. 9
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説, 1996. 7
- 4) 向野他：シールドトンネル用セグメントの継手構造の開発，日本機械学会第74期全国大会講演論文集 Vol. 4, 1996. 9
- 5) 石川他：ダクタイルセグメント用トンネル軸方向挿入型継手構造の開発(その2)-継手曲げ試験-，土木学会第51回年次学術講演概要集Ⅲ, 1996. 9
- 6) 村上他：シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について，土木学会論文集 No. 296, 1980. 4
- 7) 中島他：ASセグメントの試験施工（その1）組立，土木学会第53回年次学術講演概要集Ⅲ, 1998. 10
- 8) 中島他：ASセグメントの試験施工（その2）計測，土木学会第53回年次学術講演概要集Ⅲ, 1998. 10