

施工性の向上を目指した

ダクタイルセグメントの開発とその実用化の研究

DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE  
DUCTILE SEGMENT AND ITS APPLICATION  
TO SHIELD TUNNELING

2003年6月

佐藤宏志

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 シールド工法による都市のインフラ整備	3
1.1.1 シールド工法とインフラ整備	3
1.1.2 シールド工事における施工性の向上	6
1.1.3 シールド工法に用いられるセグメント	10
1.2 本研究の目的	14
1.3 本論文の概要と構成	15
参考文献	18
第2章 施工性の向上を目指したダクタイルセグメントの開発の背景	19
2.1 シールド工事におけるダクタイルセグメントの位置付け	21
2.1.1 ダクタイルセグメントの黎明期	21
2.1.2 中、小口径シールドトンネルへの対応	22
2.1.3 コルゲート型セグメントによる大量供給	23
2.1.4 地下河川、地下調節池への対応	24
2.1.5 複心円シールドトンネルへの対応	25
2.1.6 ASセグメントによる施工性の向上	25
2.1.7 合成構造セグメントによる合理化設計	25
2.1.8 大型、幅広セグメントによるコスト縮減	26
2.1.9 矩形シールドトンネルへの対応	26
2.2 ダクタイルセグメントの組立性の問題点	30
2.2.1 ダクタイルセグメントとRCセグメントの組立性の比較	30
2.2.2 ダクタイルセグメントの組立時間	33
2.3 まとめ	35
参考文献	37
第3章 組立性のよいセグメントの開発とその課題	39
3.1 組立性のよいダクタイルセグメント	41

3.1.1	コンセプト	41
3.1.2	セグメントの組立方式	41
3.1.3	継手の先付け方式と後付け方式	43
3.1.4	セグメントの「ワンパス組立て」とASセグメント	45
3.2	ASセグメントの開発における課題	46
3.3	まとめ	47
	参考文献	49
第4章	セグメント継手の開発	51
4.1	楔式継手の採用	53
4.1.1	楔式継手の原理	53
4.1.2	ASジョイントとAS金物	57
4.2	セグメント継手の要素試験	58
4.2.1	AS金物の形状,寸法および材質	58
4.2.2	ASジョイントの挿入試験	60
4.2.3	ASジョイントの引張試験	62
4.3	セグメント継手への締結力の導入とその制御方法	64
4.3.1	ASジョイントの先付け方式の問題点	64
4.3.2	AS金物への締結力の制御方法に関する検討	66
4.3.3	バックアップ材の開発とその性能試験	71
4.4	まとめ	74
	参考文献	75
第5章	リング継手の開発	77
5.1	アンカージョイント	79
5.2	アンカージョイントの構造と締結機構	80
5.3	アンカージョイントの基本性能試験	84
5.3.1	アンカージョイントの圧入試験	84
5.3.2	アンカージョイントの引張試験	86
5.3.3	アンカージョイントのせん断試験	87

5.4	まとめ	89
	参考文献	90
第6章	継手の強度と剛性の確認	91
6.1	継手の剛性評価	93
6.2	セグメント継手の曲げ試験	93
6.2.1	曲げ試験の方法	93
6.2.2	試験の結果	96
6.3	リング継手のせん断試験	98
6.3.1	せん断試験の方法	98
6.3.2	試験の結果	99
6.4	まとめ	99
	参考文献	101
第7章	ASセグメントの組立性の確認	103
7.1	ASセグメントの組立方式とその手順	105
7.2	模型によるセグメントの組立試験	107
7.2.1	模型による組立試験の目的	107
7.2.2	試験に用いた供試体と試験装置	107
7.2.3	試験の方法	108
7.2.4	試験の結果	110
7.3	実物大セグメントを用いた組立性の確認試験	111
7.3.1	実物大セグメントを用いた組立試験の目的	111
7.3.2	組立試験に用いた供試体	111
7.3.3	組立試験の装置およびその主要な仕様	113
7.3.4	組立試験の方法	115
7.3.5	組立試験の結果	116
7.4	まとめ	119
	参考文献	120

第8章 継手の設計法の検討	121
8.1 継手の設計	123
8.2 セグメント継手の設計法	123
8.2.1 AS金物の強度計算	123
8.2.2 ASジョイントの回転ばね定数	124
8.3 リング継手の設計の要点	131
8.4 まとめ	131
参考文献	133

第9章 実際の現場における施工	135
9.1 現場における試験施工	137
9.1.1 試験施工の経緯	137
9.1.2 試験施工の工事概要	138
9.1.3 試験施工に使われたセグメント	138
9.1.4 試験施工の結果	144
9.1.5 試験施工におけるトンネルの出来形の計測結果	156
9.2 現場における実施工	161
9.2.1 首都圏外郭放水路第4工区の概要	161
9.2.2 DRCセグメント	163
9.2.3 DRCセグメントの組立て状況	168
9.2.4 セグメント継手の締結力の管理	177
9.3 まとめ	180
参考文献	182

第10章 結論	183
---------	-----

謝辞	189
----	-----

論文概要，SUMMARY，研究業績

## 第 1 章 序論



## 1.1 シールド工法による都市のインフラ整備

### 1.1.1 シールド工法とインフラ整備

1955年からの10年間、いわゆる昭和30年代の高度経済成長に伴い、大都市でのインフラ整備が急増した。大都市でのインフラ整備は、鉄道、上下水道、電力、通信などのライフラインの整備が中心であった。これらの建設用地は、主に道路下の地下空間に求められることが多く、そのための当時の建設工事としては、開削工法によるトンネルの構築がほとんどであった。開削工法によるトンネルの建設は、既設の地下埋設物との干渉を避けたりそれらの移設あるいは周辺建物の防護から始まり、土留め壁の構築、覆工、開削、躯体構築、埋め戻しなど多くの工程と工期を必要とした。そのため、開削工法によるトンネル建設工事の増大は、その工事期間中の交通渋滞や近隣住民への騒音・振動などの建設公害を引き起こすことになり、大きな社会問題に発展した。

このような問題を解決するために、それまでの都市におけるトンネル工事の主流であった開削工法が一気にシールド工法に置き代わることになった。この工法の変更は国の施策としても取り上げられた。例えば地下鉄建設に対して、昭和45年4月、地下鉄建設工法の安全化の推進として、「地下鉄道工事等における工事施工箇所の地質、地形を勘案して適当である場合にはシールド工法の採用を図るものとする」ことが決定された<sup>1.1)</sup>。その後、シールド工法は都市におけるインフラ整備のためのトンネル建設には不可欠な工法として位置付けられことになった。その理由は、工事による地上の交通の混乱を最少にでき、既設の構築物への影響がほとんどなく、また、工事そのものの安全性が高いことによる。近年、この傾向は単なる建設公害を回避するばかりではなく、都市における地域住民の快適な住環境の確保や、自然環境の保護という観点からも加速されてきた。

シールド工法は、特に軟弱な地盤に対してその地盤の崩壊や流動を防ぐために、トンネル外径より少し大きい径の円筒を地下数mから数10mに入れ、その中で土砂の崩壊を防ぎながら掘削、掘進および覆工を行うトンネル構築の一工法である。この円筒をシールド、覆工を行う材料をセグメント、掘進を行う機械部分をシールドマシンと呼んでいる。掘削はシールド工法が発明、実用化された時代にはつるはしやショベルによる手掘りであったが、近年はほとんどが機械掘りであり、円盤状のカッターが行う。掘削された土砂が坑口側に運搬されると、切羽には円筒状の空間ができるが、この空間はシールドを常に切羽側に掘進することにより一定に保たれ、シールドの外からの土砂の崩壊を防いでいる。シー

ルドの掘進は通常シールドの内壁に円周状に取り付けられた複数のジャッキをセグメントに押し付けて反力をとり，切羽側に前進する．シールド内の坑口側にできた空間には円周状に複数のセグメントが取り付けられトンネルの構造物としての機能を発揮する．

日本のシールド工事は，1917年に旧国鉄羽越線折渡トンネルの建設に初めて採用されたが，地質が悪いことなどにより工事途中での工法変更を余儀なくされた<sup>1.2)</sup>．その後1939年に旧国鉄関門トンネルの門司側の不良地盤中の掘削に採用され，直径7m，長さ725.8mの手掘りシールドが用いられ，約2年を要したが無事工事が完了した<sup>1.3)</sup>．この関門トンネルのシールド工事に使われたセグメントはねずみ鑄鉄製であり，図-1.1はそれが製造工場でリング状に組立てられた写真を示したものである<sup>1.4)</sup>．この成功が我が国のシールド工事の本格的な始まりとなった．しかしながら，その直後の第2次大戦やその後の混乱のため，日本のシールド工事は中断し，関門トンネルの工事開始から約20年後，ようやく1960年に名古屋市営地下鉄の覚王山トンネルで戦後初めてのシールド工事が行われた．

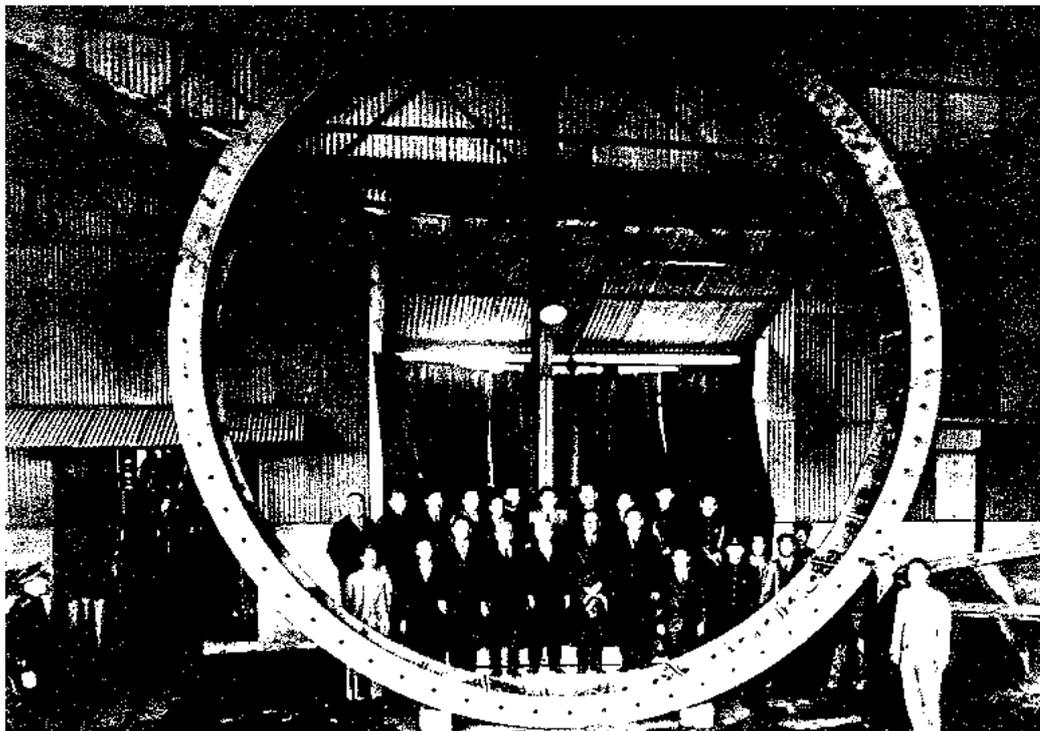


図 - 1.1 関門トンネルに使われたねずみ鑄鉄製セグメントのリング組立て状況

それ以来，日本のシールド工法は飛躍的な発展を遂げ，都市トンネルの構築には不可欠な工法となった．シールド工法の発展は切羽の安定を基本的なコンセプトとした上で，あ

らゆる地盤条件にも対応できるシールド工法を目指し、手掘りから機械掘りへ、圧気工法から泥水式シールドや土圧式シールドなどの密閉式シールド工法へと急速な進歩を遂げた。その後大断面シールドや、楕円、矩形、複円形などの非円形シールドへと発展を続けている。この段階までの特徴的なことは、新しい工法を確実にを行うためのシールドマシンを中心にした進歩であったと言われる。すなわち、機械掘りを行うためのカッターやその駆動装置、切羽の崩壊を防ぎながら掘削した土砂を搬出するためにカッター部分を密閉する技術、あるいは 1 ピースの質量が 1 トンから数トンというセグメントを容易に正確に組立てるための機械装置に関するものなどであった。一方、セグメントそのものに関する進歩発展はほとんど見られなかったと言っても過言ではない。その理由は、急増するシールド工事を安全に完了させて早期に供用するために、シールドトンネルの覆工材料であるセグメントが規格化され標準化されたことによるところが大きいと言われる<sup>1.5)</sup>。1969年に制定された「シールド工法指針」<sup>1.6)</sup>や、1973年に制定された「シールド工事用標準セグメント」<sup>1.7)</sup>は、シールド工法の飛躍的な普及に寄与した一方、セグメントの概念を固定化することになったと考えられている<sup>1.8)</sup>。

一方、バブル崩壊後の日本経済の低迷とそれに伴う国や自治体の財政逼迫により、都市の基盤整備そのものが見直されたり、大幅なコスト縮減が求められることになる。その結果、シールド工法に対しても、従来の工法をベースにしながら経済性を追求し、さらに施工性や安全性なども一段と高める技術開発が必要であるとされた。近年のシールド工法のキーワードとして、工事のコスト縮減を目的にした高速施工、自動化・省力化などの工期の短縮に繋がるものや、二次覆工の省略や長距離施工による立坑やマシン台数の減少などの工事の一部を省略することが挙げられる。また、シールド工事で大きなコストウエイトを占めるシールドマシンやセグメントそのもののコスト縮減も当然求められた。そのほか、2車線ないし3車線の道路を収容する内径10mを超える道路用のトンネルや、都市の洪水対策としての大規模な地下貯溜池や地下河川用のトンネルなどの大断面化、あるいは輻輳する地下空間を避けるための大深度化も近年の傾向である。

コスト縮減を目的にした上述の技術開発のうち、高速施工、自動化・省力化、二次覆工の省略はいずれもセグメントに関係する部分が多く、シールド工法の発展の中で従来ほとんど手がつけられなかったセグメントについても、ようやく技術開発の目が向けられることになる。特に高速施工、自動化・省力化は、シールド工事の中で作業員の数や作業時間が最も多くかかっているセグメントの組立てについて、それらを改善しようとするもので

あり、シールド工事における基本的な部分としての経済性、施工性および安全性を向上するための大きな課題と言われている。

### 1. 1. 2 シールド工事における施工性の向上

シールド工事において切羽における掘削や土砂の搬出が手作業から機械化された後、手作業が残った部分はセグメントの搬入や組立作業である。また、シールド工事の工期を左右する各作業時間の中で大きな部分は、掘削時間とセグメントの組立時間と考えられる。シールド工事における施工性の向上は、これらの作業時間を短縮したり、作業員の数を削減したり、場合によっては無人化することにより作業の効率を上げて、シールド工事における総合的なコスト縮減を図り、同時に作業の安全性を向上することを意図するものである。ここではシールド工事における作業時間の短縮と作業員の数の削減についてその要因を考えてみる。

まず、作業時間の短縮についての要因を、掘進とセグメントの組立ての流れに沿って分析してみると以下のように考えられる。

#### 1) シールドの掘進に関するもの

掘削スピード、掘削土量およびそれらを決定する地盤条件

シールドの推進力と掘進スピード

掘削土の排出および処理スピード、掘削土の保管場所のキャパシティーおよびそれらの作業に関わる作業員の数

#### 2) セグメントの組立てに関するもの

セグメントの受け入れ作業および保管場所のキャパシティー

坑口から切羽へのセグメントの運搬作業とそのスピード

セグメントの組立作業とそのスピード

上記各作業に関わる作業員の数

シールド工事において、全体の工期を左右する大きな要因は、上記のうちシールドの掘削・掘進に要する時間とセグメントの組立てに要する時間であり、この二つの作業は何百回、何千回という繰り返し作業である。この二つの作業が基本的にトンネル構築作業の1サイクルを構成しており、その他の作業はシールドの掘進あるいはセグメントの組立てと平行して行われるか、その前後のサイクルタイム外で行われる作業である。したがって、シールド工事の工期を短縮したり施工効率を上げるためにはこの二つの作業が特に重要な

要素となっている。

セグメントリング 1 リング分の掘進とセグメントの組立てに要する時間は一般的には概ね同じと言われている。この両者のサイクルタイムが短縮できればシールド工事の工期短縮につながるはずであるが、掘進スピードについては「切羽の安定」というシールド工事の大前提があるので限界がある。掘進スピードは密閉式シールドが開発され一般的に採用されるようになった段階で、概ねそれぞれの地盤に最適な掘削・掘進スピードで工事が行われるようになり、時間短縮の要因は現在ではほとんどないと言われている。

一方セグメントの組立時間については、1960 年代に日本における本格的なシールド工事が行われるようになって以来、約 25～30 年間はほとんど変化がなかったと思われる。その原因はセグメント自体の構造、特にセグメントの組立作業に最も関係のある継手構造が変わらなかったことによると考えられる。セグメントの継手構造は従来セグメント継手、リング継手ともボルトによる締結方式が一般的であった。その理由は、トンネル径が最大でも 10m 程度までであり、その場合セグメント継ぎボルトのサイズは最大 M30 程度であるため、人力でボルトとナットを締結できたことによる。また、締結作業も簡単であり、ボルトとナットが最も安価であったことによると考えられる。

施工性の向上のもう一つの要因である作業員数の削減や無人化については、切羽での掘削作業が機械化により手作業から解放されたため、手作業が続けられた部分はセグメントの組立て、セグメントの搬入および段取り作業となった。段取り作業は非定常的な作業であり、これを省力化したり無人化するのは不可能であったと考えられる。また、セグメントの搬入作業はその現場の立地条件によりスペースや作業時間が一律ではなく、これも合理化し難い部分であったと思われる。それに対してセグメントの組立て作業は 1 リングにつき 6～10 ピースの同じようなセグメントを何百リングと組立てるわけであり、定常作業の繰り返しである。したがって、組立作業の省力化や無人化の発想は比較的容易である。

このように、シールド工事における施工性の向上として残された要因はセグメントの組立作業であることがわかる。しかしながら、セグメントの組立作業についての合理化は 1980 年代の前半まではほとんど手がつけられなかった。その原因は、セグメントの組立ては切羽で直接それにあたる作業員数が 3～5 名程度と比較的小人数で行うことができるため、合理化のインパクトが必ずしも強いとは言えない状態であったことによると考えられる。ボルト締結式の継手構造をもつセグメントの組立作業において、その作業時間を短

縮し工期を短縮する方策としては、熟練作業者による手際のよい、また精度のよい作業と作業者に対しての請負制度による労働意欲の高揚によることが多かったと思われる。

しかしながら、1980年代の後半から1990年代にかけてのいわゆるバブル期には、シールド工事による都市インフラの整備が旺盛に行われる一方で、建設業をはじめ産業全体の極端な労働力の不足をきたした。この状況の中、シールド工事のすべての作業が「自動化による無人作業」という見方で見直しが行われた。その背景には以下の3つの要因があったと考えられる。

熟練作業者の極端な不足により作業効率や安全性が低下した。

また、熟練作業者の不足は、トンネルの品質、例えばセグメントの組立精度（セグメントの目開き、目違いおよび真円度など）の低下を招いたり、不適切な取り扱いによるセグメントの割れ、欠け、あるいはそれらに伴う漏水などを発生させるという不安を招いた。

小口径のトンネルでは、セグメントの組立てをはじめとして、トンネル内での作業は狭隘な場所での作業姿勢の悪い苦渋作業となり、また一方、大口径のトンネルでは、ボルトとナットのハンドリングや締結作業あるいはそれに伴う移動が、高さ10m以上での高所作業となり、安全性の確保が困難となる可能性が高くなった。

セグメントの組立作業では1988年に初めて自動組立てが実用化されたのを皮切りに、セグメントの自動組立てへの挑戦が始まった。図-1.2、図-1.3はセグメントの自動組立の一例を示したものであり、この方式は「組立てロボット」と呼ばれた<sup>1.9)</sup>。

この段階での自動組立てはほとんどがボルト締結式の継手構造を持つセグメント対してであり、自動化の程度は、セグメントの供給、セグメントの位置決め、ボルト・ナットの供給、その締結作業などを部分的に自動化するものが多かった。また、自動化の方式は各プロジェクトごとに千差万別であり、セグメントの組立時間を大幅に短縮するまでには至らなかった。その状況は、「自動化の模索」とも言える段階のものであった。完全な自動化が実現しなかった原因は、自動化による効果とそれに必要な投資額との経済的なバランスが取れなかったことによるものと思われる。

また、技術的にはボルト締結を行うためにかなり精度の高いセグメントの位置決め、ボルト・ナットのハンドリングおよびボルトを固定しナットを回転するという締結作業を自動化するために、高度な技術と多くの費用がかかったと言われている。

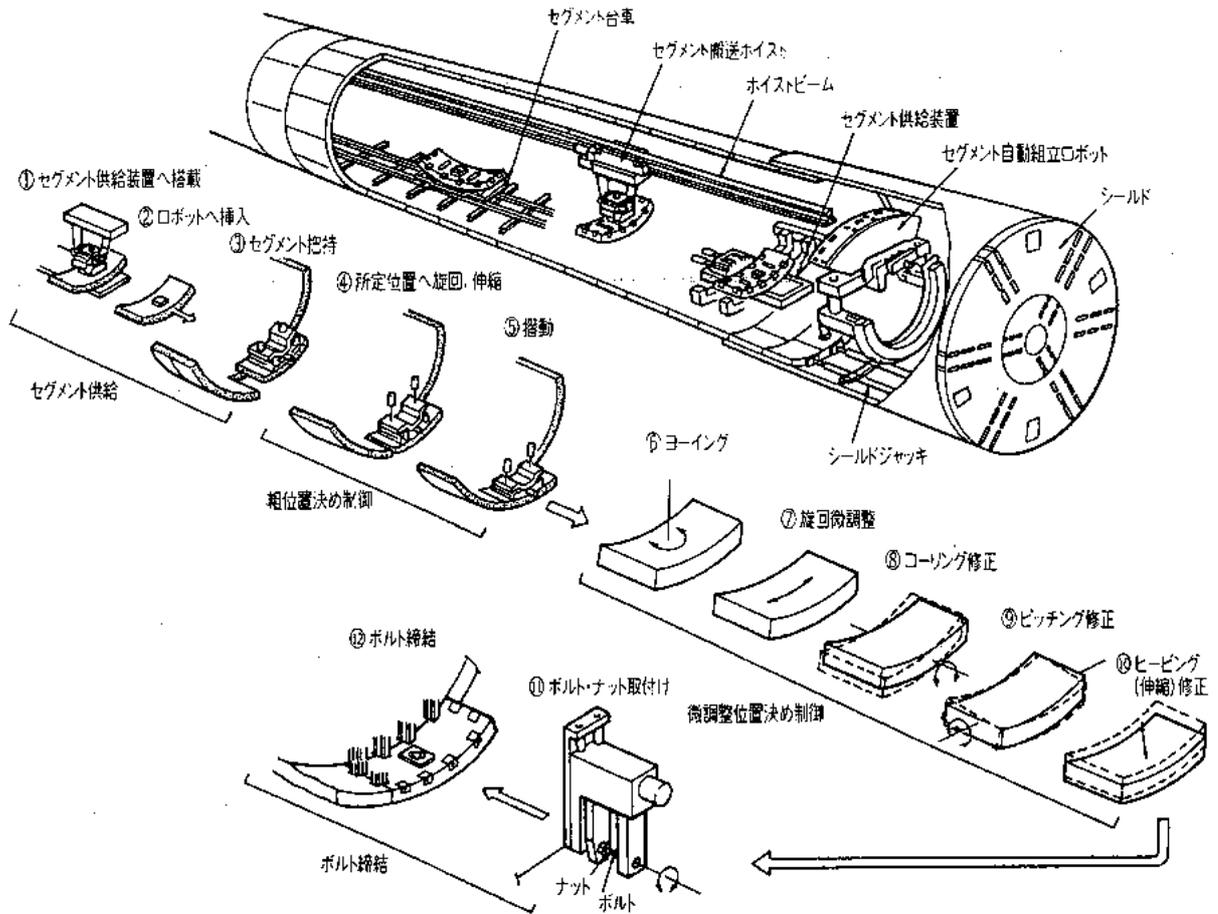


図 - 1.2 ボルト締結式継手をもつセグメントの自動組立ての一例

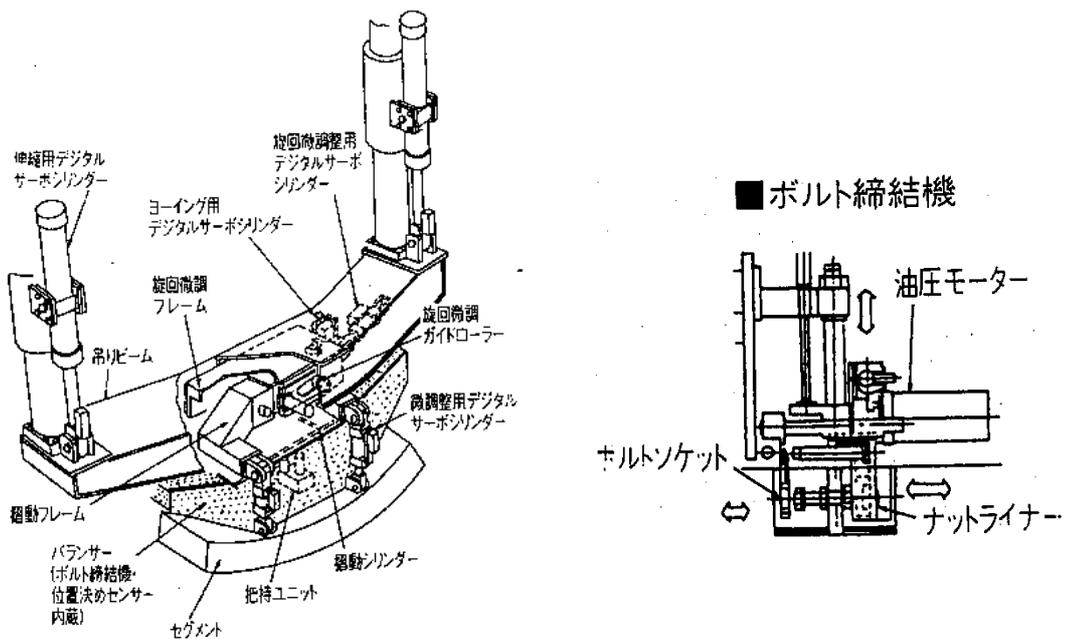


図 - 1.3 自動組立てロボットの構造

シールド工事における施工性の向上は熟練作業者の不足に端を発して、従来の方式で自動化することを目指し、一部では成果を上げたがセグメントの組立てではセグメントの継手構造がボルト締結方式であるが故にやや挫折した感があった。

このような経過を踏まえて、シールド工事における施工性の向上、それによるコスト縮減とは何かを考えてみたい。

シールド工事における施工性の向上を実現するためには、繰り返し同一作業が行われるセグメントの組立てについて着目すべきである。

セグメントの組立時間を短縮することにより、工事全体の工期の短縮が実現でき、その効果は作業員数の低減にも匹敵して、また、各種の経費の削減につながる。

セグメントの組立時間の短縮には、継手構造が従来のボルト締結方式では限界があり、シンプルな構造とシンプルな作業内容が要求される。

シンプルな継手構造をもち、セグメントの組立作業がシンプルなものになれば、セグメントの完全自動組立でも可能となろう。

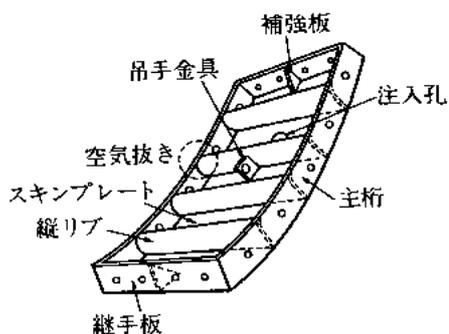
シンプルな継手構造と組立作業は、付帯的な装置や作業を最小限にできる可能性が高い。これらにより、作業の安全性も大幅に向上することが期待できる。

以上のことをまとめると、シールド工事における施工性の向上は、シンプルな継手構造とシンプルなセグメントの組立方式を採用して、組立時間を短縮し、さらにセグメントの組立作業を自動化・省力化することにより得られ、それに付随して、作業の安全性が向上し、総合的なコスト縮減が図れることになるものと考えられる。

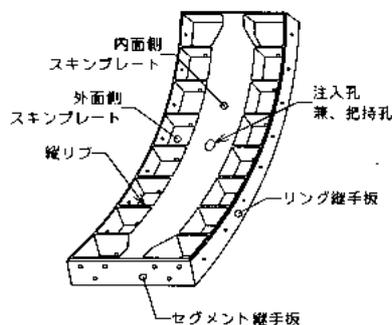
### 1.1.3 シールド工法に用いられるセグメント

シールドトンネルの一次覆工に用いられる部材はセグメントと呼ばれる。トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説によればセグメントの形状は箱形セグメントと平板形セグメントに分類される<sup>1.10)</sup>。また、セグメントを材質別にみると、鋼製セグメント、球状黒鉛鋳鉄製セグメント（以下ダクタイルセグメントと呼ぶ）および鉄筋コンクリート製セグメント（以下 RC セグメントと呼ぶ）に分けられる。箱形セグメントは主桁、スキンプレート（RC セグメントでは背板と呼ぶ）、継手板および縦リブによって囲まれた凹部を有するセグメントの総称であり、鋼製セグメントおよびダクタイルセグメントや、RC セグメントのうち中子形セグメントがこれに該当する。また、平板形セグメントは一般的

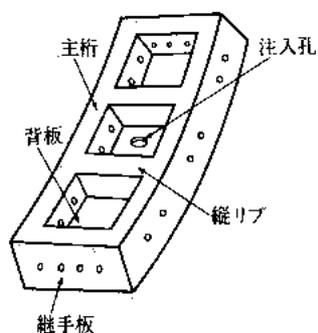
には鉄筋コンクリート製であり，充実断面をもつ平板状のセグメントである．図 - 1.4 はこれらのセグメントの形状と各部の名称を示したものである<sup>1.10)</sup>．



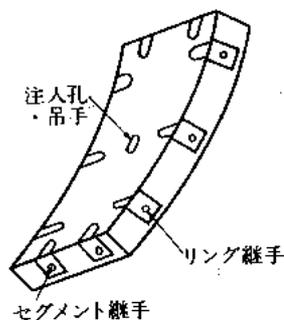
( a ) 鋼製箱形セグメント



( b ) ダクタイル鋳鉄製箱形セグメント



( c ) コンクリート製箱形 (中子形) セグメント



( d ) コンクリート製平板形セグメント

図 - 1.4 各種セグメントの形状と各部の名称

シールドトンネルの歴史によれば，1823 年にフランス人ブルネルがロンドン・テムズ川下に道路トンネルを初めてシールド工法で手がけた工事では覆工材料としてレンガが使われた<sup>1.11)</sup>．その後，1869 年にグレートヘッドが初めて鋳鉄製（ねずみ鋳鉄）のセグメント

を用いて，地下鉄用トンネルを建設した<sup>1.12)</sup>．それ以後，鋳鉄製セグメントは主にイギリスや旧ソ連で多用されることになり，1892 年にフランスでコンクリート製セグメントが出現する<sup>1.13)</sup>までは，セグメントの主要材料は鋳鉄と鋼のメタル系材料であったと言われる．現在でもイギリス，ロンドンの郊外のグリーンウイッチには 1902 年に供用開始されたテムズ川下を通る歩行者用トンネルが現存し，供用されているが，そこには鋳鉄製セグメントが使われている．図 - 1.5 は鋳鉄製セグメントで覆工されたその歩行者トンネルの写真を示したものである．このように，シールド工事が発明された初期の時代にはねずみ鋳鉄製セグメントが多用されたが，本研究で取り扱うセグメントの材質は球状黒鉛鋳

鉄（以下ダクティル鑄鉄と呼ぶ）であり，当時のねずみ鑄鉄とは異なる．



図 - 1.5 ロンドン，グリーンウィッチの歩行者用トンネルのねずみ鑄鉄製セグメント

ダクティル鑄鉄は 1948 年頃，アメリカおよびイギリスでほぼ同時に発明されたものであり<sup>1.14)</sup>，その歴史はまだ 50 数年である．ダクティル鑄鉄はねずみ鑄鉄の溶湯にマグネシウムを添加したところ黒鉛が球状で析出したことからその名が付けられた．ダクティル鑄鉄の機械的性質がねずみ鑄鉄に比べはるかに良好な性質を示したことから，機械部品や自動車部品に使用されるようになった．ダクティル鑄鉄の機械的性質は，引張強さがねずみ鑄鉄の約 2～3 倍，伸びはねずみ鑄鉄ではほとんどないのに対して，ダクティル鑄鉄では 7～10% が得られ，鋼に匹敵する特性を示した．表 - 1.1 はダクティル鑄鉄，ねずみ鑄鉄および溶接構造用鋼材のうちそれぞれ代表的な材料の機械的性質を示したものである．鑄鉄製品は形状や肉厚が自由に成形できたり，空洞部をもつ複雑な形状も中子の使用により簡単にでき，また，材料が比較的安価なことから，機械産業の米と言われるようなベーシックな材料として多用されてきた．ダクティル鑄鉄は，ねずみ鑄鉄とほとんど変わらない製造プロセスや原材料により製造できることから，その機械的性質を生かして急激に用途とその生産量を伸ばしてきている．日本におけるねずみ鑄鉄製セグメントの使用例は，前述した関門トンネル用セグメントが唯一であり，1965 年に初めてダクティルセグメントが採用された以後はすべてダクティルセグメントとなっている．

表 - 1.1 各種材料の機械的性質

規格		記号	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
球状黒鉛鑄鉄 = ダクタイル鑄鉄	2	FCD450	450 以上	280 以上	10 以上
	3	FCD500	500 以上	320 以上	7 以上
	-	FCD900A	900 以上	600 以上	8 以上
ねずみ鑄鉄品	4	FC250	250 以上	-	-
溶接構造用圧延鋼材		SM490A	490 ~ 610	325 以上 (板厚 16 mm 以下)	17 以上

鋼製セグメント，ダクタイルセグメントおよび RC セグメントの特徴は概ね以下のとおりである．

鋼製セグメントは主桁，継手板およびスキンプレーートを溶接で一体にしたものであり，形鋼または J 型鋼の縦リブが溶接によって取り付けられる．主にセグメント外径 4m 以下の中小口径の下水道または電力，通信用トンネルに使用され，比較的安価で取り扱い易い．また，中口径，大口径のトンネルでも急曲線部分や下水道トンネル，地下貯溜池トンネルなどにおける流入部のようにトンネル断面が複雑になる箇所には部分的に使用されることがある．

ダクタイルセグメントは主桁，継手板，スキンプレーートおよび縦リブがすべて鑄造により一体成形される．セグメントの形状としては，箱形のほかに，その横断面が波形をしているコルゲート形のセグメントがあり，このセグメントは外径側の凹部にコンクリートが充填されている．セグメント外径は約 4m から 12m 程度まで幅広く使われているが，強度が強く剛性が高いために，主に軟弱地盤中のトンネルやトンネル断面のうちの重荷重部および急曲線部などの特殊部に使用される．また，鑄造品の特長を生かして，開口部をもつセグメントや切り広げ工法で構築される駅舎などにもよく使われる．

RC セグメントはセグメント外径が約 3 ~ 4m 以上では最も安価なセグメントとして多用されており，適用範囲も広い．セグメントのコンクリート容積 1m<sup>3</sup>あたり，約 100 ~ 400 kg の鉄筋を引張りの主要部材とし，継手には鋼板またはダクタイル鑄鉄製の継手金物を用いられ，そのアンカー筋がコンクリート中に埋め込まれている．RC セグメントはその質量が重いこと，取り扱いによっては，割れや欠けが発生し，それによる漏水の恐れがあることが欠点である．

## 1.2 本研究の目的

本研究は、ダクタイトイルセグメントを対象に、セグメントの組立性を大幅に改善することによって、シールド工事における施工性の向上を目指し、シールド工事の総合的なコスト縮減に寄与するために、ボルト締結方式の継手に代わる新しいセグメントの継手構造を開発し、それを実用化するための研究である。従来のダクタイトイルセグメントはボルト締結方式の継手構造を有し、しかもボルトの本数が多いため、セグメントの組立時間の短縮が難しいという問題があった。本研究の主要なテーマは、ボルト締結式の継手構造に代わる組立性のよい新しい継手構造を開発することであり、それをもったセグメントを用いて実際の現場においてセグメントの組立てを行うことである。そして、最終的には人力によらずにセグメントを自動組立てできるシステムを構築するものである。

ダクタイトイルセグメントはシールドトンネルの覆工材料の一つとして、日本では1965年に帝都高速度交通営団（以下営団地下鉄と呼ぶ）木場駅と大阪市高速電気鉄道（以下大阪市営地下鉄と呼ぶ）4号線に初めて使われた。以後、シールドトンネルの主に特殊な部分、例えば、軟弱地盤部、重荷重部、急曲線部、建物や橋脚の下、河川下などのセグメントの強度が特に要求される箇所および地下鉄の駅舎、換気室、ポンプ所などのように、覆工の一部を開口するために偏った荷重が想定される箇所に使用されてきた。しかしながら、その使用割合はセグメント外径が約4～5m以上のシールドトンネルの総延長距離の約15%程度である。ダクタイトイルセグメントがシールドトンネルの特殊な部分にのみ使用されてきた理由は価格が高いためであったと考えられる。

このような状況の中でシールド工事のコスト縮減や合理化に対してダクタイトイルセグメントの対応がやや鈍くなっていたことは否めない。例えば、RCセグメントを主体にした工区において、RCセグメントについてはその組立ての一部を自動化して施工するように計画されても、ダクタイトイルセグメントはそのリング数が少ないため従来の手作業による組立てを行うといようなことがよくあった。その背景としては、RCセグメントとダクタイトイルセグメントについて、その分割と大きさ、質量、組立装置の把持方式、ボルトサイズおよび本数など、ほとんどの部分で異なるために、セグメントの自動組立てを行う場合にも方式や装置に互換性がないことが挙げられる。

シールドトンネルは今後大断面化、大深度化、長距離化など、その工事が大型化する傾向にあり、それらに対してダクタイトイルセグメントの有用性は従来以上に高まることが予想

される。また、コスト縮減や合理化のニーズが強いのは言を待たない。ダクタイトルセグメントがトンネルの一部に使われる特殊なセグメントという扱いから脱皮し、ダクタイトルセグメントの優れた特性を生かしながら、その施工性や経済性を改善すれば、シールド工事に用いられる一般的なセグメントとして認知され、シールド工事の総合的な合理化やコスト縮減のニーズに十分応えられるものと考えている。

### 1.3 本論文の概要と構成

本論文は、まず、これからのシールド工事においては、経済性、施工性、安全性の向上が求められており、しかもそれらは工法そのものやそれに伴うシールドマシンを中心に開発が行われたシールド工法の初期の段階に対して、その課題がセグメントに移っていることを述べる。また、それらはダクタイトルセグメントにも要求されることを認識しこれに言及する。その中でもセグメントの施工性の向上はその他の二つの要求も併せて実現できることから、大きな目標であることを述べる。次に、シールド工事における施工性の向上は、現在ではセグメントの組立性の向上そのものであり、その点でダクタイトルセグメントがその継手用のボルト本数が多いため問題を抱えていることを紹介する。そして、その問題を解決するためには従来のボルト締結式の継手構造からの脱皮が不可欠であり、セグメントの組立方式にいわゆる「ワンパス組立」を採用すべきであることを示す。その後に一連の開発の内容とその結果を述べる。最後に、研究の大きな目標である実際の現場における施工状況を詳細に述べ、結論を導くものである。

以下に各章の概要を示す。

第1章は序論であり、現在のシールド工事に求められている事項を過去の経緯から導き、本研究の目的と概要とを示す。

第2章では、本研究のテーマである施工性の向上を目指したダクタイトルセグメントの開発の背景を述べる。まずダクタイトルセグメントのシールド工事における位置付けを明確にする。次に、近年のコスト縮減の要請に対して主にセグメントの組立性の改善が求められていることを指摘する。さらに、セグメントの組立性に関して、従来のボルト締結式の継手をもつダクタイトルセグメントの問題点を分析し、その解決策の方向を示す。そして、ボルトに代わる継手構造を採用すれば、セグメントの組立時間を大幅に短縮できることを提

案する。

第 3 章は組立性のよいセグメントの具体的な組立方式を提案する章である。このセグメントの組立方式はエレクターによりセグメントを組立位置まで移動した後、シールドジャッキでセグメントを切羽側から坑口側へトンネル軸方向に押し込むだけで組立てが完了する、「ワンパス組立て」である。シールドジャッキでセグメントをトンネル軸方向に押し込むことからこのセグメントを「Axial Slide Segment=AS セグメント」と呼ぶこととしたが、このセグメントの開発の骨子は、セグメントの自動組立を念頭においたボルト締結方式に代わる新しい継手構造の開発であることを詳述する。

第 4 章からセグメントの開発の具体的な内容を述べていく。第 4 章はセグメント継手の開発に関するものである。まずセグメント継手として採用した楔式継手を紹介し、その継手構造を「AS ジョイント」、その継手を「AS 金物」と呼ぶことにし、はじめに、AS ジョイントの力学的な要素試験の状況とその結果を述べる。次に、セグメント継手をセグメントに予め取り付けセグメントの組立てを行う場合の問題点とその解決方法について詳細に述べる。そしてその解決方法として、継手部材を固定せず可動式とするが自由に動き過ぎないように部材を取り付けることを提案する。この部材を「バックアップ材」と呼び、その性能を詳細に紹介する。

第 5 章ではリング継手の開発について述べる。「アンカージョイント」と呼ぶことにしたリング継手の構造や構成を紹介し、その性能確認試験の状況と結果とを詳述する。

第 6 章は継手の強度と剛性について述べた章である。継手の強度と剛性は、一般的に行われている一連の構造試験を実施し、その結果からセグメント継手の回転ばね定数とリング継手のせん断ばね定数を求めて評価している。

第 7 章ではセグメントの組立てについて、室内におけるセグメントの組立実験の状況とその結果を述べる。実験は平板形状の模型を使った組立試験と実物大のセグメントを使用した組立試験とからなる。室内実験では、セグメントの組立てが目標どおりにできることを確認し、その際の各継手の挙動と締結力の導入状況およびセグメントの組立ての品質について詳細に述べ、この組立方式が妥当かつ合理的なことを示す。

第 8 章は継手の設計法を検討した章である。特にセグメント継手については、はり-ばねモデルに用いられる継手の剛性評価を行うにあたって、継手部の特殊な形状と断面の取り扱い方を検討し、回転ばね定数を算出する際の合理的な計算モデルを提示する。

第 9 章は実際の現場における施工状況について述べた章である。この章は大きく 2 つ

に分けられ、前半は鉄道単線トンネルにおける 24 リングの試験施工について述べ、後半は大断面地下河川トンネルにおける 1002 リングの実施工についてその工事概要、使用したセグメント、施工結果およびできあがったトンネルの品質などについて詳述するものである。特に、本研究のテーマである施工性の向上が図れたこと、継手の性能が所期のとおりであったなどについて重点的に述べている。

第 10 章は本研究で得られた結論を述べた章である。

## 参考文献

- 1.1) シールド工法による鉄道トンネル実施例集編集委員会編：シールド工法による  
鉄道トンネル実施例集，(社)日本鉄道施設協会，p . 3，1974
- 1.2) シールドトンネルの新技术研究会編：シールドトンネルの新技术，(株)土木工  
学社，p . 4，1995
- 1.3) シールドトンネルの新技术研究会編：シールドトンネルの新技术，(株)土木工  
学社，p . 7，1995
- 1.4) 社史編纂委員会編：クボタ 100 年，(株)クボタ，p . 64，1990
- 1.5) 「セグメントの新技术」編纂委員会編：セグメントの新技术，(株)土木工学社，  
p . I，2000
- 1.6) 土木学会トンネル工学委員会編：シールド工法指針，(社)土木学会，1969
- 1.7) (社)土木学会，(社)日本下水道協会 共編：シールド工用標準セグメント，  
(社)日本下水道協会，1973
- 1.8) 「セグメントの新技术」編纂委員会編：セグメントの新技术，(株)土木工学社，  
p . I，2000
- 1.9) シールドトンネルの新技术研究会編：シールドトンネルの新技术，(株)土木工  
学社，p . 113，1995
- 1.10) 土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解  
説，(社)土木学会，pp . 31 ~ 32，1996
- 1.11) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島出版会，p . 12，1981
- 1.12) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島出版会，p . 6，1981
- 1.13) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島出版会，p . 14，1981
- 1.14) 張博，明智清明，塙健三：球状黒鉛鑄鉄，(株)アグネ社，p . 1，1983

## 第2章 施工性の向上を目指した ダクティルセグメントの開発の背景



## 2.1 シールド工事におけるダクティルセグメントの位置付け

ダクティルセグメントによって覆工されたトンネルの総延長距離は 2003 年 3 月現在で約 96 km、セグメントの質量は約 57 万トンになる<sup>2.1)</sup>。また、トンネルの用途別の使用実績は表 - 2.1 に示すとおりであり、鉄道トンネルへの使用実績が約 78%と圧倒的に多く、その傾向は、ダクティルセグメントが最初に使用された 1965 年から約 20 年間はさらに強い。地下河川や道路トンネルへのダクティルセグメントの採用は最近の 10 年程のことであり、それらのトンネルがシールド工法で建設されること自体が近年のことであることから、その件数もまだ少ない。ダクティルセグメントの歴史とともに、その技術的な変遷と主な使用実績の概要を以下に述べる。

表 - 2.1 ダクティルセグメントの用途別の使用実績

	用途						合計
	鉄道	電力・共同	上・下水道	地下河川	道路	その他	
リング数	76,153	9,833	5,119	2,851	908	5,142	100,006
延長距離m	74,984	9,019	4,723	2,781	1,090	3,828	96,425
使用割合%	77.76	9.35	4.90	2.88	1.13	3.97	100.0

### 2.1.1 ダクティルセグメントの黎明期

1965 年にダクティルセグメントが最初に使われたのは、営団地下鉄木場駅と大阪市営地下鉄 4 号線である。前者は単線シールドトンネルを駅舎としたもので、それらの両端部のみを開口して相互に連絡している。後者は複線シールドトンネルを地下鉄の亘り線に使用したもので、一部に換気孔を設けたものである。営団地下鉄木場駅に使われたセグメントを図 - 2.1 に示す。

これらの工事に用いられたセグメントは基本的には箱型であり、主桁およびセグメント継手板は内面側の端部にフランジがついており、それにより内径側の断面性能を確保している。縦リブはセグメントの幅方向の中央部で外径側に少し薄くしているがこの部分にもフランジを設けてある。セグメント継手およびリング継手ともボルト接合である。この種のセグメントは当時、地下鉄工事が開削工法からシールド工法へ転換していく過程で、各工区の軟弱地盤部、重荷重部、河川下などの特殊部分に使用された。このような使用のされ方は約 15 年間続いた。

また、2 本の単線シールドトンネルを構築した後、それらのトンネルをかんざし桁工法



図 - 2.1 営団木場駅で使われた箱型セグメント

やルーフシールド工法で開口し、中央のホーム部を構築する工法が駅舎の構築工法として合計 10 件実施されている。

そのほかにも、地下鉄トンネルの換気室やポンプ所用のセグメントとしてダクティルセグメントが多用された。駅舎と換気室などの共通点はトンネルをセグメントで構築した後に、その一部を取り外して開口部を築造するものであり、メタル系のセグメントの代表的な使用例となっている。

#### 2.1.2 中、小口径シールドトンネルへの対応

1970 年代の後半は地下鉄工事が一段落した結果、セグメントの需要は転換期に入り、小口径の上下水道、燃料パイプライン、共同溝などの用途が主なものとなる。これらの用途には、箱型ではあるが 3 本の主桁をもち、その主桁にはそれまでのフランジがないタイプが使われた。また、香港の地下鉄用にもそのタイプのセグメントが使われた。これらの工事では設計結果の曲げモーメントが比較的小さいため、主桁のフランジが不要なく、そのことによりセグメントの製造コストを下げる事ができた。結果的にこのタイプのセグメントは「経済型」セグメントと呼ばれることになる。これらの一例を図 - 2.2 に示す。

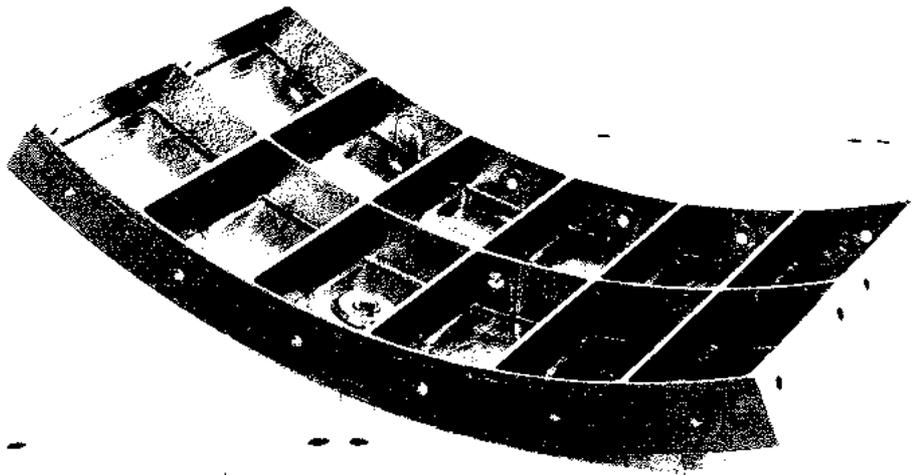


図 - 2.2 経済型箱型 3 主桁セグメント

### 2.1.3 コルゲート型セグメントによる大量供給

1980 年代の後半にはコルゲート型のセグメントが開発され、ダクタイルセグメントの第 3 ステージに入った。このセグメントはセグメントの横断面がコルゲート型（波型）をしているもので、主桁断面は内外面に均等に配置することができ、曲げモーメントが卓越する場合も軸力が卓越する場合もどちらの設計条件にも適応でき、合理的な断面形状をもつ経済的なセグメントである。図 - 2.3 はコルゲート型セグメントの形状を、図 - 2.4 はその断面図を示したものである。この断面形状はセグメントの製造面でも大量生産に適しており、一層のコストダウンが実現され、その後の各都市での地下鉄の新設工事や電力用トンネルや共同溝用トンネルに大量に採用されることになり、いわば汎用的な経済型セグメントと言えるものであった。

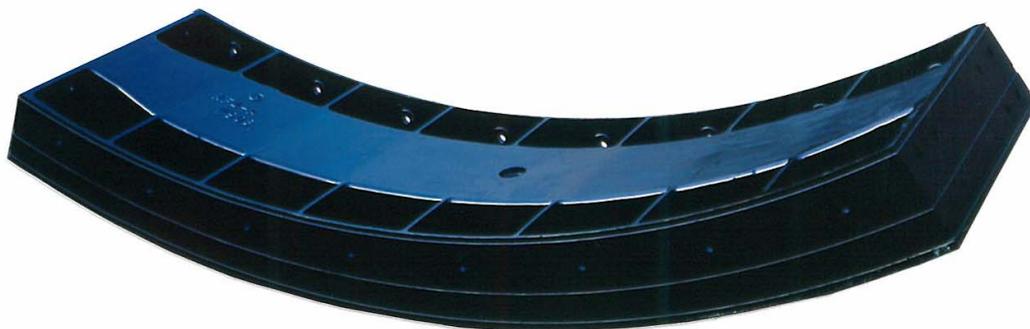


図 - 2.3 コルゲート型セグメント

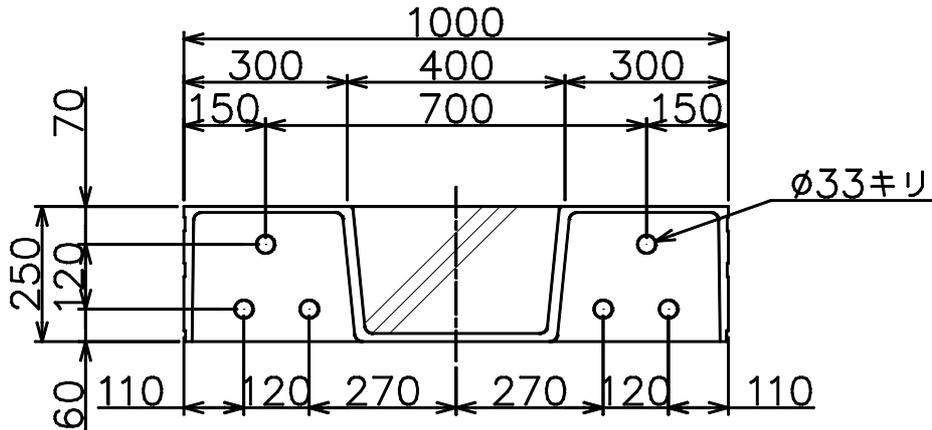


図 - 2.4 コルゲート型セグメントの横断面

#### 2.1.4 地下河川、地下調節池への対応

1990年代の後半から鉄道の新設工事がやや下降ぎみになる中、都市周辺の洪水対策としての地下河川や地下調節池が計画され、これらのトンネルにもダクタイトイルセグメントが採用された。これらのトンネルでは、その中に水が流れたり水を溜めることから、鉄部材の防食対策と水の流れをスムーズにするために、トンネル内面側をコンクリートで充填したダクタイトイルセグメントが用いられた。このセグメントはダクタイトイルセグメントと鉄筋コンクリートとの一部合成構造として位置付けることができ、また二次覆工を施工しないでそのまま使用する、いわゆる「二次覆工省略型のセグメント」としてシールドトンネルの総合的なコストダウンに寄与するものであった。図 - 2.5 は地下河川用セグメントの例を示したものである。

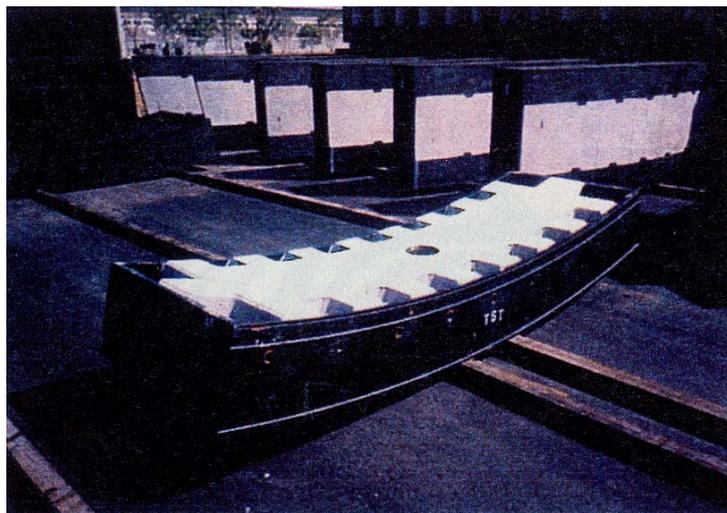


図 - 2.5 地下河川用セグメント

### 2.1.5 複心円シールドトンネルへの対応

1995年には世界で初めての3連マルチシールドによる駅舎の工事に伴い、そのセグメントが開発された。以後複心円シールドトンネルが普及することになる。複心円シールドトンネルは円が交差する部分に柱を設けるため、柱受け部の特殊なセグメント、いわゆる「かもめセグメント」が必要であったが、セグメント本体およびセグメントから柱へのスムーズな応力伝達が可能な形状が追求された。その後、3連マルチシールドトンネルでは2件、DOT工法による2連シールドトンネルでは4件の工事に採用されている。3連マルチシールドによる駅舎を図-2.6に示す。

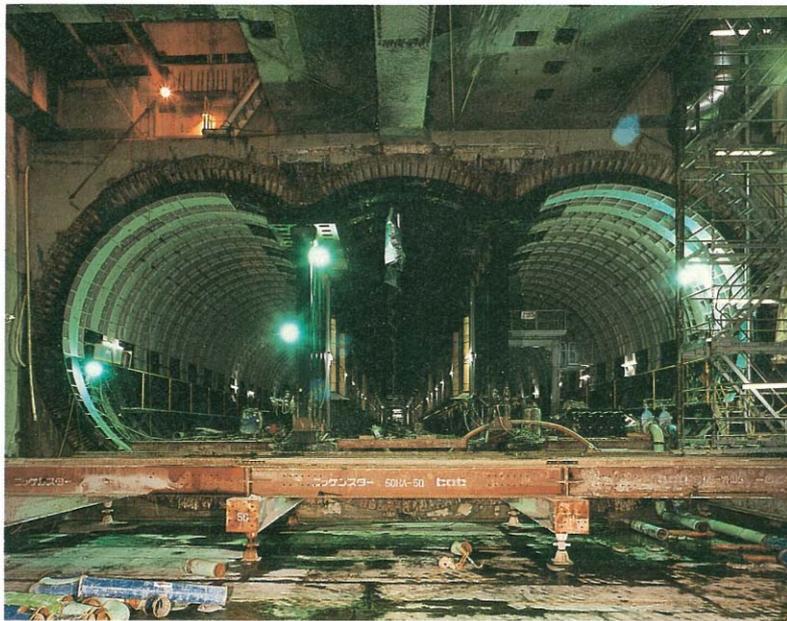


図 - 2.6 3連マルチシールドによる大阪市地下鉄 OBP 駅

### 2.1.6 AS セグメントによる施工性の向上

同時期に、本研究のテーマである施工性の向上を目指したダクタイルセグメント、「ASセグメント」の開発が進められ、1997年に最初の試験施工が実施された。これは、ダクタイルセグメントの継手構造が約30年余り続いたボルト締結式から、いわゆる「ボルトレス方式」に脱皮した最初のものとなった。

### 2.1.7 合成構造セグメントによる合理化設計

2000年にはダクタイルセグメントと鉄筋コンクリートとの合成構造のセグメントが実用化された。このセグメントは、特に大きな強度と剛性を有するものであり、民地下を通る地下鉄や地下河川用のトンネルのセグメントとして用いられている。

### 2.1.8 大型、幅広セグメントによるコスト縮減

2001年にはセグメントの製造コストの縮減およびシールド工事における総合的なコスト縮減を目指して、セグメントの大型化が図られ、セグメント幅を広げることとセグメント分割数を減らす試みがなされた。その例として、セグメント幅が1300mm、セグメント分割角度が86度というものがある。

### 2.1.9 矩形シールドトンネルへの対応

2002年には、ダクティルセグメントとしては、初めての矩形シールドトンネルに対応するセグメントが開発された。このセグメントは矩形断面の地下鉄のわたり線の隣接部に使用されるものであり、土被りが浅いシールドトンネルにおいて、地下空間を有効に利用するものである。また、この矩形シールドトンネル用セグメントでは3連マルチシールドや2連マルチシールドの「かもめセグメント」に相当する柱受け部のセグメントが必要となったが、このセグメントを分割し、その一部をライン生産することにより製造のコストダウンが図られた。図-2.7は矩形シールドトンネルに用いられたセグメントのリング載荷試験の状況を示したものである。



図 - 2.7 矩形シールド用セグメントのリング載荷試験状況

このように、1990年代の後半からのシールドトンネルに対する新しいニーズに伴って、ダクティルセグメントもトンネルの用途、セグメントの形状、セグメントの継手構造などの面で多様化の時代に入ることになる。

表-2.2は今まで述べてきたダクティルセグメントの歴史の中の主なエポックについて、その時期、セグメントの主桁構造、主な用途および技術的な特徴などをまとめたものである。

表 - 2.2 ダクタイルセグメントの変遷と主な使用例（その1）

区分と概略の時期	セグメントのプロファイル	主な用途	特長	主な納入先
1) ダクタイルセグメントの黎明期 1965 ~ 1975	箱型, フランジ付き	重荷重部	特種部に使用	営団木場駅,
		軟弱地盤部	開口部	新御茶ノ水駅, 他
		急曲線部	かんざし桁,	大阪市各工区
		換気室, ホソソ所	ハイプルーフ工法	JR 新橋駅
		単線併設駅	高価格	都営 10 号線
		めがね型駅舎		その他各都市
2) 経済型セグメントによる中, 小口径シールドへの対応 1977 ~ 1985	箱型, 2 または 3 主桁	海底トンネル	軸力が比較的大	名港導水路
		下水幹線	きなトンネルへの対応	成田空港燃料
		パイプライン	低価格セグメント	パイプライン
		海外の地下鉄		各都市下水幹線
				香港地下鉄
3) コルゲート型セグメントによる大量供給 1986 ~	コルゲート型	各都市地下鉄	重荷重部	大阪市 7 号線
		電力, 共同溝	急曲線部	営団 7 号線
				都営 12 号線
				各都市地下鉄
				関西電力
4) 地下河川, 地下調節池への対応 1993 ~	コルゲート型	地下河川	セグメント内面に	神田川調節池
	箱型, 2 または 3 主桁	地下調節池	コンクリート打設	寝屋川調節池
			リングホルト半減	平野川調節池
			ナット先付け型	首都圏外郭放水
			二次覆工の省略	路第 2, 3 工区
				横浜市今井川
				調節池
5) 複心円シールドへの対応	コルゲート型	3 連リブシールド 駅舎	地下空間の有功	大阪市, OBP
	かもめ型	DOT シールド	利用	営団, 白金台駅
			工事の安全性の	都営, 飯田橋駅
			向上	名古屋市 4 号
			異型セグメント	

表 - 2.2 ダクタイルセグメントの変遷と主な使用例（その2）

区分と概略の時期	セグメントのプロファイル	主な用途	特長	主な納入先
6) ASセグメントによる施工性の向上 1997～	コルゲート型	地下鉄	ASセグメント	営団，麻布台
	箱型，2または4主桁	電力	ASジョイントと	関西電力，学園
		地下河川	アウタージョイントによる	首都圏外郭
		下水	組立性の向上	放水路第4工区
			内面平滑	大阪市下水都島
7) 合成構造セグメントによる合理化設計 2000～	コルゲート型	地下鉄	ダクタイルセグメントと	営団，扇橋
	箱型，2または4主桁	地下河川	鉄筋コンクリートとの	首都圏外郭
			合成構造	放水路第4工区
8) 大型，幅広セグメントによるコスト削減 2001～	コルゲート	地下鉄	大分割，少ピース	営団，11号線
	箱型，4主桁		幅広	大阪市8号線
9) 矩形シールドへの対応 2002～	コルゲート型	地下鉄わたり	異型セグメントの	京都市東西線
	箱型，3主桁	線	コストダウン	

ダクティルセグメントは日本におけるシールド工事の初期の段階から使われ、各種のトンネルや地盤条件に対応してきた。トンネル外径が約 4～5m以上のシールドトンネルの覆工材料でのシェアは約 15%ではあるが、軟弱地盤を主体にした日本のシールド工事には不可欠な覆工材料として位置付けられて採用されてきた。その理由は、ダクティルセグメントの特長から以下のとおりであると考えられる。

#### (1) 材料の性質、特性およびセグメントの強度からみた特長

必要な桁高、必要な肉厚が自由に選べることができ、経済設計ができる。

コンクリートに比べ、ダクティル鋳鉄の圧縮強度が高いため、セグメントの桁高を小さくできる。これは掘削断面の低減につながる。

主桁、縦リブおよびスキンプレートの交差部にハンチや曲線部が自由に付けられるので、応力集中を防ぐだけでなく、応力の伝達をスムーズに行うことができる。

主桁、縦リブおよびスキンプレートによって構成される格子形状のためセグメントの剛性が高く、結果としてセグメントリングの剛性を高められる。

耐食性が比較的よい。

本体の水密性がはよいので漏水の心配はない。

#### (2) セグメントの製造面の特長

主桁、縦リブおよびスキンプレートなどが鋳造により一体成形でき、また、それらの交差部にハンチや曲線部を自由に付けたり、ボルト座を付加することが簡単にできる。

各継手板の表面、シール溝、コキング溝およびボルト孔はすべて機械加工により仕上げられるので寸法精度がよい。

#### (3) 施工上の特長

セグメントが軽量であり、運搬や取り扱い時に、通常の衝撃や振動により破損することがないので取り扱いやすい。取り扱い上で起きる割れや欠けがないことからそれらによる漏水の心配もない。

リング継手は固定端の距離が比較的大きな継手板で構成されているので、変形はやや大きい。そのため、リング継手面の止水性を確保する必要から、リング継ぎボルトの本数がコンクリートセグメントに比べて約 2 倍程度と多く、セグメントの組立性を悪くしている。

## 2.2 ダクティルセグメントの組立性の問題点

### 2.2.1 ダクティルセグメントと RC セグメントの組立性の比較

ダクティルセグメントと RC セグメントが同一工区で隣接して使用されることは通常的に行われている。地下鉄複線シールドにおいてこのような例で使用された両セグメントの一般図を図 - 2.8 および図 - 2.9 に示す<sup>2.2)</sup>。また、その諸元と特にセグメントの組立性の要因について比較すると表 - 2.3 のとおりとなる。

表 - 2.3 同一工区で使用されたダクティルセグメントと RC セグメントの比較表

項目	ダクティルセグメント	RC セグメント
セグメントの型	コルゲート	平板
セグメントの寸法		
外径	9500mm	9500mm
桁高, または厚さ	300mm	400mm
幅	1100mm	1200mm
弦長	3214mm	4095mm
セグメントの分割		
Aセグメント	7ピース/リング	5ピース/リング
Bセグメント	2ピース/リング	2ピース/リング
Kセグメント	1ピース/リング	1ピース/リング
セグメント継ぎボルト	M30, 60本/リング	M27, 48本/リング
	M30, 6本/ピース	M27, 6本/ピース
リング継ぎボルト	M27, 65本/リング	M30, 29本/リング
A, Bセグメント用	7本/ピース	4本/ピース
Kセグメント用	2本/ピース	1本/ピース
セグメントの質量	Aセグメント: 1036kg	Aセグメント: 約5100kg

両セグメントの比較表および一般図から以下のことがわかる。

ダクティルセグメントは RC セグメントに比べて、セグメントの分割数が多い。

そのため、セグメント1ピースの弦長は約880mm短い。

また、セグメントの桁高または厚さも低く、セグメント幅も狭い。

それらの寸法諸元とここで使用されたダクティルセグメントはコンクリートが充填されていないことから、その質量はコンクリートセグメントの約1/5程度である。





セグメントの組立てやハンドリングにおいては、セグメントの質量が軽いことと、取り扱いによる割れ、欠けの心配がないことから、ダクティルセグメントは扱いやすく、セグメントの組立てがし易いと言われている。

セグメント継ぎボルト本数は 25%、リング継ぎボルト本数は 221%も RC セグメントより多い。

これらのことから、両セグメントの組立性について総合的に評価すると、以下のとおりとなる。

作業者がある程度熟練すれば、セグメントのハンドリングや位置決め時に RC セグメントに割れや欠けを発生させずにしかも時間をかけずに組立てができると考えられる。したがって、扱いやすさはセグメントの組立時間を左右する大きな要因とはならない。セグメントの組立時間を左右する要因はボルト・ナットのハンドリングとそれらの締結作業であると考えられる。ボルト本数が多いことはセグメントの組立時間が長いことを意味する。

また、テール脱出後のボルトの増し締め作業にも多くの時間と労力を要する。通常リング継手のボルト締結作業には 2 人の作業者がかかる。セグメントの組立作業を早めるために、これを 3 人にすることも可能だが、生産性の悪い作業となる。

ダクティルセグメントのリング継ぎボルトの本数は 1973 年に制定された「シールド工  
事用標準セグメント」<sup>2,3)</sup>の鋼製セグメントに準拠して決定されている。「シールド工  
事用標準セグメント」において、鋼製セグメントのリング継ぎボルトの本数が RC セグメントに比べて多い理由は、リング継手面の止水性を確保するためである。鋼製セグメントのリング継手板は変形しやすいため、止水するのに十分なだけシール材を押しつぶすためにはリング継ぎボルトの本数を増やす必要があるからである。

## 2.2.2 ダクティルセグメントの組立時間

地下鉄単線シールドに使用されたボルト締結式の継手をもつダクティルセグメントについて、セグメントの組立時間を測定した例は以下のようなものであった。

セグメントの諸元

セグメントの外径：6600mm

セグメント継ぎボルト：M27， 8.8， 36 本 / リング（ 6 本 / ピース）

セグメントの桁高：250mm

セグメントの分割：A - 3， B - 2， K - 1 合計 6 ピース / リング

リング継ぎボルト：M27， 8.8， 47 本 / リング（ 9 本 / ピース）

セグメントの組立時間（秒 / ピース）

セグメントの搬送 : 30 秒（ 7.8%）

エレクターによるセグメントの把持と旋回 : 90 秒（ 23.4%）

セグメントの位置決めおよびボルト締め : 215 秒（ 55.8%）

エレクターの旋回，復帰 : 50 秒（ 13.0%）

合計 : 385 秒（ 100%）

なお，セグメントの位置決めとボルト締めは平行して行われる作業なので，ここでは作業時間を分離した表現をしていない．

このように，ボルト締結式の継手をもつダクタイルセグメントの組立時間は，その約半分以上がセグメントの位置決めとボルト・ナットの締結作業にかかっており，セグメントの組立時間の短縮にはこの作業時間の短縮が必要ながわかる．この時間の短縮は継手用ボルトの本数を減らすことを意味し，特に本数が多いリング継ぎボルトが検討の対象となる．

リング継ぎボルトを減らすことは地下河川用セグメントで試みたことがある．地下河川用セグメントは，トンネルの内面側はコンクリートで充填されるため，リング継手面の剛性はダクタイルセグメントが未充填で使われる場合に比べて大きく，継手板の変形はほとんどないと考えられる．したがって，地下河川用セグメントの場合には止水性を確保するためにリング継ぎボルトを多くする必要はない．

そこで，リング継ぎボルトを同じ工区で使用される RC セグメントと同じ本数とし，さらに，ボルト・ナットのハンドリング作業を減らすためにナットをリング継手板に予め取り付けたいわゆる「インサート」型とし，併せてこの部分はコンクリートで充填することによりリング継ぎボルト用のボルトボックスを半減することを考えた．この地下河川用セグメントは外径 11800mm，桁高 450mm，であり，リング継ぎボルトはM27， 10.9， 36 本である<sup>2.4)</sup>．リング継ぎボルトのピッチは約 977mmで，従来の 450mm前後の 2 倍強となり，リング継ぎボルト本数を半減したことになる．図 - 2.10 はリングボルトを半減

し、片側にナットを内蔵したセグメントを示した図である。

このセグメントの組立てはリング継ぎボルトの半減により、組立時間にかなりの短縮が図れることを期待したが、実際のセグメントの組立時間はセグメント1ピースあたり約7～8分程度であり、わずかな時間短縮にとどまった<sup>2.5)</sup>。その主な原因は、リング継ぎボルト用のナットをインサート型にしたことによりセグメントの位置決めにかかったこと、高所でのボルトのハンドリングに時間を要したことであると考えられた。

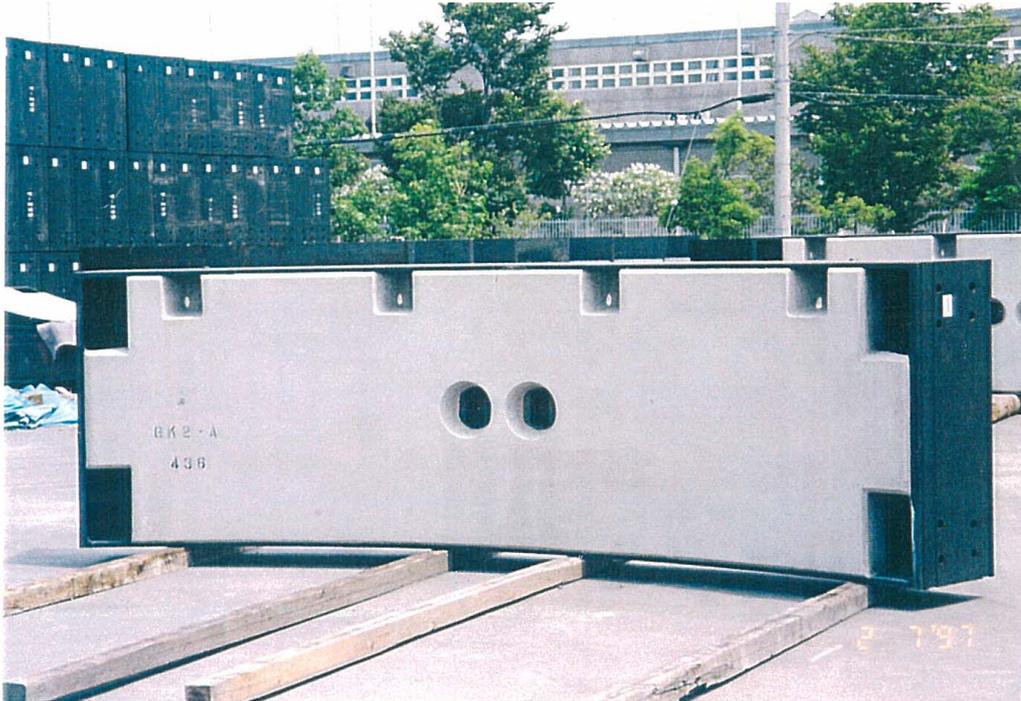


図 - 2.10 リングボルトを半減しナットを内蔵した地下河川用セグメント

この結果から、継手構造をボルト締結式としたままではセグメントの組立時間の短縮には限界があり、ボルト締結方式に代わる継手構造が必要であることがわかった。また、その継手構造は、継手の締結が瞬時に終わるいわゆる「ワンタッチ式」の組立てができる構造が望ましいとの結論に達した。

### 2.3 まとめ

本章ではまず、従来のダクタイルセグメントについて、シールドトンネルの覆工材料としての位置付けを、その使用実績と特長から述べた。ダクタイルセグメントはシールド工

法によるインフラ整備の変遷に応じて、その用途やセグメントの形状あるいは機能を変えて、次第に多様化してきている。しかしながら、シールド工事の一工区のすべてにダクタイトイルセグメントが使われた事例はほとんどなく、その使用割合は工事に用いられたセグメント全体の約 15%程度であった。その使用される条件は主に軟弱地盤部や重荷重部など発生断面力が大きくなる箇所や駅舎、換気室およびポンプ所などのように、セグメントのリングの一部を開口するような特殊な箇所であった。その理由はコンクリートセグメントに比べ強度やじん性が高い一方で、価格が高いためであったと考えられる。

次に、ダクタイトイルセグメントの問題点として、継手用のボルト本数が多いために、セグメントの組立性が悪いことを指摘した。その原因は主にリング継ぎボルトの本数にあるが、リング継手板の変形性が大きいことから、止水性を確保するためにはその本数が多くなるを得ないことによる。さらに、ダクタイトイルセグメントの組立時間の測定結果から、セグメントの位置決めとボルト締結の時間が組立時間の約 56%を占めていることを指摘した。このことからリング継ぎボルトの本数を減少すればセグメントの組立時間が削減できると考え、地下河川用セグメントについて従来約 1 / 2 にリングボルトを減らすことを試みたが、この工事の場合には、大口径トンネルで、かつセグメントの手作業による組立てということもあり、1 ピースあたりのセグメントの組立時間は従来と余り変わらなかった。

最後に、これらの検討結果として、セグメントの組立時間の減少のためには、従来のボルト締結式の継手構造では限界があることを認識し、組立性のよいセグメントを開発するためには、その継手構造を検討することが最も大きなテーマとなることを述べた。

## 参考文献

- 2.1) (株)クボタ編：ダクタイルセグメント納入実績表，(株)クボタ，p．1，2003
- 2.2) シールド工法による鉄道トンネル実施例集編集委員会編：シールド工法による鉄道トンネル実施例集（その3），(社)日本鉄道施設協会，p．358，1994
- 2.3) (社)土木学会，(社)日本下水道協会 共編：シールド工事用標準セグメント，(社)日本下水道協会，pp．32～33，1973
- 2.4) 宇賀田健，相場勉，渡邊崇志：内水圧対応・二次覆工省略型ダクタイルセグメントの  
開発，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，pp．1242～1243，1995
- 2.5) 江口公道，川端僚二，野沢隆一，今野勉，浜田要：二次覆工省略型ダクタイルセグメントの施工結果報告，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，pp．150～151，1999



### 第3章 組立性のよいセグメントの開発とその課題



### 3.1 組立性のよいダクタイトイルセグメント

#### 3.1.1 コンセプト

地下鉄単線シールドトンネルにおける，ボルト締結式の継手構造をもったセグメントの組立て時間の測定結果から，施工性の向上を目指すダクタイトイルセグメントのコンセプトを以下のように考えることにした．

継手部材や部品はできるだけ少ない方がよい．

継手部材や部品はすべてセグメント本体に取りつけておき，従来のボルト締結式継手のようにそれらを締結位置までもってくる一切のハンドリングをなくす．

セグメントの組立ておよび継手の締結作業は，できるだけ単純な動作が望ましい．例えばシールドジャッキのようなトンネル軸方向の推力を利用することがよいと考えられる．その組立てのイメージは，セグメントの組立てと継手の締結が瞬時にかつ同時に完了することである．

この組立方式が実現できれば，ボルト締結式の継手をもったセグメントの組立てにおいて，組立時間の約 56%を占めていたセグメントの位置決めとボルトの締結作業が約 1/3 程度になることが期待でき，セグメントの組立時間が全体では約 35%程度短縮できるものと思われる．なお，セグメントの組立時間を短縮する要素として，セグメントのエレクトターによる把持作業がある．従来は，セグメントの注入孔栓のネジを利用してネジ付シャフト（つり金具）によりエレクトターに把持していたが，この作業はシャフトのネジ締結のための回転動作やシャフトのエレクトターへの取り付けに時間と人手を要しており，この作業も検討する必要がある．

#### 3.1.2 セグメントの組立方式

従来のダクタイトイルセグメントの組立てにおける問題点の分析から，開発すべきセグメントの組立方式は以下のとおりであるべきと考えた．

セグメントの把持方法はネジ式ではなくグリップを引張り込む方法がよい．

セグメントを組立てられる位置までもってくる方法は，従来どおり，エレクトターにより把持して，回転した後，セグメントの位置および姿勢の制御を行う方法でよい．

セグメント間の組立てとリング間の組立てには，従来の継手のボルト・ナットと同様に

継手部の剛性を保持し、また、シール材を押しつぶすために必要とされる締結力が必要である。

この締結力はエレクターの旋回力や摺動力で与えるだけでは不十分と考えられる。シールドマシンのシールドジャッキの推力は、通常、切羽の  $1\text{m}^2$  あたり約  $1000\text{kN} \sim 1500\text{kN}$  を装備しており、この推力を継手の締結に利用することが考えられる。従来のセグメントの組立てでは、セグメントの組立てを行っている間は、当該セグメント位置のシールドジャッキは解放状態となっているが、それらのシールドジャッキをセグメントの組立てに利用することには問題がないと考えられる。

このようなセグメントの組立方法を採用する場合、セグメント継手およびリング継手に必要な機能や動作を検討すると概ね以下のとおりと考えられる。

セグメント間においては、組立てられるセグメントが、すでに組立てられその端面をシールドジャッキで支持された隣接するセグメントに引き寄せられ、継手面に貼付されたシール材が完全にシール溝内に収まり、継手部に所定の曲げ剛性を付与できるような締結が必要となる。シールドジャッキの推力の方向はトンネルの軸方向であるから、これにほぼ直角の方向に締結力が発生するような機構が必要となる。

リング間においては、組立てられるセグメントが既設のリングに接触し、継手面に支圧力が発生した時点で両継手板が確実に締結されることが必要である。これにより、従来のリング継ぎボルトに相当するせん断耐力と引張耐力を付与させる。

セグメント継手とリング継手の動きは、セグメント間が優先する必要がある。この関係は従来のボルト締結式の継手と同様である。

これらの継手部品は予めセグメントに取り付けることによって、部品のハンドリングや締結作業を省略する。

以上のようなセグメントの組立方式とそれに必要な継手構造をイメージしたものが図 - 3.1 である<sup>3.1)</sup>。

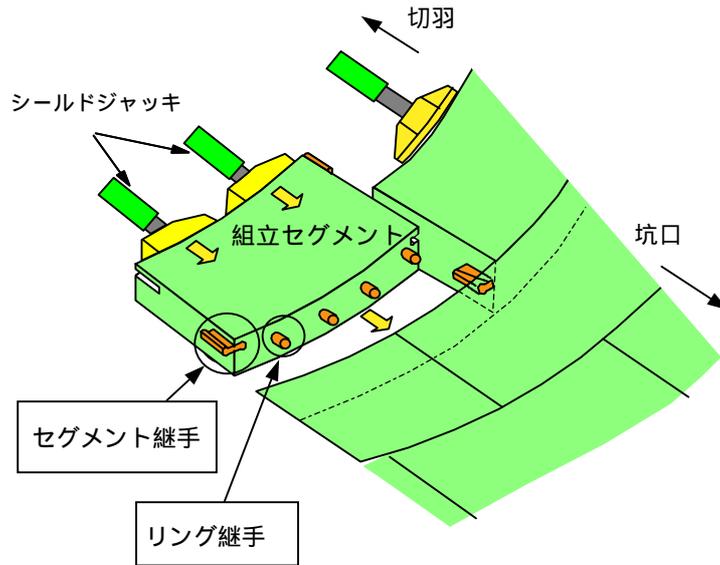


図 - 3.1 セグメントの新しい組立方式のイメージ

### 3.1.3 継手の先付け方式と後付け方式<sup>3.2)</sup>

セグメントの組立性を第一義に考えた継手構造は、セグメントの組立て前に必要な継手部品を予めセグメントに取り付けておくことが望ましい。ここでは、このように継手部品をセグメントに予め取り付けておく方式を「先付け方式」と呼び、従来のボルト締結式の継手のように、セグメントを組立て位置までハンドリングした後に継手部品を供給する方式を「後付け方式」と呼ぶこととする。

開発すべきセグメントの継手構造として「先付け方式」が可能か、あるいは先付け方式の方が大きなメリットがあるかの検証をまず行う。図 - 3.2 はセグメントの組立方式について、「先付け方式」と「後付け方式」のイメージを示したものである。また、両方式の特長を比較したものが表 - 3.1 であるが、両方式の差は以下のように明確である。

「先付け方式」はセグメントの組立てと継手の締結が同時に行え、かつ瞬時に完了する。

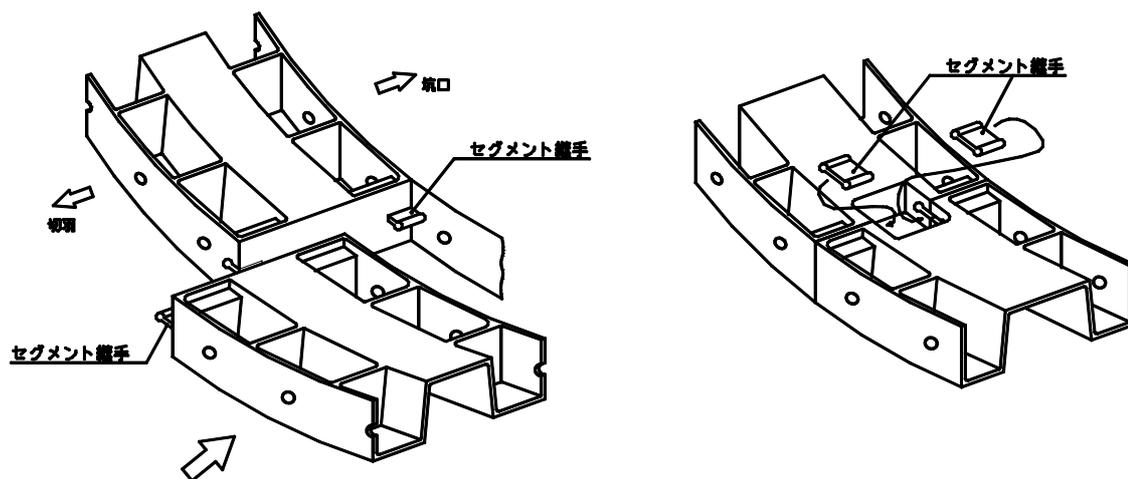
「後付け方式」はセグメントの位置決め、継手のハンドリングおよび継手の締結作業の3段階となり、作業が複雑であり、時間がかかる。

「先付け方式」は継手への締結力の導入状況が明確でなく信頼性に欠ける面があるのに対して、「後付け方式」は締結の管理がしやすく、増し締めも可能である。

「先付け方式」は継手がセグメント内面に露出することがない。そのため、セグメント本体に従来のセグメントのボルトボックスのような開口部を必要としない。このこと

は、セグメント内面にコンクリートを打設すれば内面が完全に平滑となるセグメントが得られることを意味する。

「後付け方式」は継手のハンドリングや締結作業のためにセグメント本体に開口部を必要とし、それにより、セグメントの主桁の一部が欠損状態となったり、セグメントの面を完全に平滑にすることができない。



a) 継手部品の先付け方式

b) 継手部品の後付け方式

図 - 3.2 継手の先付け方式と後付け方式

このように「先付け方式」は継手の性能を確保することやその信頼性について、不確実性があるものの、セグメントの組立性については、「後付け方式」に比べてはるかに優位であり、また、トンネルを構築した後に開口部を埋めて内面を平滑にする必要がないなど、セグメントの施工性の向上ばかりでなく、総合的なコストの縮減が図れるなどのメリットが期待できる。これらのことから、「先付け方式」が目指すべき組立方式であると考えた。

表 - 3.1 継手の先付け方式と後付け方式の比較表

項目	継手部品の先付け方式	継手部品の後付け方式
1) セグメントの組立手順	エレクターの旋回と摺動	同左
	セグメントの位置決め	同左
	エレクターの摺動	同左
	シールドジャッキの押し込み	シールドジャッキによる押え
		継手のハンドリング
2) 継手の締結		継手の締結
	セグメントの組立てと同時に	締結装置で締結
	継手の締結力にバラツキ	継手の締結力は安定
3) 付帯装置	継手の増し締めができない	継手の増し締めができる
	不要	継手の格納庫
		継手のハンドリング装置
4) 自動組立対応		継手の締結装置
	位置決め精度を上げる	継手の把持, ハンドリング
		継手の位置決め
5) セグメントの構造		継手の締結
	特に問題なし	セグメント継手部に欠損が生じる
6) その他	継手が内面に露出しない	継手が内面に露出する
	セグメントの内面が平滑	セグメントの内面は平滑でない

### 3.1.4 セグメントの「ワンパス組立て」と AS セグメント

継手部品を先付けした方式によるセグメントの組立方法を具体的に以下のように考えた。シールドマシンのエレクターにより把持されたセグメントは旋回後、既設のセグメントのセグメント継手面に押し当てられながら位置決めされる。この場合、リング継手面は既設のリング継手面からおよそ 100 ~ 150mm 離れた状態にある。

その後、組立てられるセグメントはその姿勢を制御するためにピッチング、ローリングおよびヨーイングの 3 つの調整が行われる。

エレクターの摺動ジャッキによりセグメントを坑口側へ約 50 ~ 100mm 移動する。

最後に、シールドジャッキでセグメントを坑口側に押し込むことにより、セグメントの組立てが完了する。

この方式によるセグメントの組立ては、エレクターによりセグメントを組立て位置まで持ってきた後は、シールドジャッキによりトンネル軸方向の坑口側への押し込み動作だけでセグメントの組立てが完了することから、この組立てはいわゆる「セグメントのワンパス組立て」と呼ぶことができる。このセグメントの組立方式がセグメントをトンネル軸方向にスライドさせることから、このセグメントを「Axial Slide Segment = AS セグメント」と呼ぶこととした<sup>3.3)</sup>。

### 3.2 AS セグメントの開発における課題

前節で、施工性の向上を目指したダクティルセグメントの組立方式は、「ワンパス組立て」であるべきことを述べたが、このセグメントを実現するためには、セグメントの組立方式と継手の構造を確立させることが必要である。これらは単独には考えられないものであり、セグメントの組立方法をまず考案し、次にその方法に則した継手構造を検討した上で、その継手構造により組立てが可能か、継手に必要な締結力は確実に導入できるか、組立ての作業性はよいかなどを検証するようなことが必要となる。本節では、セグメントの組立方法、セグメント継手およびリング継手の開発における課題について、特に、セグメントの組立方法と継手構造との接点となるものの概要を述べる。

#### (1) セグメントの組立方法の課題

AS セグメントの1リング分の組立てにおいては、最初のAセグメントと最後のKセグメントを除いて、セグメント間の継手部品が取り付けられべき箇所は既設セグメント側の一方のみとなる。AS セグメントの組立ての最終段階はシールドジャッキで押し込むことになるが、このようにセグメント継手の締結力がセグメントの両端でアンバランスであっても、セグメントの組立てができるか。

セグメントの位置決め精度はどの程度が必要か。位置決めのために時間がかからないか。それを補足する手段はあるか。

セグメント継手およびリング継手を締結するための力は、シールドジャッキの推力で十分であるか。

セグメント継手に必要な締結力の向きとセグメントの組立てに使うシールドジャッキの推力の向きはほぼ90度異なるが、このような継手の締結機構が開発できるか。

#### (2) セグメント継手の課題

シールドジャッキの推力を利用してセグメント間に締結力が発生する継手の締結機構を開発できるか。

継手を先付けした場合にセグメントの組立ては可能と考えられるが、セグメント継手に締結力を導入し、かつそれを制御することは可能か。

セグメント継手に導入された締結力は、緩んだり抜けたりせずに長期間保持できるか。

### (3) リング継手の課題

リング継手の組立て完了は、継手面が接触しシール材を完全に押しつぶし、継手面の目開きがゼロとなる状態であるが、リング継手の締結の完了がこのタイミングとマッチングするか。また、締結のタイミングのバラツキを吸収する機構が可能か。

リング継手の締結がセグメント継手の締結を阻害してはならない。したがって、セグメント継手面とリング継手までの距離のバラツキを吸収できる機能、いわゆる調心機能が必要である。この機能が付与できるか。

リング継手の締結に必要な力がジャッキ推力に比べて十分小さくできるか。

このような課題の検討と解決には、両継手が具体的に開発された時点で、模型あるいは実物大のセグメントにその継手を取り付けて、実際の状況に近いセグメントの組立試験を行い、両継手の挙動および組立性を確認する必要がある。

## 3.3 まとめ

本章ではまず、開発すべき組立性のよいセグメントの組立方式を検討した。それはいわゆる「ワンパス組立て」であり、シールドマシンのエレクターによってセグメントを把持し、回転してセグメントの位置決めを行った後、シールドジャッキでセグメントを切羽側からトンネル軸方向に押し込むだけで組立てが完了するものである。この場合セグメントをトンネル軸方向にスライドさせてセグメントの組立てを行うことから、このセグメントを「Axial Slide Segment = AS セグメント」と呼ぶこととした。

次に、この組立方式を具体化するために、継手部品を「先付け」しておくか、「後付け」するかの検討を行った。その結果「先付け方式」には特に継手の締結力の導入とその制御について不確実な要素があるものの、それによるセグメントの組立性の良さおよび付帯的なメリットが十分あることから、継手部品は「先付け」にするべきであるとの結論に至っ

た．

セグメントの組立方式が具体的に決定されたので，次にこのセグメントの開発方針と課題とを明確にして具体的な開発を進めることとした．

セグメントの組立方式の最大のポイントはシールドジャッキでセグメントを押し込むだけで組立てができることである．そのために必要となるセグメント継手の最重要な課題は継手の締結力の導入方法およびその制御方法と長期にわたる締結力の保持方法である．

リング継手の課題はセグメントの組立ての完了とリング継手の締結の完了のタイミングをマッチングさせることである．

## 参考文献

- 3.1) 庄司功, 深海仁司, 酒本博, 佐藤宏志, 青木敏行: AS セグメントの急速施工, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, pp. 260~261, 2000
- 3.2) 向野勝彦, 奥山恵昭, 佐藤宏志: AS ジョイントセグメントの施工性試験, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp. 278~279, 1996
- 3.3) 石川幸彦, 渡邊健, 佐藤宏志, 宮武順一, 石井悟: 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 回年次学術講演会講演概要集, pp. 1236~1237, 1995



## 第4章 セグメント継手の開発



## 4.1 楔式継手の採用

### 4.1.1 楔式継手の原理

セグメント継手には楔式の継手構造を採用することとした。用いる楔は、シールドジャッキの推力を利用してセグメントの組立を行うことから、トンネル軸方向に打ち込む「直線楔」とした。従来の継手に多用されているボルト締結方式の継手は、ボルトとナットとの相対的な回転により、それぞれのネジの山と谷が噛み合う、いわば「らせん楔」とも考えられ、締結の原理は本研究で採用した「直線楔」も同様であると思われる。両者の違いは、締結力を与える方法とその発生方向にある。ボルト締結式の継手は回転運動によりその軸方向に締結力を導入するのに対して、楔式継手は直線運動によりその方向と直角方向に締結力を導入するものである。したがって、楔は形状的にも原理的にも非常にシンプルな継手構造と考えられ、力学的にも解明しやすい構造であると考えられる。セグメント継手における楔式継手構造の原理を図 - 4.1 ~ 図 - 4.4 に示し、各部の構成とそれらの締結時の挙動を以下に説明する。

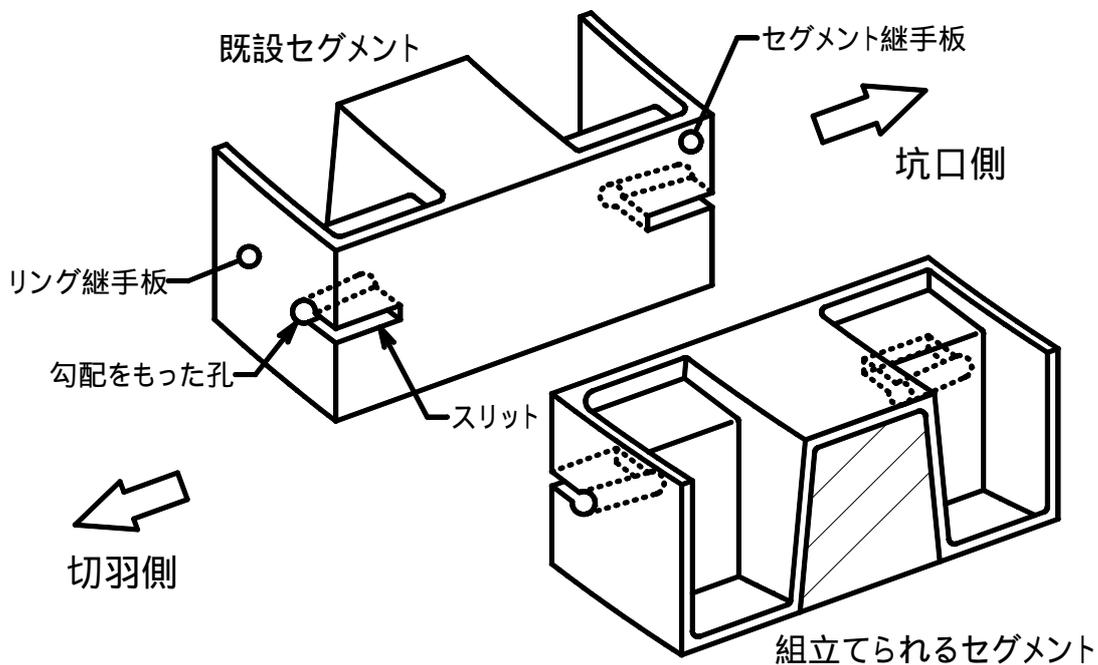


図 - 4.1 セグメント継手部に開けられた勾配のある孔とスリット

図 - 4.1 は、セグメント継手板とリング継手板が交差する部分に設けられた、セグメント継手部を示したものであり、セグメント継手面に対して勾配のついた孔とスリットを有する。スリットは楔のウェブ部を挿入するための空間であり、リング継手板とセグメント継手板を連通している。勾配のついた孔は切羽側および坑口側のリング継手板からそれぞれ内側に先広がり孔である。

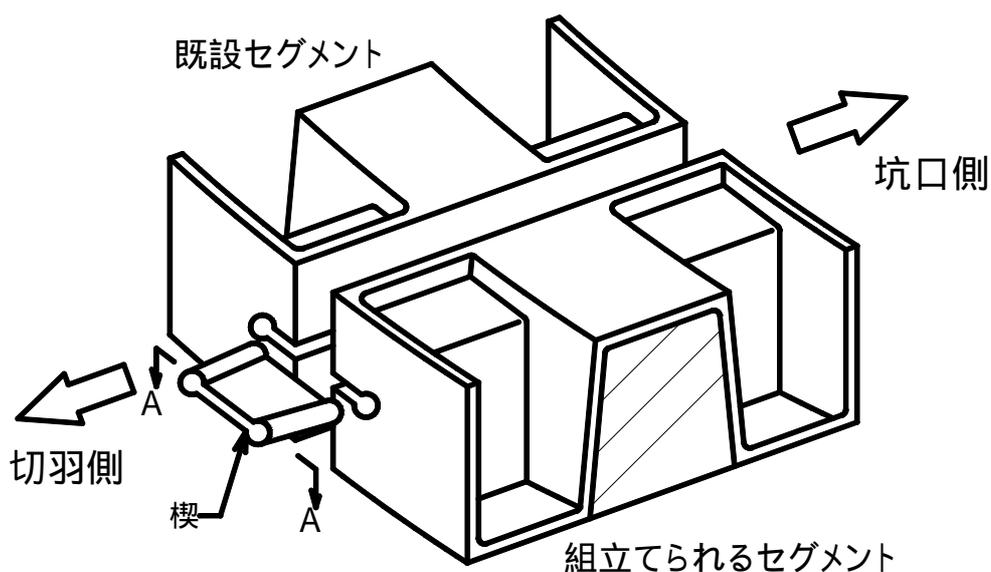


図 - 4.2 既設セグメントと組立て直前の組立てられるセグメントおよび楔の位置関係

図 - 4.2 は組立て直前のセグメントの継手部と楔の位置や向きを示した図である。この図に示すように、楔は「鉄アレ - 型」をしており、図 - 4.2 に示した切羽側の楔は坑口側に先広がりとなっており、セグメント継手部の勾配のついた孔に対して勾配とその向きが一致している。この状態における両セグメント間の距離は、約 5 ~ 10mm 程度である。

図 - 4.3 は楔が勾配のついた孔に挿入され、組立てられるセグメントが既設セグメント側に引き寄せられている状態を示したものである。

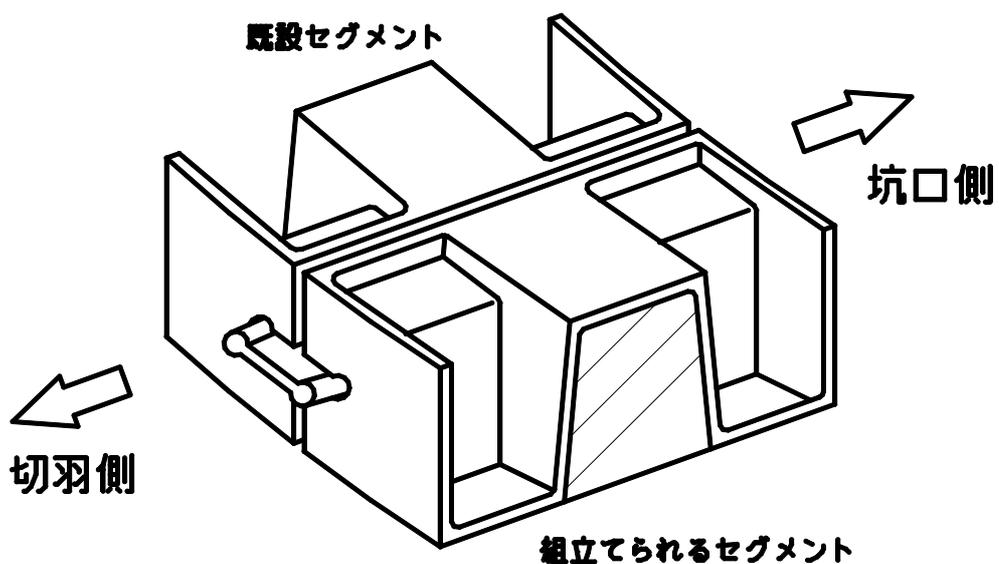


図 - 4.3 両セグメント継手面が突き合わされ楔の挿入が開始された状態

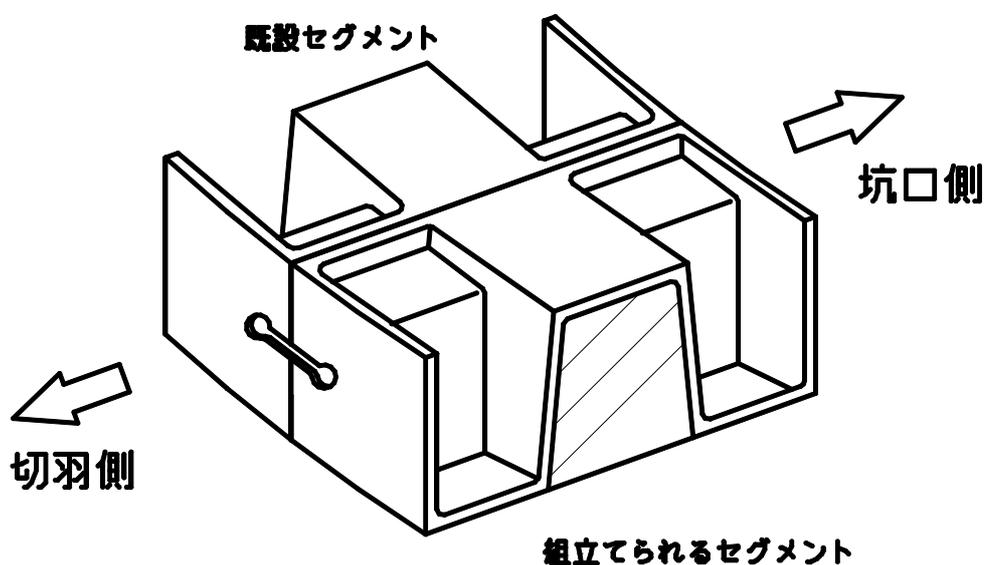


図 - 4.4 楔が完全に挿入され、セグメントの組立てが完了した状態

図 - 4.4 は楔が勾配のついた孔に完全に挿入され、セグメントの組立てが完了した状態を示したものである。両セグメント継手面は密着し、締付け力を受けている。

一般的に言われる「楔」と AS セグメントのセグメント継手として採用した楔では、その楔と楔が打ち込まれる部分との関係およびその表現が異なる。図 - 4.5 は図 - 4.2 における断面 A - A を示したものである。この継手構造では、図 - 4.5 において、楔は矢印の方向へ「挿入」され（打ち込まれ）ると、楔のフランジとウェブ部の交差部（図 - 4.5 の太線部）は、セグメントに設けられた勾配のある孔とスリットとの交差部（図 - 4.5 の太線部）とで競り合いながら嵌合する。一般的に言われる「楔」では、図 - 4.5 に示したセグメントの斜線部がいわゆる「楔」であり、AS 金物のフランジとウェブ部の交差部で構成する V 字型のくびれた部分に挿入される。したがって、楔と楔を受け入れる V 字型の部分について、一般的な場合と AS セグメントの場合ではその関係が逆になっているが、相対的には両者は楔の関係と考えられる。AS セグメントの場合、鉄アレー型のものを楔と呼び、楔を挿入または打ち込むという表現を用いる。図 - 4.5 において、楔がセグメントに設けられた勾配のある孔に挿入されると、図の太線部で嵌合が行われ、嵌合が完全に終わると、図の斜線部を含む両継手面は支圧され、楔のウェブ部には引張力がはたらく。

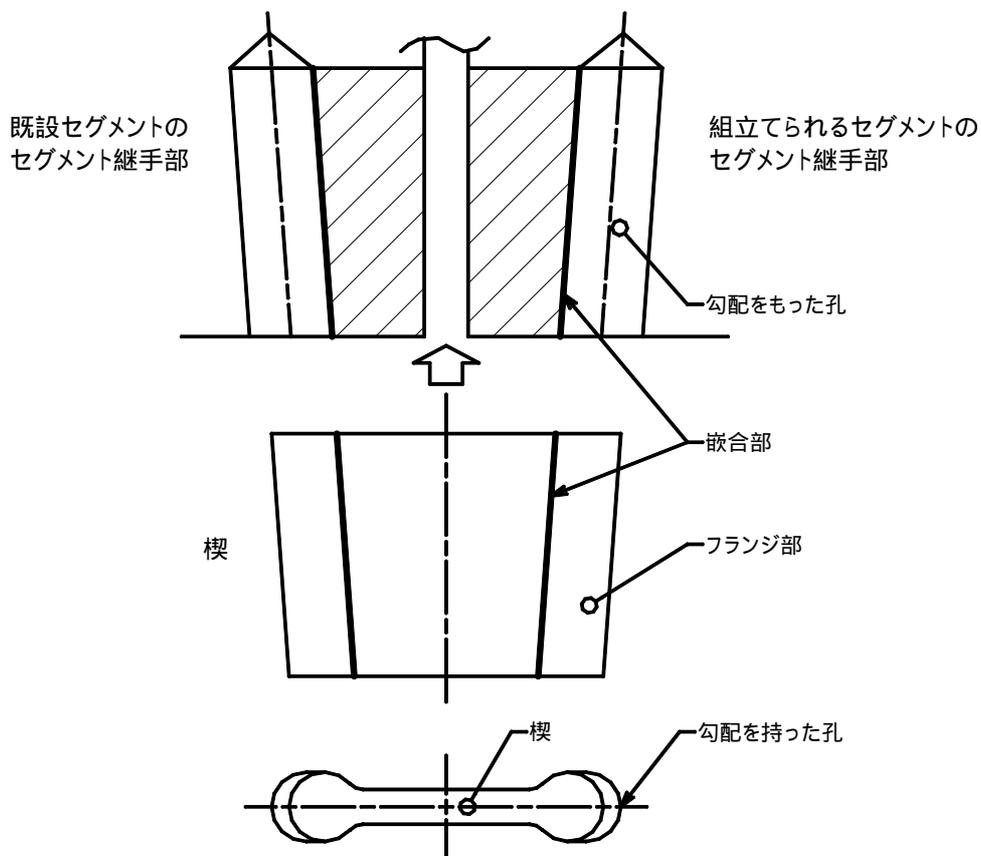


図 - 4.5 楔とセグメントに設けられたテーパ孔との関係

なお、図 - 4.5 においてセグメント継手部に設けられた勾配をもつ孔は、両継手が締結される場合には2つの勾配のある孔から構成される1セットのテーパ状の孔である。したがって、1セットの孔は「テーパ孔」と呼ぶことができるが、一つの孔に対しても便宜上「テーパ孔」と以下呼ぶこととする。

楔式継手構造を採用した理由は以下のとおりである。

構造や形状がシンプルである。

楔の原理から継手に必要な締結力を簡単に算出できる。

RCセグメントの継手構造としてすでに実用化され、使用実績がある<sup>4.1)</sup>。

楔の形状は鋳造や鍛造を行えば比較的簡単に製造でき、また、セグメントの本体部分についても製造上の制約がほとんどないと考えられる。

#### 4.1.2 ASジョイントとAS金物

施工性の向上を目指したダクタイルセグメントを「ASセグメント」と呼ぶことにしたが、そのコンセプトはセグメントの「ワンパス組立」ができることであり、そのため、セグメント継手とリング継手ともセグメントに先付けしておく方式とした。したがって、セグメント継手である楔と嵌合されるテーパ孔との関係は、図 - 4.1 ~ 4.4 において説明した楔式継手構造の原理のように楔を打ち込むのではなく、実際には以下に述べるような動きになる。図 - 4.6 は楔を先付けしたセグメントの概念図を示したものである。セグメントの組立てでは、坑口側ではこれから組立てられるセグメントに設けられたテーパ孔を、既設セグメントに先付けされた楔に挿入する。切羽側では組立てられるセグメントに先付けされた楔を、既設セグメントに設けられたテーパ孔に挿入する形となる。

このように、セグメント継手は組立てられるべきセグメントがトンネル軸方向の動きの中で、先付けされた楔とセグメントに設けられた勾配をもった孔とが互い違いにトンネル軸方向に挿入されながら締結を行う方式である。以下ではこのセグメント継手の構造を「Axial Slide Joint=ASジョイント」と呼ぶこととし、また、この継手部品である楔を「AS金物」と呼ぶこととする<sup>4.2)</sup>。

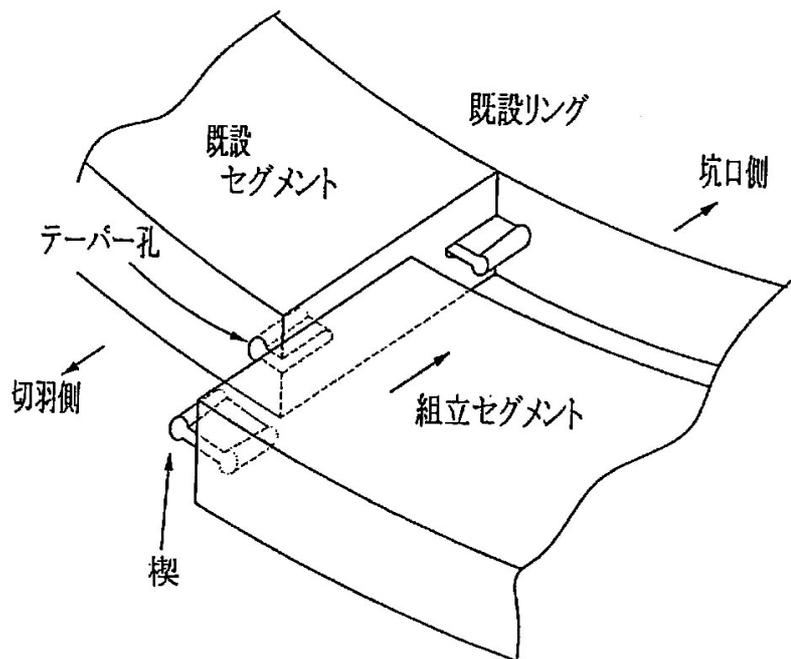


図 - 4.6 楔を先付けしたセグメントの概念図

## 4.2 セグメント継手の要素試験

セグメント継手として採用した AS 金物について、形状、寸法、材質などの基本事項を定め、力学的特性を明確にする目的で、各種の要素試験を行った。

### 4.2.1 AS 金物の形状、寸法および材質

図 - 4.7 は、AS 金物の形状と寸法の例を示したものである。AS 金物はその断面がいわゆる「鉄アレ - 形」のような形をしており、ウェブ部と締結時に支圧されるフランジ部からなる。

ウェブ部とフランジ部が交わる隅角部からフランジ部の稜線にかけてが継手の嵌合部であり、この部分は先広がり「テ - パ」になっている。この「テ - パ」によって締結力が発生する。K セグメントを除く標準セグメント用の金物のこの勾配は、既往の研究結果<sup>4.3)</sup>から 1/20 としたが、その理由は、比較的小さな挿入力により所定の締結力が得られ、また、挿入後は AS 金物が抜け出しにくいことによる。AS 金物をセグメント継手に使った場合の AS 金物への力のかかり方は、従来のボルト締結式の継手と概ね同じと考えられ、その

力はウェブ部の厚さと長さの積で与えられる断面積で負担するものと考えられる。

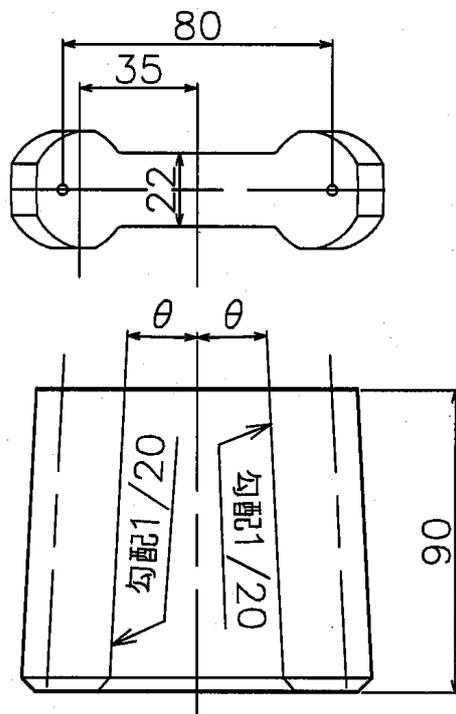


図 - 4.7 AS 金物の形状図 (例)

AS 金物の製造法とその材質については、AS 金物の形状や肉厚が不均一でテ - パ - 部もあることから、鋳造で製造することが最も好ましいと考え、構造材料として十分な性能を有する FCD900A と FCD500 とを選んだ。AS 金物の材料の選定については、開発の初期の段階では高強度の FCD900A のみを取り上げた。その後、AS 金物の製造コストを下げするために、汎用性のある FCD500 も適用することとした。FCD900A はダクタイル鋳鉄を塩浴熱処理したもので、高強度で伸びも大きい。また、FCD500 はダクタイルセグメントと同じ材料である。なお、両材料の機械的性質は表 - 1.1 に示したとおりである。

AS 金物の具体的な寸法の決め方を以下に示す。この例は鉄道複線トンネルのセグメント継手を想定したものである。このクラスのセグメント継手では、一つの継手断面に呼び径 M30、強度区分 10.9 のボルトが 6 本使用されるが、これと同じ強度の AS 金物を考えた場合、AS 金物 2 個がボルト 6 本に対応する必要がある。このことから、AS 金物 1 個あたり 3 本のボルトに相当する性能を与える。AS 金物の材質別の断面積およびウェブの厚さと長さは表 - 4.1 のとおりとなる。

M30 ボルトの断面積：5.606cm<sup>2</sup> / 本，16.98cm<sup>2</sup> / 3 本

ボルトの材料の許容応力度：380N / mm<sup>2</sup>

許容引張荷重：16.98cm<sup>2</sup> × 380N / mm<sup>2</sup> = 645.2 k N / 3 本

表 - 4.1 AS 金物のウェブの厚さと長さの例

AS 金物の材質	FCD900A		FCD500	
許容応力度 N / mm <sup>2</sup>	200 *		190	
許容引張荷重 k N	645.2		645.2	
必要断面積 cm <sup>2</sup>	32.3		34.0	
ウェブの厚さと長さの例	厚さmm	長さmm	厚さmm	長さmm
	15	215	15	227
	20	162	20	170
	25	129	25	136

\* FCD900A の許容応力度は示方書などに定められていないが，AS 金物に対して偏荷重や応力集中が考えられたので，開発の初期段階では，安全を見て降伏点の約 1 / 3 とした．

AS 金物の材質とウェブの厚さおよび長さはこのようにして，従来のボルト締結式の継手との対応から決定でき，セグメント継手の設計条件やセグメントの桁高さ，幅などを考慮して容易に選択できる．なお，この場合にウェブの厚さを自由に選べることは，鋳造品の最も特長とするところである．

#### 4.2.2 AS ジョイントの挿入試験<sup>4.2)</sup>

AS 金物をテーパ孔に挿入した場合の各部の挙動は以下のように考えられる．

AS 金物を挿入していくと，まず，テーパ孔をもつセグメント本体は AS 金物により互いに引き寄せられ，継手面は接触する．さらに AS 金物の挿入を続けると継手面は支圧され締結力が導入される．一方，AS 金物は継手面が接触した直後からフランジのテ - パ - 部は支圧され，ウェブ部には挿入方向とほぼ直角の引張力が発生する．

このような挙動を想定して AS 金物の挿入力とウェブ部に発生する引張ひずみとの関係を求める試験を行った．AS 金物はウェブ部の厚さ 15mm，長さ 150mm のものを使用し，1 / 20 の勾配のある孔をもったブロック 2 つを突き合わせた状態で AS 金物を挿入した．図 - 4.8 は試験直前の AS 金物と試験治具を示したものである．AS 金物の挿入は，AS 金物のウェブ部に許容応力度の約 2 倍に相当するひずみが発生するまで行った．また，図 - 4.9 はその試験結果を示したものである．

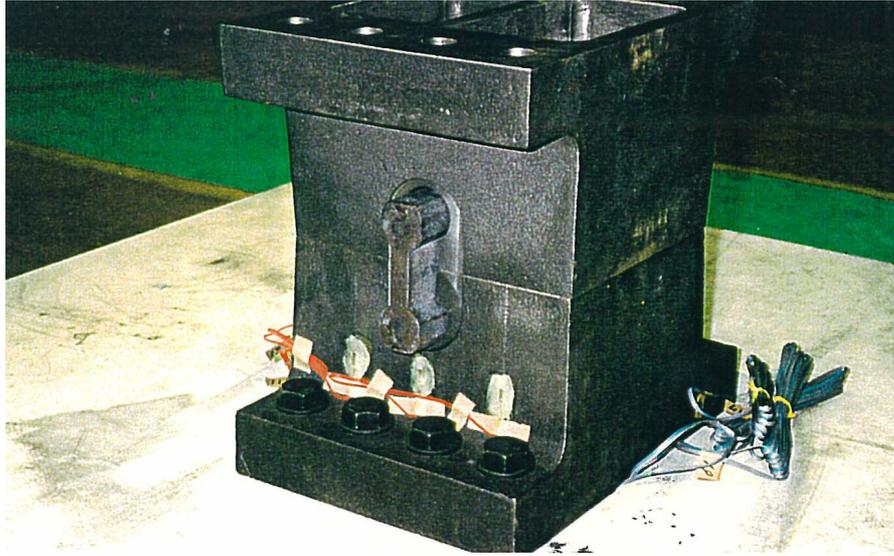


図 - 4.8 AS ジョイント挿入試験直前の AS 金物と試験治具

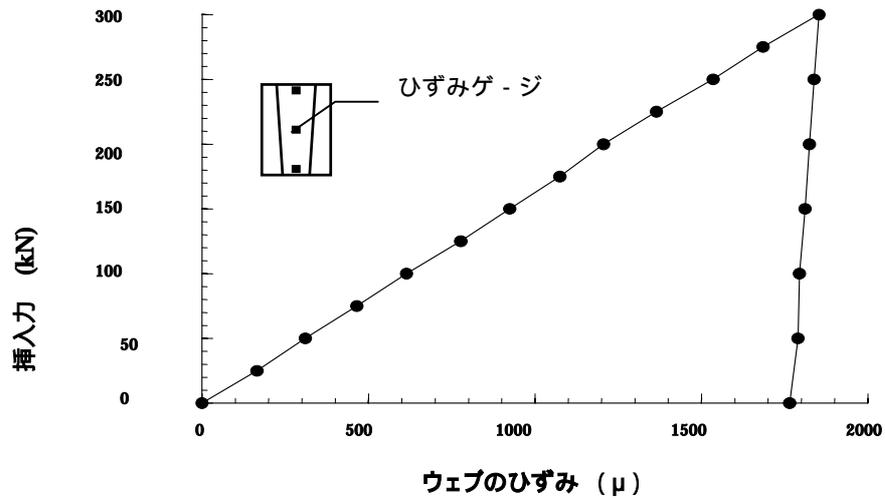


図 - 4.9 AS ジョイントの挿入試験の結果

この試験結果から、以下のことがわかった。

発生する締結力は挿入力に比例し、挿入力と締結力との関係は式 (1) で表せる。

$$P = \frac{F}{2} (\mu + \tan \theta) \quad (1)$$

ここに、

P : AS 金物に発生する締結力 (N)

F : AS 金物の挿入力 (N)

$\mu$  : ダクティル鋳鉄どうしの摩擦係数

: AS 金物の勾配 ( = 度),  $\tan = \frac{1}{10}$

である .

AS 金物の挿入力と締結力との間に  $P / F = 2.3$  という関係が得られ , この供試体において許容応力の 80% の締結力を発生させる挿入力は約 150 k N であることがわかった .

こ

の関係が大きく支配したのはテ - パ - 孔と AS 金物との間の摩擦係数であり , 結果から逆算すると  $\mu = 0.17$  であった . この値は一般的に言われる鋳鉄間の摩擦係数約 0.2<sup>4.4)</sup> よりやや小さかったが , その理由はテ - パ - 孔が機械加工された面をもつことによるものと考えられる .

挿入力を除荷しても締結力が保持された .

#### 4 . 2 . 3 AS ジョイントの引張試験<sup>4.2)</sup>

テーパ孔のあるブロックを対向させ一対にしたものに AS 金物を挿入した後 , 図 - 4.10 に示す試験装置により引張試験を行った . AS 金物に導入した締結力は , FCD900A の許容応力度の 50% に相当する応力度が発生する 225kN とした . また , AS 金物のウェブには表裏各 3 枚のひずみゲージを貼付したが , 図 - 4.11 に示すひずみは 6 点の平均値である .

試験では , AS 金物に許容応力度が発生する荷重相当まで 5 回繰り返し載荷し , その後 , 破壊まで載荷を行った . 図 - 4.11 はその試験結果を示したものであり , 試験における AS 金物の挙動は以下のとおりであった .

引張荷重と AS 金物のウェブ部に発生するひずみとの関係は , 締結力を導入したボルト継手と同様であった . すなわち , 引張荷重を与えると概ね導入した締結力に見合う引張荷重までは AS 金物にひずみが発生しない . その後 , 許容応力度相当の荷重まではほぼ直線的にひずみが増加した . 許容応力度相当の荷重におけるひずみ量は計算値 235  $\mu$  にほぼ等しかった .

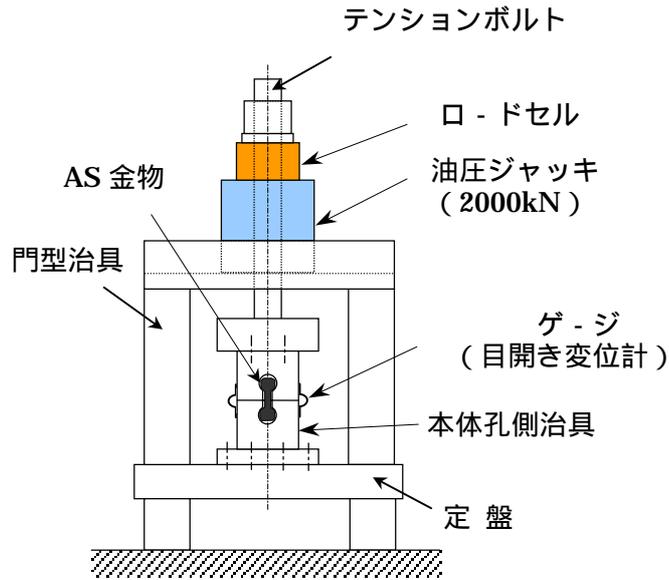


図 - 4.10 AS ジョイントの引張試験装置の図

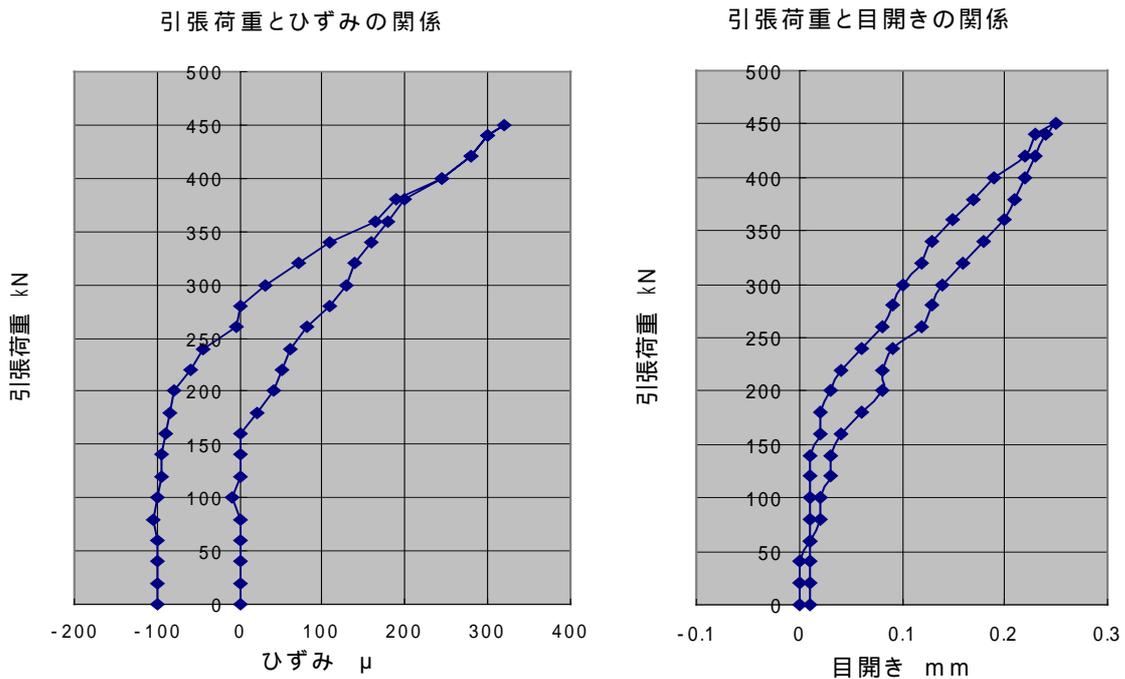


図 - 4.11 AS ジョイントの引張試験の結果

破壊は概ね AS 金物のフランジとウェブが交差する部分で発生し、その荷重は 1.75 MN であった。これは、許容応力度が発生する荷重の約 4 倍であったが、材料の全強度に対しては約 85% であり、引張荷重が偏ったり、応力集中があったものと考えられる。

### 4.3. セグメント継手への締結力の導入とその制御方法

#### 4.3.1 ASジョイントの先付け方式の問題点<sup>4.5)</sup>

セグメント継手として AS 金物を固定した状態で先付けし，ワンピース組立てを行った場合に以下に示すような問題が考えられる．

AS 金物の取り付け位置を固定すると AS 金物に発生する締結力は大きくばらつき，極端な場合には締結力がまったく発生しないか，逆に締結力が過度になり AS 金物またはセグメント本体が破壊することになる．

その理由はセグメント本体に設けてある勾配のある孔 2 つで構成されるテ - パ - 孔の幅寸法と，そこに嵌合する AS 金物のウェブ部の幅寸法とはそれぞれ製造上のバラツキがあり，それぞれの最大幅と最小幅が組み合わされると上述したような極端な場合が発生する．

したがって，両者の製造上のバラツキをなくすことを目指すか，それが不可能な場合にはバラツキがあっても適切な締結力が導入される方式とする必要がある．

これらの問題が解決されないと，AS 金物を先付けする方式は実用化できないことになる．その理由を以下に詳しく述べる．図 - 4.12 はセグメント継手部に設けられた勾配のある 2 つの孔で構成されるテ - パ - 孔と AS 金物の嵌合状態を示したものである．

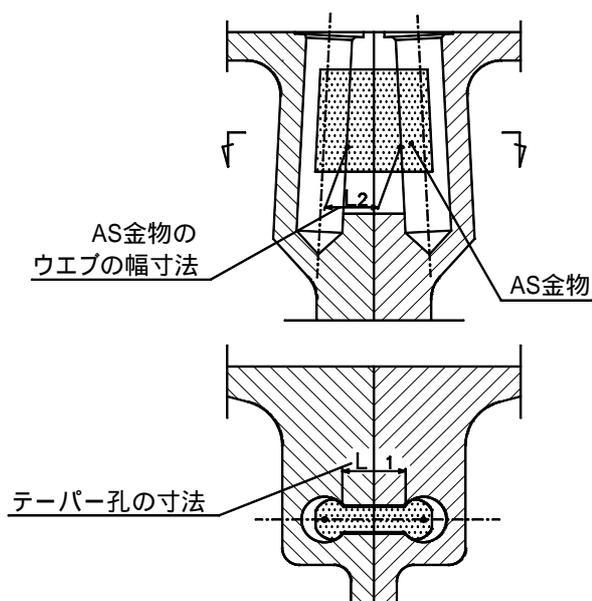


図 - 4.12 セグメント継手部に設けられたテ - パ - 孔と AS 金物の嵌合状態

図 - 4.12 に示したセグメント継手部のテ - パ - 孔と AS 金物の嵌合状態の模式図において、2 つの勾配のある孔で構成されるテ - パ - 孔の嵌合部の距離  $L_1$  と、AS 金物のウェブ部の幅  $L_2$  にはそれぞれ製造上の寸法のバラツキがある。例えば機械加工されるテ - パ - 孔は、勾配のある孔の片側について  $\pm 0.4\text{mm}$ 、鑄造の鑄放し品である AS 金物の嵌合部の寸法  $L_2$  は  $\pm 0.5\text{mm}$  の精度である。これは、テ - パ - 孔と AS 金物が嵌合する正規の幅寸法を  $L$  とすれば、テ - パ - 孔では  $L_1 = L \pm 0.8\text{mm}$ 、AS 金物では  $L_2 = L \pm 0.5\text{mm}$  のバラツキが発生することを意味する。

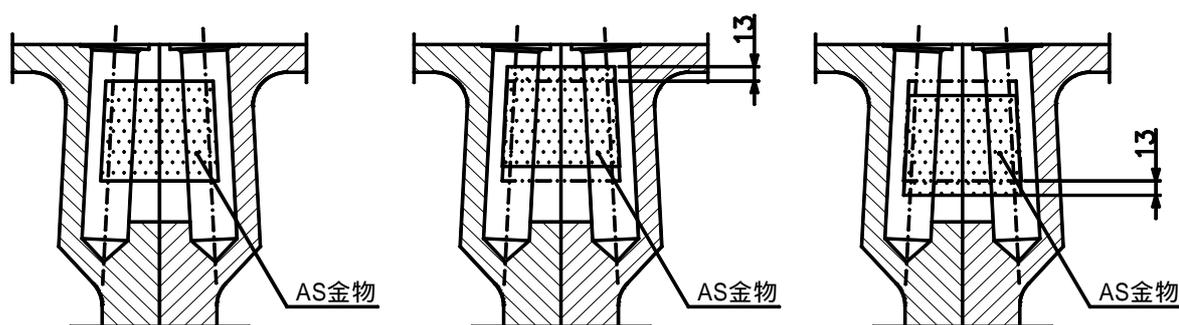
セグメント本体に設けられたテ - パ - 孔と AS 金物のテ - パ - の勾配は片側で  $1/20$  であるから、テ - パ - 孔と AS 金物の寸法の組み合わせにより、AS 金物が止まる位置は以下の 3 ケ - スがあると考えられる

ケ - ス(1) :  $L_1 = L \pm 0$ 、 $L_2 = L \pm 0$  の場合は両者とも寸法誤差がない場合であり、AS 金物は正規の位置で止まる。

ケ - ス(2) :  $L_1 = L + 0.8$  と  $L_2 = L - 0.5$  の場合はテ - パ - 孔の幅が広く、AS 金物のウェブ部の幅が狭い場合であり、AS 金物は正規の位置より 13mm 後ろの最後端で止まる。

ケ - ス(3) :  $L_1 = L - 0.8$  と  $L_2 = L + 0.5$  の場合はテ - パ - 孔の幅が狭く、AS 金物のウェブ部の幅が広い場合であり、AS 金物は正規の位置より 13mm 前の最前端で止まる。

図 - 4.13 はこれらの嵌合の状態 3 ケ - スを示したものである。



ケ - ス ( 1 )

ケ - ス ( 2 )

ケ - ス ( 3 )

AS 金物が正規の位置

AS 金物が 13mm 後ろの位置

AS 金物が 13mm 前の位置

図 - 4.13 テ - パ - 孔と AS 金物の嵌合状態の 3 つのケ - ス

もし、AS 金物を一定の位置に固定した場合には各々の寸法の組み合わせにより、AS 金物に過度な締結力が導入されて AS 金物が破壊したり、逆に AS 金物にまったく締結力が導入されないということが予想される。したがって、AS 金物はこの  $\pm 13 \text{ mm}$  の範囲内を動く構造にしておく必要がある。

#### 4.3.2 AS 金物への締結力の制御方法に関する検討<sup>4.6)</sup>

セグメント継手部のテ - パ - 孔と AS 金物の幅寸法のバラツキに左右されることなく、AS 金物に発生する締結力を所定の値に近いものに制御する方法として、AS 金物が所定の範囲内を動く構造が必要となる。しかしながら、これは AS 金物が自由に動くことを意味するのではなく、「AS 金物には挿入（打ち込む）力を常に与えながら」なおかつ動く構造でなければならない。すなわち、AS 金物が自由に動くことにより、AS 金物に対する必要で適正な締結力が失われないように、AS 金物の後端から何らかの挿入力（打ち込み力）を常に与える構造が必要となる。

AS ジョイントを実際に使える方式として示した図 - 4.6 のような AS 金物の先付け方式において、坑口側の AS ジョイントについてこの考え方を説明すると以下のとおりとなる。図 - 4.14 はこれらを説明した図である。なお、テ - パ - 孔の幅の寸法と AS 金物のウェブ部の幅の寸法が誤差なく製造された場合に AS 金物に所定の締結力が発生し止まる位置を以下「正規の位置」と呼ぶこととする。

図 - 4.14 において、AS 金物を最初に先付けしてセットしておく位置は、正規の位置に対して  $13 \text{ mm}$  だけ切羽側である。

組立てられるセグメントに設けられたテーパ孔を、既設セグメントに先付けされた AS 金物に挿入するに従い、AS 金物には徐々に締結力が発生し、ある時点で締結力は所

定の値に達する。さらに組立てられるセグメントを坑口側に動かすと、AS 金物に過度な締結力が発生しないように、AS 金物は坑口側に後退する。

この場合に、AS 金物が坑口側に後退し過ぎて AS 金物に導入した締結力が抜けないように、AS 金物に対して坑口側から一定の力を与える機構が必要となる。

AS 金物にこの一定の力を与える機構を「メカリリーフ機構」、その材料を「バックアップ材」と呼ぶこととする<sup>4.7)</sup>。

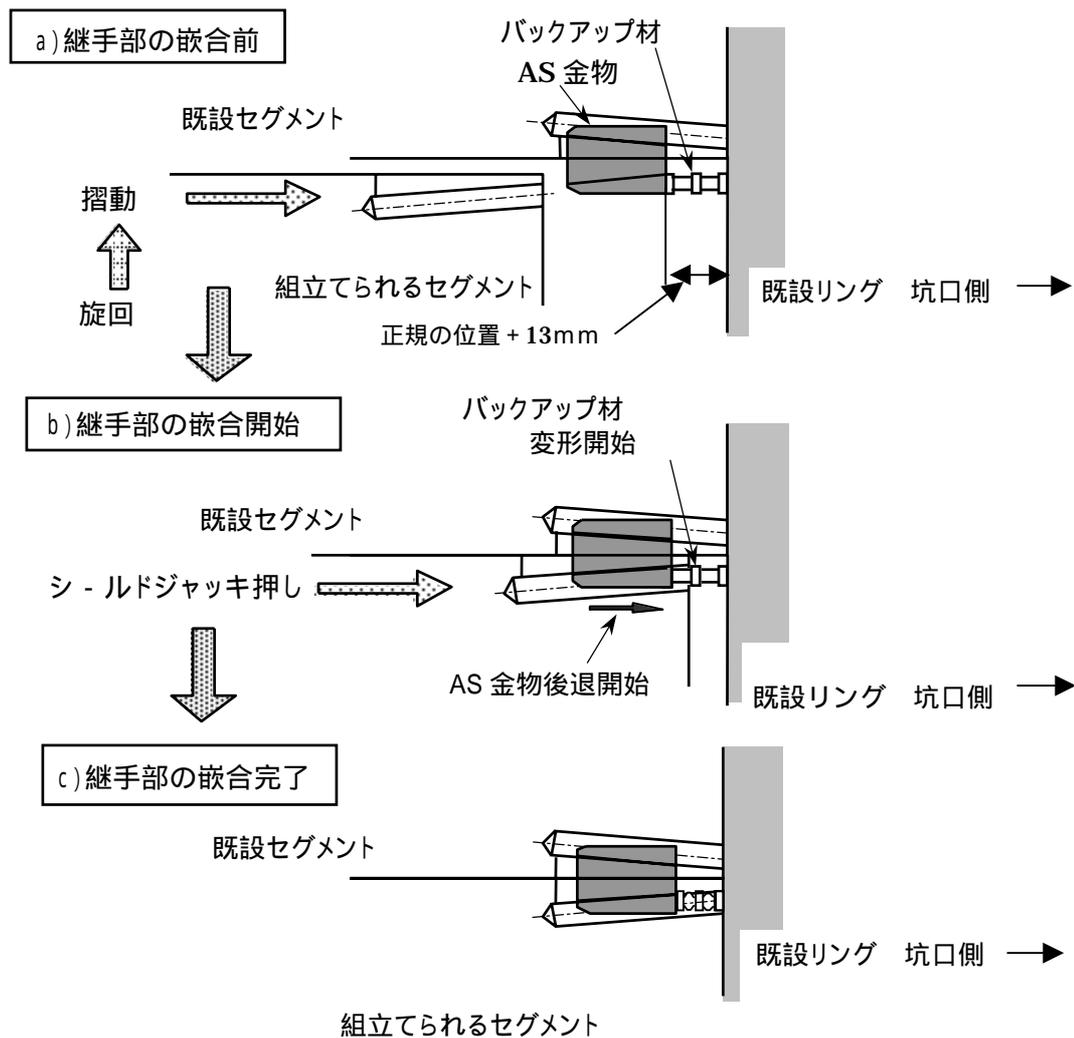


図 - 4.14 坑口側に先付けされた AS 金物に所定の締結力を発生させる機構

セグメントの組立てと、AS 金物とバックアップ材の動きを図 - 4.14 を参照して説明すると以下のとおりとなる<sup>4.8)</sup>。

図 - 4.14 の a ) に示すように、既設セグメントの坑口側に取り付けられる AS 金物は、組立てられるセグメント側のフランジの後ろに、バックアップ材をセットした状態で設置する。その位置は AS 金物が正規に停止する位置から約 13mm 切羽側とする。

この状態で組立てられるセグメントの位置決めを行い、エレクタ - の摺動ジャッキを用いてセグメントを坑口側へ摺動させる。

組立てられるセグメントが坑口側へ摺動すると、ある時点からセグメントのテ - パ - 孔と AS 金物のフランジ部の嵌合が始まる。

さらにセグメントが坑口側へ移動すると、バックアップ材は変形し、縮み始める。この時点から AS 金物がゆっくり坑口側へ移動を始める。

バックアップ材の変形はほぼ一定のスピードで進行し、最後に組立てられるセグメントが既設リングのリング継手面に接して組立てが完了する。

なお、以上は、図 - 4.6 の既設セグメントの坑口側に先付けされた AS 金物の説明であるが、切羽側に取り付けられた AS 金物の組立時の挙動は概ね以下のとおりである。図 - 4.15 はその説明図である。

図 - 4.15 に示すように組立てられるセグメントの切羽側に取り付けられる AS 金物は、既設セグメント側のフランジの後ろに、バックアップ材をセットした状態で設置する。

その位置は AS 金物が正規に停止する位置から約 13mm 坑口側とする。

この状態で組立てられるセグメントの位置決めを行い、エレクタ - の摺動ジャッキを用いてセグメントを坑口側へ摺動させる。

組立てられるセグメントと既設リングとの間隔が約 30mm となった時点から、シールドジャッキによりセグメントは坑口側に押し込まれる。この場合、当該 AS ジョイントの後方にシールドジャッキのスプレッダーがセットされている。

組立てられるセグメントが坑口側に押し込まれると、ある時点からセグメントのテ - パ - 孔と AS 金物のフランジ部の嵌合が始まる。

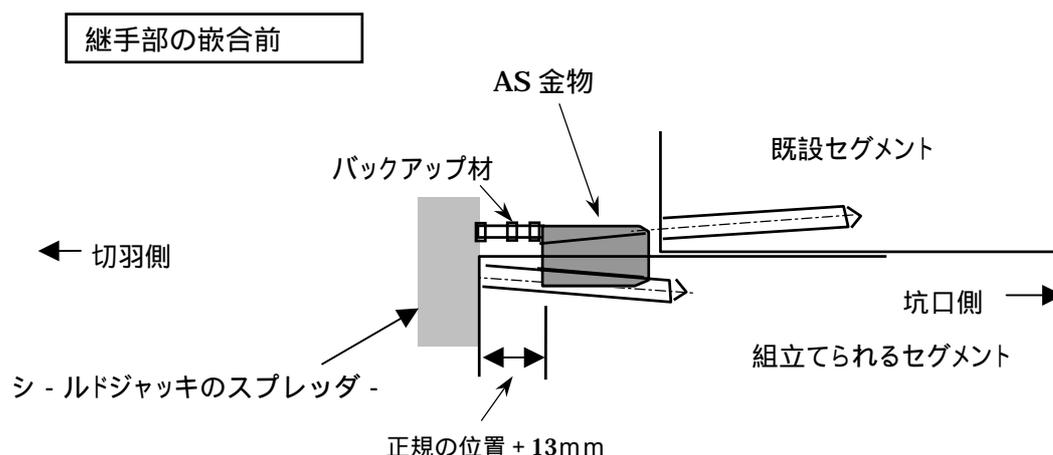


図 - 4.15 切羽側に先付けされた AS 金物に所定の締結力を発生させる機構

さらにシールドジャッキによりセグメントが坑口側へ移動すると、バックアップ材はシールドジャッキのスプレッダから一定の力を受けて変形し、縮み始める。この時点から AS 金物はバックアップ材の変形量に見合う距離だけ切羽側に移動する。最後に組立てられるセグメントが既設リングのリング継手面に接して組立てが完了する。

このように、AS 金物に所定の締結力を発生させる方法は切羽側と坑口側とでは基本的には同じ方式であるが、坑口側で行われるように、既設リングのリング継手面がバックアップ材に反力を与えるような方式は、切羽側ではできない。切羽側の反力部材として、シールドジャッキのスプレッダがあることを図 - 4.15 で説明したが、この方式はセグメントの分割数によって決まる AS 金物の円周方向の位置とシールドジャッキの本数によって決まるスプレッダの位置が全てで一致することが必要である。AS セグメントを実用化していく段階で、AS 金物とバックアップ材の取り付け方法とその位置について、いくつかのバリエーションがあることがわかった。各工事におけるセグメントの主桁構造、セグメントの分割数、セグメントの幅寸法、シールドジャッキの本数およびセグメントを組立てる際のセットバック量などの条件によってそのバリエーションから選択することとした。図 - 4.16 はこれらのバリエーションを示したものである。

なお、シールドジャッキのスプレッダによってバックアップ材に反力を与える方式は、試験施工の 3 回目からは採用していない。

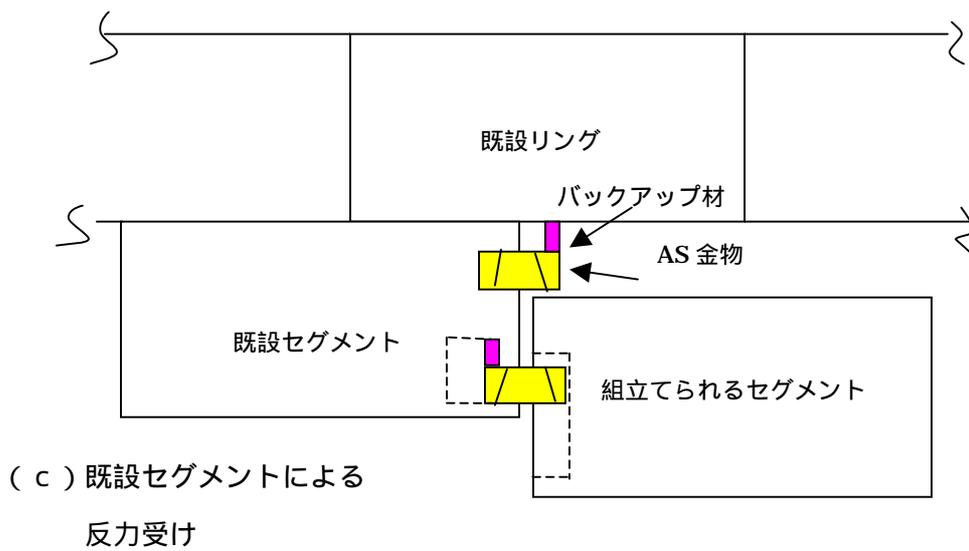
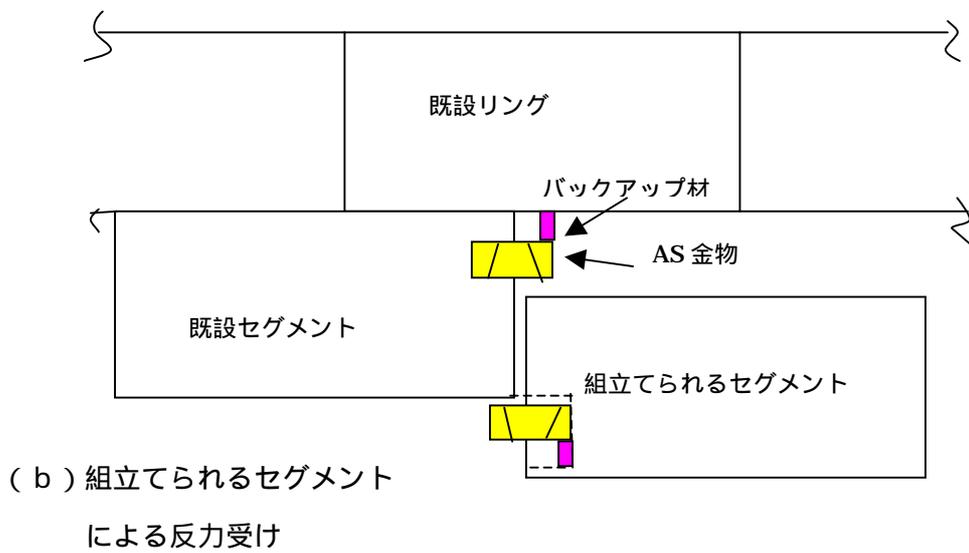
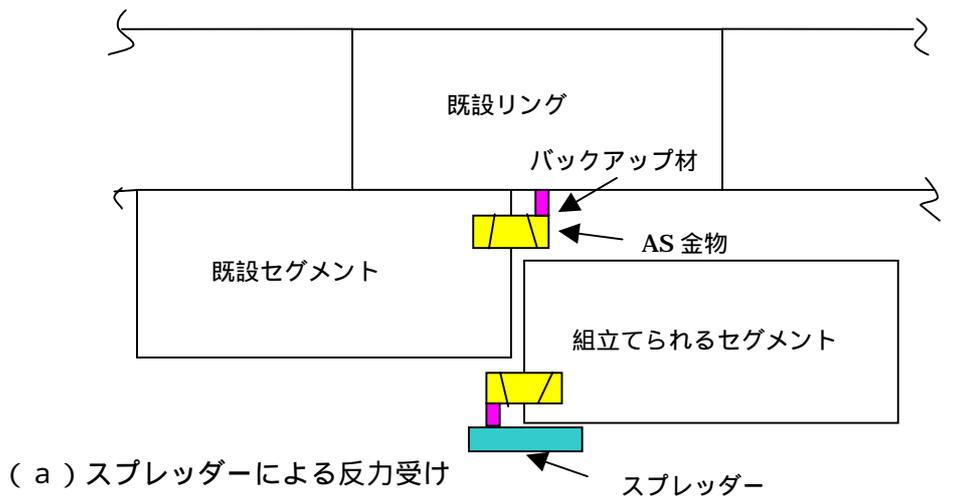


図 - 4.16 AS 金物に所定の締結力を発生させるための機構のバリエーション

#### 4.3.3 バックアップ材の開発とその性能試験<sup>4.9)</sup>

バックアップ材の原理は円筒座屈である<sup>4.10)</sup>。すなわち、円筒部材を軸方向に圧縮した場合、ほぼ一定の圧縮荷重で軸方向に大きな変位が発生するという特性を利用するものである。

バックアップ材を AS 金物の後端部に取り付けて締結を行う方式の開発は以下のフローによって行った。

AS 金物に必要な締結力を算定する。

必要な締結力とバックアップ材に生じる反力との関係を求める

セグメントに設けられたテ - パ - 孔と AS 金物の寸法とのバラツキを設定し、それによる AS 金物の移動距離を設定する。すなわち、バックアップ材が変形できる長さを設定する。

バックアップ材の各部の寸法をパラメ - タ - とし、反力と変形特性とを実験的に求めて、形状寸法を決定する。

これらの開発内容を以下に述べる。

##### 1) AS 金物に必要な締結力とバックアップ材に生じる反力との関係

図 - 4.17 はバックアップ材を取り付けた AS 金物の締結時に働く力の釣り合いを示したものである。この力の釣り合いから AS 金物に発生する締結力とバックアップ材の反力との関係を求めると以下のとおりとなる。

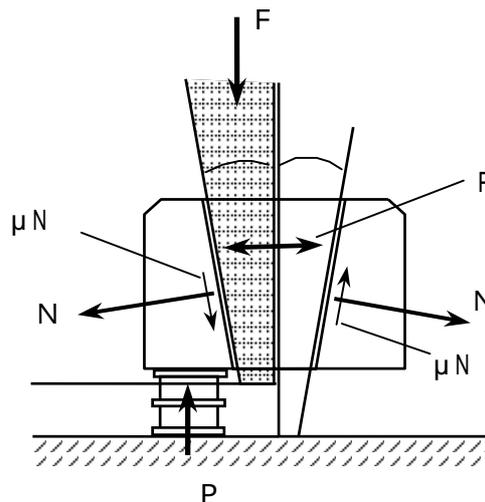


図 - 4.17 バックアップ材を取り付けた AS 金物の締結時の力の釣り合い

$P = N (\cos \theta - \mu \sin \theta)$  から

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

ここに、

$P$  : AS 金物に発生する締結力 (N)

$F$  : AS 金物への挿入力 (N)

$P$  : バックアップ材の反力 (N)

$N$  : AS 金物の垂直抗力 (N)

$\mu$  : AS 金物とテ - パ - 孔との摩擦係数

$\theta$  : AS 金物のテ - パ - 角 (  $\theta$  = 度 )

である。

この式 (2) は AS 金物の締結力  $P$  とバックアップ材の反力  $P$  とが比例することを意味し、 $\mu = 0.17$ 、 $\theta = 0.05$  を与えれば、両者の関係は概ね

$$P = 9.8 P$$

となる。

AS 金物のウェブ部の厚さ 15mm、長さ 150mm の供試体では許容応力度の 80% の締結力を与えるためにはバックアップ材の反力は約 37kN となる。すなわち、

$$\text{AS 金物の断面積} : A = 1.5 \times 15 = 22.5 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{必要締結力} : P &= \sigma_{ta} \times 0.8 \times A = 200 \text{ N/mm}^2 \times 0.8 \times 2250 \text{ mm}^2 \\ &= 360 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{バックアップ材の反力} : P &= \frac{P}{9.8} = \frac{360 \text{ kN}}{9.8} \\ &= 37 \text{ kN} \end{aligned}$$

となる。

## 2) バックアップ材の形状、寸法およびその性能<sup>4.11)</sup>

バックアップ材の形状と寸法はその外径、内径、肉厚、長さ、つばの数などをパラメータとして、圧縮荷重と圧縮変形量との関係を実験的に求め、定めることにした。バックアップ材には、変形性能に富み耐久性に優れるアルミニウム材 (例えば JIS H 4000, 5052) を用いることとした。

図 - 4.18 はバックアップ材の 1 例を示したものである。このバックアップ材は圧縮荷重約 10 kN のとき、変形量が約 13 mm であり、これを用いれば約 100 kN の締結力を発

生させることができ、可動範囲が約 13mm の AS ジョイントに適用できる。図 - 4.19 にバックアップ材を取り付けた AS 金物の写真を示す。

このような手順で圧縮荷重 20 kN、30 kN、36 kN の性能をもつバックアップ材についても開発を行った。

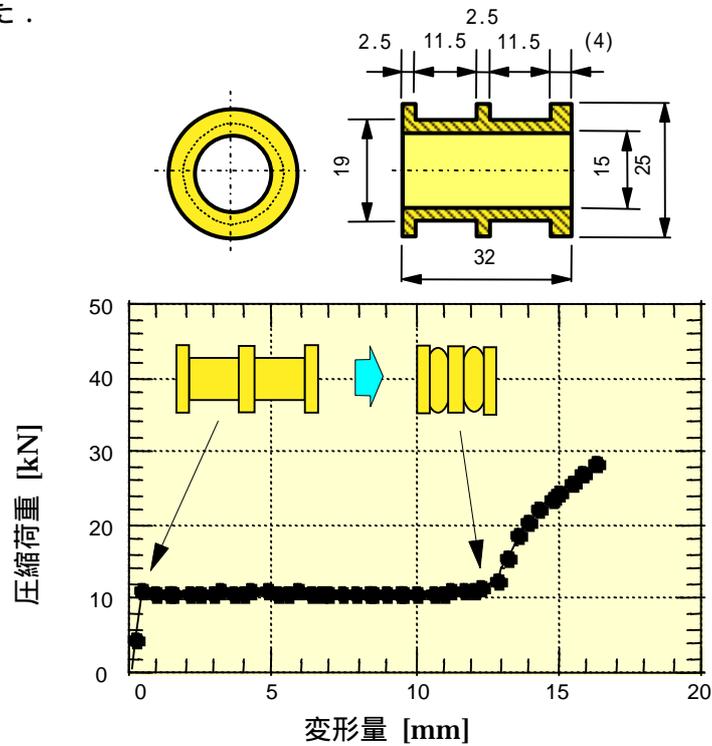


図 - 4.18 締結力約 100 kN に適用できるバックアップ材の一例



図 - 4.19 バックアップ材を取り付けた AS 金物の写真

#### 4.4 まとめ

本章では、この AS セグメントにおいて、組立てられるべきセグメントがトンネル軸方向の動きをする中で、先付けされた AS 金物とセグメントに設けられたテ - パ - 孔とが相対的にトンネル軸方向に挿入されながら締結を行う方式であることから、このセグメント継手の構造を「Axial Slide Joint=AS ジョイント」と呼ぶこと、また、この継手である楔を「AS 金物」と呼ぶこととしたことを紹介した。

まず、セグメント継手として採用した AS 金物について、その形状、寸法、材質を検討した。AS 金物のウェブ部の寸法は、その断面積がボルト締結式の継手のボルトの断面積と等しくなるように定めることにし、材質は FCD900A と FCD500 の 2 種類を採用して、それらは設計条件などにより自由に選択できるようにした。

次に、AS ジョイントの挿入試験と引張試験を行い、その基本特性を確認した。その結果、AS 金物は挿入力に比例する締結力が AS 金物に発生すること、AS 金物を引張ると、締結力を導入したボルト継手と同じ挙動を示して、締結力相当の荷重までは AS 金物にひずみが発生しないことなどがわかった。また、FCD900A の AS 金物の引張試験における破壊荷重は、許容応力度相当の荷重の約 4 倍であり、破断は AS 金物のフランジとウェブが交差する部分で生じることでもわかった。

本章での最も重要な課題はセグメントに先付けした AS 金物への締結力の導入とその制御方式であった。まず、AS 金物を予めセグメントに取り付けておく先付け方式では、AS 金物を固定することができないことを示し、その上で AS 金物に締結力を導入するための方法を検討した。その結果、AS 金物は可動構造とする必要がある一方で、AS 金物は動くものの緩まないように一定の反力を与える機構が必要であることがわかった。この一定の反力を与える部材をバックアップ材と呼ぶこととし、次にバックアップ材の開発を進めた。バックアップ材は、一定の圧縮荷重を越えると大きく変形する特性を有する必要がある。この一定の荷重が AS 金物に与えられる反力であり、軸方向の変形量が AS 金物の移動距離である。ここでは、これらの AS 金物に発生する締結力とバックアップ材の反力が比例関係にあることを理論的に示した。また、締結力を選択できるように、4 水準のバックアップ材を開発した。このバックアップ材を AS 金物の先端が狭まる側のフランジ部の後端に取り付けて AS ジョイントを構成すれば、AS 金物に適切な締結力を導入できることを確認した。

## 参考文献

- 4.1) 坂口良孝, 松井芳彦, 茂木徳次郎: コッター式継手セグメントの実施工, (社) 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第1巻, (社) 土木学会, pp. 113~115, 1991
- 4.2) 石川幸彦, 渡邊健, 佐藤宏志, 宮武順一, 石井悟: ダクタイト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回年次学術講演会講演概要集, pp. 1236~1237, 1995
- 4.3) 坂口良孝, 松井芳彦, 茂木徳次郎: コッター式継手セグメントの実施工, (社) 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第1巻, (社) 土木学会, pp. 113~115, 1991
- 4.4) 小栗 富士雄: 機械設計図表便覧 新版, p. 24 - 24, 1969
- 4.5) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクタイトイルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No. 721 / VI - 57, p. 180, 2002
- 4.6) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクタイトイルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No. 721 / VI - 57, pp. 180~181, 2002
- 4.7) 中島誠三, 秋山真次, 八坂光洋, 佐藤宏志, 向野勝彦: トンネル軸方向挿入組立ダクタイトイルセグメントの開発, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集第8巻論文(6), pp. 40~41, 1998
- 4.8) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクタイトイルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No. 721 / VI - 57, pp. 180~181, 2002
- 4.9) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクタイトイルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No. 721 / VI - 57, pp. 181~182, 2002
- 4.10) 広瀬光治, 浅沼博, 横川昌彦: 厚肉円筒の圧縮座屈現象, 塑性加工春季講演会講演論文集, pp. 601~604, 1988
- 4.11) 中島誠三, 秋山真次, 八坂光洋, 佐藤宏志, 向野勝彦: トンネル軸方向挿入組立ダクタイトイルセグメントの開発, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集第8巻論文(6), pp. 40~41, 1998



## 第 5 章 リング継手の開発



## 5.1 アンカージョイント<sup>5.1)</sup>

このセグメントの組立方式をワンパス組立てとしたことから、リング継手もいわゆるワンタッチ式の継手構造を目指した。ただし、ワンタッチ式の継手構造であっても、その締結完了時点と必要な強度や耐力を発揮する時点は、組立てられるセグメントがトンネル軸方向に動き、既設セグメントに接した時点でなければならない。つまり、締結動作が徐々に進みセグメントの組立てが完了すると同時に締結を完了する必要がある。

このような機能を実現できる機構は以下のようなものであると考えた。

組立てられるセグメントと既設リングとの締結は、両者に取り付けられた継手部材が噛み合い、その噛み合いの度合いが徐々に大きくなることにより、その摩擦力で締結力を発生させる。

両継手部材を噛み合わせ、それにより摩擦力を徐々に増大させるには、テーパがついた部材をトンネル軸方向に移動させる。

テーパがついた部材と噛み合う側の部材は、テーパがついた部材を包み込むことにより押し広げられるが、一方でその外側を拘束すれば自由な変形が抑制され、テーパのついた部材とそれを包み込む部材および外側を拘束する部材との間に摩擦力が発生する。

これらの機能をもつものとして、コンクリートの躯体に他の構築物を固定するために建築工事で一般に使用されているホールインアンカーがある。ホールインアンカーはコンクリートの躯体に開けられた孔に、孔の径よりやや小さい外径をもつスリーブ状の部材を挿入し、そのスリーブ状の部材をテーパのついたこまで押し広げることにより、スリーブとコンクリートの孔面およびスリーブとテーパをもつこまとの間に摩擦力を出現させ、スリーブ状の部材を固定するものである。

これらの機能をセグメントのリング継手に応用した場合、その継手の基本的な構成とセグメントの組立時の挙動は以下のとおりとなると考えた。

既設セグメントの切羽側のリング継手面には、半径方向に変形しやすいスリーブ状の部材が取り付けられる。

組立てられるセグメントの坑口側のリング継手面には、スリーブ状の部材の外径よりやや大きい内径をもつ筒状の部材と、その中にその先端の外径がスリーブの内径よりやや

小さいテーパーをもつこまを置く。

組立てられるセグメントがトンネル軸方向に移動するに従い、スリーブ状の部材は組立てられるセグメントに設けた筒状の部材に挿入される。

さらに組立てられるセグメントが坑口側へ移動すると、筒状の部材の内部に格納されたテーパーをもつこまがスリーブ状の部材の内面に沿ってその中に挿入される。

スリーブ状の部材はこまによって半径方向に押し広げられ、その外面が筒状の部材の内面に接触する。

最終段階では、スリーブ状の部材は筒状の部材により外面から拘束され、また、テーパーをもつこまにより内面からも支圧を受けて、その肉厚を減少しながら変形をして締結が終了する。

その際に、筒状の部材の内面、スリーブ状の部材の外内面およびテーパーをもつこまの外面はそれぞれの間で摩擦力を生じ、これにより組立てられるセグメントと既設のリングとが締結される。

この機構がリング継手の構造に採用できると考え、その開発を行った。なお、そのアイデアはホールインアンカーから得られたものであるから、この継手を「アンカージョイント」と呼ぶこととした。

## 5.2 アンカージョイントの構造と締結機構<sup>5.1)</sup>

アンカージョイントの各部の構成と締結時の挙動と機能および特長を図 5.1, 図 5.2 および図 5.3 により説明する。図 5.1 はアンカージョイントの構成部品の外観, 図 5.2 は同じく外観であるが, 図 5.1 のような正面からでは見えない部分を見取り図的に見たものである。これらの二つの図はアンカージョイントの部品のみを示したものであり, リング継手面に取り付けられた状態ではない。また, 図 5.3 はアンカージョイントがセグメントのリング継手面に取り付けられた状態の断面を示したものである。これらの図において, いずれも左側が既設リングの切羽側の継手面を示し, 右側が組立てられるセグメントの坑口側の継手面を示したものである。

切羽側のリング継手面には, 継手面から 70mm の深さのくぼみに 8 本のスリットのあるスリーブ状の部材 (以下単にスリーブと呼ぶ) がナットで取り付けられる。図 5.1

および図 5.2 ではリング継手面は示されていない。スリーブの外径は 36mm , 肉厚 3.5 mm , スリーブ部の長さは約 60mm であり , その後部はボルト状で , ネジが加工されて

ある。スリーブの先端約 30mm の範囲の外表面にはロートレック加工が施されている。

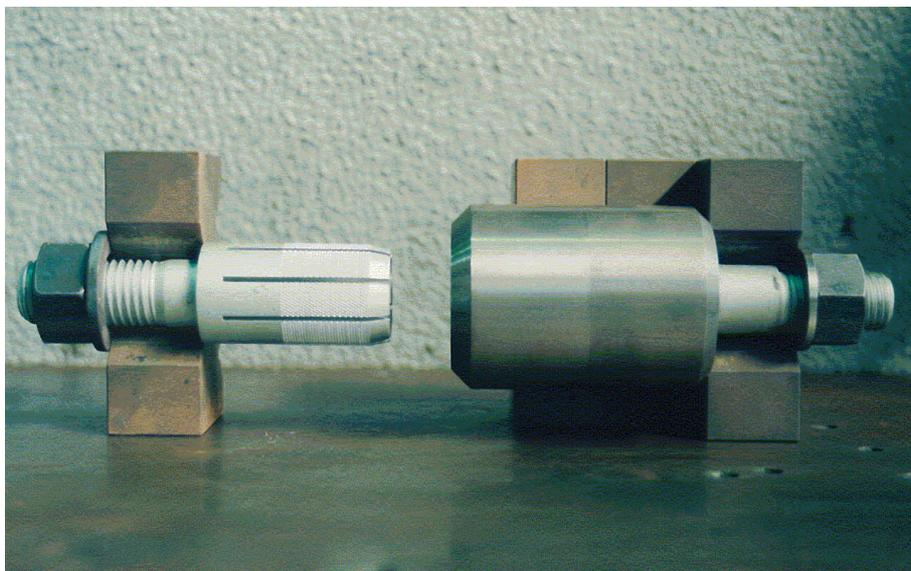


図 - 5.1 アンカージョイントの外観

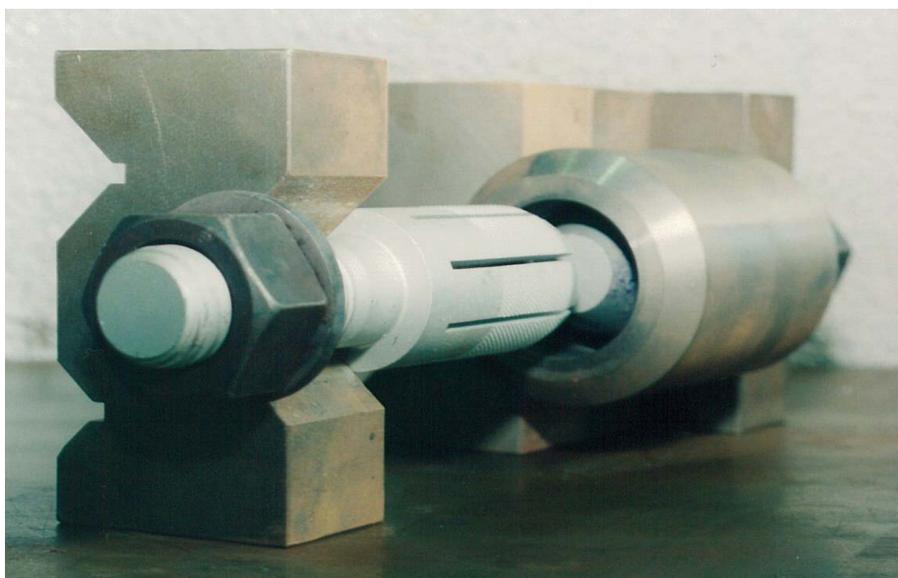


図 - 5.2 アンカージョイントの見取り図的外観

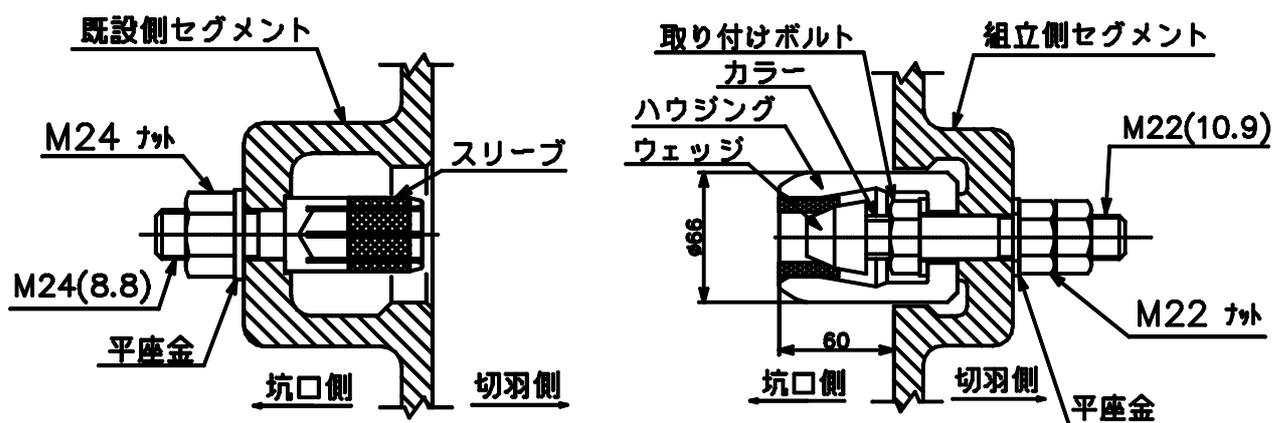


図 - 5.3 アンカージョイントの切羽側（左）と坑口側（右）の断面

坑口側にはハウジングと呼ぶ筒状の部材がリング継手面から約 60mm 突出した状態でリング継手板に設けた深さ 30mm のくぼみにボルトによって取り付けられる。ハウジングは外径 66mm、肉厚約 6mm、長さ約 90mm である。ハウジングの外径は、既設セグメントの切羽側に設けられたスリーブを格納するくぼみの内径より 3mm 小さく、せん断力を受けた場合に半径方向にこの範囲で動くことができる。また、ハウジングの先端は面取りがしてあり、ハウジングがスムーズに挿入できるようになっている。

ハウジングの内部は先広がり空洞部を構成する。ハウジングの中には先端がスリーブの内径より 5mm 小さい外径をもち、先端から約 30 度の勾配をもつ長さ 30mm のウェッジと呼ぶ部材が格納されている。このウェッジはハウジングの取り付けボルトとは完全に分離されており、それ自体はどこにも固定されていない。したがって、ウェッジはセグメントの組立てが行われるまでは、発泡スチロールでできた部品によってハウジング内に格納され、セグメントの組立てまでに落下することを防いでいる。また、セグメントの組立て段階ではウェッジはハウジング内で半径方向に自由に動くことができる。これにより、組立て誤差に伴うスリーブとハウジングとの軸心のずれ、スリーブの肉厚、ウェッジの外径およびハウジングの内径の寸法精度のばらつきを吸収する。

ウェッジの後端にはカラーと呼ぶ外径 20mm、肉厚 1.5mm の円筒状の部材が装着されている。このカラーは、セグメントが組立てられる際に、スリーブの挿入によってウェッジが受ける支圧力が伝えられる。カラーは前述したセグメント継手のバックアップ材に相当するもので、所定の荷重を越えると座屈変形を起こし、スリーブの肉厚、ウェッ

ジの外径およびハウジングの内径の寸法誤差を吸収する．これにより 8 枚のスリーブに均等な塑性変形を発生させることができ，過度な挿入力の導入や不完全な締結状態を抑制できる．

セグメントが組立てられる際のアンカージョイントの締結は次のような手順で行われる．組立てられるセグメントがシールドジャッキにより坑口側に押し込まれることに伴い，組立てられるセグメントの坑口側継手面に取り付けられたハウジングの先端が既設リングの切羽側のくぼみに挿入される．

さらにハウジングが挿入されると，切羽側のリング継手板に格納されたスリーブがウェッジ先端により押し広げられながら，ハウジングの内面とウェッジの外面の隙間に挿入される．この時点でスリーブは塑性変形を開始する．

さらに挿入が行われると，スリーブ先端が若干内径側に变形して締結が完了される．図 - 5.4 および図 - 5.5 は締結が完了したアンカージョイントの断面を示したものである．

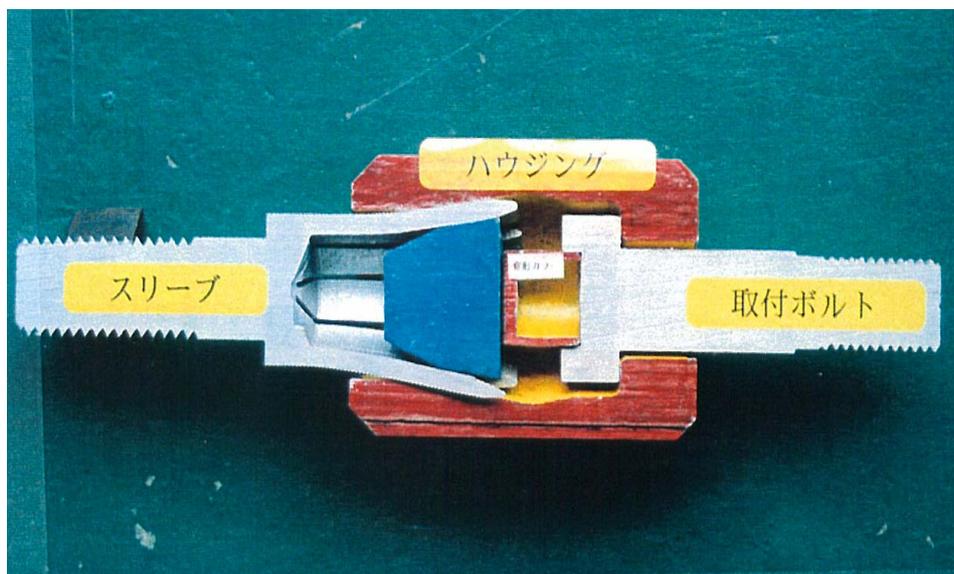


図 - 5.4 アンカージョイントの締結状態の断面

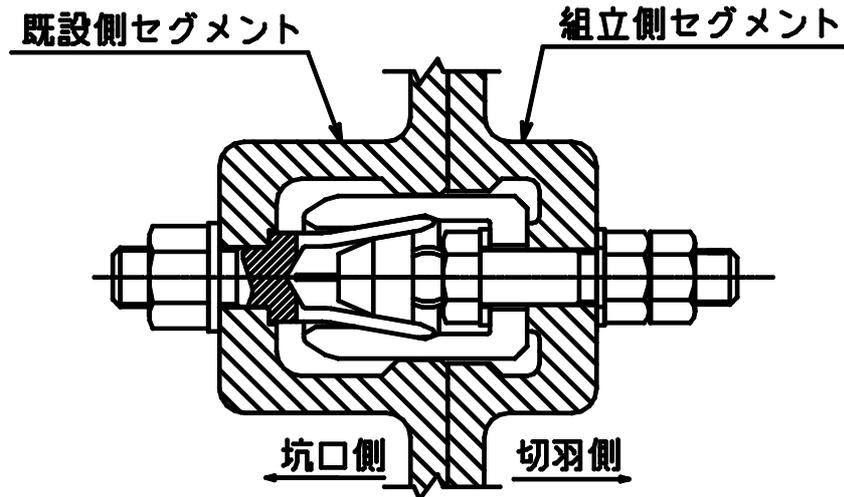


図 - 5.5 アンカージョイントの締結完了時の断面

表 5.1 はアンカージョイントの構成部品の材料表を示したものである。

表 - 5.1 アンカージョイントの構成部品の材料表

品名	材質	強度区分
ハウジング	FCD 600	4 種
ハウジングの取り付けボルト	SCM 435	8.8
同ナット		8
同ワッシャー		22H
スリーブ	SCM 435	10.9
スリーブ用ナット		10
同ワッシャー		22H

### 5.3 アンカージョイントの基本性能試験<sup>5.1)</sup>

図 5.3 に示した構成と基本寸法をもつ供試体を用いて、アンカージョイントの基本性能に関する各種の試験を行った。

#### 5.3.1 アンカージョイントの圧入試験

アンカージョイントの圧入試験は以下のようにして行った。圧入試験は図 5.6 に示すように、リング継手板を想定した治具にアンカージョイントの切羽側および坑口側の継手部品を取り付け、それらをアムスラー試験機に対向させて取り付ける。その状態で切羽側を想定した治具の後方から圧縮荷重を与え、両継手面が完全に接触するまで圧入を行うものである。

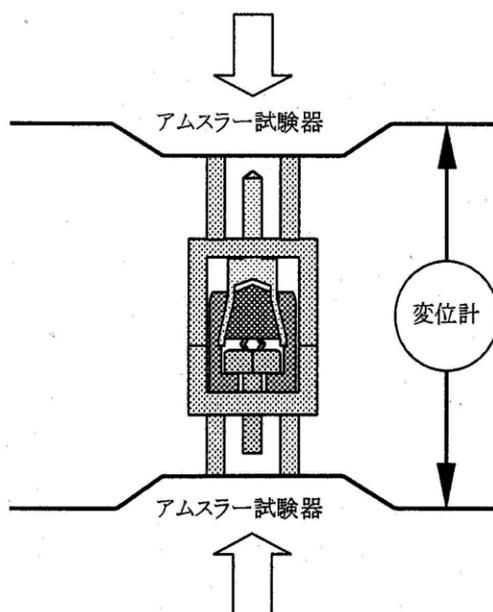


図 - 5.6 アンカージョイントの圧入試験

図 5.7 はその試験結果を示したものである。この試験はハウジングの先端が既設リング継手面と同位置の状態、両継手面を想定した面の間隔が 60mm の状態で試験を開始したが、その後両継手面の距離が 28mm までは圧入力はまったく発生しないが、28mm 以後急激に上昇した。圧入力が急激に上昇した理由は、スリーブがウェッジによって花びら状に押し広げられ、さらに挿入が行われるとスリーブがハウジングの内面とウェッジの外表面との間に差し込まれ、塑性変形が生じたためである。その後はほぼ一定の圧入力となり、その荷重は約 120 kN であった。この圧入荷重はシールドジャッキの装備推力の約 5% である。

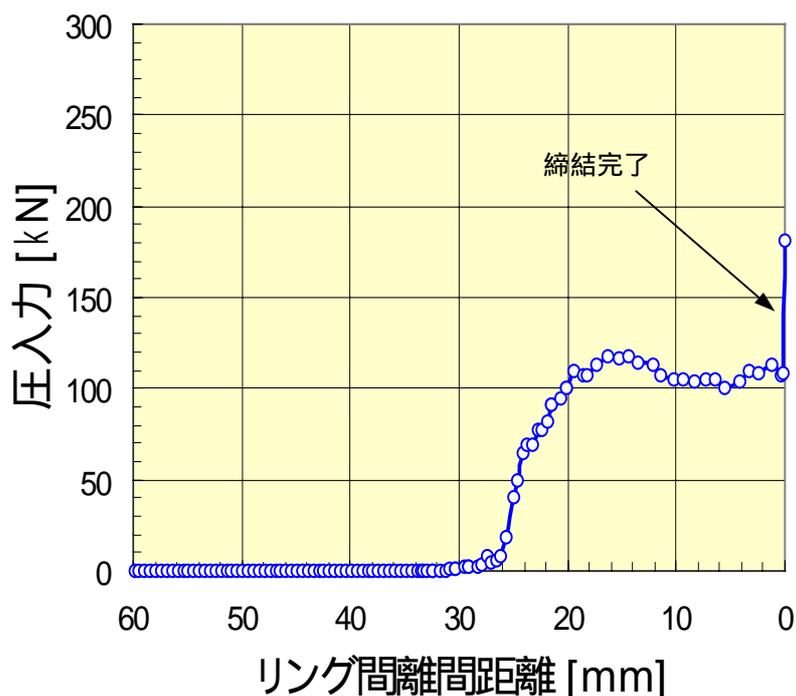


図 - 5.7 アンカージョイントの圧入試験の結果

### 5.3.2 アンカージョイントの引張試験

図 5.8 は締結が完了したアンカージョイントの引張試験の状況を示したものである。ハウジングはその取り付けボルトによってアムスラー試験機のテーブルに直接取り付けられ、スリーブは治具に取り付けられた状態でアムスラー試験機の上昇テーブルに取り付けられる。その状態でアムスラー試験機の上昇テーブルを上昇させて試験を行った。

また、図 5.9 はその結果を示したものであり、以下のことがわかる。

引張荷重と変位との関係は設計荷重の約 2 倍の 170kN までは直線的であった。このときの目開き量は約 1.7mm であった。これは、セグメントの幅が 1200mm の場合にはその約 1.5%に相当する。

設計荷重 84kN における継手面の目開き量は約 0.3mm であり、止水性を十分満足できるものと判断できる。また、設計荷重による 10 回の繰り返し載荷後の目開き量はなく、緩みが生じないと判断できた。

さらに荷重を加え引張載荷した結果、設計荷重の約 3 倍の 254kN でハウジング取り付けボルトが破断した。アンカージョイントの引張強度を、ボルトの呼び径 M22、強度区分 8.8 相当と想定して定めたが、この破断荷重はそのボルトの破断強度例の 252kN

にほぼ等しい値であった。

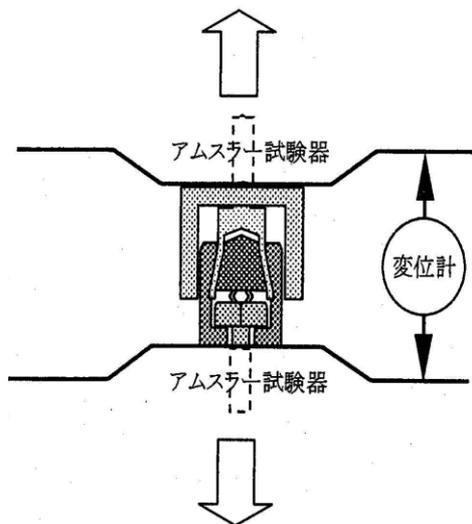


図 - 5.8 アンカージョイントの引張試験

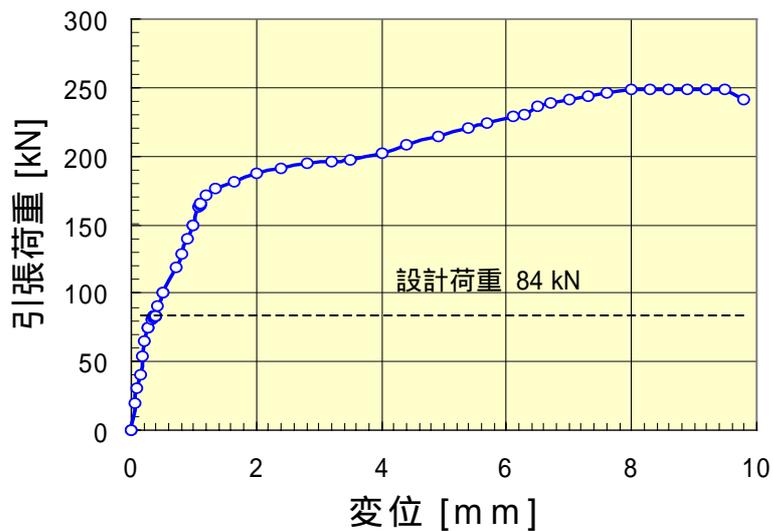


図 - 5.9 アンカージョイントの引張試験の結果

### 5.3.3 アンカージョイントのせん断試験

アンカージョイントのせん断試験は、締結後の継手にせん断荷重を載荷して行った。図 - 5.10 はその試験方法を示したものである。せん断試験用の治具にアンカージョイントの各部品を取りつけた状態でアンカージョイントを締結完了の状態にしてせん断試験の供試体とした。既設セグメントの切羽側のリング継手板を想定した治具 ( a ) は剛性のある

試験用治具に取り付けられた上で治具全体をアムスラー試験機のベッドに取り付けられる。一方組立てられるセグメントの坑口側リング継手を想定した治具 ( b ) はその上部が突出し、そこにアムスラー試験機によりせん断荷重を載荷できる構造とした。

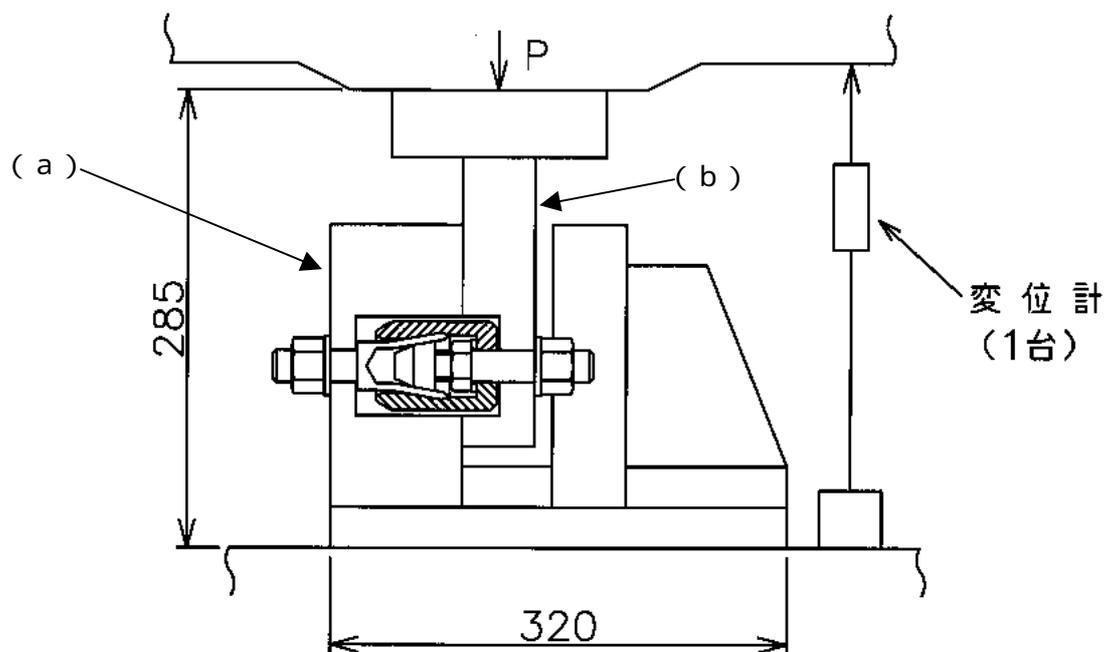


図 5.10 アンカージョイントのせん断試験

図 5.11 はアンカージョイントのせん断試験の結果を示したものである。この結果から以下のことがわかる。なお、載荷は設計荷重の約 3 倍の 300kN で終了し、破断までは行っていない。

せん断荷重の載荷の初期にはハウジングとセグメント本体とのクリアランス 3mm に相当するせん断方向の変位が見られ、その後直線的に挙動した。

せん断ばねのばね定数は 89MN / m となった。

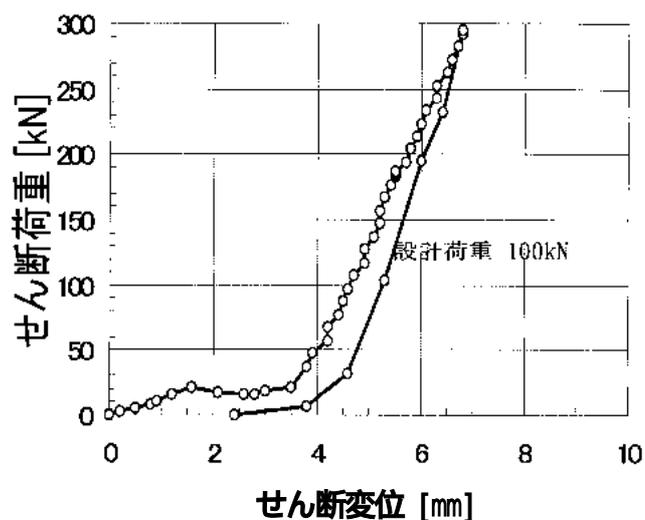


図 5.11 アンカージョイントのせん断試験の結果

#### 5.4 まとめ

本章では、まず、リング継手として、ホールインアンカーの原理を応用した継手構造が適用できると判断し、「アンカージョイント」を開発した。次にアンカージョイントに付与する機能を検討し、その構造と構成部品、材質、形状・寸法などを選定した。その構造は、切羽側ではリング継手面に設けられた凹部にスリーブが格納される構造で、坑口側ではリング継手面からハウジングが突出し、その中にウェッジなどを内蔵する構造である。アンカージョイントの圧入試験では想定どおりの挙動が確認され、リング継手が問題なく締結できることが確認された。さらに締結後に引張試験とせん断試験とを行い、引張試験ではスリーブの取り付けボルトがその強度相当の設計荷重で破断することを確認した。また、せん断試験では、せん断強度が設計の3倍以上あることなどを確認した。

このことから、アンカージョイントが十分に実用できるものと判断された。

## 参考文献

- 5.1) 石川幸彦, 渡邊健, 辻本和則, 宮武順一, 吉野彰一: 自動アンカージョイントの開発, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp. 270 ~ 271, 1996

## 第6章 継手の強度と剛性の確認



## 6.1 継手の剛性評価

シールド工事に用いられるセグメントの断面力の算定には、「はり - ばねモデル計算法」を用いることが現在では一般的になりつつある<sup>6.1)</sup>。このため、セグメント継手を回転ばねにモデル化するときのばね定数およびリング継手をせん断ばねにモデル化するときのばね定数を把握する必要がある。

本セグメントについても、これらのばね定数を求めるとともに継手部の強度を確認することを目的として、セグメント継手部の曲げ試験およびリング継手部のせん断試験を行った。

## 6.2 セグメント継手の曲げ試験<sup>6.2)</sup>

### 6.2.1 曲げ試験の方法

セグメント継手の曲げ試験は図 - 6.1 に示すような平板供試体を用いて行った。セグメントの桁高は鉄道の複線トンネルを想定して 350mm とし、セグメント幅は通常のセグメント幅である 1200mm、セグメントの長さは 1 ピースの概ね 1/2 とした。AS ジョイントの位置はセグメント内面側から 125mm の位置とした。これは従来の継手において、ボルトを 3 本用いる場合には、抵抗モーメントの負担率がセグメントの内面側で 2/3 となっていることから定めた位置である。

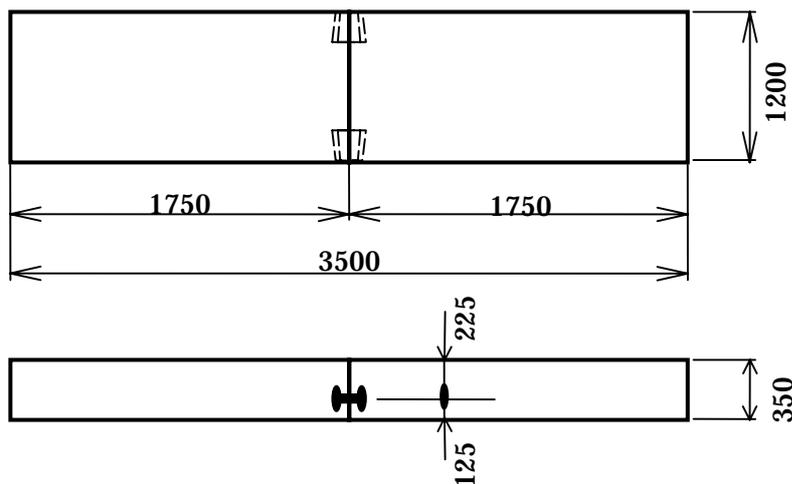


図 - 6.1 継手曲げ試験の供試体

図 - 6.2 および図 - 6.3 は継手曲げ試験の試験要領を示したものである。

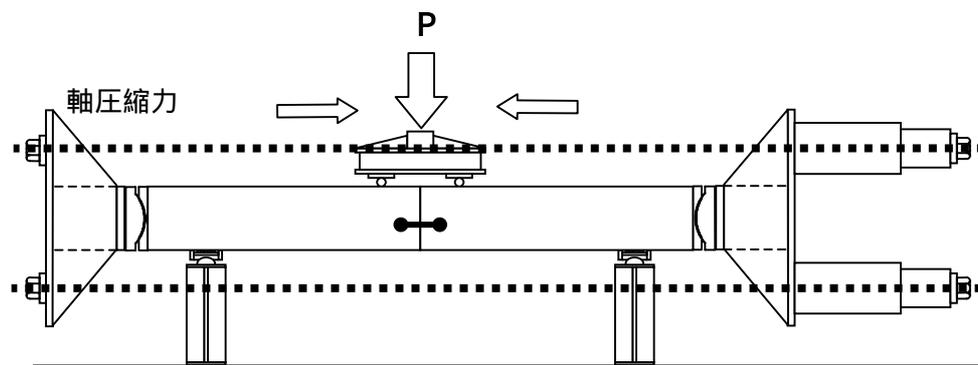


図 - 6.2 軸圧縮力を導入した場合の継手曲げ試験の要領

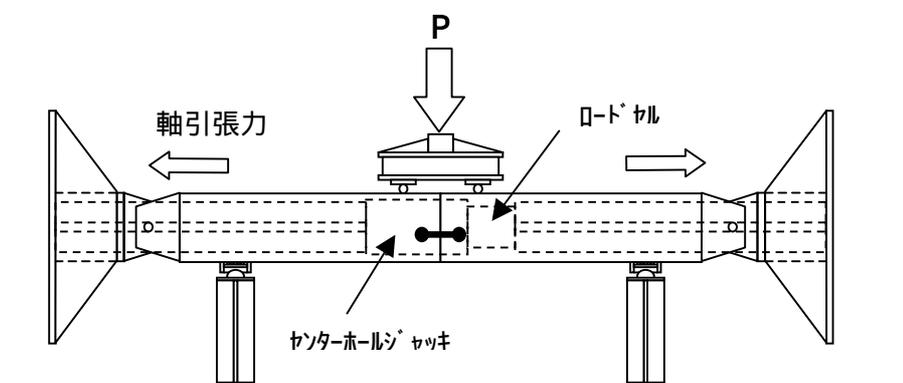


図 - 6.3 軸引張力を導入した場合の継手曲げ試験の要領

継手曲げ試験は、セグメント本体を直線部材でモデル化して、供試体の両端部に治具を介して引張りおよび圧縮の軸力が導入できるものとし、その両端は可動支持とした。載荷は鉛直方向に2点載荷する方法を採用した。ASジョイントに導入する締結力はAS金物の材料の許容応力度として定めた  $200 \text{ N/mm}^2$  の約80%の応力度に相当する力とした。

試験ケースは表 - 6.1 に示すとおりで、軸力の有無をパラメーターとして設定した。測定項目は載荷荷重と継手部の目開き量である。また、軸引張力  $100 \text{ kN}$  を導入したケースでは破壊まで載荷を行った。

図 - 6.4 および図 - 6.5 に継手曲げ試験の状況を示す。

表 - 6.1 継手曲げ試験の試験ケースの一覧表

	正曲げ				負曲げ			
軸力 ( kN )	N = - 1000	N = 0	N=100	N=300	N = - 1000	N=0	N=100	N=300
曲げモーメント ( kN・m )	327	152	134	99	260	86	68	33
載荷荷重 ( kN )	622	289	256	189	496	163	129	63

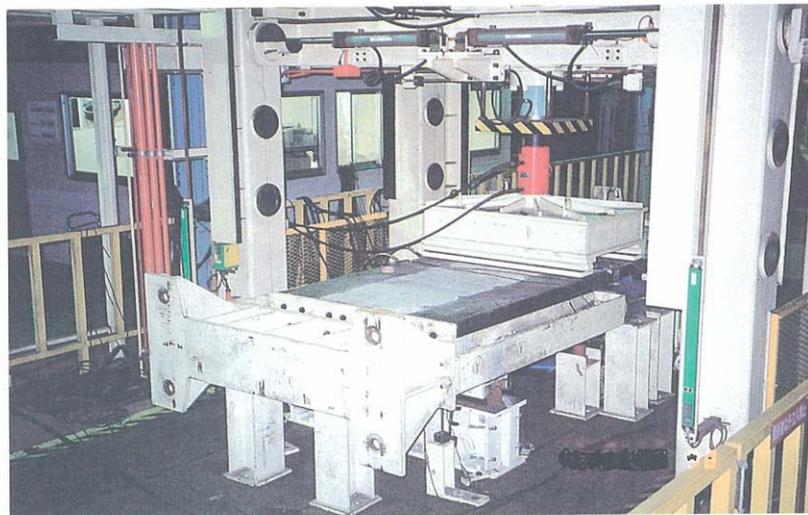


図 - 6.4 継手曲げ試験の状況 (正曲げ)

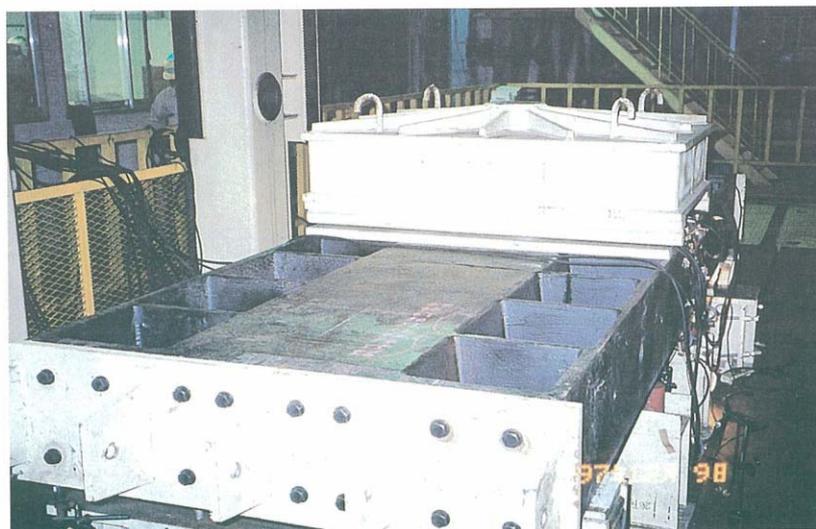


図 - 6.5 継手曲げ試験の状況 (負曲げ)

## 6.2.2 試験の結果

### (1) 継手の回転ばね定数

図 - 6.6 および図 - 6.7 は継手の曲げモーメントと回転角との関係を示したものである。図中の接線勾配が回転ばね定数を表す。それらをまとめると表 - 6.2 に示すとおりとなった。

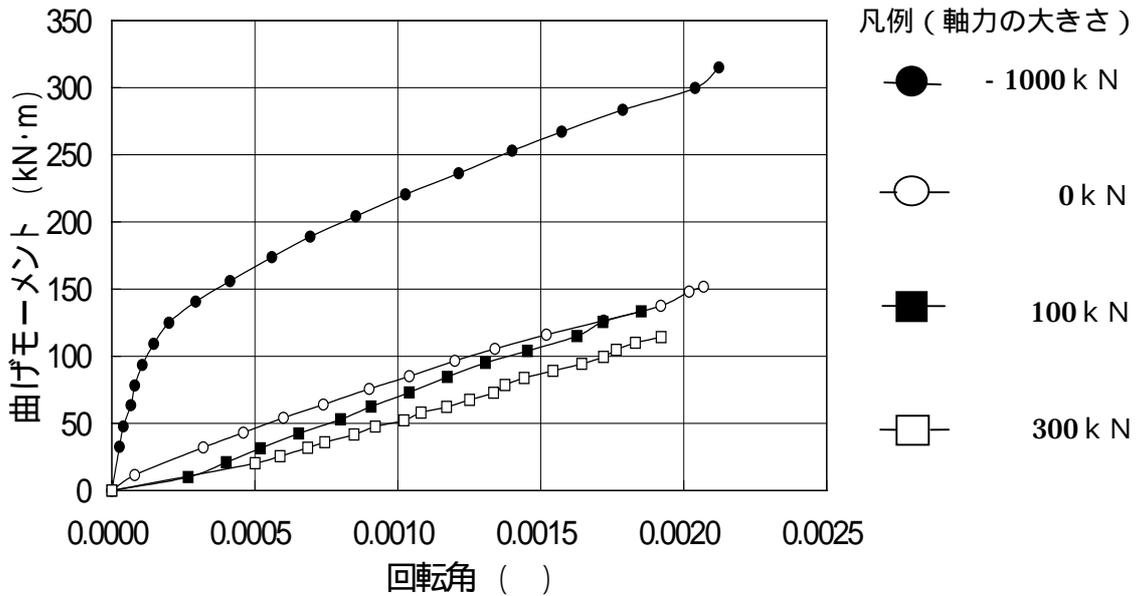


図 - 6.6 曲げモーメントと回転角との関係 (正曲げ)

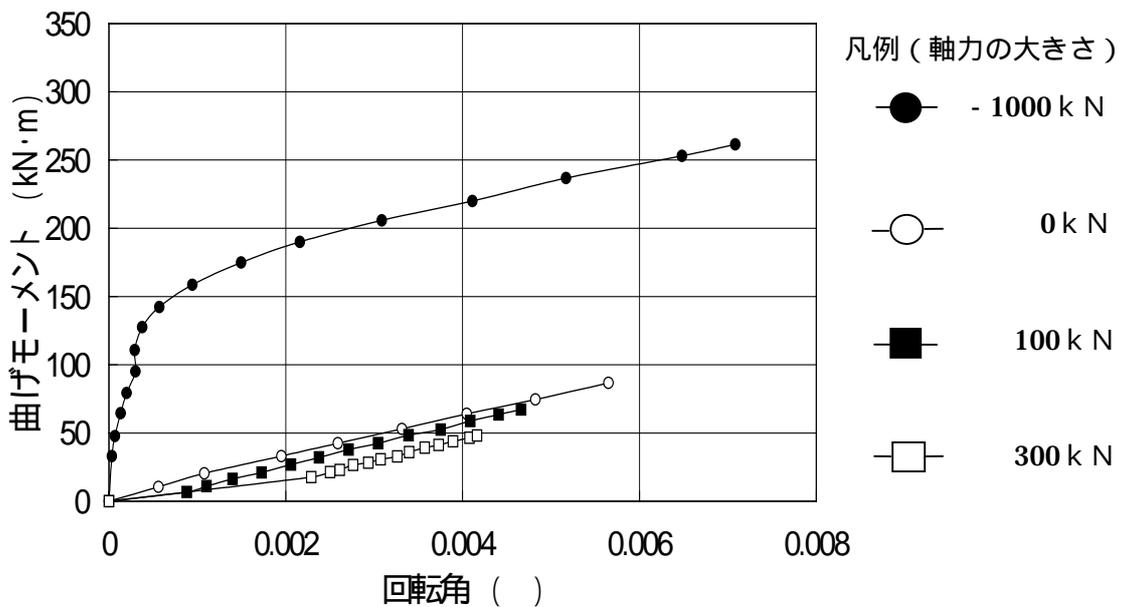


図 - 6.7 曲げモーメントと回転角との関係 (負曲げ)

軸圧縮力 1 MN を導入した場合は、圧縮領域と曲げ引張領域の 2 つに分けて回転ばね定数を求めた。

$K_2$  の値は軸力の大きさに関係なくほぼ一定の値であった。また、正曲げと負曲げで回転ばね定数に約 6 倍ほどの差が生じたのは、図 - 6.1 の供試体の図で示したように正曲げを重視して AS ジョイントの桁高方向の位置を決定したためである。

8.2 で述べる回転ばね定数の計算法によれば、本試験条件による正曲げの回転ばね定数は  $60.5 \text{ MN} \cdot \text{m} / \text{rad}$  であり、実験値は概ね計算値に近似している。

表 - 6.2 セグメント継手の回転ばね定数の一覧表

軸力 (kN)	正曲げ		負曲げ	
	$K_1$	$K_2$	$K_1$	$K_2$
- 1000	688	67.4	211	11.5
0	-	63.8	-	14.7
100	-	87.5	-	15.8
300	-	64.6	-	15.6

単位：MN・m / rad

## 2) 継手の曲げ強度

軸引張力 100 kN を導入した状態で破壊まで載荷したが、破壊は AS 金物フランジとウェブとの交差部に近い部位で発生し、破壊荷重は設計荷重の約 5 倍であった。この荷重は計算値にほぼ近似している。図 - 6.8 には AS 金物の破壊状況の写真を示す。



図 - 6.8 AS 金物の破壊状況

### 6.3 リング継手のせん断試験

#### 6.3.1 せん断試験の方法

リング継手のせん断試験は図 - 6.9 に示す直線ばり状の供試体を用いて、図 - 6.10 に示すように、4 個のリング継手で締結された 3 つの供試体の両端を固定して、中央部のセグメントを押し抜く方法で行った。4 本の継手部材に対する載荷荷重は、M22、8.8 相当のボルトの許容せん断荷重の 2 倍の 608 kN（1 本あたり 152 kN）とした。

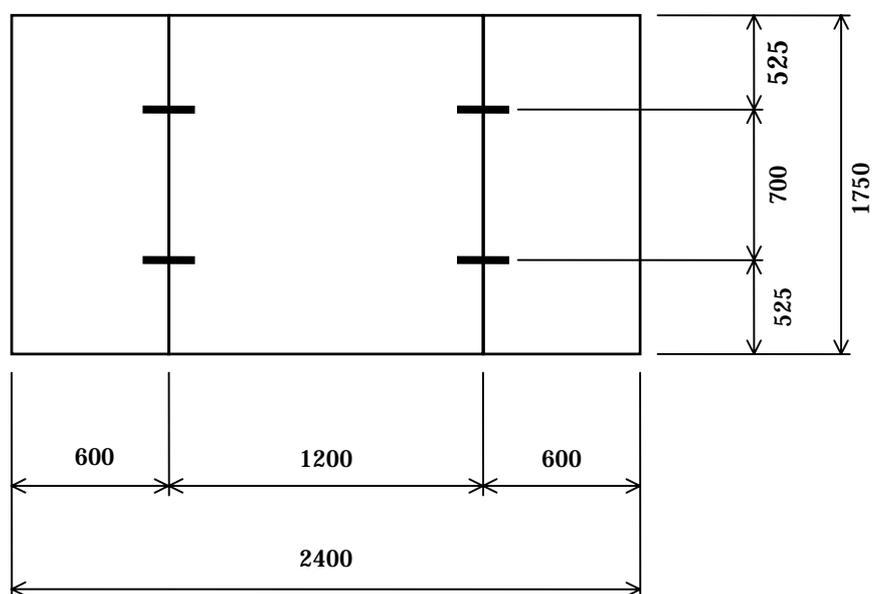


図 - 6.9 リング継手のせん断試験に用いた供試体

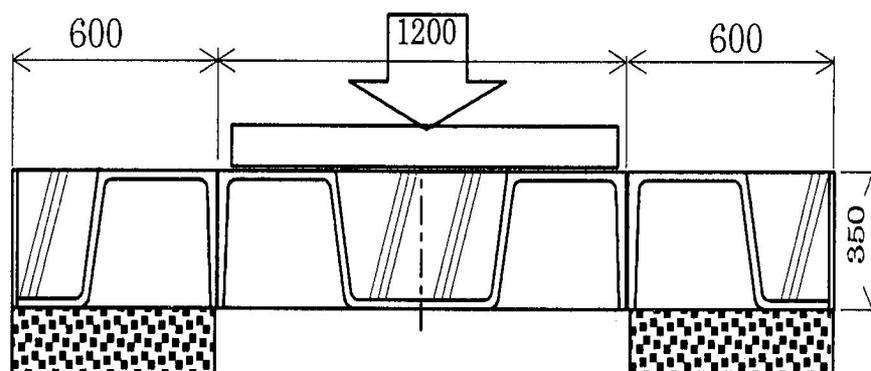
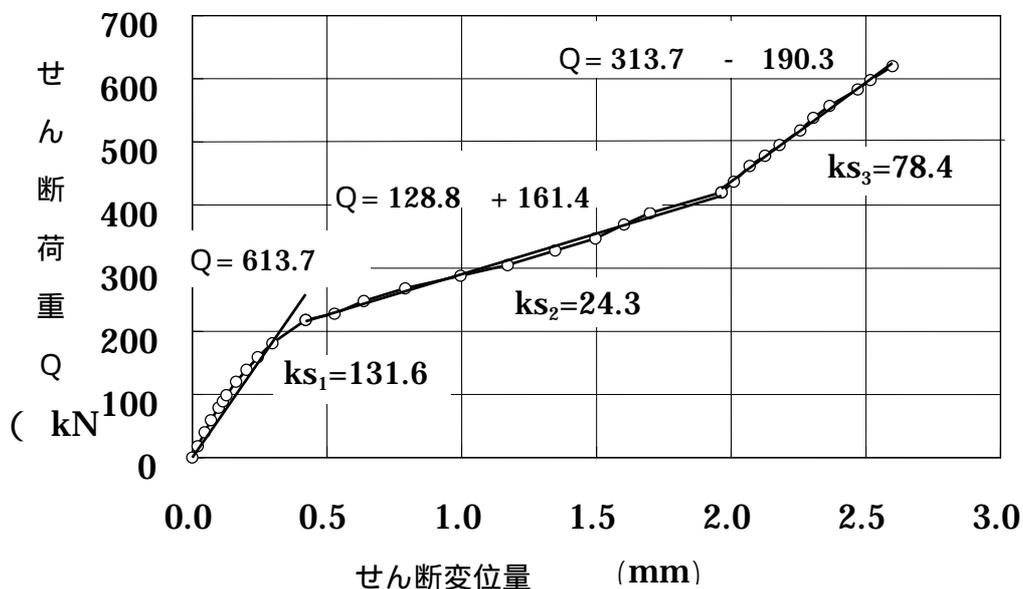


図 - 6.10 リング継手のせん断試験の要領

### 6.3.2 試験の結果

リング継手のせん断試験における荷重と相対変位量との関係を図 - 6.11 に示す。載荷直後はスリーブとハウジングの取り付けボルトの締め付け力による摩擦抵抗力が発生し、その後約 2mm の滑りが生じた。さらに荷重を増加させると、ハウジングとリング継手板とのせん断状態となる。せん断荷重とせん断変位量との関係には、全体としていわゆるトリリニアの挙動を示した。第2領域の約 2mm の滑り距離はハウジング外径である 66mm とハウジングが取り付けられている坑口側継手面のくぼみの内径である 69mm との差とほぼ一致した。図 - 6.11 には各領域のせん断ばね定数を算出した結果を併記してある。



(注)せん断ばね定数の単位は MN / m

図 - 6.11 せん断荷重とせん断変位量との関係

### 6.4 まとめ

本章では、セグメント継手とリング継手の強度と剛性に関する実験とその結果を示した。継手の剛性については、断面力の算定を「はり - ばねモデルによる計算」で行う場合に必要回転ばね定数とせん断ばね定数を求めている。

セグメント継手の回転ばね定数  $K_2$  は、正曲げでは概ね 60 ~ 80 MN · m / rad であった。これは想定したボルト締結式のセグメント継手の回転ばね定数と同じオーダーであり、AS ジョイントが実用的な剛性を有しているものと判断できる。また、 $K_2$  の値は軸引張

力あるいは軸圧縮力の有無およびその大小に関係なくほぼ一定の値を示した。

軸引張力として 100 kN を与えた場合の破壊荷重は設計荷重のほぼ 5 倍であり，十分な安全性があることが確認できた。また，その破壊位置は A S 金物のフランジとウェブの交差部に近い箇所であった。また，セグメントの継手板などに有害な変形は認められなかった。

リング継手のせん断試験結果における荷重と供試体のせん断変位との関係は概ねトリリニアアの挙動を示したことから，リング継手の調芯機能が働いていたことが確認できた。また，せん断荷重として，アンカージョイントの引張強度として想定した M22，8.8 相当のボルト 4 本分の許容せん断荷重の 2 倍の 608kN を載荷したが，ハウジングの有害な変形は認められなかった。

## 参考文献

- 6.1) (社)土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準指方書「シールド工法編」・同解説，(社)土木学会，pp. 80～81，1996
- 6.2) 佐藤宏志，向野勝彦，今野勉，辻本和則，小泉淳：施工性向上を目指したダクタイトイルセグメントの開発とその実用化，土木学会論文集 No. 721 / VI - 57，p. 184，2002



## 第7章 ASセグメントの組立性の確認



## 7.1 AS セグメントの組立方式とその手順

AS セグメントの組立方式は、いわゆる「ワンパス組立て」であり、その組立手順を以下のとおりに設定した。

準備作業として、組立てられるセグメントにセグメント継手およびリング継手を取り付け、滑材が塗られたシール材を貼り付ける。

シールドマシンのエレクターがセグメントを把持した後、組立てるべき位置の近くまで回転する。この場合、組立てられるセグメントと既設リングのリング継手面の間隔は、先付けされた AS 金物やアンカージョイントが干渉しないように、約 100～150 mm 開けておく必要がある。

さらに回転し、セグメント継手面が隣接する既設セグメントのセグメント継手面に接した後、ヨーイング動作により、セグメント継手面が既設セグメントと平行になるように姿勢制御を行う。

この段階でエレクターの伸縮ジャッキを用いて、既設セグメントと組立てられるセグメントの高さ合わせを行う。

エレクターを坑口側に摺動させ、組立てられるセグメントと既設リングのリング継手面の間隔が約 80mm になるまで接近させる。

この状態で、エレクターのローリング動作で既設リングとの高さ合わせを行う。

最後に、セグメント継手に近いシールドジャッキ 2、3 本で、組立てられるセグメントを坑口側へ押し込む。

図 - 7.1 はこの手順を示したものである。

本セグメントの大きな目的である施工性の向上を実現するためには、実際の現場での施工を行う前に、実験室的な組立試験により、想定した組立方式が可能かどうかの基礎的な確認が必要と考えた。そのため、2 段階の組立試験を行うことにした。第 1 段階は平板状の模型を用いて行う組立試験であり、第 2 段階は実物大のセグメントを使用した実際の現場の組立てに近い状態での組立試験である。いずれの場合にも、セグメント継手とリング継手は所定の位置に取り付けられた状態で行うこととした。

# ASセグメントのワンパス組立

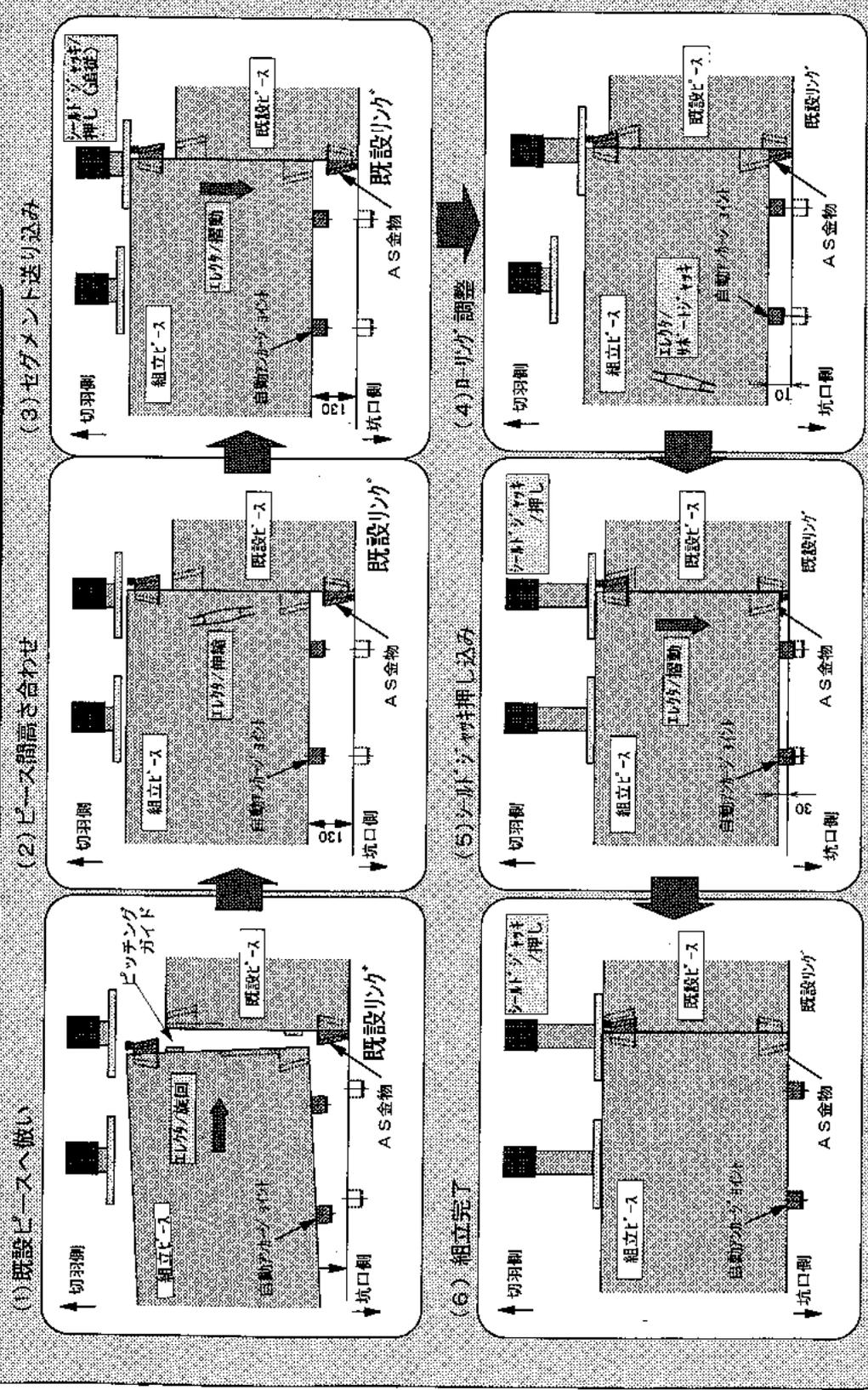


図 - 7.1 ASセグメントのワンパス組立ての手順

## 7.2 模型によるセグメントの組立試験

### 7.2.1 模型による組立試験の目的

模型によるセグメントの組立試験の目的を以下のとおりと考えた。なお、この組立試験はこの方法が可能か否かを概略把握するためのものである。したがって、試験に用いる供試体や試験装置は簡易的なものとした。

シールドジャッキでセグメントをトンネル軸方向に押し込むだけでセグメントの組立ができることの確認。

組立てられたセグメントの品質（隣接するセグメント間の目開き，目違い）の確認。

セグメントを押し込むためのシールドジャッキの位置とその必要な推力の確認。

セグメントの位置決めはどの程度の精度が必要であるかの確認。

セグメントの組立がスムーズに行えるためのシール材の条件の把握。

### 7.2.2 試験に用いた供試体と試験装置

#### (1) 供試体

表 - 7.1 はこの試験に用いた供試体の一覧表である。

表 - 7.1 模型によるセグメントの組立試験に用いた供試体の一覧表

項目	Aセグメント	半径方向挿入型Kセグメント	軸方向挿入型Kセグメント
供試体の寸法，桁高	350mm	350mm	350mm
幅	1200mm	1200mm	1200mm
長さ	1650mm	800mm	600×800mm
ASジョイントの数	2個	4個	4個
アンカージョイントの数	2個	1個	1個
シール材の種類	水膨張3倍型	同左	同左
幅	20mm	20mm	20mm
厚さ	2mm	2mm	2mm

#### (2) 試験装置

試験に用いた装置は以下のとおりである。

既設リングおよび既設セグメントに相当するフレーム

シールドジャッキ：300kN×2本

エレクターに相当する姿勢制御用ジャッキ：10kN×6本

### 7.2.3 試験の方法

模型による組立試験は以下の方法で行った。

供試体と既設リングおよび既設セグメントの準備として、組立てられるセグメントにはバックアップ材を取り付けた AS 金物とアンカージョイントを取り付け、シール材を貼付する。また、既設リングおよび既設セグメントに相当するフレームにはそのシール溝に所定のシール材を接着剤で貼り付ける。

組立てられるセグメントを既設セグメントに対して約 20mm 既設リングに対して約 80 mm 離れた位置にセットする。

エレクターの旋回に対応するジャッキにより、組立てられるセグメントを既設セグメントに接触させる。この段階でセグメントの高さとヨーイングおよびローリングの制御を行う。

最後にシールドジャッキに相当するジャッキにより、組立てられるセグメントを押し込む。

これらの試験の要領を図 - 7.2, 7.3 に、試験装置と試験供試体を図 - 7.4, 7.5 に示す。

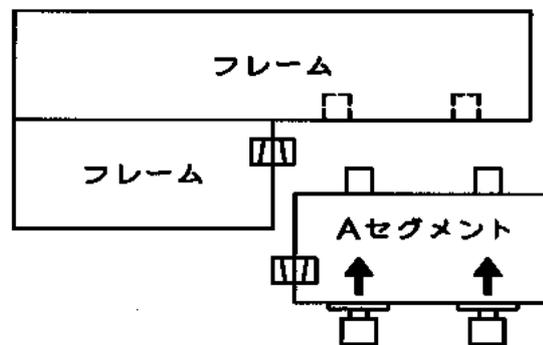


図 7.2 Aセグメントの組立試験の要領

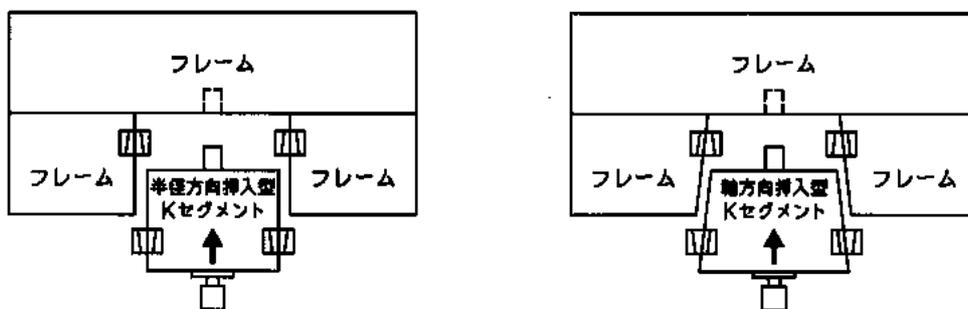


図 - 7.3 半径方向挿入型 K および軸方向挿入型 K セグメントの組立試験の要領



図 - 7.4 模型を用いた A セグメントの組立試験の状況 (下側が供試体)

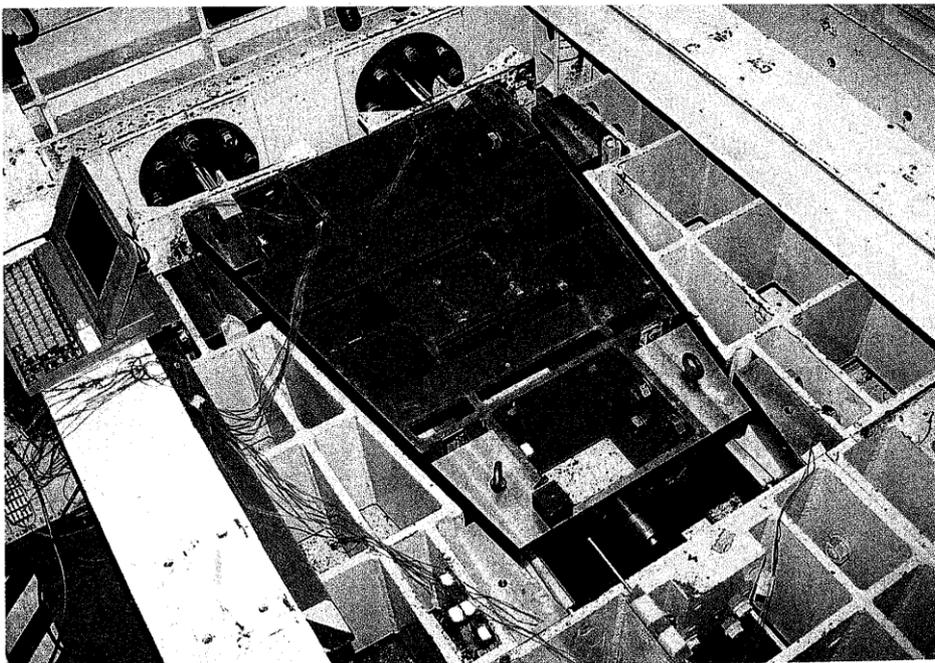


図 - 7.5 模型を用いた軸方向挿入型 K セグメントの組立て試験の状況

#### 7.2.4 試験の結果

模型を用いたセグメントの組立試験の結果を表 - 7.1 に示す。

表 - 7.1 模型によるセグメントの組立試験の結果

セグメントの種類	確認項目	試験結果	セグメントの組立ての可否
A セグメントの 1/2 模型	必要な推力の確認	300kN × 2 本 = 600kN 以下	可能
	シール材の挙動	はがれ, 寄りはない	
	目開き量 3mm での組立て	組立て可能	可能
	目違い 3mm での組立て	組立て可能	可能
半径方向挿入型 K セグメント	必要な推力の確認	150kN × 2 本 = 300kN 以下	可能
軸方向挿入型 K セグメント	必要な推力の確認	150kN × 2 本 = 300kN 以下	可能

この表に示すように、いずれのセグメントも、シールドジャッキでトンネル軸方向に押し込むだけで組立てが可能であることが確認できた。

また、A セグメントの 1/2 に相当する供試体を組立てる場合に必要となるジャッキ推力の予測値は以下のとおりであり、合計 532 kN となる。

A S ジョイントの締結に必要な挿入力

- ・ M27, 10.9 相当の許容締結力の 80% :  $172\text{kN} \times 0.8 = 138\text{kN}$
- ・ AS 金物に上記の締結力を発生させるための挿入力 :  $138\text{kN} / 2.3 = 60\text{kN}$
- ・ 2 個の AS 金物に対して必要な挿入力 :  $60\text{kN} \times 2 = 120\text{kN}$

アンカージョイントの圧入に必要な圧入力

- ・ アンカージョイント 1 本の圧入力 :  $120\text{kN}$
- ・ 2 本のアンカージョイントの圧入に必要な圧入力 :  $120\text{kN} \times 2 = 240\text{kN}$

シール材の押しつぶしに必要な力

- ・ シール材の種類と寸法 : 3 倍型水膨張ゴム, 厚さ 2mm × 幅 20mm × 長 330cm
- ・ シール材の圧縮率とそのときの圧縮応力 : 約 35%, 2.6MPa
- ・ シール材の圧縮に必要な力 :  $2.6\text{MPa} \times 2\text{cm} \times 330\text{cm} = 172\text{kN}$

合計 :  $120\text{kN} + 240\text{kN} + 172\text{kN} = 532\text{kN}$

この組立試験においては、シールドジャッキに相当するジャッキのリリーフ圧力を一本あたり 300kN と設定している。予測値 532kN はジャッキのリリーフ設定推力 600kN の

89%であり，セグメントを組立てるために必要な押し込み力は概ね予測値程度であったことが推定できる．実際のシールドジャッキ 2 本の装備推力を 4000kN とすれば，セグメントの組立てに必要な推力はその約 15%であり，実用的にも十分対応できる値であると考えられる．

### 7.3 実物大セグメントを用いた組立性の確認試験<sup>7.1)</sup>

模型を用いたセグメントの組立試験に引き続き，実物大セグメントを用いた組立試験を行った．

#### 7.3.1 実物大セグメントを用いた組立試験の目的

実物大セグメントを用いた組立試験の目的は以下のとおりである．

実物大のセグメントがシールドジャッキでトンネル軸方向に押し込むだけで組立てが行えることの確認．

セグメントの組立てに必要なジャッキ推力の把握．

セグメントの組立てを行う場合の最適なジャッキパターンの把握．

AS ジョイントへの締結力の導入が可能で，その数値が概ね予測値に近いことの確認．

また，締結力の経時変化の把握．

組立て後のトンネル品質（目開き，目違い）の確認．

シール材のはがれ，めくれが発生しないことの確認．

#### 7.3.2 組立試験に用いた供試体

実物大セグメントを用いた組立試験の供試体は以下のとおりである．

##### (1)セグメント

地下鉄単線シールド用セグメントを用いた．その主な仕様は以下のとおりである．

材質：F C D 5 0 0

セグメントの寸法：外径 6600mm，桁高 250mm，幅 1200mm

なお，このセグメントに従来のボルト締結式継手を使う場合のボルトの仕様は以下のとおりである．

- ・セグメント継ぎボルト：M27，8.8，36本/リング
- ・リング継ぎボルト：M27，8.8，47本/リング

試験に用いたセグメントを図 - 7.6 に示す。

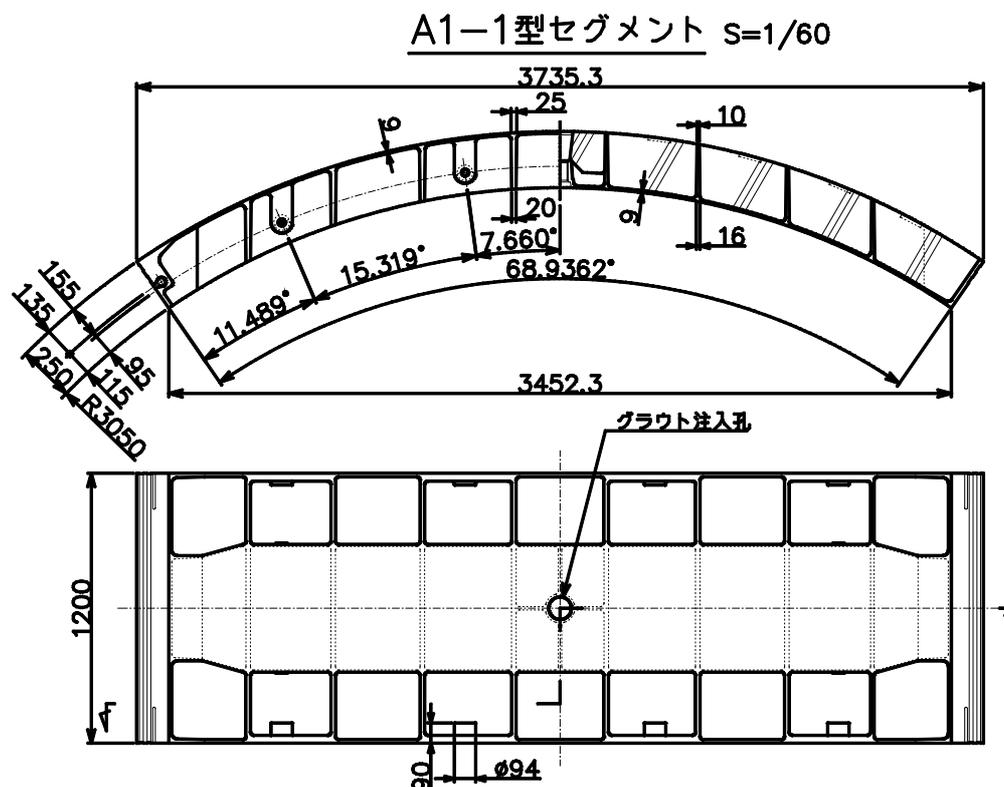


図 - 7.6 実物大セグメントを用いたセグメントの組立試験の供試体

## (2) AS 金物

試験に用いた AS 金物の仕様は以下のとおりである。

材質：FCD900A

AS 金物の寸法：ウェブの厚さ = 22mm，ウェブの長さ：86mm

バックアップ材：反力 30kN 用

AS 金物の許容引張り力： $200\text{N/mm}^2 \times 22\text{mm} \times 86\text{mm} = 378\text{kN}$

数量：2 セット

AS 金物のウェブには表裏 3 枚ずつ，合計 6 枚のひずみゲージを貼付した。

## (3) アンカージョイント

試験に用いたアンカージョイントの仕様は以下のとおりである。

材質：FCD600 および SCM345 他

アンカージョイントの形状，寸法：図 - 5.3 のとおり

アンカージョイントの締結に要する圧入力：約 100kN / 個

#### (4) シール材

試験に用いたシール材の仕様は以下のとおりである．

材質，仕様：水膨張 3 倍型

寸法：厚さ 3.5mm，幅 20mm，2 条

使用滑材：アニオン性界面活性剤

### 7.3.3 組立試験の装置およびその主要な仕様

この組立試験は概ね図 - 7.7 に示す要領により行った．使用したセグメントはいずれも実物大のセグメントであり，既設リングとして A セグメント 1 ピースとその 1/2 大のもの 1 ピースを用いた．また，既設セグメントとして，1/2 大のもの 1 ピースを使用した．

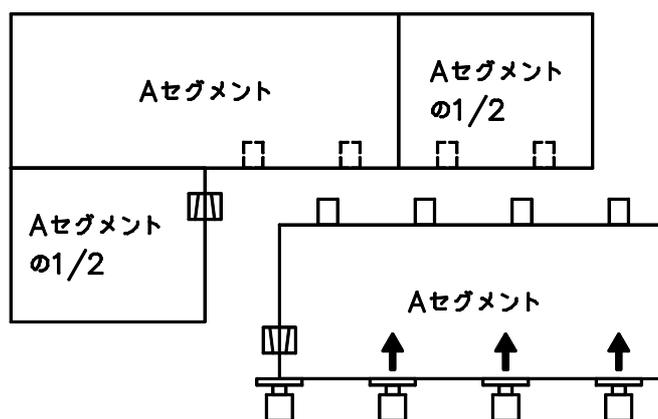


図 - 7.7 実物大セグメントを用いたセグメントの組立試験の要領

また，図 - 7.8 は試験装置の全景を示した写真であり，図 - 7.9 は装置の側面図を示したものである．



図 - 7.8 実物大のセグメントを用いた組立試験装置の全景

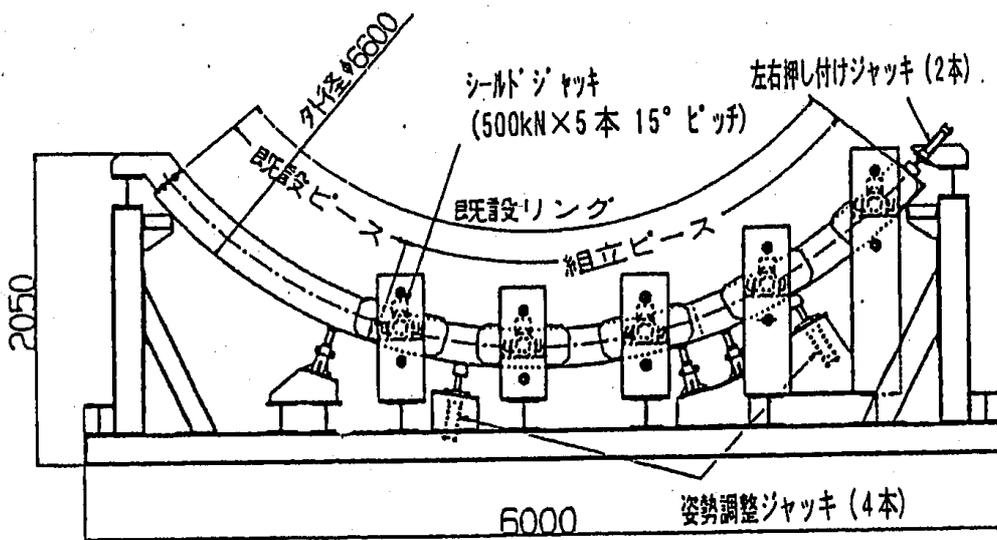


図 - 7.9 実物大セグメントを用いたセグメントの組立試験装置の側面図

この組立試験装置に使用した機器の主な仕様は以下のとおりである。

シールドジャッキに相当するセグメント押し込み用ジャッキ：500kN×5本

姿勢制御用（セグメントの高さ，ヨーイング，ローリング，ピッチング制御）ジャッキ：

150kN×4本

セグメントの押し付け用ジャッキ（エレクターの旋回機能相当）：150kN×2本

#### 7.3.4 組立試験の方法

組立試験はこれらの装置を用いて概ね以下の手順で行った。

組立てられるセグメントに AS 金物，アンカージョイントを取り付け，シール材を貼り付ける。

既設リングには，アンカージョイントが，既設セグメントには AS 金物が取り付けられ，両者のシール溝にはシール材が貼付される。

組立てられるセグメントをクレーンで組立て前の位置にセットする。このときの位置は既設リングに対して約 120mm，既設セグメントに対して約 20mm 離れた位置である。

組立てられるセグメントを左右押し付けジャッキで既設セグメントと接するまで送る。この状態の写真を図 - 7.10 に示す。

既設セグメントとの高さ合わせを姿勢制御ジャッキで行った後，同じジャッキでローリング調整を行う。

シールドジャッキに相当する押し込みジャッキ 2 本で組立てられるセグメントを既設リングとの間隔が約 70～80mm 程度になるまで寄せる。

この段階で再度既設リングとの高さ合わせを行う。この作業は姿勢調整ジャッキを用いて既設リングと組立てられるセグメントの内径面にストレッチを当てながら行う。

最後の作業として，シールドジャッキに相当する既設セグメント側の押し込みジャッキ 2 本を用いて組立てられるセグメントを既設リング側に押し込む。既設リングとの間隔が約 20mm になった時点でさらに 2 台のジャッキを追加して合計 4 台のジャッキで押し込み，組立てを完了する。

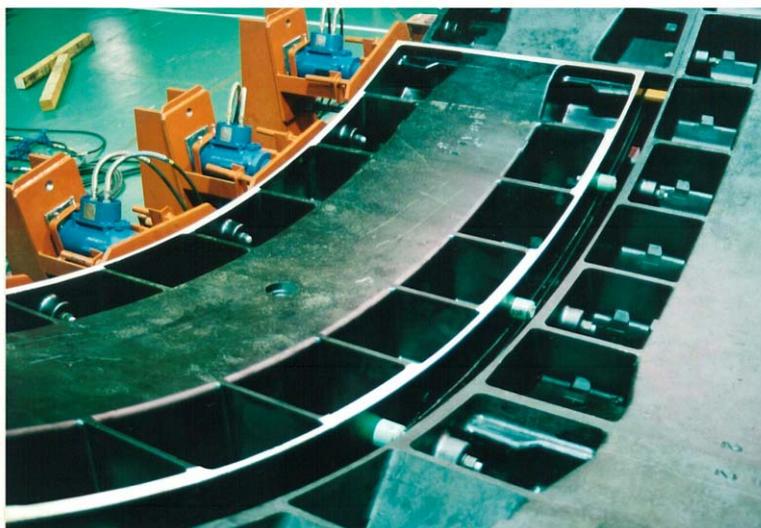


図 - 7.10 実物大セグメントを用いたセグメントの組立試験の状況

### 7.3.5 組立試験の結果<sup>7.2)</sup>

組立試験で得られた主な結果は以下のとおりである。

既設セグメントに対してセグメント間の間隔が約 3mm，既設リング間との間隔が約 70mm，目違い量が約 3mm であってもシールドジャッキを用いてセグメントをトンネル軸方向に押し込むだけで組立てが可能であることを確認した。

セグメントの組立てに必要なシールドジャッキの推力は約 1.2MN であり，これはシールドジャッキの装備推力の約 15%に相当する。

セグメントを組立てた後のセグメント間の目開き量は 0.1～0.2mm 程度であり，これはトンネルの出来形や止水性の観点からみて十分小さな値である。

AS 金物への締結力の導入状況を図 - 7.11 に示すが，これによると AS 金物への締結力は締結完了となる約 50mm 手前の位置から発生し，締結完了の約 10mm 手前で締結力がほぼ一定になることがわかる。締結完了時点の締結力は坑口側で平均約 338kN，切羽側で平均約 273kN であった。これは AS 金物の許容応力度相当の締結力に対してそれぞれ 89%と 72%であり，概ね目標どおりの締結力が導入されたことが確認された。切羽側の締結力は目標値に対して約 10%不足したが，これは押し込み条件が 4 台のジャッキで微妙に異なったためと考えられる。

その後，この試験装置を用いて各種のジャッキパターンとその場合の締結力のバラツキを確認した。その結果，当該セグメント継手に近い 2 つのジャッキのみで締結を行い，リング継手面の間隔が約 5mm まで接近した段階からすべてのジャッキを作動させる方法が最も締結力にバラツキの少ない方法であることがわかった。

AS 金物への締結力にバラツキが発生しても所定の締結力が得られるように設定値を予め高めにしておく（この場合は約 10%）ことも必要である。

締結完了後の状態で 1 週間放置したが締結力の低下は約 5%程度であった。

AS 金物に各種のバックアップ材を装着したセグメントの組立試験において，AS 金物に発生した締結力の状況は図 - 7.12 に示すとおりとなった。これから以下の結果が得られた。

- ・各種バックアップ材の反力と締結力とは比例する。
- ・反力 20kN 以下では継手面に目開きを生じる。
- ・反力約 30kN で AS 金物の許容応力度の 80%相当の締結力が発生する。

なお，図 - 7.13 は締結終了後のバックアップ材の状況を示したものである。バックア

ツブ材が AS 金物の移動に伴い反力を受けて座屈した状況がよくわかる。

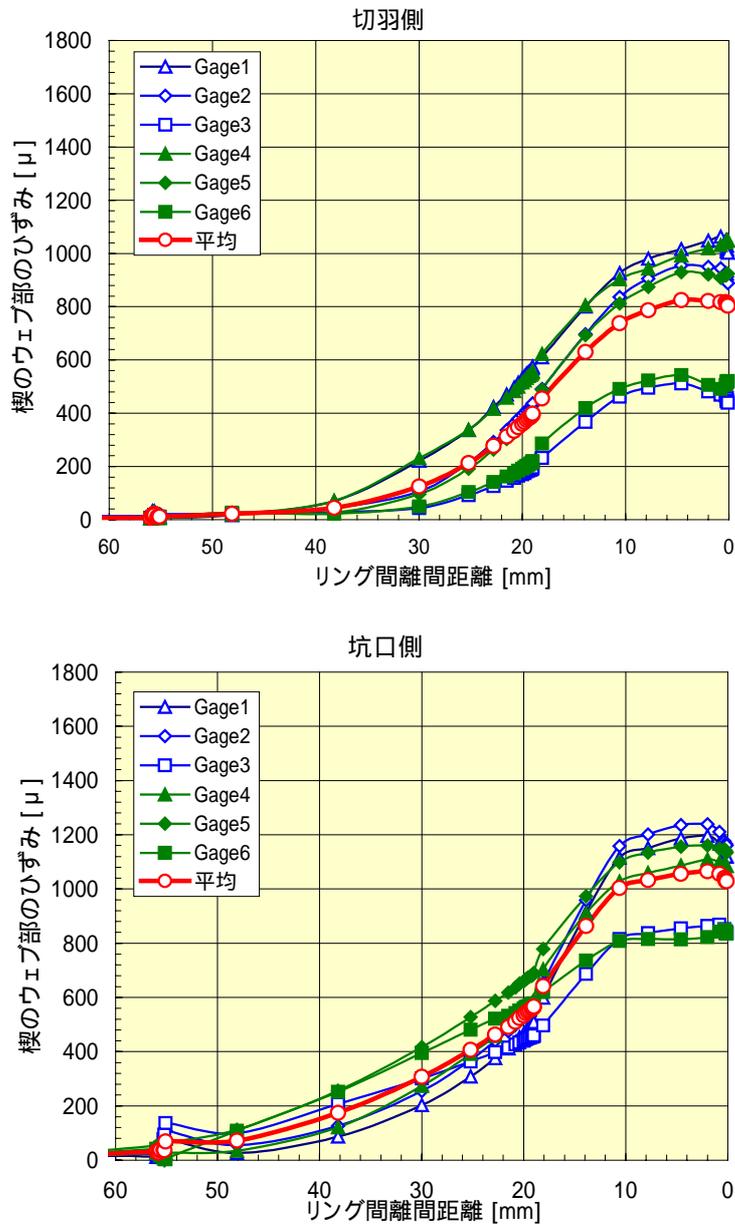


図 - 7.11 実物大セグメントの組立試験で AS 金物へ導入された締結力の状況

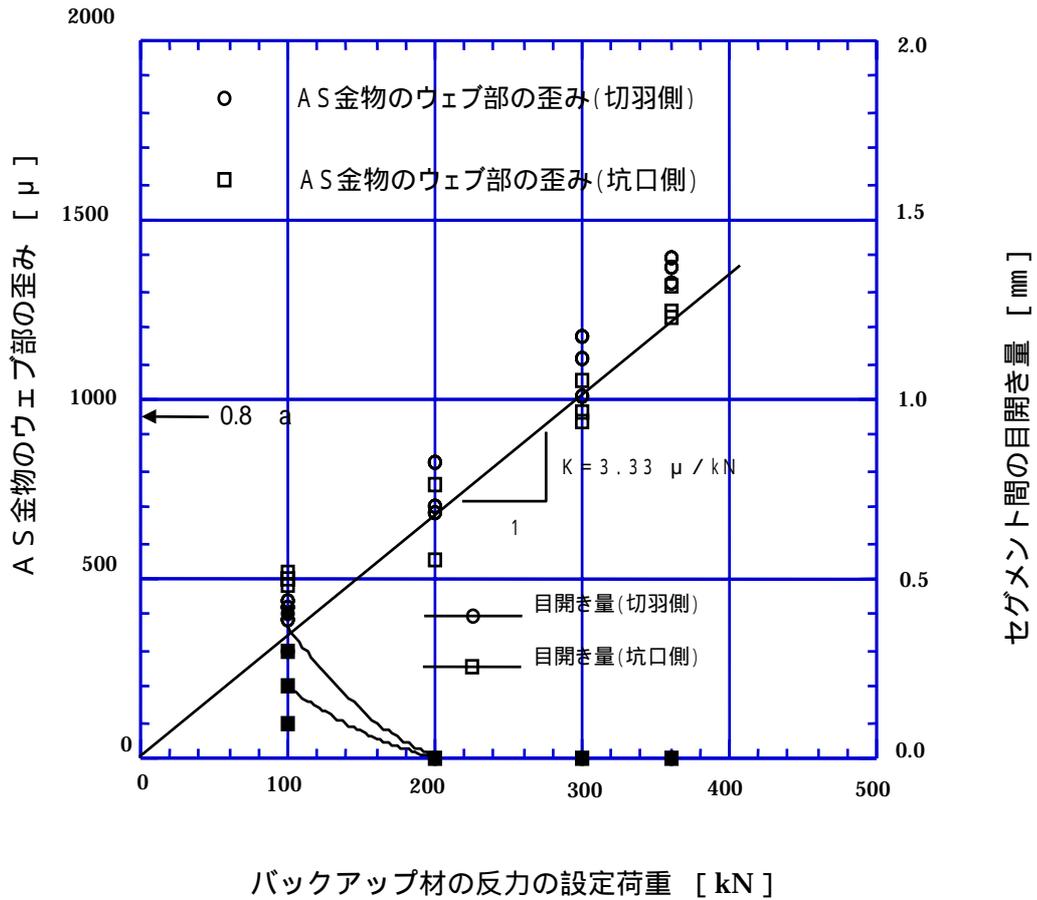


図 - 7.12 バックアップ材の反力の設定荷重と AS 金物への締結力および継手面の目開き量との関係

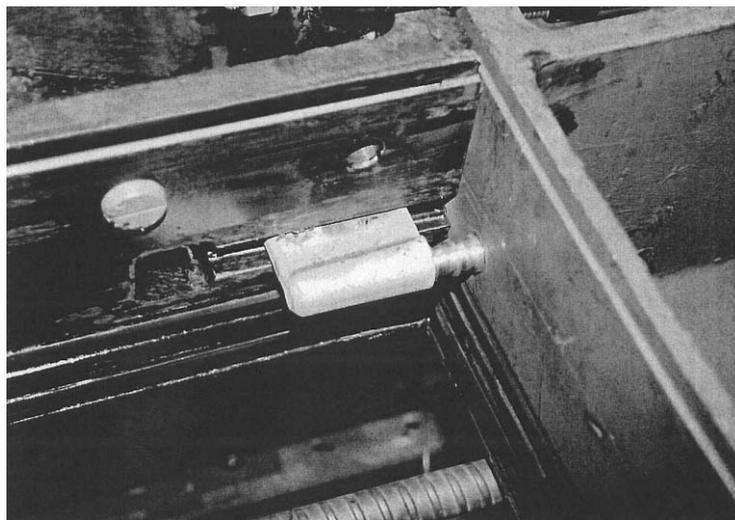


図 - 7.13 AS 金物が締結された後のバックアップ材の状況

## 7.4 まとめ

本章では、AS セグメントの組立て性について、室内における確認試験の状況とその結果について述べた。これらから得られた知見は以下のとおりである。

模型を用いた組立試験では、A セグメント、半径方向挿入型 K セグメントおよび軸方向挿入型 K セグメントのいずれも、所定の組立て位置にセグメントを姿勢制御した後、シールドジャッキで押し込むだけでセグメントの組立てができることを確認した。

その場合の A セグメントに対するシールドジャッキの押し込み力は、装備推力の約 15 %を必要とすることがわかった。

さらに、実物大セグメントを使用して行ったセグメントの組立性の確認試験では、現場で行われるセグメントの組立て状況に近い状況で組立性の確認を行うことができた。

この確認試験においても、エレクターにより、組立てられるセグメントを既設セグメントに押し付けた後、セグメントの高さ位置、ヨーイング、ピッチングおよびローリングを調整した後シールドジャッキでセグメントを押し込むだけでセグメントの組立てができることを確認した。

AS 金物に導入する締結力は、AS 金物の材料の許容応力度の 80%が発生する締結力を目標としたが、それに対して、実際に計測された締結力は坑口側ではその 89%、切羽側では 72%であった。バラツキはあるが、締結力の絶対値は概ね目標値に近いものであった。

この試験装置を使って、各種のバックアップ材の性能確認試験を行った。バックアップ材の反力と AS 金物に発生する締結力は比例することを確認した。また、反力が 300kN のバックアップ材は、AS 金物の許容応力度の約 80%相当の締結力を発生させることができ、実用できるバックアップ材であることが確認された。しかし、バックアップ材の反力が 200kN 以下の場合には、AS 金物へ導入される締結力が不足してセグメント継手面に目開きが生じることが確認できた。

## 参考文献

- 7.1) 石川幸彦, 渡邊健, 松井芳彦, 辻本和則, 佐藤宏志: AS セグメントの実物大組立試験土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, pp . 240 ~ 241 , 1997
- 7.2) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクティルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No . 721 / VI - 57 , p . 187 , 2002

## 第 8 章 継手の設計法の検討



## 8.1 継手の設計

セグメント継手に AS ジョイント，リング継手にアンカージョイントを先付けした本セグメントの強度と剛性は，基本的に従来のボルト締結式の継手と同等となるように定めた．また，断面力の算定には，「はり - ばねモデル計算法」を適用するため，その際に必要となるセグメント継手の回転ばね定数およびリング継手のせん断ばね定数を実験的に求めた．

実験的に求めた継手の強度あるいは剛性は概ね実用レベルであることを確認したが，本章ではセグメント継手の強度とばね定数を計算で求める方法について検討する．

## 8.2 セグメント継手の設計法

### 8.2.1 AS 金物の強度計算

#### (1) AS ジョイントの位置

セグメントの桁高に対する AS ジョイントの位置については 継手曲げ試験の結果から<sup>8.1)</sup>，基本的に桁高の中央部に配置することとした．なお，シール溝などの取合いの関係によっては桁高の 10%程度は上下に寄せざるを得ない場合も想定した．図 - 8.1 はその概念図を示したものである．

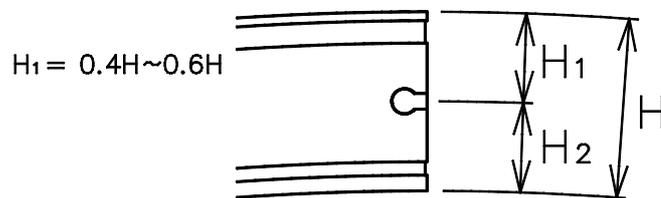


図 - 8.1 セグメントの桁高方向の AS ジョイントの位置

#### (2) AS 金物の材質及び許容応力度

AS 金物の材質は前述したようにダクタイル鋳鉄 3 種またはオーステンパ球状黒鉛鋳鉄とする．それらの材質および許容応力度は表 - 8.1 のとおりである<sup>8.2)</sup>．なお，FCD900A の許容応力度は耐力の約 1 / 3 とした．

表 - 8.1 AS 金物の材料および許容応力度

記号	引張強さ $N / mm^2$	耐力 $N / mm^2$	伸び %	許容応力度 $N / mm^2$	
				曲げ引張り	せん断
FCD500	500 以上	320 以上	7 以上	190 以上	130 以上
FCD900A	900 以上	600 以上	8 以上	(200 以上)	

### (3) AS 金物の断面寸法

AS 金物のウェブの断面寸法( $t, L$ )は、継手部に作用する断面力( $M, N$ )に対して、金物を配置した位置における必要な断面積以上となるように定める。 $t$ と $L$ との配分については以下のようにウェブの厚さの制約条件を考慮する必要があるが、長さの制約は特に設けないものとした。

材質が FCD900A の場合のウェブの厚さの上限：25mm ~ 30mm

その理由：熱処理が均一に行われる限界。

なお、FCD500 の場合は特に制限を設けない。

ウェブの厚さの下限：15mm ~ 20mm

その理由：AS 金物のウェブが挿入される継手板のスリットを機械加工する場合、その刃物とマシンの剛性による限界。

図 - 8.2 に AS 金物のウェブの断面積の考え方を示す

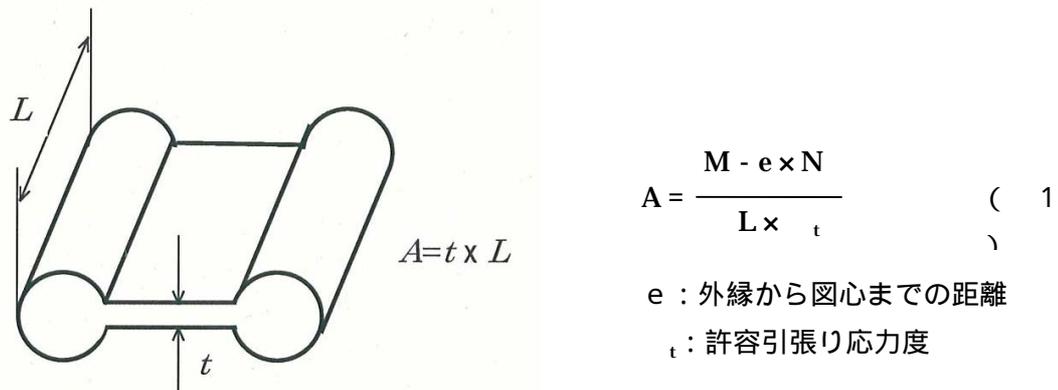


図 - 8.2 AS 金物の断面寸法

### 8.2.2 AS ジョイントの回転ばね定数<sup>8.3)</sup>

AS ジョイントの回転ばね定数の算出方法はボルト締結式の継手に関する「村上 - 小泉理論」に準拠して以下のとおりで算出できる<sup>8.4)</sup>。ただし、AS ジョイントでは継手板がボルト孔を持った継手板ではなく、図 - 8.3 および図 - 8.4 に示すようにスリットを持った継手板であることを考慮することとした。

(1) 継手板の軸方向の剛性を表すばね定数  $K$

$$K_1 = \frac{2k_b \cdot k_{pu}}{2k_b + k_{pu}} + 2k_{pl} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{2k_b \cdot k_{pu}}{2k_b + k_{pu}} \quad (3)$$

ここに、

$k_b$  : AS 金物の引張力作用方向のばね定数

$k_{pu}$  : 継手板の軸圧縮剛性を評価するばねのばね定数

$k_{pl}$  : AS 金物の初期締め付けによって主桁に蓄えられた圧縮ひずみが開放される際に板の剛性を評価するばねのばね定数

$K_1$  : 継手板どうしが離間する前のばね定数

$K_2$  : 継手板どうしの離間後のばね定数

である。

継手板の軸方向の剛性を表すばね定数  $K$  は、安全側を考慮して AS 金物に初期締め付け力が発生しなかった場合を想定して  $K_2$  を採用することにする。

(2) AS 金物の引張力が作用する方向のばねのばね定数  $k_b$

$$k_b = \frac{E \cdot A}{l} \quad (4)$$

ここに、 $A$  : AS 金物のウェブの断面積

$l$  : AS 金物の面圧が作用する面の間隔

である。

(3) 継手板のばね定数  $k_{pu}$

$$A_u = (B_1 - c)B_2 \quad (5)$$

$$k_{pu} = \frac{E \cdot A_u}{T_1} \quad (6)$$

ここに、各記号は図 - 8.3 および以下に示すとおりである。

$A_u$  : 継手板の中立軸より上側の圧縮有効面積

$T_1$  : 継手板の後面からテーパ孔が AS 金物により支圧を受ける起点までの距離

$T_2$  : テーパ孔が AS 金物により支圧を受ける起点から継手面までの距離

$B_1$  : AS 金物によって支圧を受ける領域のうちセグメントの桁高方向の有功幅

$B_2$  : AS 金物によって支圧を受ける領域のうちセグメントの幅方向の有功幅

$C$  : スリットの幅

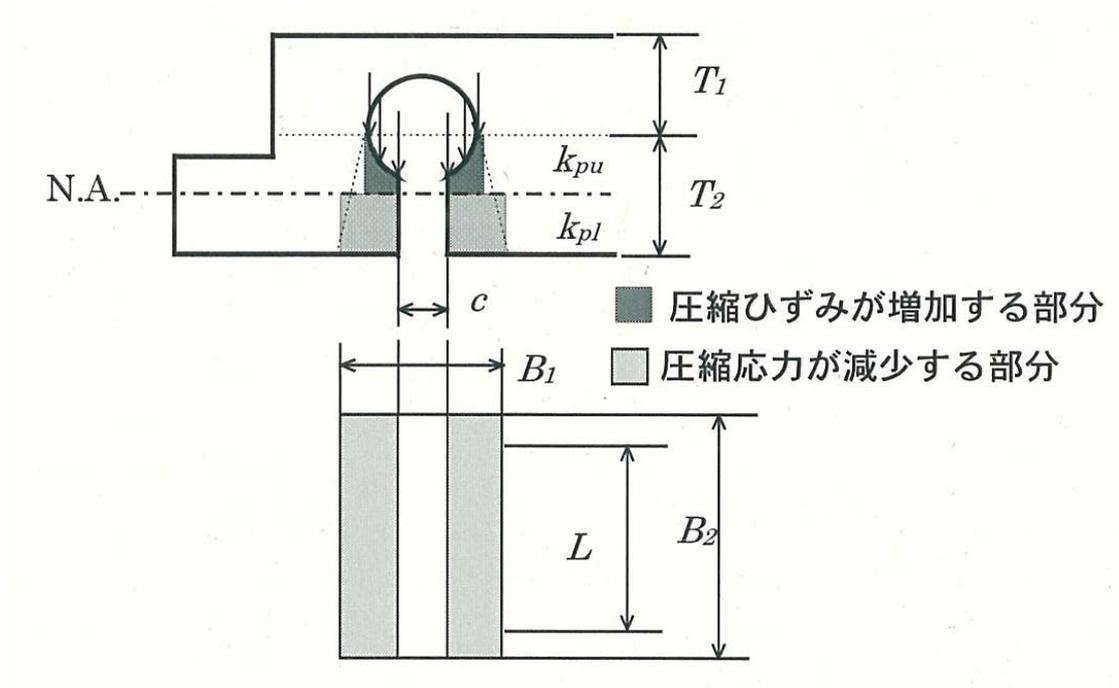


図 - 8.3 継手板の圧縮有効域

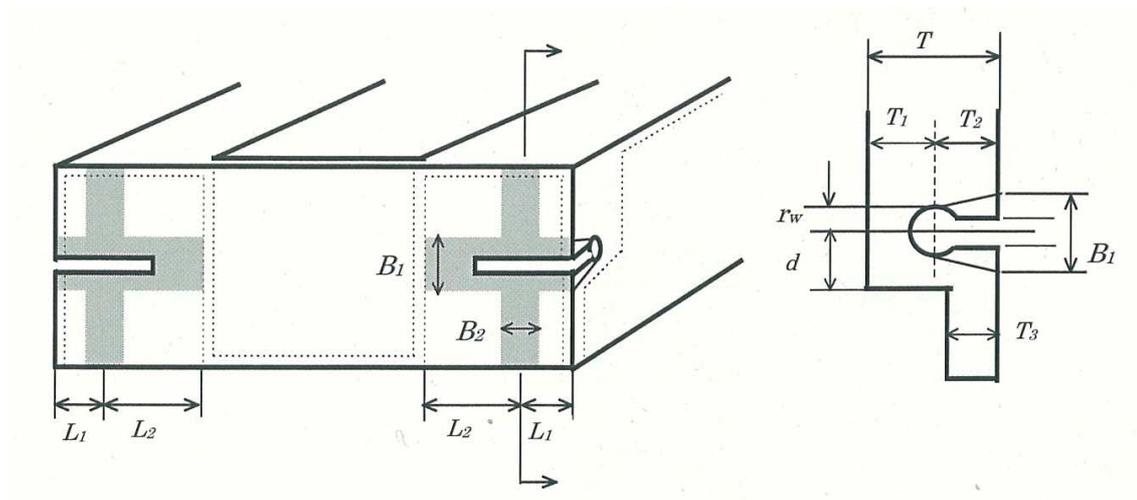


図 - 8.4 セグメント継手板の有効幅

継手板を図 - 8.4 に示す有効幅  $B$  を持つ格子ばりに置換する .

$$B_1 = \left[ r_w + \frac{T_2}{6} \right] \times 2 \quad (7)$$

$$B_2 = L + \frac{T_2}{6} \times 2 \quad (8)$$

ここに,  $r_w$ : テーパー孔の半径  
 $L$ : AS 金物のウェブの長さ  
である

(4) 継手金物 1ヶ所あたりの軸引張剛性を表すばね定数  $k_{ru}$

円周方向のはりの曲げ剛性  $D_1$  と半径方向のはりの曲げ剛性  $D_2$  は以下の式で計算する.

$$D_1 = \frac{E \cdot I}{1 - \nu^2} \quad (9)$$

$$D_2 = \frac{B_2 \cdot t^3 \cdot E}{12(1 - \nu^2)} \quad (10)$$

ここに,  $E$ : ヤング係数  
 $I$ : 水平ばりの断面 2 次モーメント  
 $\nu$ : ポアソン比

である.

円周方向のはりおよび半径方向のはりの荷重点のたわみをそれぞれ  $\delta_1, \delta_2$  とすると,

$$\delta_1 = \frac{P_1 \cdot L_1^3 \cdot L_2^3}{3D_1 \cdot (L_1 + L_2)^3} \quad (11)$$

$$\delta_2 = \frac{P_2^2 \cdot L_3^3}{3D_2} \quad (\text{正曲げ}) \quad (12a)$$

$$\delta_2 = \frac{P_2^2 \cdot L_4^3}{3D_2} \quad (\text{負曲げ}) \quad (12b)$$

となる.

ここに,  $P_1, P_2, L_1, L_2, L_3, L_4$  は図 - 8.5 および図 - 8.6 に示すものとする.

ここで,  $\delta_1 = \delta_2, P_1 = P_2$  とおくと,

$$= \frac{L_1^3 \cdot L_2^3}{(L_1 + L_2)^3 \cdot L_3^3} \cdot \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{正曲げ}) \quad (13a)$$

$$= \frac{L_1^3 \cdot L_2^3}{(L_1 + L_2)^3 \cdot L_4^3} \cdot \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{負曲げ}) \quad (13b)$$

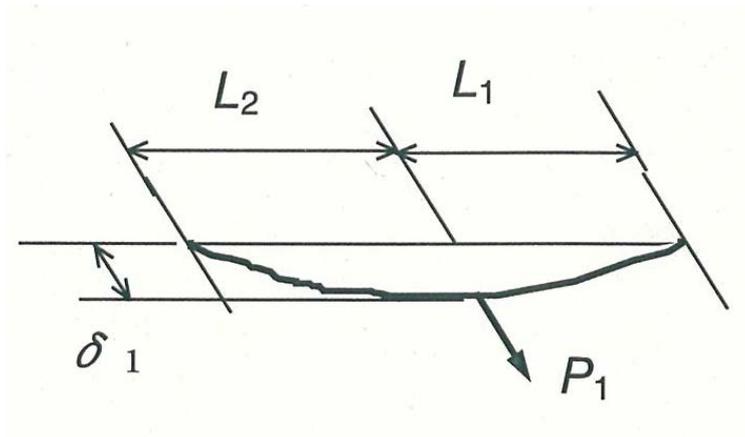


図 - 8.5 円周方向のはり

AS 金物に作用する引張力 T は,

$$T = P_1 + P_2 = (1 + \quad) P_1 \qquad P_1 = \frac{T}{1 + \quad} \qquad (14)$$

したがって AS 金物位置の変位 は継手板と金物自身の伸びを加味して,

$$= \frac{L_1^3 \cdot L_2^3}{3D_1 \cdot (L_1 + L_2)^3} \cdot \frac{T}{(1 + \quad)} + \frac{T}{K} \qquad (15)$$

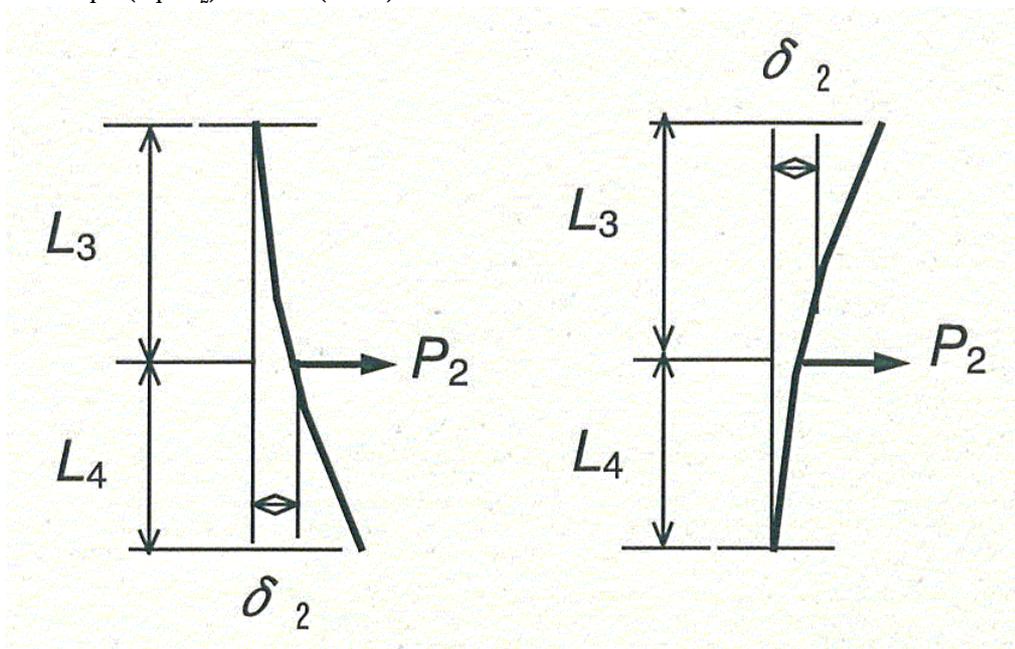


図 - 8.6 半径方向のはり (左: 正曲げ, 右: 負曲げ)

となる. これから引張力 T に対する AS 金物 1 ヲ所あたりの軸引張剛性を表すばね定数 \$K\_{ru}\$ は相対する主桁どうしの間で, 変形が 2 倍になることを考慮して,

$$K_{ru} = \frac{\frac{3}{2} D_1 (L_1 + L_2)^3 \cdot (1 + ) K}{K \cdot L_1^3 \cdot L_2^3 + 3D_1 (L_1 + L_2)^3 (1 + )} \quad (16)$$

となる。

(5) 回転ばね定数 K の計算

正曲げに対する力の釣り合いと変形状態を図 - 8.7, 負曲げに対する力の釣り合いと変形状態を図 - 8.8 に示す。

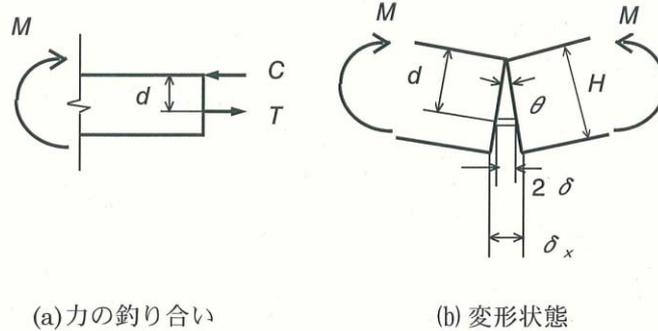


図 - 8.7 正曲げに対する AS ジョイント部の力の釣り合いと変形状態

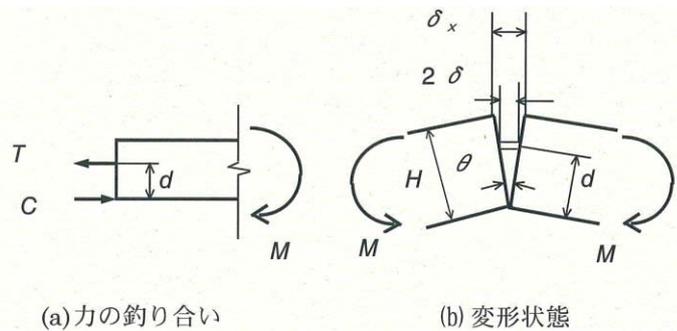


図 - 8.8 負曲げに対する AS ジョイント部の力の釣り合いと変形状態

これらの図から,  $M = T \cdot d$ ,  $2\delta = d \cdot \theta$  となり, 一方,  $T = K_{ru} \cdot \delta$  なので,

$$M = \frac{K_{ru} \cdot d^2}{2} \cdot \theta \quad (17)$$

$$K (+) = \frac{M}{\theta} = \frac{K_{ru} \cdot d^2}{2} \quad (\text{正曲げ}) \quad (18a)$$

$$K (-) = \frac{M}{\theta} = \frac{K_{ru} \cdot d^2}{2} \quad (\text{負曲げ}) \quad (18b)$$

となる。ただし，正曲げの場合  $d = H_1$ ，負曲げの場合  $d = H_2$  である。

(6) 目開き量  $x$  の計算

$$x = H \cdot \quad (19)$$

ここに，

$H$ ：桁高

：曲げモーメント  $M$  が作用したときの回転角 (rad)

である。これから， $x$  は，

$$= \frac{M_{\max}}{n \cdot K} \quad (\text{正曲げ}) \quad (20a)$$

$$= \frac{-M_{\max}}{n \cdot K} \quad (\text{負曲げ}) \quad (20b)$$

となる。ただし， $n$  は AS ジョイントの個数である。

### 8.3 リング継手の設計法の要点

リング継手の設計は従来からのボルト締結式の継手と同様にトンネル軸方向の引張強度とそれに直角な方向のせん断強度に対して行うこととした。

引張強度については、リング継手の引張試験において、ハウジングを取り付けているボルトが破断したことから、このボルトについて従来のボルト式継手と同等であることの検証を行った。

リング継手のせん断はハウジングの一面せん断である。ハウジングのせん断強度はせん断方向の肉厚がスリーブの圧入力で決定されるため、必要なせん断強度の約 2 倍の強度をもつことになり、せん断力に対しては安全な設計となっている。

なお、リング継手であるアンカージョイントの本数は従来のリング継ぎボルトの本数の約 1/2 とした。その理由は、以下のとおりである。

リング継手を締結する際に必要な圧入力が第 5 章、5.3.1 で述べたとおり約 120kN であり、アンカージョイントの締結時に継手板に集中荷重がかかる。そのため、アンカージョイントを配置した部分のリング継手の板厚を他の部分の約 2.5 倍としている。従来のボルト締結式のリング継手では、リング継手面の止水に対してシール材の十分な押しつぶしを行うためにリング継ぎボルトの本数が多かったが、アンカージョイント部の継手の板厚を増加したことにより、継手板の変形が少なくなるのでリング継手の締結箇所が少なくてもよいと判断した。

### 8.4 まとめ

本章では継手の設計法について述べた。

セグメント継手の設計は基本的には、従来のセグメント継手に使用するボルトと同等の強度を 2 個の A S 金物に置き換えて、ウェブの断面積を決定すればよいことを確認した。ただし、この継手の引張試験を行った結果は第 4 章、4.2.3 で述べたとおり材料の全強度の約 85% で破断しており、応力集中などによる有効断面の軽減を考慮しなければならない。現状の設計では FCD900A の許容応力度を  $200\text{N}/\text{mm}^2$  というように低目に設定したことから、安全率が約 4 倍になっており、十分に安全側の設計と考えられる。

セグメント継手の剛性を評価するためにその回転ばね定数を計算で求めることを試みた。

その結果，継手板をテーパ孔とスリットを有する格子ばりと考え，ボルト締結式の継手板と同様に「村上 - 小泉理論」による計算方式で計算できることが確認された．

リング継手の設計法については，引張強度がハウジングの取り付けボルトにより決定されることを考慮することにした．また，アンカージョイントのせん断強度は，ハウジングがアンカージョイントの圧入力で決まる肉厚を有しており，これによるせん断強度が設計強度の3倍以上を示したことから，十分に安全であると判断された．

## 参考文献

- 8.1) 石川 幸彦, 渡邊 健, 向野 勝彦, 鬼橋保祐, 青木敏行, 豊富俊文: ダクタイルセグメント用 AS ジョイントの開発(その2) - 継手曲げ試験, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp. 280~281, 1996
- 8.2) (社)土木学会トンネル工学委員会編: トンネル標準指方書「シールド工法編」・同解説, (社)土木学会, pp. 60~67, 1996
- 8.3) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクタイルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No. 721 / VI - 57, p. 185~186, 2002
- 8.4) 村上博智, 小泉淳, 岡村光政, 大塚一雄: セグメント継手の合理的な設計法に関する研究, 早稲田大学理工学研究所報告, 第 82、1978



## 第9章 実際の現場における施工



## 9.1 現場における試験施工

### 9.1.1 試験施工の経緯

第7章で述べたように、本セグメントの組立性についての各種試験とその結果から、このセグメントがシールドジャッキで押し込むだけで組立てができ、セグメントの施工性の向上が図れることを確認した。その後、発注者や施工者の理解と協力を得て、現場における実際の試験施工の機会を与えられることになった。

試験施工は現在まで合計3件が行われた。表-9.1はその概要を示したものである。いずれの場合も、原設計では従来のボルト締結式の継手をもつダクタイルセグメントであったが、ASセグメントの有用性と新規性を理解いただき、その一部を本セグメントに置き換える形で試験施工が行われた。

表 - 9.1 試験施工の概要

項目	試験施工 1	試験施工 2	試験施工 3 <sup>9.1)</sup>
発注者	営団地下鉄	関西電力(株)	関西電力(株)
工事名称	7号線麻布台B線 工区土木工事	学園豊崎間管路新設 工事(第一工区)	学園豊崎間管路新設 工事(第一工区)
施工者	前田・白石建設JV	熊谷・飛島・鉄建 竹中土木JV	熊谷・飛島・鉄建 竹中土木JV
工事場所	東京都港区麻布	大阪市北区	大阪市北区
工事時期	1997年11月	1999年4月	1999年9月
工事の特徴	320mR, 上り2.4%勾配	阪急京都線下, 土被り約37m	50mRの急曲線
セグメントの概要			
外径	6600mm	7600mm	7560mm
桁高	250mm	300mm	280mm
幅	1100mm	1200mm	600mm
施工リング数	24リング	45リング	41リング

これらの試験施工では、このセグメントの開発目標が実現できたかどうかを確認することが最大の目的であったが、特に、同じ工区にあるボルト締結式継手をもつセグメントとの組立性やトンネルの品質についての比較を詳細に行った。

ここではそれらのうちの代表的なものとして、3例の中で最初に行われた営団地下鉄7号線・麻布台B線工区について述べる<sup>9.2), 9.3), 9.4)</sup>。

### 9.1.2 試験施工の工事概要

営団地下鉄で行われた試験施工の概要は以下のとおりである。試験施工が行われた工区の工事路線図を図 - 9.1 に示す

工事名称：営団 7 号線麻布台 B 線工区土木工事

工事場所：東京都港区麻布十番～同区六本木

施工時期：1997 年 11 月

工法：泥水式シールド工法

土被り：約 31 m，土質：上総層群，細砂主体

線形：平面 R = 202 ~ 401 m，縦断 上り 2.4%

延長距離：1008m

セグメント

ダクティルセグメント：275m（内，本セグメント：26.4m）

中子型 RC セグメント：733m

本セグメントの試験施工のリング数：標準 11，テーパー11，調整 2，合計 24 リング

シールドマシンの仕様

マシン外径：6750mm

シールドジャッキ推力：2000 kN × 24 本，

組立て時の推力：450 kN / 本

本セグメントが使われた場所は，発進立坑から，ダクティルセグメント 224m，RC セグメント 499mのあと再度ダクティルセグメントが 51m 施工される部分の一部である。この区間は直行する営団日比谷線の直下であり，首都高速道路のピアが近接する重荷重部である。試験施工はこの 51m の区間において，RCセグメントからダクティルセグメントに変わった直後から本セグメントによる 24 リングの施工が行われ，その後ボルト締結式継手をもつダクティルセグメント 20 リングが施工された。

### 9.1.3 試験施工に使われたセグメント

試験施工に使われた AS セグメントは外径 6600mm，桁高 250mm，幅 1100mm のものである。原設計のダクティルセグメントは，セグメント継手 1ヶ所あたり M27 のボルトが 6 本，リング継手は 1 リング断面あたり 47 本のボルトが使われていたが，これらを

# 7号線麻布台B線工区土木工事路線図

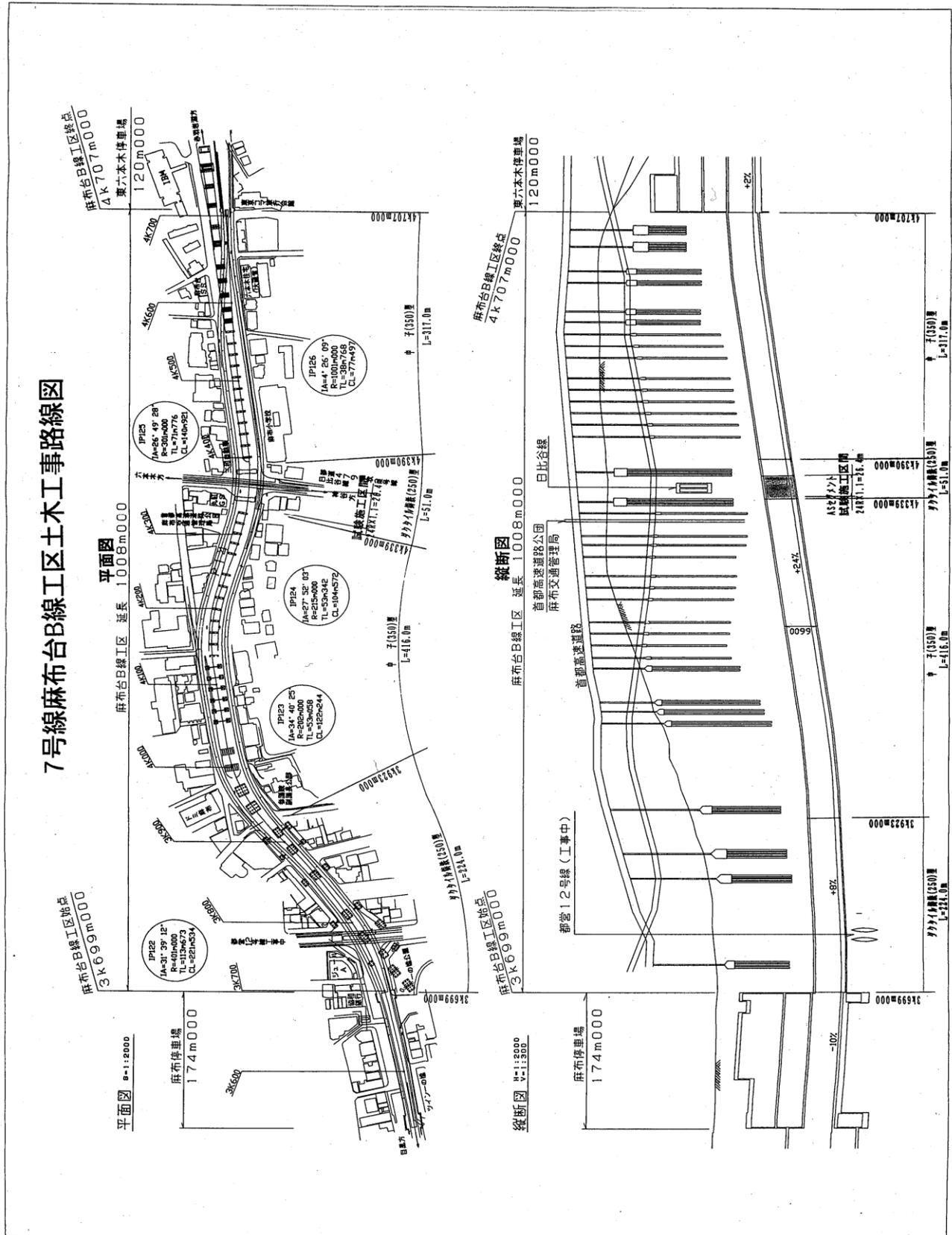
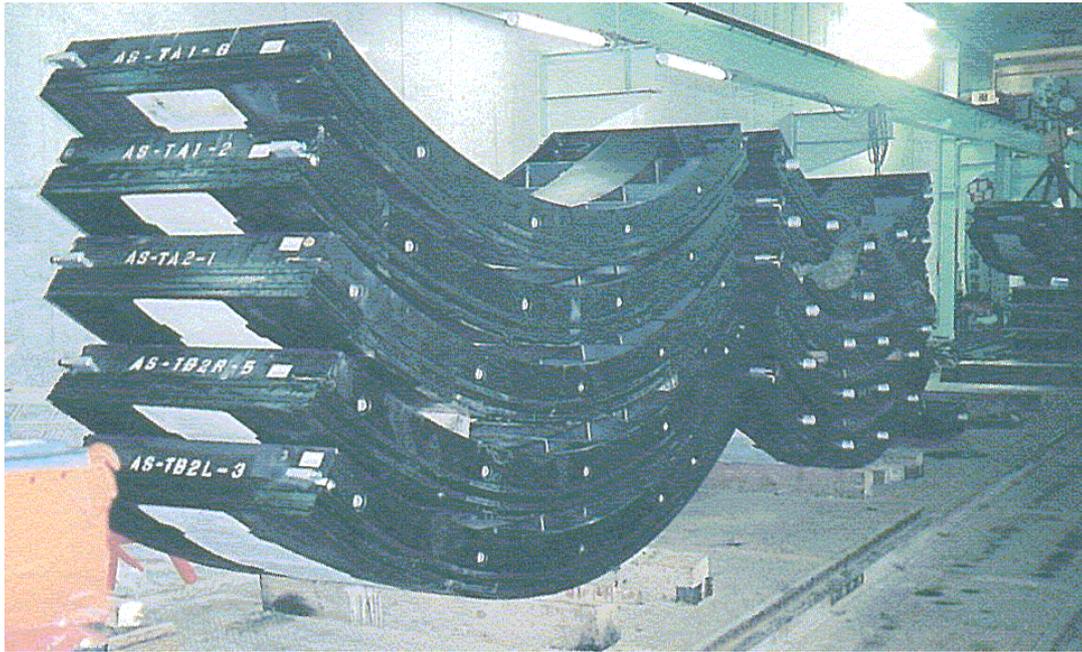


図 - 9.1 試験施工が行われた工区の路線図

AS セグメントでは，セグメント継手として 2 個の AS ジョイントを，リング継手として 21 個のアンカージョイントを使うことにした．図 - 9.2 および 9.3 は試験施工に使用したセグメントおよびその継手を示し，図 - 9.4 はそれらの写真を示したものである．







AS セグメントの全景。手前のセグメントが切羽側面，奥のセグメントが坑口側面



AS ジョイントと切羽側のリング継手面に格納されたスリーブ



坑口側のリング継手面に取り付けられたハウジング

図 - 9 . 4 試験施工に使われたセグメント

#### 9.1.4 試験施工の結果

##### (1) 試験施工の状況

試験施工は昼の片番のみで6日間行われたが、日ごとのセグメントの組立リング数は表-9.2のとおりであった。セグメントの組立ては2日目から軌道に乗り順調に行われた。

表-9.2 セグメントの組立て数の推移

	第1日	第2日	第3日	第4日	第5日	第6日	合計
組立月日	11/18	11/19	11/20	11/21	11/22	11/25	6日間
組立数	2	5	5	6	2	4	24
備考	1リング目は調整リング				排泥系の故障により2リングで中止	最終リングは調整リング	

##### (2) セグメントの組立て

セグメントの組立ては図-8.1で示した計画どおりの手順で行われた。その作業は概ね以下のとおりであった。

搬送台車からセグメントが組立てられる切羽まで、セグメントをホイストにより搬送する。

セグメントを把持する。

セグメントを旋回する。

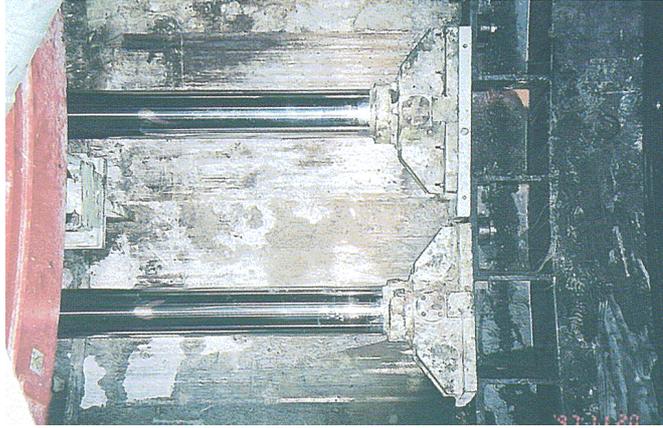
既設セグメントに接触させて、粗位置決めを行う。

セグメントの高さ位置、ヨーイング、ピッチングおよびローリングの調整を行う。

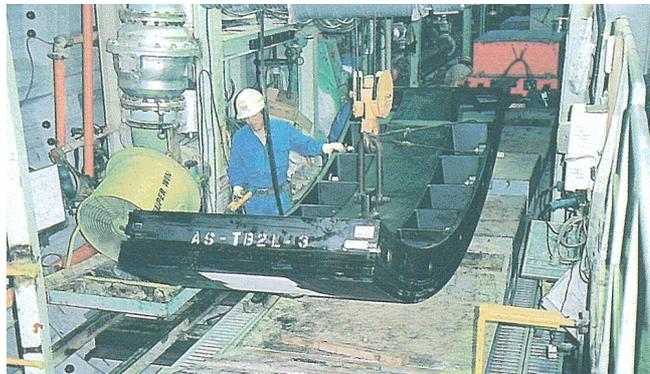
エレクターの摺動ジャッキにより、セグメントを坑口側へ移動させる。

既設セグメント側の2～3本のシールドジャッキによりセグメントを押し込む

これらの組立作業はすべて手作業で行われた。図-9.5～9.8はセグメントの組立状況を示した写真である。



掘進が完了し、セグメントが組立てられるスペースができる。

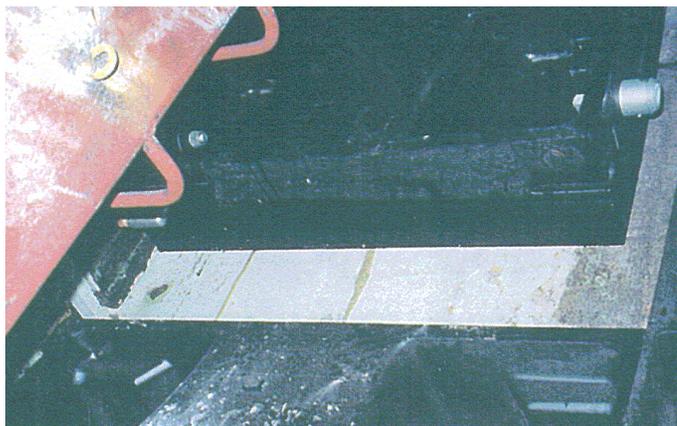


セグメントがホイストで切羽に搬送される。



最初に組立てられる A - 1 セグメントの位置合わせが行われる。

図 - 9.5 試験施工の状況 (その - 1)



組立てられるセグメントをエレクターで把持し、旋回する。既設リングとの間隔は約150mm 程度開ける。



既設セグメント（下側）に接近した状態で粗位置決めを行う。

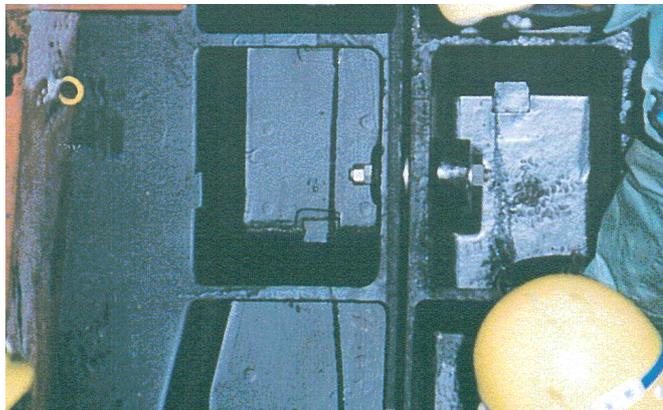


既設セグメントに接触させ、セグメントの高さ位置、ヨーイングなどの位置合わせを行う。

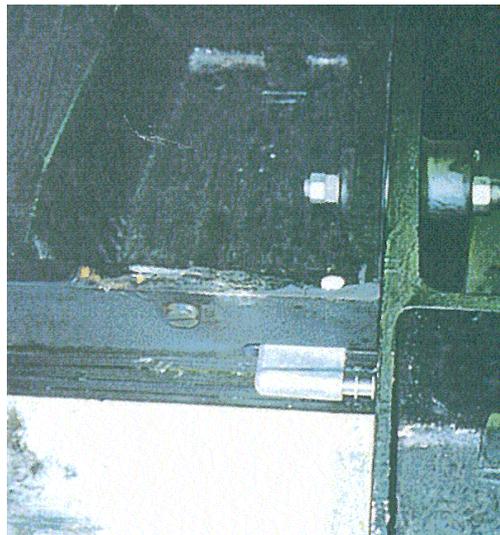
図 - 9 . 6 セグメントの組立て状況（その - 2 - 1）



組立てられるセグメントがエレクターの摺動ジャッキにより坑口側に移動される。



既設リングとの間隔が約 20mm になると、シールドジャッキにより押し込みを開始する。



さらに、シールドジャッキによる押し込みが行われ、組立て完了直前の状態になる

図 - 9.7 セグメントの組立て状況 (その - 2 - 2)



K セグメントの組立て．隣接する B セグメントとの両間隔をよく見ながら K セグメントを半径方向に移動させる．既設リングとの間隔は 150mm 程度空けてある．

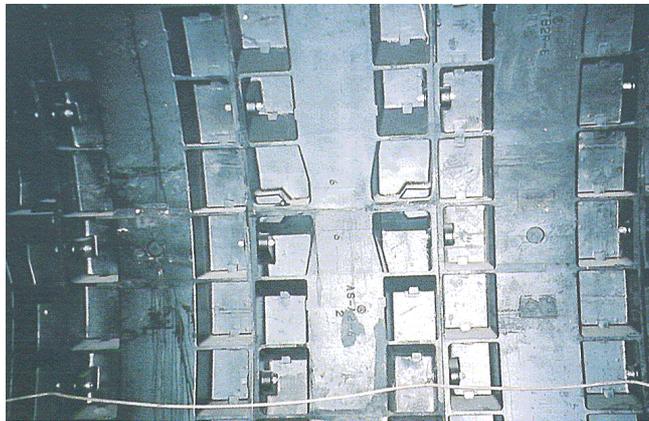


半径方向の移動が終わると，アンカージョイントのハウジングが嵌合する直前まで K セグメントを坑口側に移動する．この時点で，さらにピッチングおよびローリング調整を行う．最後にシールドジャッキにより一気に坑口側に押し込み，組立てを完了する．

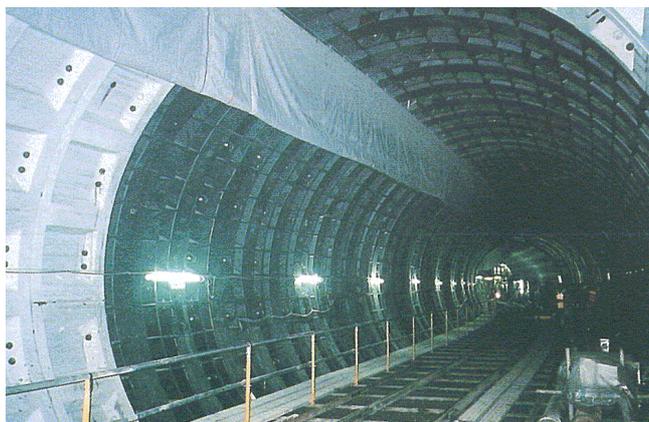
図 - 9.8 セグメントの組立て状況 (その - 3)



AS ジョイントとアンカージョイントの組立て後の状況



AS セグメントの組立て後の継手部



AS セグメントによる施工部の状況

図 - 9.9 セグメントを組立て後のトンネルの状況

### (3) セグメント組立時の作業員数

セグメントの組立作業に関わった作業員は 3 人であり、ボルト締結式継手をもつセグメントの場合の 4 人に対して 1 名減であった。3 名の作業員の役割は以下のとおりである。

作業員 A：リーダーであり、エレクターのオペレーターである。操作ペンダントでエレクターの諸操作を行う。

作業員 B：監視および合図者であり、常に組立てられるセグメントの近くに位置して、セグメントの位置、姿勢などを目視あるいは差し金などを使ってチェックし、エレクターまたはシールドジャッキの操作者にセグメントの組立ての状況に応じた合図を送る。

作業員 C：作業の前半はセグメントの搬送、後半はシールドジャッキの操作を行う。シールドジャッキの操作は、操作すべきジャッキの番号とその操作時期を作業員 B からの合図に従い、ジャッキ操作盤により操作する。

### (4) セグメントの組立時間

セグメントの組立時間をすべてのリングについて測定した。図 - 9.10 はその結果を示したものである。セグメントの組立時間はセグメントを把持してから、セグメントの組立てを終えてエレクターが原点まで戻ってくるまでの時間を 1 サイクルとした。また、図 - 9.10 に示した組立時間の測定対象には、最初と最後のリングとなる調整セグメントリングは含まれておらず、合計 22 リングを対象としている。

全 22 リングの AS セグメントの平均組立時間は約 28 分であり、AS セグメントのあとに行われたボルト締結式継手をもつセグメントの組立時間の平均値約 37 分に比べて 9 分、約 24%の低減が図れた。組立時間からみた全 22 リングの組立ての流れは以下のとおりである。

初期の 4 リングは初めての作業に対する習熟期間であり、いずれの組立時間も平均値を上回っているが、リングを追うごとにセグメントの組立時間が短縮されていることがわかる。

5 リング目から 20 リング目までの 15 リングは安定した組立時間で推移し、その平均組立時間は約 25 分であった。これはボルト締結式継手をもつセグメントの組立時間に比べて 12 分、約 32%の短縮であった。

21 リング目からは作業のシフトが変わり翌週の別の班による組立てとなった。その結果、初めての作業として、初期の 4 リングとほぼ同じような組立時間となっている。

セグメントの組立時間を左右するものとして、セグメントを組立てる位置のシールドジ

ジャッキ 4 本を切羽側に後退するタイミングが重要なことも確認された。タイミングが遅いと意味のない待ち時間が発生する。

(5) セグメントの組立てに必要なジャッキ推力

各セグメントの組立時の最後に 4 本のシールドジャッキで押し込む際の推力は、セグメント 1 ピース当たり 1.8MN に設定された。これはセグメントの組立てに必要な押し込み力の約 1.3 倍であり、また、シールドジャッキの装備推力の約 23%であった。セグメントの組立てのために推力を増加する必要がないことが再確認された。

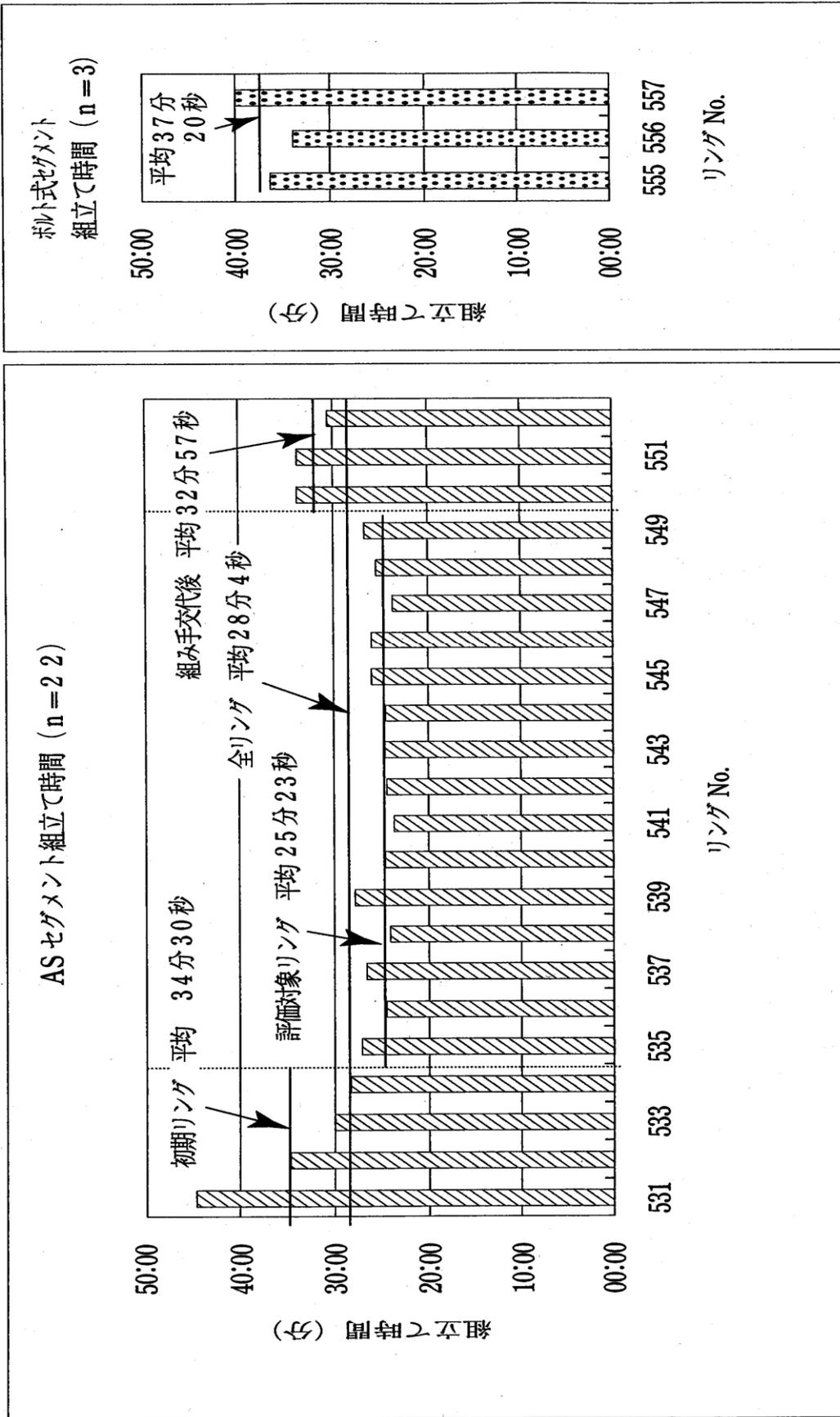
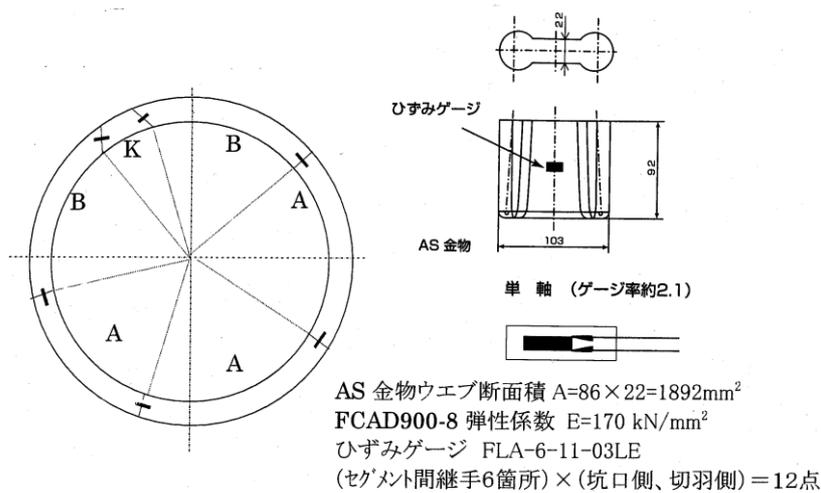


図 - 9.10 ASセグメントとボルト締結式継手をもつセグメントの組立時間の推移

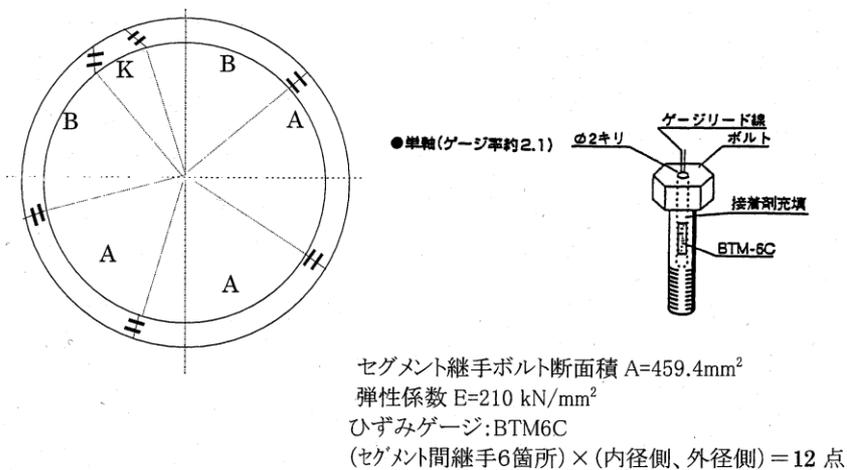
(6) セグメント継手への締結力の導入状況とその経時変化

AS セグメントが達成すべき目標は、セグメントのワンパス組立てが行われると同時に、セグメント継手である AS 金物に締結力が導入され、それが長期間保持されることである。これらのことを、本試験施工での確認事項の一つとして以下のような計測を行った。

計測の対象は、試験施工を行った AS セグメントの 7 番目のリングと、その 25 リング後のボルト締結式継手をもつセグメントである。計測は両リングのセグメント継手である AS 金物あるいはボルトに図 - 9.11 に示すようにひずみゲージを貼付し、組立て時から計測を開始し、その後約 3 ヶ月間計測を継続して行った。



a) セグメント継手の計測位置と計測器 (AS セグメント)



b) セグメント継手の計測位置と計測器 (ボルト締結式継手をもつセグメント)

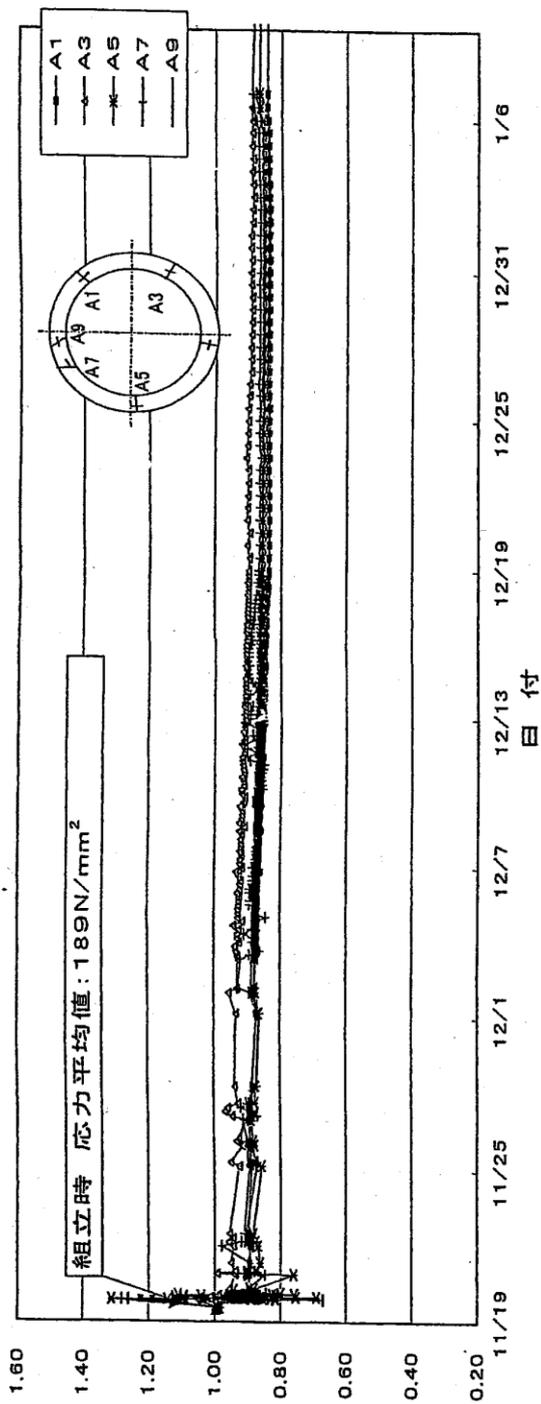
図 - 9.11 AS 金物とボルトのひずみ計測の要領およびひずみゲージの貼付位置

このような計測を行って得られたたひずみの経時変化を図 - 9.12 に示す。なお、計測はデジタルひずみ測定器（東京測器製，TDS - 302）を用いて自動計測を行った。各計器のケーブルは測定リング近傍のトンネルのスプリングライン附近に設置したスキャナーに接続し、スキャナーからは1本のケーブルで測定器に接続した。測定器により変換されたひずみのデータは、パーソナルコンピュータによりフロッピーディスクに収録した。

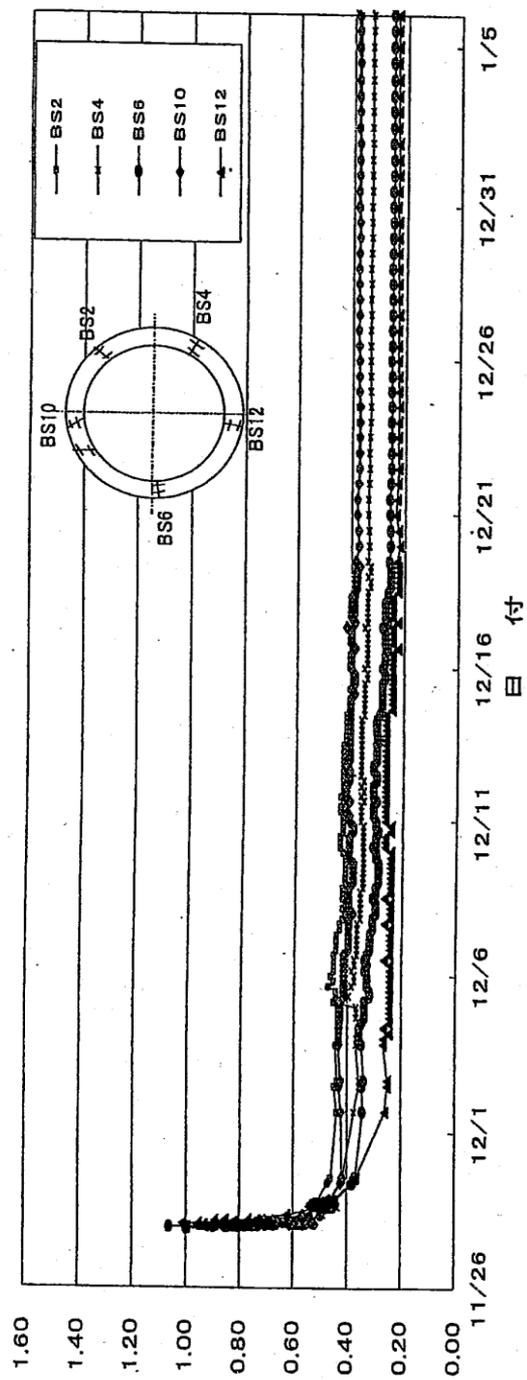
図 - 9.12 に示した締結力の経時変化のグラフから、以下のことがわかった。

AS セグメントの組立て直後に AS 金物のウェブ部に導入された締結応力度は 8 個所の平均値で  $185\text{N/mm}^2$  となっており、AS 金物の許容応力度の 80%とした目標値である  $160\text{N/mm}^2$  を上回った。AS 金物に発生した応力度は、組立て直後に約 5~6%、その後約 1 ヶ月の間にさらに約 5%の低下を見たが、それ以後の低下は見られず、低下率の合計は約 11%で安定したと判断できる。このことから、AS 金物の締結力の設定値は締結力のバラツキとその後の低下を考慮した、また、ボルト締結式継手のように増し締めができないことなどを考慮すると、その目標値の約 20%増し程度とすることが望ましいものと考えられる。

一方ボルト締結式の継手は、ボルトに発生した応力度の組立て直後の低下率が約 65%であり、その後、増し締めが必要となった。



a) AS 金物



b) M27 ボルト

図 - 9.12 セグメント継手に導入された締結力の経時変化 (縦軸は組立時を 1 とした応力  
度の変化率を表す)

### 9.1.5 試験施工におけるトンネルの出来形の計測結果

本研究によるASセグメントと従来のボルト締結式の継手をもつセグメントの両者について、セグメントの組立てが終わったあと、トンネルの出来形の計測を行った。計測項目はトンネルの真円度を表すトンネルの内径および継手の締結度を表す継手面の目開き量に関してである。計測の項目、計測位置および計測の時期と対象リングは以下のとおりである。

計測項目と計測位置：セグメントの内径：鉛直方向，水平方向の2方向

継手面の目開き：円周方向の上下，左右4ヶ所

計測時期：セグメントの組立て直後，裏込め注入後および推力の影響外である組立後約

20リング目となる時期（図-9.13 参照）

計測対象としたリング：ASセグメント：調整セグメントを除く22リング

ボルト締結式継手をもつセグメント：ランダムに20リング

計測時期の概念を図-9.13に示す。

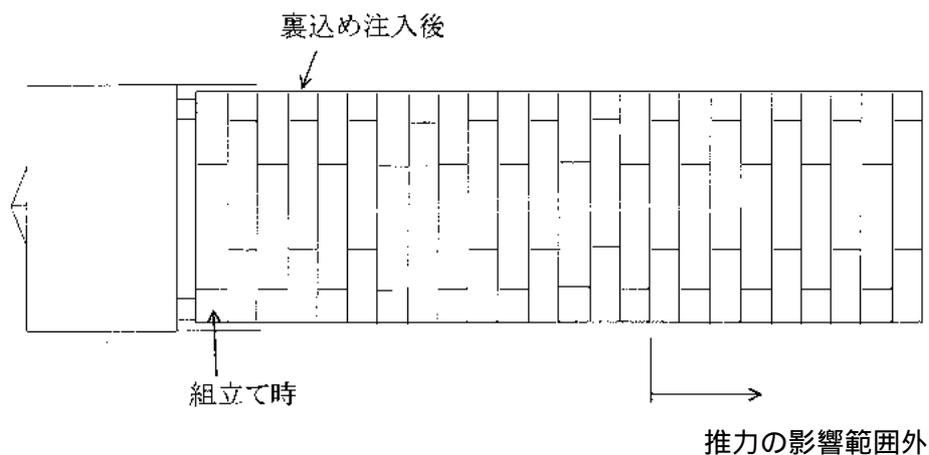


図-9.13 トンネルの出来形の計測時期

#### (1) トンネルの真円度

トンネルの真円度は、トンネル径の鉛直方向と水平方向の直径の変化量で評価したが、図-9.14で示すように計測時期によりその計測方法が異なる。セグメントの組立て直後はシールドマシンのテールクリアランスを計測することにより求め、それ以後はトンネルの内径を伸縮ボールで計測する方法により求めた。テールクリアランスによる計測では、その計測値をトンネルの内径に置き換えて評価し、他の計測値と同じになるようにした。図-9.15は、トンネルの内径の設計寸法と計測値との差を表したものである。

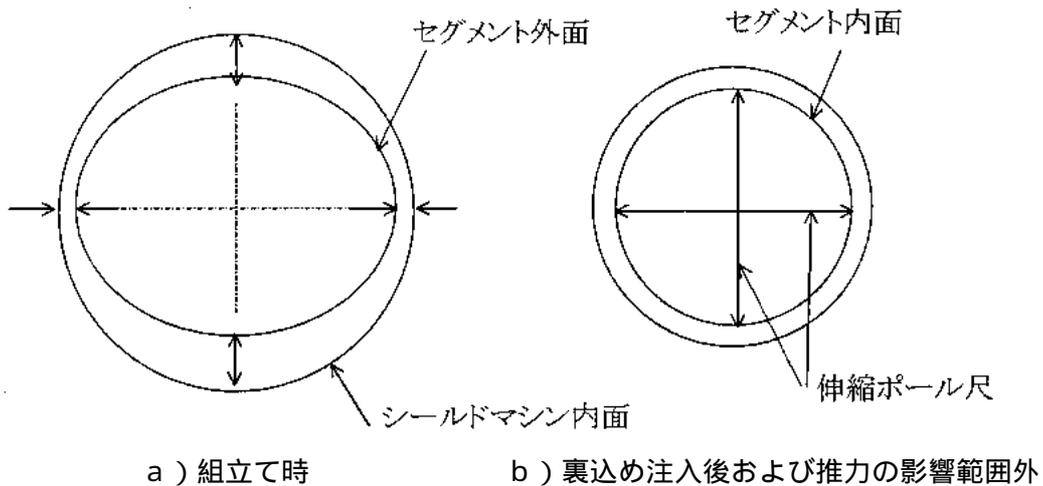


図 - 9.14 真円度の計測要領

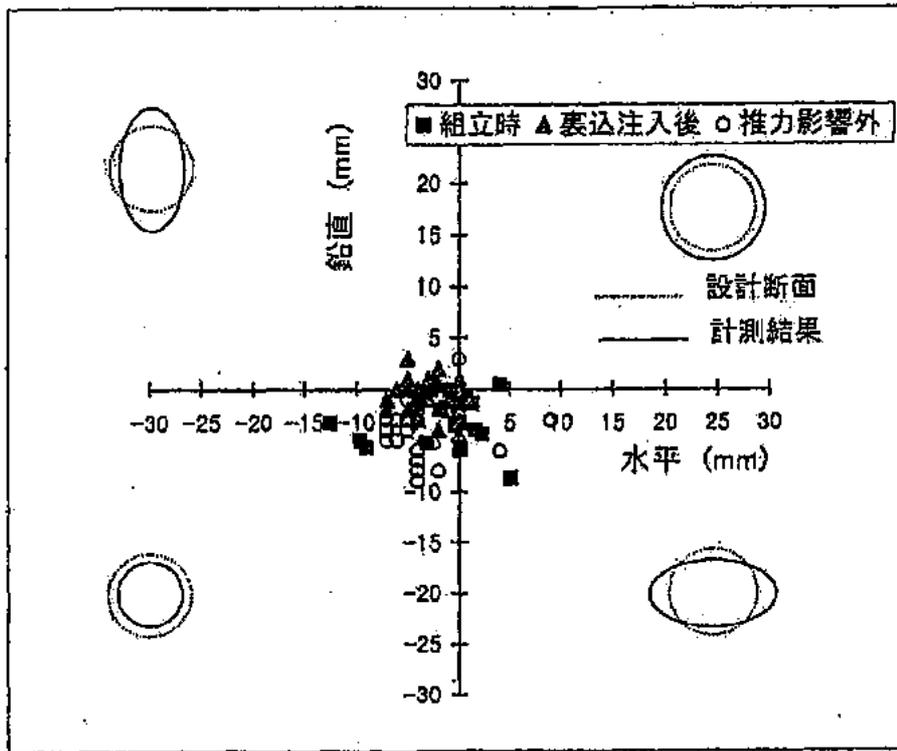
図 - 9.15 に示した散布図から AS セグメントの真円度は、概ね以下のような結果であったと考えられる。

AS セグメントの真円度は約 2mm 程度のつぶれを示し、良好な結果であった。これは、AS 金物に所定の締結力が確実に導入されたこと、セグメントの組立時にセグメント継手

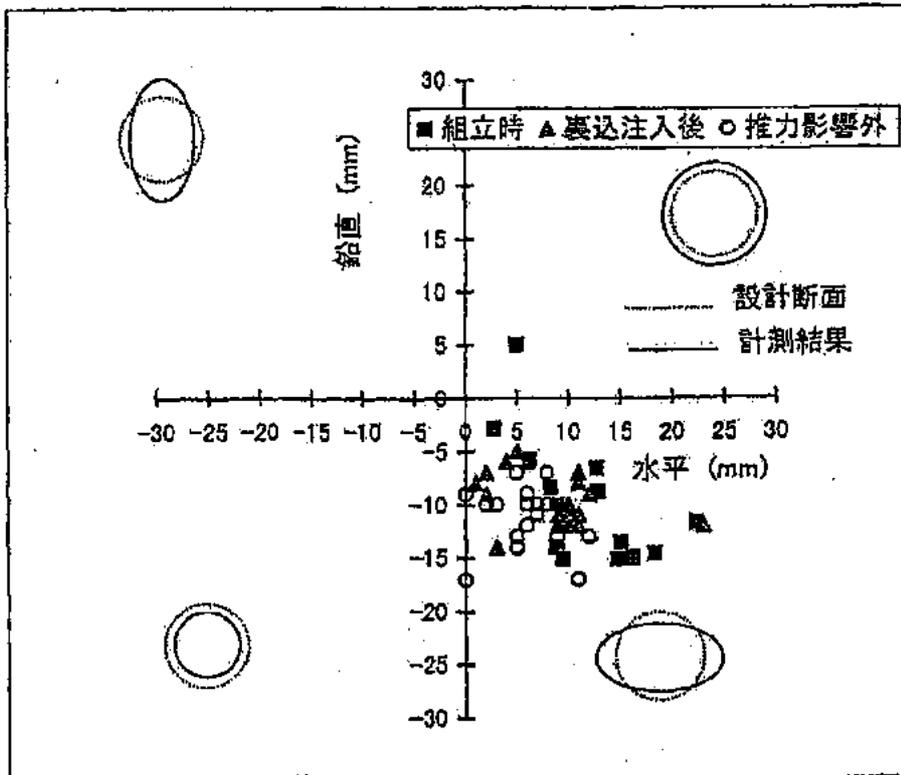
面がメタルタッチしてリングを形成しているためと考えられる。

それに対して、ボルト締結式の継手をもつセグメントの真円度は、裏込め注入後および推力の影響範囲外においては若干の「もどり」や増し締めによる影響があるものの、最終的には 10～15mm の偏平につぶれる傾向を示している。

AS セグメントは従来のボルト締結式の継手をもつセグメントに比べてリングの剛性が高く、高い真円度が確保できる。



a) AS セグメント



b) ボルト締結式継手をもつセグメント

図 - 9.15 トンネルの内径の設計値と計測値との差

(2) 継手面の目開き量

図 - 9.16 は、継手面の目開き量の計測位置を示したものである。セグメント継手面の目開きはイ～への全継手面 6 ヶ所で、リング継手面の目開きは、クラウン位置、インバート位置、左右のスプリングライン位置で計測した。セグメント継手面の目開き量の計測結果を図 - 9.17 に、リング継手面の目開き量の計測結果を図 - 9.18 に示す。

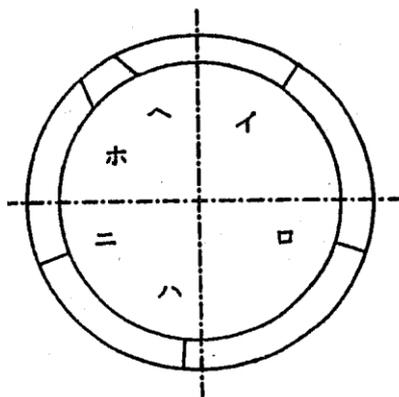
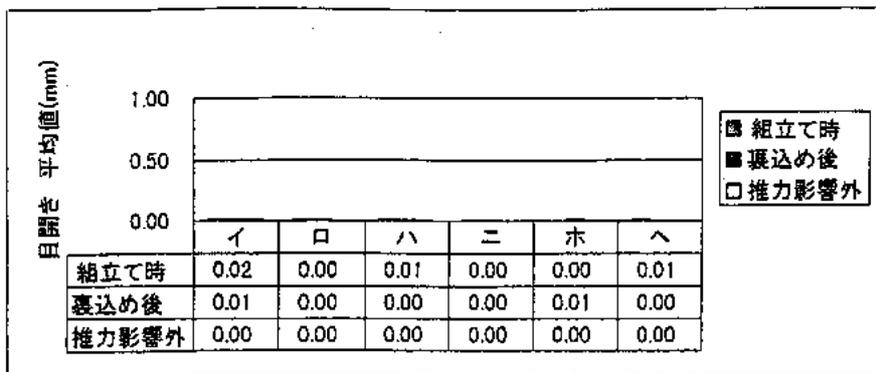
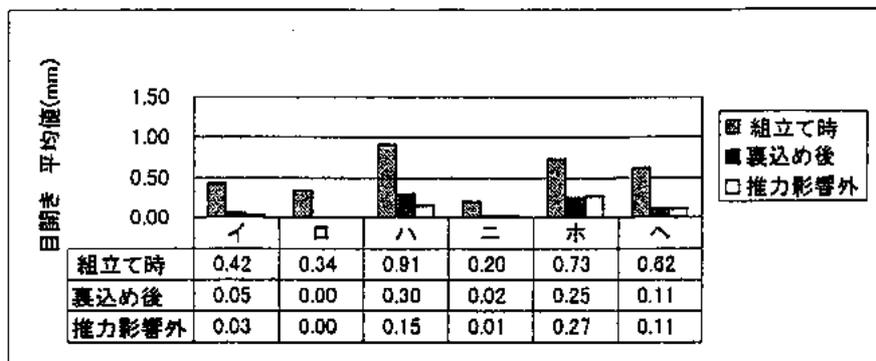


図 - 9.16 継手面の目開き量の計測位置

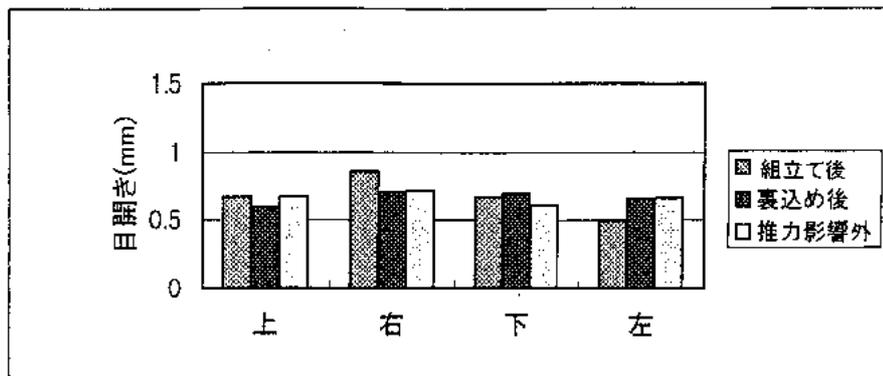


a) AS セグメント

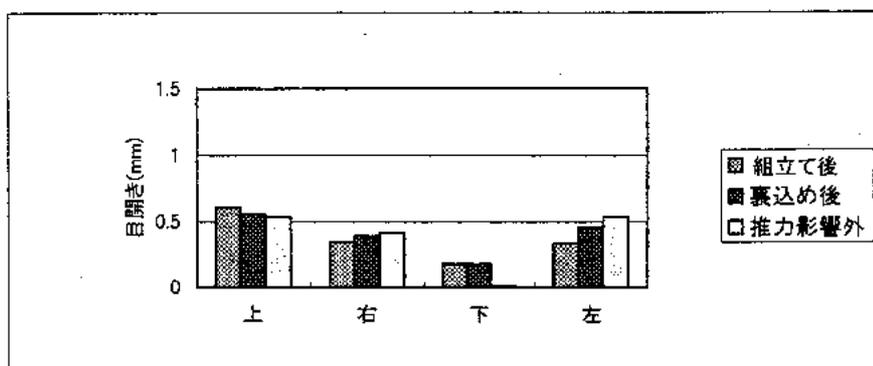


b) ボルト締結式継手をもつセグメント

図 - 9.17 セグメント継手面の目開き量の計測結果



a) AS セグメント



b) ボルト締結式継手をもつセグメント

図 - 9.18 リング継手面の目開き量の計測結果

以上のことから、AS セグメントを用いたトンネルの目開き量については概ね以下の結果であったと考えられる。

AS セグメントのセグメント継手面の目開き量は、組立て直後から推力の影響範囲外までほとんど生じていない。このことからトンネルの真円度がよいことがわかる。

ボルト締結式継手をもつセグメントの目開き量は、組立て直後に大きく、その後推力の影響範囲外で増し締めされるため、0.2mm 程度に小さくなる。

AS セグメントのリング継手面の目開き量は、ボルト締結式継手をもつセグメントに比べてやや大きいですが、止水性を損なうほどではない。

### (3) 継手面からの漏水

試験施工後の AS セグメントもボルト締結式継手をもつセグメントも継手面からの漏水は皆無であった。

## 9.2 現場における実施工

営団地下鉄7号線麻布台B線工区における試験施工のあとの2件の試験施工についても、継手に締結力を導入しながらセグメントのワンパス組立てが行えることを確認した。3件の試験施工の結果から、ASセグメントを用いれば、セグメントの組立時間の短縮、セグメントの組立作業員数の削減が可能であり、また、ASセグメントで組立てられたトンネルの品質は、ボルト締結式継手をもつセグメントによるトンネルの品質と比べて遜色ないことが確認された。さらに、このセグメントを用いることによって、セグメントの自動組立てが可能であるとの確信を得た。これらのことから、ASセグメントを長距離のトンネルに本格的に採用できるものと判断した。

ASセグメントは、首都圏外郭放水路第4工区トンネル新設工事において、初めて実施工に採用された。以下には、この現場でのセグメントの組立てについて、組立方法、組立時間、組立作業員数などを中心に述べる。

### 9.2.1 首都圏外郭放水路第4工区の概要<sup>9.5)</sup>

#### (1) 首都圏外郭放水路

首都圏外郭放水路は首都圏の北部を流れる中川、綾瀬川などの中流部の治水対策として、これらの河川と江戸川とを地下放水路で連絡し、これらの河川の洪水を江戸川に放流するものである。この放水路の全長は6.3kmであるが、そのうち、1～3工区はすでに完成し、そのうちの1,2工区および排水機場は2002年7月から運用されている。首都圏外郭放水路の全体構成を図-9.19に示す。



図 - 9.19 首都圏外郭放水路の全体構成

## (2) 第4工区

第4工区は第4立坑から西へ大落古利根川までの1235mのシールドトンネルを構築するもので、シールドは2001年4月に発進し2002年7月に到達した。地下約50mに設置されるトンネルは内径10.87mで、この放水路用トンネルの覆工構造に求められる品質としては、最高水頭約16mの内水圧に対応でき、流れを阻害しないように内面が平滑であること、高い水密性を確保すること、鉄材の腐蝕やコンクリートの脱落を防止でき、摩耗に耐えることなどが要求された。また、当然であるが、施工性の向上や安全性の向上も求められた。

このような要求品質に対して、本研究によって実用化されたASセグメント、特にその継手構造をベースにした新型合成セグメントが採用された。このセグメントは箱型のダクタイルセグメントの内面側に鉄筋を配筋し、コンクリートとの合成構造としたことから「DRC」(Ductile and Reinforced Concrete)セグメントと呼ぶことにした。継手構造はセグメント継手には桁高方向に2段のASジョイントを1断面に4個配置し、リング継手にはセグメント1ピースに4個のアンカージョイントを配置したものである。セグメントの内径側は把持孔を除きすべてコンクリートで充填されており、従来のボルト締結式継手をもつセグメントのようなボルトボックスは一つもない。図-9.20はDRCセグメントのイメージ図を示したものである。

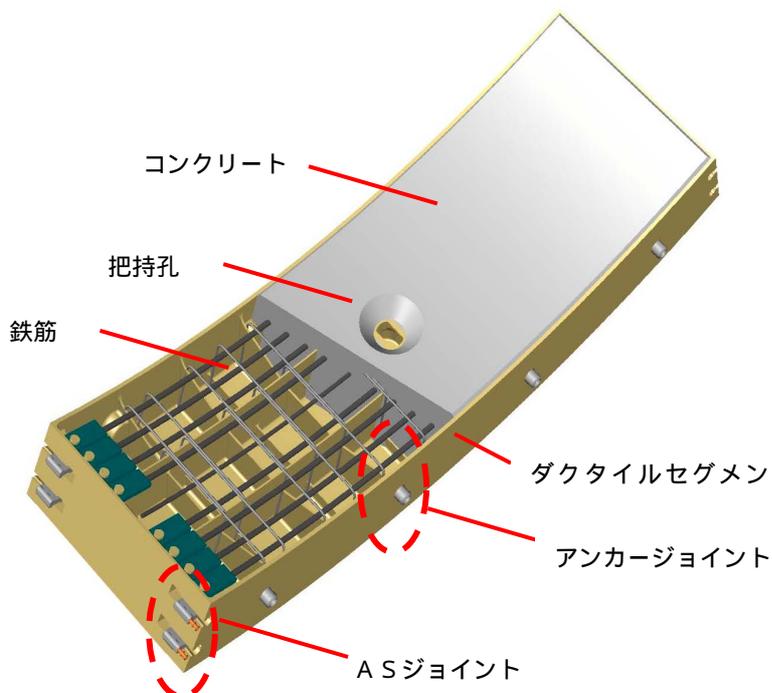


図 - 9.20 DRC セグメントのイメージ図

### (3) 第4工区の工事概要

DRC セグメントが採用された第4工区の工事概要は以下のとおりである。

工事名称：首都圏外郭放水路第4工区トンネル新築工事

発注者：国土交通省関東地方整備局江戸川工事事務所

施工者：鹿島・飛島・西松 JV

工期：2000年7月8日～2004年3月31日

トンネル延長：1235m

トンネル径：外径 = 11.8m，内径 = 10.87m

トンネル線形：直線部 751m (61%)，曲線部 484m (39%)，最小曲線半径 250m

工法：泥水式シールド工法

土質：成田層群，洪積砂質土層 (77%) および粘性土層 (23%)

土被り：51～54m

セグメント：標準部：DRC セグメント 1002 リング

流入部：スチールセグメント 20 リング

## 9.2.2 DRC セグメント

### (1) DRC セグメントの構造

DRC セグメントには軽荷重用および重荷重用の2種類のセグメントがあるが、それらのうち軽荷重用について、その殻となるダクティルセグメント部を図-9.21に、配筋図を図-9.22に示す。ダクティルセグメントの材質は一般のダクティルセグメントと同じFCD500であり、製造法も同様であるが、ダクティルセグメントとしては、桁高が450mm、外径側の弦長が約4000mmを超え、大きさとしては最大クラスのものとなっている。

主桁構造は2本の外主桁とそれより桁高さを120mm低くした2本の内主桁および外面側のスキンプレートからなる。また、縦リブは約430mmピッチで配置され、その高さは内主桁に挟まれる部分に向かって桁高の半分まで減じている。通常のダクティルセグメントとは異なり、鉄筋を固定するために、二つの工夫がなされている。まず、主筋を固定するためのボス4個がそれぞれセグメント継手板の内側に配置され、鉄筋の端部に溶接で取り付けられた羽子板状の鋼板とこれらのボスとが楔を打ち込むことによって一体化される。次に、配力筋を固定するために、各縦リブの中間に高さ90mmの孔のある壁を設け、その孔に配力筋の端部を差込み固定するようになっている。

継手板の外周には上下 2 本，幅 50mm，深さ 4mm のシール溝を設けてある。

セグメント継手は外面側から 135mm と内面側から 125mm の位置に上下 2 段に 4 個の AS ジョイントを配置し，正負の曲げに対して有効に働く構造となっている。AS 金物の材質は FCD500 とした。これはセグメント本体の AS ジョイント用スリットの機械加工の効率を上げるため，スリット寸法を大きくしたことにより，金物のウェブ厚さを厚くでき，その結果，材質も低強度のものが使用できるようになったためである。また，AS 金物のコストダウンも意図している。

リング継手にはセグメント 1 ピースに 4 個のアンカージョイントを設けた。

一方鉄筋コンクリートに，主筋として SD345 の D29 を 4 本，および D16 を 4 本，配力筋として SD345 の D13 を約 450～450mm ピッチで設け，コンクリートの圧縮強度は 30 N/mm<sup>2</sup> とした。

セグメントの把持構造は，図 - 9.22 に示すように，コンクリートに埋め込んだ把持金物にエレクターのグリップを差込み，回転後引張り，一方でエレクターの伸縮ジャッキを張り，反力をとりながらセグメントを把持するものである。

## (2) DRC セグメントの設計とその確認

DRC セグメントの設計は，セグメント本体構造の基本特性および終局耐力，継手構造の強度や剛性を把握するために実施した性能確認試験の結果を反映して行った。ここでは，その中のセグメント本体の性能確認について述べる。

DRC セグメントはダクタイルセグメントの内面側に鉄筋を配置してコンクリートを充填する構造のセグメントである。ダクタイルセグメントの一部には縦リブや補強リブが配置されているので，ダクタイルセグメントとコンクリートとの一体化が図れると考えられ，合成構造として評価できるものと考えた。

検討は，充填コンクリートを考慮せず，ダクタイルセグメントと鉄筋のみを構造部材とみなす構造（以下 DS 構造と呼ぶ）と，充填コンクリートを考慮して合成構造とした構造（以下 DRC 構造と呼ぶ）のそれぞれについて行った。

まず DRC セグメントの単体曲げ試験を行い，セグメント本体の耐力の確認と，ダクタイルセグメントと充填コンクリートとの一体性についての確認を行った。図 - 9.23 は試験状況を示したものである。



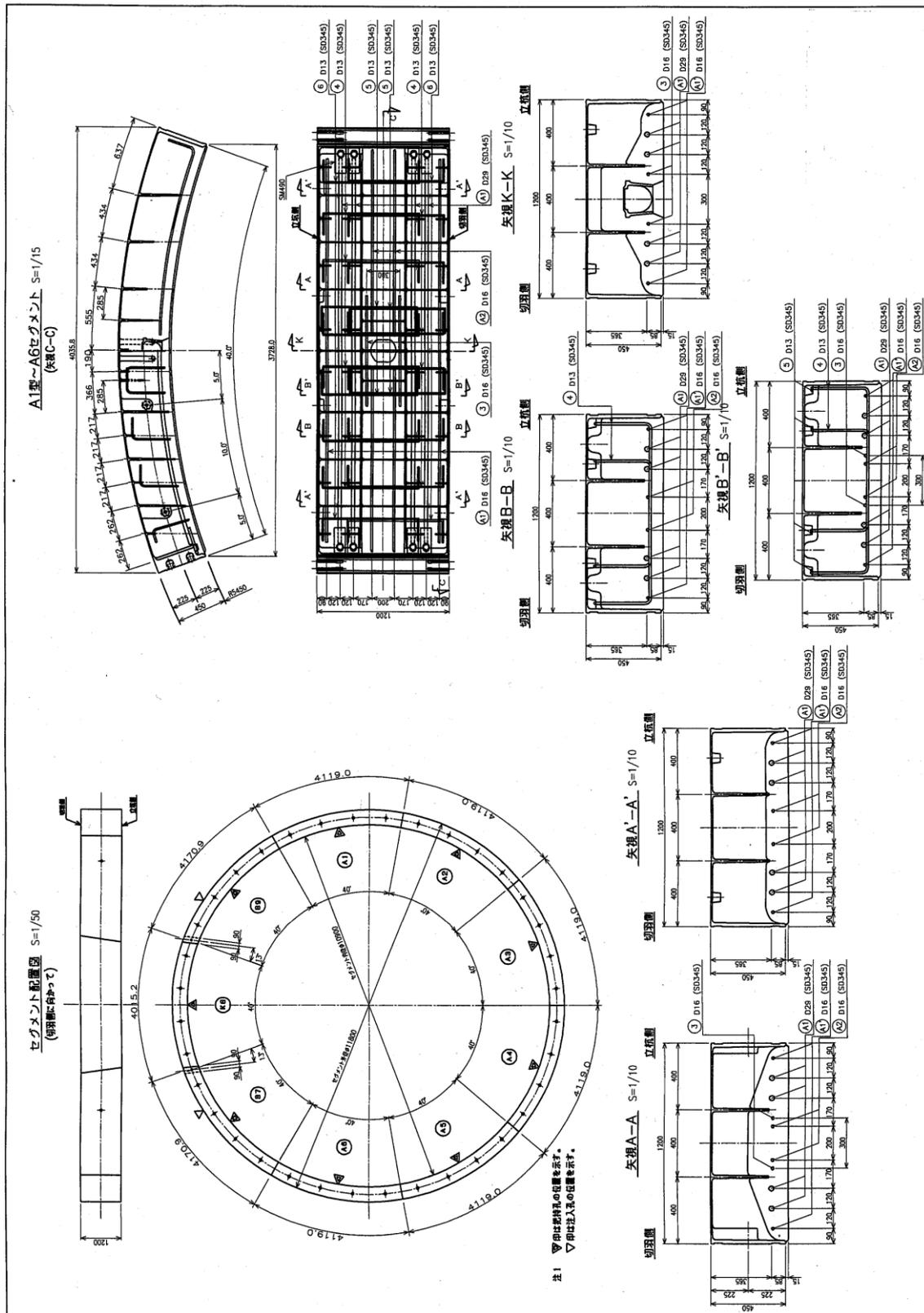


図 - 9.22 DRC セグメントの配筋図

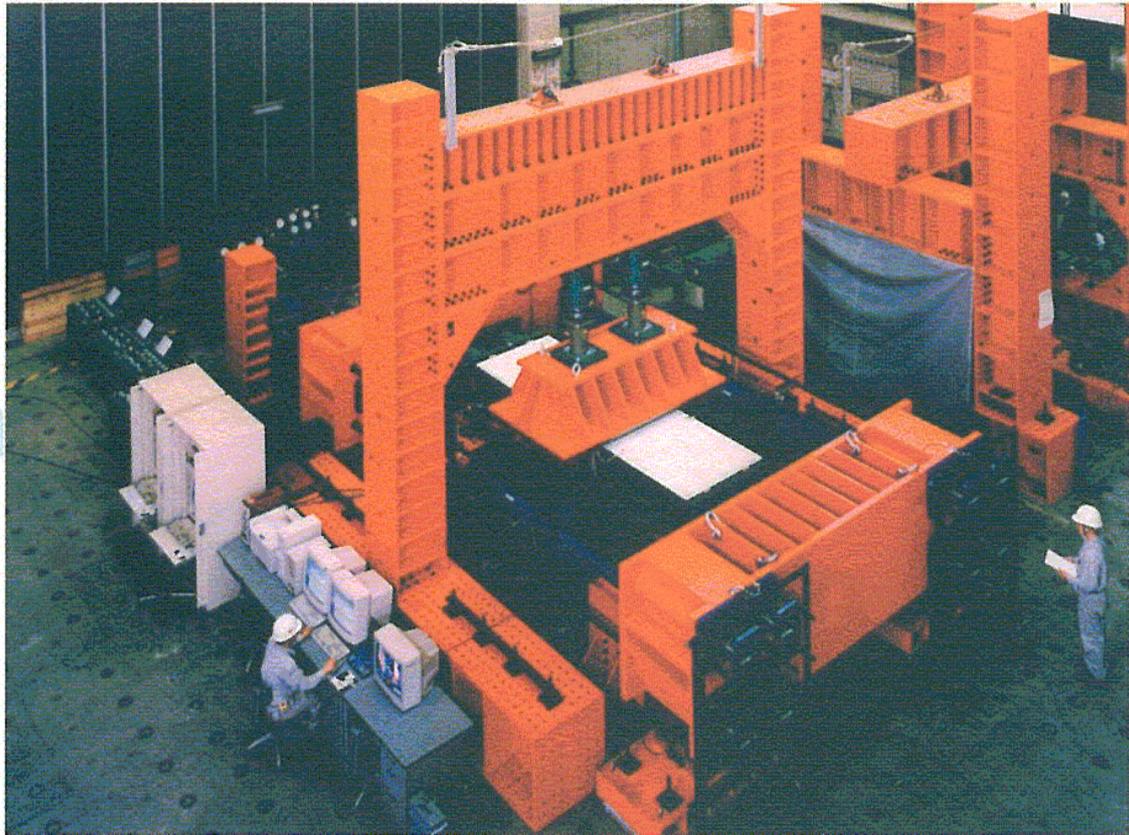


図 - 9.23 DRC セグメントの構造試験の状況

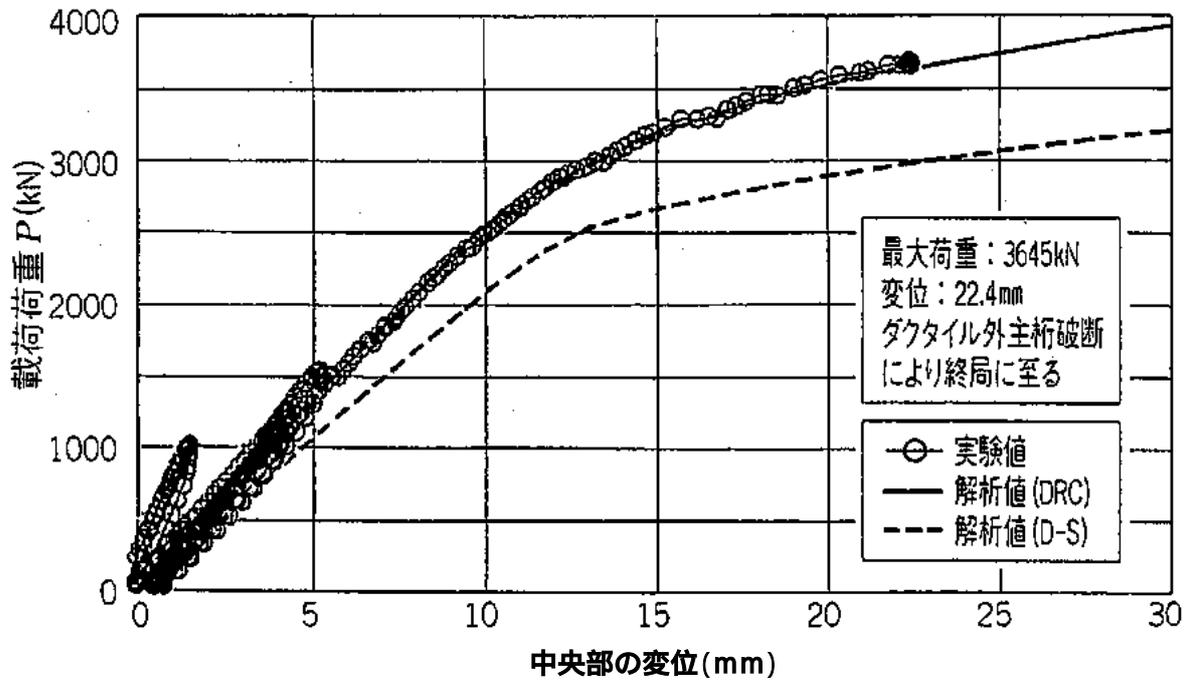


図 - 9.24 DRC セグメントの単体曲げ試験（正曲げ）の結果

その結果，載荷荷重と中央部の変位の関係や断面内のひずみ分布の状況から，この構造が合成構造として評価できることを確認した．図 - 9.24 には非線型 FEM 解析によるシミュレーション解析の結果を併記してある．実験結果が DRC 構造の解析結果とよく一致していることがわかる．

### 9.2.3 DRC セグメントの組立て状況

#### (1) セグメントの組立方法

DRC セグメントの組立ては以下の理由から全自動組立て方法が採用された．

トンネル外径が 11.8m という大断面トンネルであり，セグメントの組立てを手作業で行う

場合には高所作業となり，安全性の確保が最重要課題となること．

DRC セグメントのベースとなっている AS セグメントについては，従来までに合計 110 リングの手作業によるセグメントの組立てを行ったが，その中で，セグメントの組立ての可否や組立時間の短縮について，最も大きな要因となるのはセグメントの位置決め作業であった．精度と熟練を要したり，エレクターやシールドジャッキのオペレーターとの連携作業を必要とするこの位置決め作業を，1000 リングを超えるセグメントについて

手作業で行うことは事実上不可能であると考えたこと．

セグメントの組立てサイクルタイムを左右するもう一つの大きな要因はジャッキ操作である．セグメントを組立てるためのスペースをあけるいわゆる「ジャッキの引き」と，セグメントを組立てるための「ジャッキの押し」は，タイミングが遅くなると手待ちとなるばかりでなく，手作業の場合は作業者同志の合図作業となり，安全性の観点でも好ましくないこと．

このようなことから，DRC セグメントの組立時間を短縮し，作業員の安全性を確保するためには，自動組立てが最も有効であると考えられた．また，従来の試験施工の結果から，全自動組立てが可能であると考えた．

#### (2) 自動組立てを行うための課題と対策

表 - 9.3 は DRC セグメントを自動組立てする際の課題とその対策の検討結果を示したものである．

表 - 9.3 DRC セグメントの自動組立てのための課題とその対応策

項目	対応策の方向	対応具体策案
1) 継手の先付け部品が確実に取り付けられていること	部品の層別 目視管理とその記録	部品の種別ごとの色分け 坑口での事前目視チェック セグメント組立時の CCD カメラによるチェックとビデオ撮影
2) セグメントの把持	非ねじ込み方式 寸法精度のアップ	把持金物と 90 度回転するグリップ方式の採用 グリップ部と位置の寸法精度の確保
3) セグメントの位置決め	セグメントの高さ, ヨーイング, ピッチング, ローリングの調整	接触式センシングの採用 既設リング, 既設セグメントを基準にする方式の設定
4) セグメントの押し込みとシールドジャッキの操作	セグメントの押し込みステップごとに必要となるジャッキの決定	セグメントリングの等分割化 押し込みジャッキパターンの決定
5) セグメント継手への締結力の導入の管理	セグメント全ピースの管理	AS ジョイントの締結時のジャッキ推力の変化を把握し, その圧力変化のパターンにより良否を判定し記録

この中で, セグメントに最も関係のあるセグメントの位置決めをどのように考えたかを以下に述べる.

### (3) DRC セグメントの組立て時の位置決め

DRC セグメントの組立ては基本的には AS セグメントと同じであるから, AS セグメントを手作業で組立てた際のセグメントの位置決めの方法, 手順および精度を踏襲すればよい. セグメントの位置決めの基本は以下のとおりと考えられる.

DRC セグメントが組立てられる条件とは, AS ジョイントおよびアンカージョイントが, それぞれ隣接する継手位置に円周方向および半径方向とも一致することである. その精度としては, 両継手構造の組立て上のクリアランスである 2~3mm 程度が要求される.

半径方向について, 隣接する AS ジョイントとアンカージョイントそのものを位置合わせすることは, 形状的にも各継手の位置からも直接行うのは難しいので, セグメントの内面側に打設したコンクリートの面で代用する.

その場合, 両継手の基準となる位置 (例えばセグメントの弦長のセンター) や, コンク

リート面までの寸法精度を正確に確保しておくことが必要となる。

このようなことから各寸法精度を以下のように決定した。

- ・ AS ジョイントおよびアンカージョイントの中心位置から内面側コンクリートまでの高さの公差は  $\pm 2\text{mm}$  とする。
- ・ エレクターに内蔵する接触式位置決めセンサーの精度を  $\pm 1\text{mm}$  とする。

円周方向の位置決めは既設リングのセグメント継手面の接点と組立てられるセグメントの円周方向のセンターを合わせる方式とする。したがって、セグメントの坑口側のリング継手板の木口に機械加工による溝を設け、それを白色に塗装することとした。このセンターマークの寸法精度は  $\pm 1\text{mm}$  である。

把持金物のグリップ部の寸法精度は  $\pm 1\text{mm}$  とした。

これらのことを図示したのが図 - 9.25 である

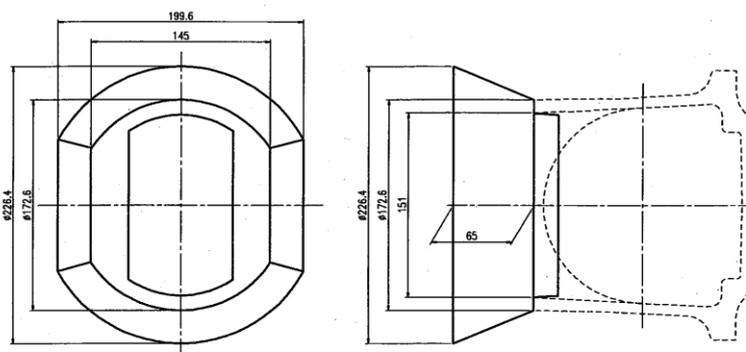
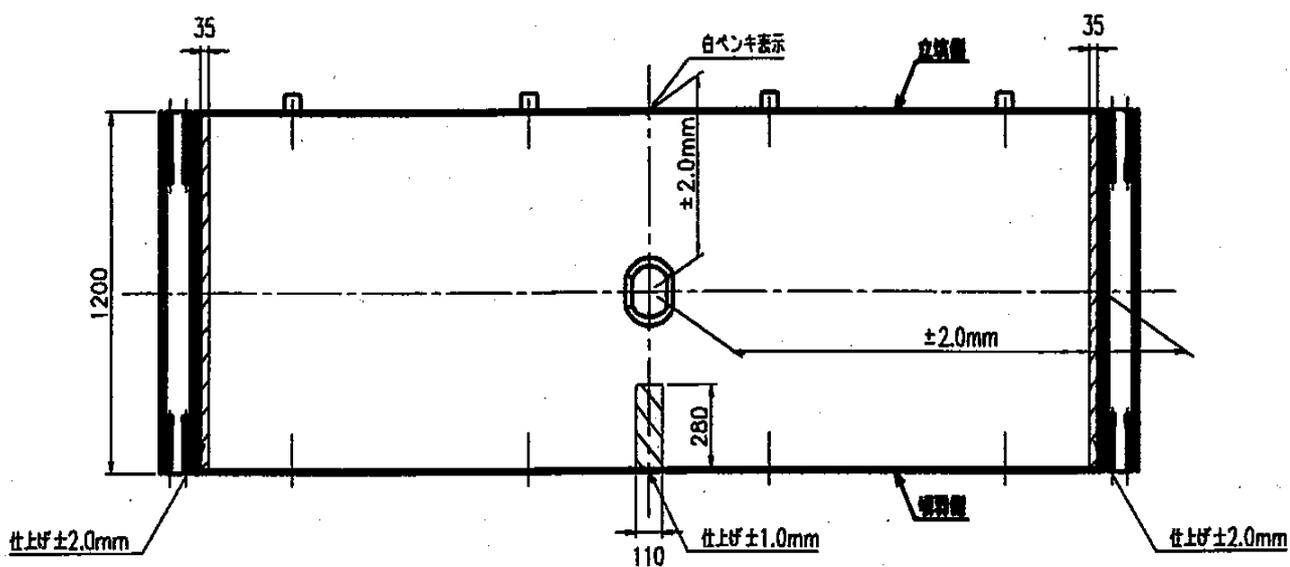


図 - 9.25 DRC セグメントの位置決め用センシング面とその寸法精度

#### (4) DRC セグメントの組立手順

DRC セグメントの組立手順を各ステップごとに詳細にまとめたものが図 - 9.26 ~ 9.29 である。これらの各ステップにおける AS ジョイントおよびアンカージョイントの嵌合状態を明らかにし、それによってどの時点でシールドジャッキを作動させるべきかを決め、シールドジャッキの動作パターンを決定する基準とした。

このステップ図でのポイントを以下に述べる。

ステップ 1~2 ではセグメント継手面が突き合わせされ、位置決めされたあとシール材を片側 0.6mm (シール材の厚さの約 10%) 圧縮させる。

ステップ 3~4 では AS ジョイントが挿入を開始し、それに伴いシール材をさらに圧縮させる。

ステップ 5~8 はアンカージョイントの挿入開始直前から締結が進むステップであり、ステップ 6 からはその抵抗が大きくなるのでシールドジャッキによる押し込みを開始するステップである。なお、シールドジャッキによる押し込みが行われるステップではエレクターの摺動ジャッキはリリースしながら追従することになる。また、シールドジャッキによる押し込みを開始する前に位置決めセンサーにより各センシング位置の高さの再チェックを行う。

ステップ 9 からは AS ジョイントの締結が開始され、合計 119mm のストロークで締結が完了する。

この組立手順とシールドジャッキの操作により全自動組立が可能となった。



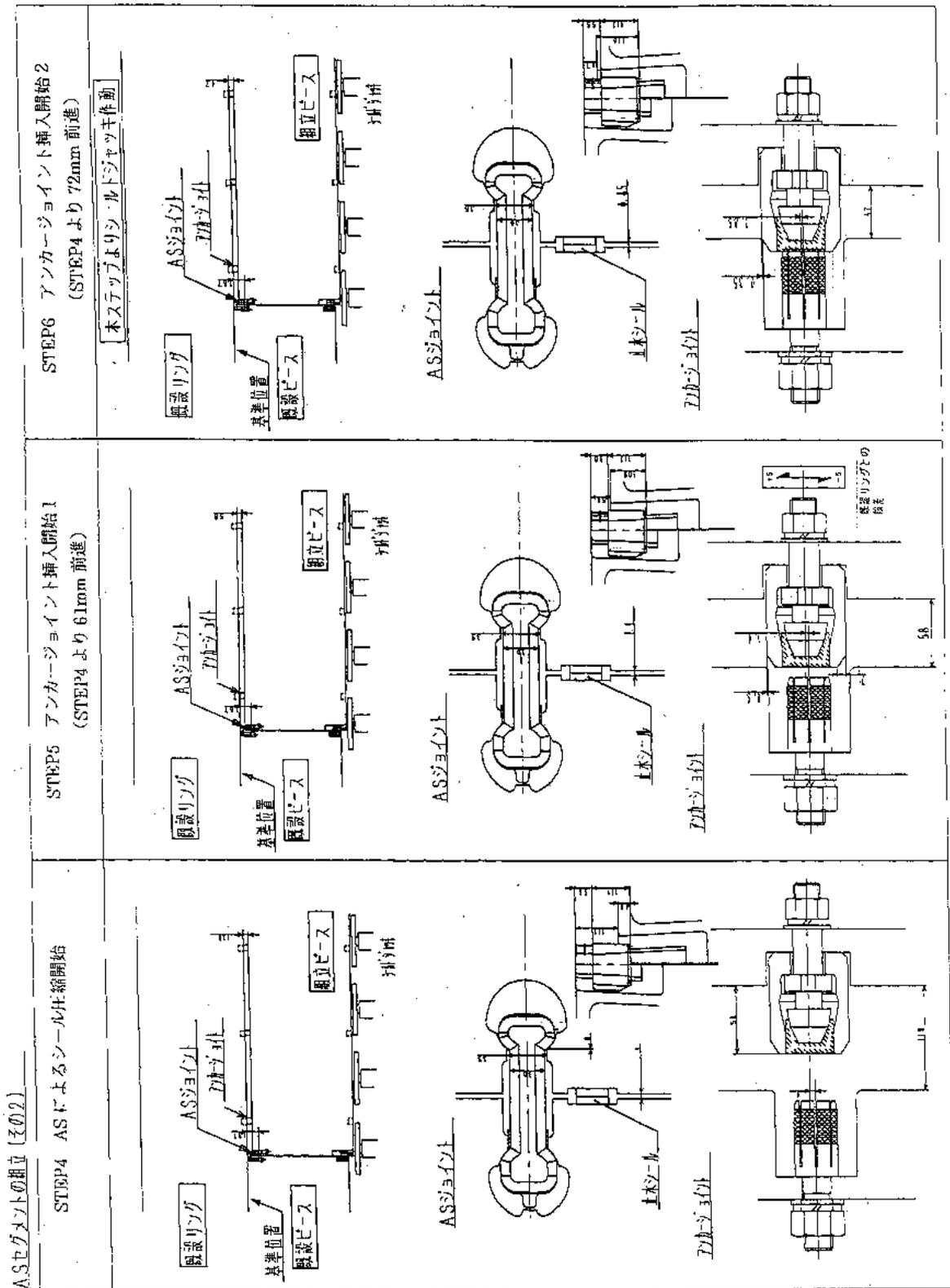


図 - 9.27 DRC セグメントの組立手順 (ステップ 4~6)

ASセグメントの組立 (その3)

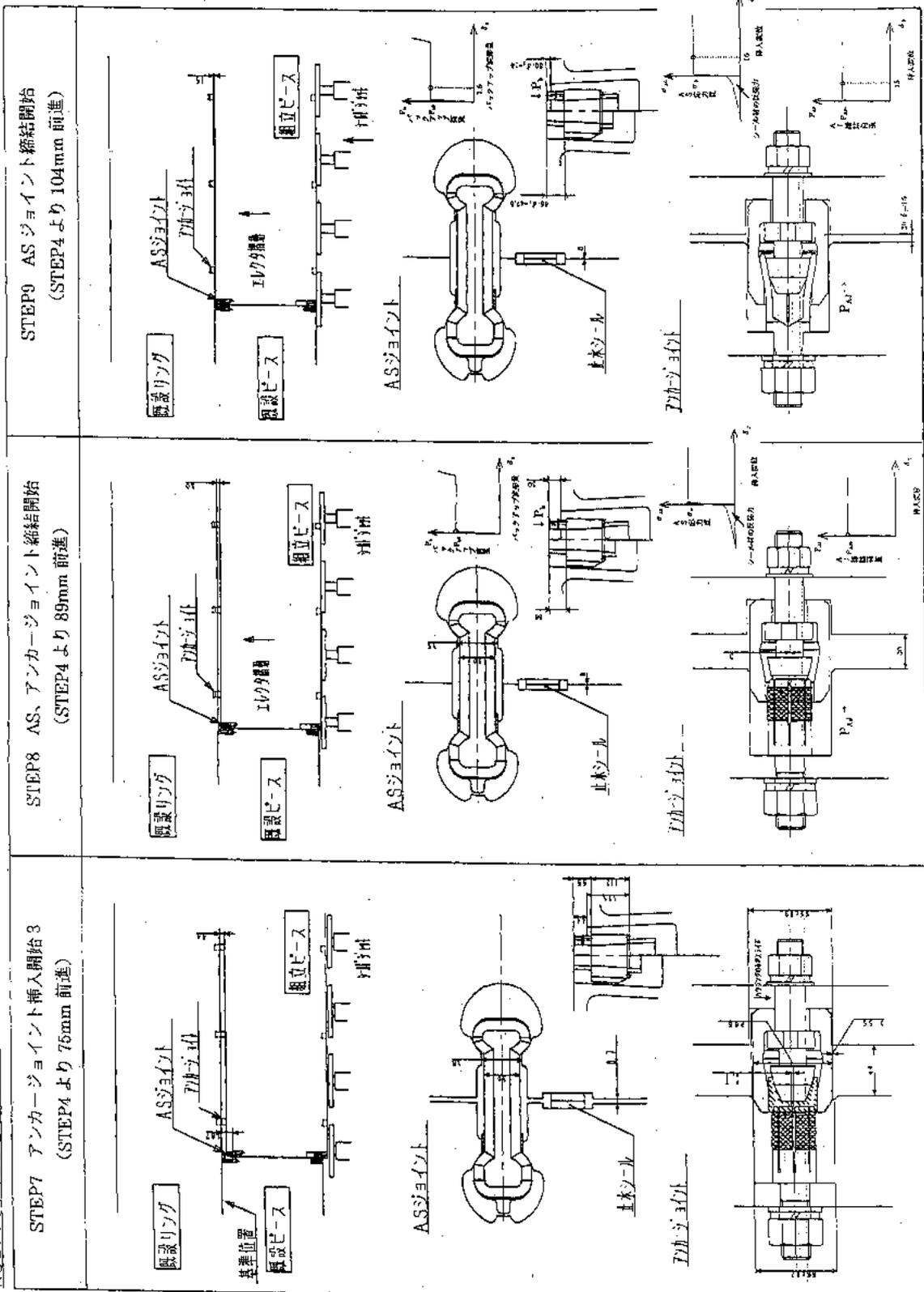


図 - 9.28 DRC セグメントの組立手順 (ステップ7~9)

ASセグメントの組立(その4)

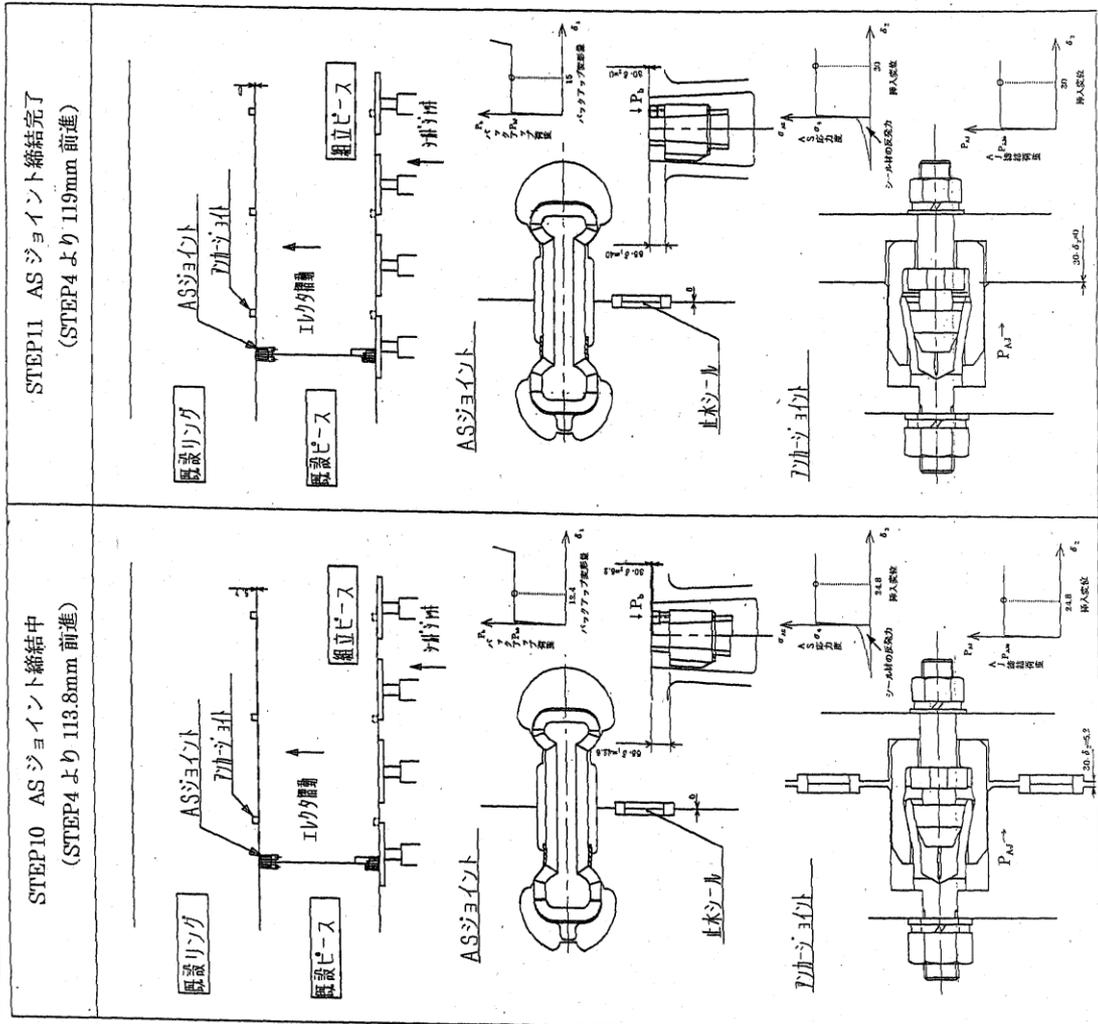


図 - 9.29 DRC セグメントの組立手順 (ステップ 10 ~ 11)

(5) DRC セグメントの組立時間と掘進状況<sup>9.6)</sup>

当該工区でのシールドの掘進は 2001 年 7 月に開始され、120 リングの初期掘進の後の 12 月以後から本掘進に入った。セグメントの組立てが軌道に乗った時期の組立時間を表したものが図 - 9.30 である。これによれば、計測した全 21 リングの平均組立時間は約 39 分であるが、故障のため停止し組立時間が伸びた 3 リングを除けば、その平均組立時間は約 36 分となった。1 ピースの組立時間は約 4 分であり、また、1 リングは 9 ピースから構成されていることから、トラブルがない場合の組立時間は 36 分となる。計測したリングの最短組立時間は約 33 分であったが、これは同工区に先立ち施工された第 3 工区のボルト締結式継手をもつセグメントの組立時間の約 1/2 であり、セグメントの組立時間の大幅な短縮が実現された。これとともに、セグメントの自動組立による組立作業の省力化も達成された。

このようなセグメントの組立時間の大幅な短縮の結果、この工区での 1 日あたりの施工数量は平均 8~10 リング(昼夜)、最大で 12 リングとなった。

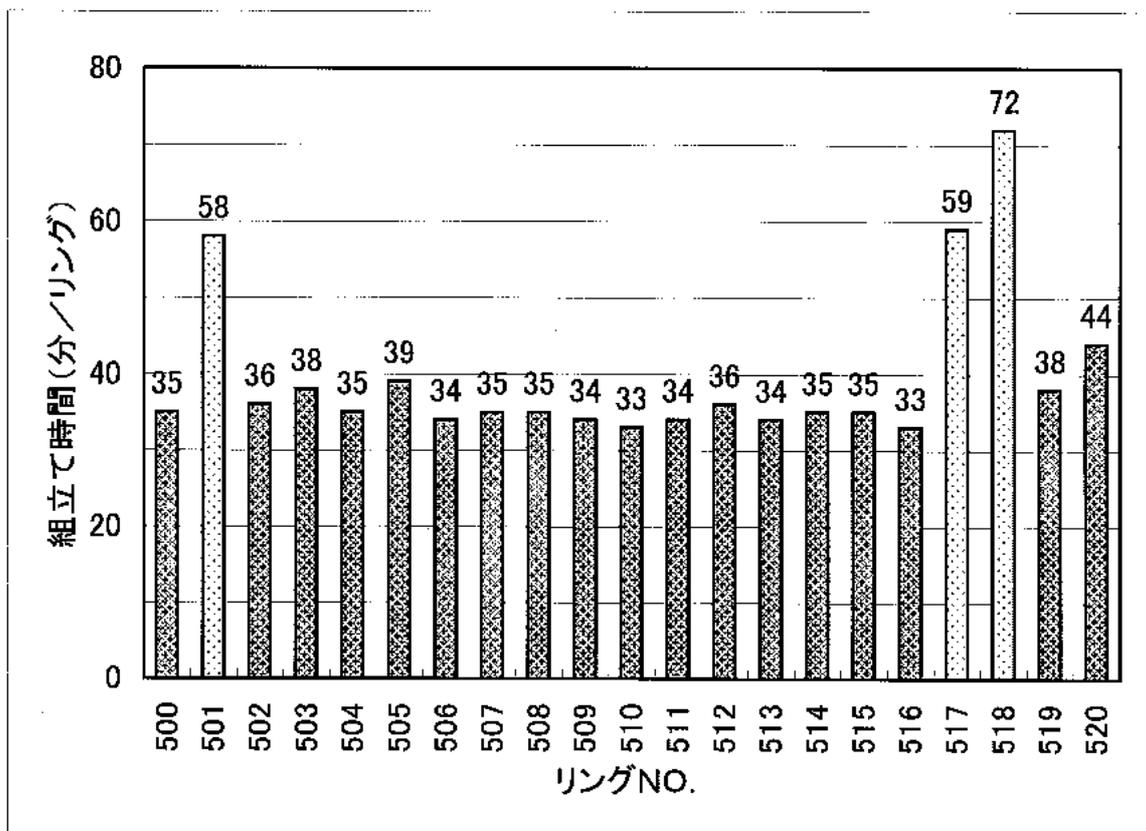


図 - 9.30 DRC セグメントの組立時間

#### 9.2.4 セグメント継手の締結力の管理<sup>9.7)</sup>

DRC セグメントの組立時間が従来のボルト締結式継手をもつセグメントに比べて、大幅に短縮でき、また、自動組立でも実施することができたが、本セグメントのように組立てと継手の締結が同時に行われる場合のセグメントの組立の品質として、セグメント継手への締結力の導入とその保持状態が大きな課題である。以下にはこれらの課題について述べる。

##### (1) セグメント継手の締結力の目標値

AS ジョイントへ導入される締結力がばらつく要因は 2 つあり、それらを勘案して目標値を以下のように決定した。

AS ジョイントの構造上のバラツキ：約 ±30%

AS ジョイントのリラクゼーションによる長期の締結力低下：約 -7%

これらから、目標値に対してばらつきは ±30% とし、下限値でも必要締結力を割らないことおよび上限値でも許容応力度 ( $160\text{N/mm}^2$ ) を下回らないこととした。

その結果目標値は以下のとおりとなった。

- ・目標値：712  $\mu$
- ・上限値：926  $\mu$  (+30%)
- ・下限値：448  $\mu$  (-37%)

##### (2) AS ジョイントへの締結力の導入結果およびその保持状況

AS ジョイントに導入された組立て直後の締結力と組立後 50 リング進行した時点での締結力の状況を図 - 9.31 と図 - 9.32 に示す。計測した 1 リングあたり 9 断面の継手のどの箇所も上限値を越えたりまたは、下限値を割ることはなく計画どおりのひずみ分布が得られていることがわかる。

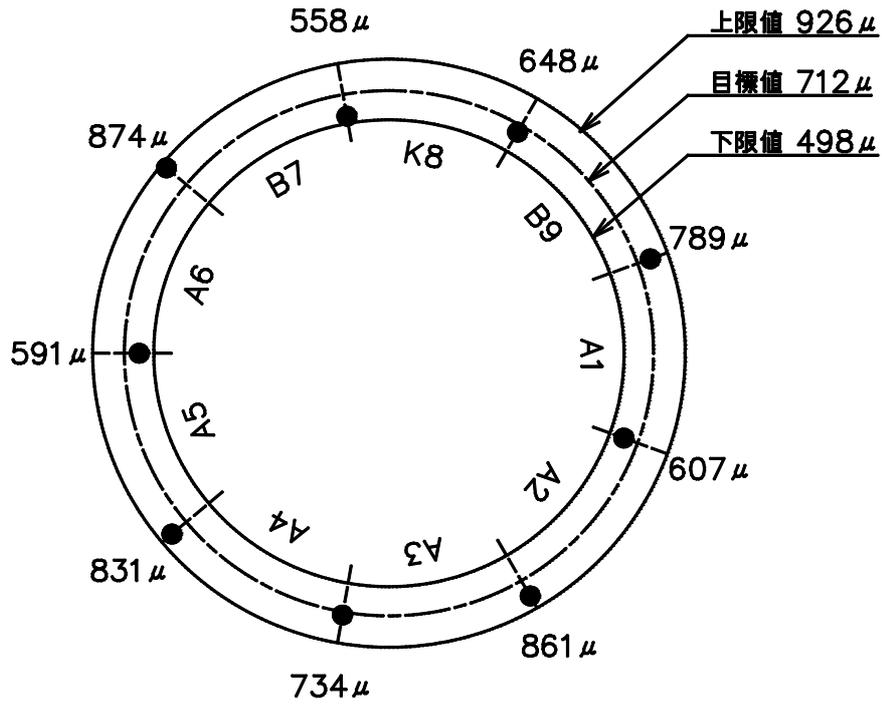


図 - 9.31 AS ジョイントの締結力 (ひずみ) の分布 (組立て直後)

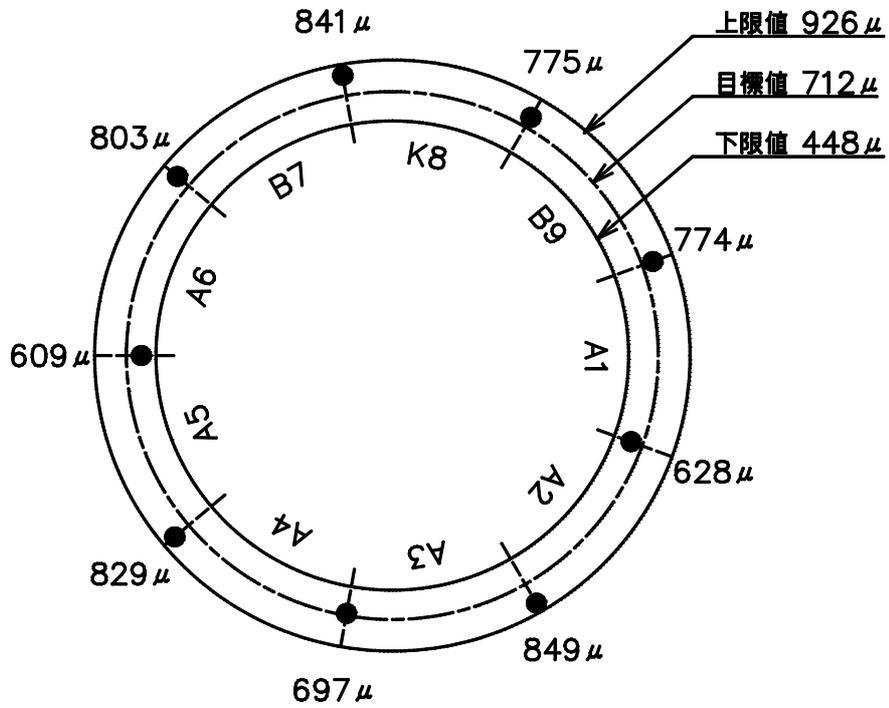


図 - 9.32 AS ジョイントの締結力 (ひずみ) の分布 (組立 50 リング後)

### (3) AS ジョイントの締結力の管理

この工区で組立てられた DRC セグメント 1002 リングについて，AS ジョイントの締結力を管理する方法として，数種類の方法が兼用されることになった．表 - 9.4 は AS ジョイントの締結力の管理方法を一覧表に示したものである．

この中で，AS 金物の止まり位置はセグメントが組立てられた後の金物の位置をセグメントに取り付けた穴から直接ピアノ線で測定し，金物の位置が適正な位置にあり，このことから AS ジョイントに適正な締結力が導入されていることを確認した．

また，シールドジャッキによるセグメントの押し込み時のジャッキの押し込み力を油圧の変動として計測し，適正な締結力が導入された場合の油圧のパターンおよびその圧力と比較して適否を判定した．

表 - 9.4 DRC セグメントのセグメント継手の締結力の管理方法

管理項目	基準値	検査時期，頻度	管理方法
AS 金物の締結力 (ひずみ)	組立直後 ： 926 ~ 498 $\mu$	4 回 / 1002 リング	AS 金物のひずみの測定
	テール通過後 ： 926 ~ 448 $\mu$		
AS 金物の止まり位置	所定位置 $\pm$ 15mm	所期掘進時： 5 回 本掘進時： 5 回	AS 金物の止まり位置のピアノ線による測定
ジャッキの押し込み力(p : kN)	A , B セグメント： 840 p 1560	ジャッキの押し込み時	シールドジャッキの油圧変動の計測
	K セグメント： 1710 p 3170		

### 9.3 まとめ

本章では実際の現場での2件の施工状況や施工結果について述べた。1件は営団地下鉄7号線、麻布台B線工区の一部における24リングの試験施工について、他の1件は首都圏外郭放水路第4工区の流入部を除く全線1002リングについてである。二つの現場における施工は、トンネルの用途や規模、設計条件、施工条件などが異なるために、セグメントの構造や寸法はかなり違うものとなったが、継手構造は両者とも本研究によるASジョイントとアンカージョイントである。これらの継手をもつセグメントが、その組立てにおいて、施工性の向上という目的を十分に満足するものであることを、実際の現場の施工から確認した。これらをまとめると以下ようになる。

- (1) セグメントをエレクターにより組立てできる位置に移動し、セグメントの姿勢を制御した後、シールドジャッキでトンネル軸方向に押し込むだけで締結が完了し、いわゆる「ワンパス組立て」が実現できた。
- (2) セグメントの組立てと同時にセグメント継手およびリング継手に所定の締結力が導入され、セグメントが組立てられた後もそれらは保持された。
- (3) 外郭放水路第4工区では、セグメントの自動組立てを実現できた。
- (4) セグメントの手作業および自動での組立てを可能にした最も大きな要因は、セグメントの高さ、ヨーイング、ピッチング、ローリングの姿勢を組立て可能な位置に制御することであった。
- (5) 自動組立てにおけるセグメントの位置決めの方法は、リング継手間に関しては既設リングのアンカージョイントを、セグメント継手に関しては既設セグメントのASジョイントを基準にして、組立てられるセグメントの両継手の位置合わせを行えばよい。その位置合わせはセグメントの内径側に基準となるべきセンシング面を設け、それを用いて行うことができる。また、位置決め精度は基準に対して $\pm 2\text{mm}$ 程度でよいことが確認された。
- (6) セグメントの平均組立時間は、従来のボルト締結式継手をもつセグメントの組立時間に比べて、営団麻布台B線工区の手作業による組立てでは約67%に、外郭放水路第4工区の自動組立てでは約60%に短縮された。
- (7) セグメントの組立てに要した作業員は、営団麻布台B線工区では3人、外郭放水路第4工区では無人となり、このセグメントを用いれば、セグメントの組立ての省力化ま

たは無人化が可能であることが確認された。

- (8) 本セグメントにより施工されたトンネルの品質は、トンネルの真円度、継手の目開き  
量および止水性能に関して、従来のボルト締結式継手をもつセグメントによるものよ  
り優れていることが確認された。

## 参考文献

- 9.1) 庄司功, 深海仁司, 酒本博, 佐藤宏志, 青木敏行: AS セグメントの急速施工, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, pp. 260~261, 2000
- 9.2) 中島誠三, 渡邊健, 八坂光洋, 佐藤宏志, 辻本和則: AS セグメントの試験施工(その 1) 組立, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, pp. 284~285, 1998
- 9.3) 中島誠三, 渡邊健, 八坂光洋, 今野勉, 青木敏行: AS セグメントの試験施工(その 2) 計測, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, pp. 286~287, 1998
- 9.4) 佐藤宏志, 向野勝彦, 今野勉, 辻本和則, 小泉淳: 施工性向上を目指したダクタイルセグメントの開発とその実用化, 土木学会論文集 No. 721 / VI - 57, p. 188~190, 2002
- 9.5) 国土交通省関東地方整備局江戸川工事事務所, 鹿島・飛島・西松特定建設工事共同企業体編: 外郭放水路第 4 工区トンネル新設工事, pp. 1~2, 2002
- 9.6) 黒川美喜男, 吉田英信, 向野勝彦, 滝本邦彦: 施工の品質と施工速度を改善した新開発のセグメント - 首都圏外郭放水路第 4 工区 -, トンネルと地下, vol. 33, no. 6, p. 40, 2002
- 9.7) 黒川美喜男, 吉田英信, 向野勝彦, 滝本邦彦: 施工の品質と施工速度を改善した新開発のセグメント - 首都圏外郭放水路第 4 工区 -, トンネルと地下, vol. 33, no. 6, pp. 38~39, 2002

## 第 10 章 結論



近年の日本経済の低迷に伴い、公共工事やシールド工事も見直しやコスト削減の検討が厳しく行われてきて、シールド工事における経済性、施工性、安全性などの向上が強く求められるようになった。シールド工事における施工性の向上のための方法はいろいろと考えられるが、中でも最も効果的で実現性の高い項目は、セグメントの組立作業の効率化である。1980年代の後半には、セグメントの自動組立ての試みがなされたが、目覚ましい成果は得られなかった。その原因は、当時のセグメントがボルト締結式の継手構造をもつセグメントであり、そのセグメントを自動組立てすることに技術的な困難さや経済性の問題があったためと考えられる。

本研究は、ダクティルセグメントを対象として、シールド工事におけるセグメントの組立性を大幅に改善し、組立時間を短縮することによって、シールド工事の施工性を改善し、それにより、シールド工事の工期を短縮し、総合的なコスト削減と安全性の向上を図ろうとするものである。本研究ではセグメントの継手構造そのものを新しい継手構造に置き換えることを基本的なコンセプトとして、ボルト締結式継手構造と同等の性能を持ちながら、セグメントの組立性を格段に向上するセグメントの開発を行った。

本研究で開発されたセグメントはASセグメントと呼ぶこととしたが、このセグメントはASジョイントとアンカージョイントとを組立て前に予めセグメントに取り付けておき、セグメントを組立て位置に移動した後、シールドジャッキでセグメントを坑口側に押し込むだけで組立てが完了できることを確認した。現在までに試験施工として3件、実施工として2件の工事に採用されているが、最初の試験施工ではセグメントの組立時間の短縮と、組立てに要する作業員の削減が実現できた。また、トンネル外径11.8mの大断面トンネルの実施工においては、本格掘進の段階でセグメントの全自動組立てが実施され、組立時間は従来の約1/2程度となるなどの成果を得た。セグメントの組立てを無人で行い、しかも高速で行うことは本研究の最終目標であり、それが実現されたことになる。

以下に各章で得られた知見をまとめて述べる。

第1章では、本論文の概要と構成を述べた。シールド工法の経緯を述べながら、近年特に経済性、施工性、安全性の向上が求められており、ダクティルセグメントもその例外ではないこと、本研究の目的がそのための新しいセグメントを開発することにあることを示した。

第2章では、ダクティルセグメントのシールド工事における位置づけについて、その歴史、特徴および使用実績などを紹介した。ここでは、ダクティルセグメントが、シールドトンネルの一部に使われる特殊なセグメントであったことから、技術開発が進まなかったという実状と、リング継ぎボルトが非常に多いために、これがセグメントの組立性を大きく阻害していることを指摘し、セグメントの組立性を改

善するためには，ボルト締結式の継手構造では限界があることを述べた．

第 3 章では，まず，開発すべきセグメントの組立方法を提案した．すなわち，セグメントをエレクターで旋回し，組立位置まで移動させ，セグメントの姿勢を整えた後にシールドジャッキで坑口側に押し込むだけでセグメントの組立が完了する，いわゆる「ワンパス組立て」である．この組立方法では，セグメントがトンネル軸方向にスライドすることから，これを「Axial Slide Segment=AS セグメント」と呼ぶことにした．また，この組立方法を選択する際に，継手金物を「先付け」とするか「後付け」とするかを検討し，「先付け」とする方式がセグメントの組立性を向上するための絶対条件であることを述べた．最後に，継手金物を「先付け」することによる技術課題を提示し，それらの解決が本研究の主要課題となることを述べた．

第 4 章は，セグメント継手の具体的な構造，その要素試験による性能の確認，セグメント継手を先付けした場合の問題点およびその解決策について述べた章である．この章が本研究の最も重要な部分である．まず，セグメント継手として，隣接するセグメント継手部に楔を挿入する方式を提案した．実際は断面が鉄アレー形をした楔をセグメント継手部に予め取り付けおき，その楔がセグメント継手部に設けられた，継手面に対して勾配をもつ孔とスリット（以下これらをテーパ孔と呼ぶ）に挿入される方式である．この継手構造を「AS ジョイント」，継手金物である楔を「AS 金物」と呼ぶことにした．次に，これらの継手構造の基本的な性能を確認するために，AS ジョイントの挿入試験と引張試験とを行い，AS 金物の材質，形状，寸法を具体的に決定するための方法を提示した．さらに，AS 金物を固定して先付けした場合に，継手の締結時の挙動から問題が生じる可能性を詳細に述べ，その解決には AS 金物が動く方式が必要であることを示した．この方式を採用するために，バックアップ材と呼ぶ部材を開発し，それを AS 金物に取り付けた上で AS 金物を可動式にすれば，AS 金物への所定の締結力が確実に導入でき，また，締結力の導入が任意に制御できることを示した．

第 5 章では，まずリング継手の構造を決定し，次にその要素試験から要求される性能が満足されることを確認して，それが実用できることを示した．リング継手はホールインアンカーの原理を応用し，トンネル軸方向にセグメントが移動することによって締結が完了するワンタッチ式の継手構造である．その継手構造を「アンカージョイント」と呼ぶことにした．アンカージョイントについては，締結に必要な圧入力を圧入試験で求めたところ，シールドジャッキの推力の約 5% 程度の圧入力があれば十分に圧入できることを確認した．また，締結後の引張特性と耐力を求め，その結果，アンカージョイントはボルト締結式継手と同等な引張特性があることを確認した．

第 6 章では具体的に設計したこれらの継手の強度と剛性を，実験から確認した結果を述べた．セグメント継手については，平板供試体を用いた継手曲げ試験を行ってその回転ばね定数を求め，従来のボルト締結式継手と同等の回転剛性があることを確認し，さらに，継手曲げ試験を破壊まで行い，AS ジョイントの破壊挙動や耐力を確認したうえで，AS ジョイントが所定の剛性と強度を有することを示した．一方，リング継手については，2 本ずつのアンカージョイントで締結された平板供試体を用いてせん断試験を行い，結果としてアンカージョイントが実用的なせん断ばね定数を持ち，所定の強度を満足することを確認した．

第 7 章は，室内におけるセグメントの組立試験について述べた章である．AS ジョイントおよびアンカージョイントを取り付けた 2 種類の供試体を用いて，コンセプトどおりの組立てが可能であることを確認した．特に，実物大のセグメントを用いた組立試験では，現場におけるセグメントの組立てのとおり，実物大のセグメントをシールドジャッキで押し込む方法の組立てを行い，その際 AS 金物に目標に近い締結力を導入できることが確認でき，このセグメントが実用できることを示した．

第 8 章では，セグメント継手についてその設計法を述べている．継手部の断面力の算定には，「はり - ばねモデルによる計算法」を適用することとして，それに必要となるセグメント継手の回転ばね定数を計算から求める方法を検討した．その方法は「村上・小泉の理論」に準拠するものであるが，従来のボルト締結式の継手では，継手板をボルト孔を有する格子ばりとして扱うのに対して，AS ジョイントではそれをテーパ孔とスリットを有した格子ばりとして扱うものである．

第 9 章は実際の現場における 2 つの施工事例をもとに，その施工状況と施工結果について詳細に述べた章である．一例目は AS セグメントの最初の試験施工として採用された営団地下鉄の単線シールドトンネルであり，外径 6.6m のセグメント 24 リングが施工された．二例目は初めて実施工に採用された首都圏外郭放水路第 4 工区の地下河川トンネルであり，外径 11.8m のセグメント 1002 リングが施工された．セグメントの組立ては前者は手作業で，後者は無人の自動組立て方式で行われた．この二つの施工例から，AS セグメントの施工性について以下のような知見が得られた．

セグメントの組立てはコンセプトどおりにできた．

セグメントの組立時間はボルト締結式の継手をもつセグメントの 1/2 ~ 2/3 程度であり，セグメントの組立時間の大幅な短縮が実現できた．

セグメントの手作業による組立てでは，ボルト締結式の継手をもつセグメントの組立てに比べて 1 名の省力化ができ，また，自動組立て方式では無人の組立てができることが確認された．

AS セグメントは、セグメントが組立てられると同時にセグメント継手に目標に近い締結力が導入され、それが組立て後も長期間にわたって保持されることが確認された。

本研究で得られた成果は以上に述べたようなことであると考えられる。

今後、シールド工法が大断面化、大深度化あるいは長距離化していく中で、ダクタイルセグメントが社会的ニーズに応じて、その特長が生かされ、一般的なセグメントとして普及していくよう、さらなる技術開発を進めていきたいと考えている。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，早稲田大学理工学部小泉淳教授には，新しい継手構造について，常に「先進的であるべき」とのご指導やご助言を賜った結果，今日の成果を得ることができました．また，本論文をまとめるにあたり，構成や内容はもとより，論文の一字一句に至るまでの懇切丁寧なご指導をいただきました．これらのごことに対しまして心より御礼申し上げます．

論文審査を通じては，早稲田大学理工学部依田照彦教授，清宮里教授，赤木寛一教授には，貴重なご意見やご助言をいただきました．ここに深く感謝申し上げます．

本研究は 1992 年から，ダクティルセグメントの技術開発の一つとして，約 10 年間力を注ぎ込んできました．その間基本的なあるべき姿について，大所，高所からご指導をいただいた，早稲田大学名誉教授村上博智先生，帝都高速度交通営団元建設本部長渡邊健博士に心から御礼申し上げます．

東京都立大学名誉教授山本稔先生，株式会社クボタ元技監木川富男博士には，本論文をまとめるにあたり，終始叱咤激励をいただきました．暖かくまた厳しいお言葉がなければ，この論文は完成しなかったのではないかと厚く御礼申し上げる次第です．

本研究は施工現場における実際のセグメントの組立てにより，初めてその成果を確認できるわけではありますが，1997 年の試験施工にあたっては帝都高速度交通営団矢萩秀一建設本部長および前田建設工業株式会社の関係の皆様，2001 年の実施工にあたっては国土交通省江戸川工事事務所白土正美前放水路課長および鹿島建設株式会社の関係の皆様方から，各種のご指導や施工のノウハウに属するようなご教示も賜りました．ここに心から御礼申し上げます．

株式会社クボタ元素形材事業部長松井正毅常務には，この研究や論文をまとめるにあたり，暖かいご指導と多大なご理解をいただきました．このような環境を作っていたいただいたことに対しまして厚く御礼申し上げます．

本研究は企業内の技術開発活動であり，この研究開発に関わった株式会社クボタの上司，先輩，同僚および若い方々は多数にのぼります．挫折や停滞や失敗を乗り越え，これらの皆様方とともに「ボルトレスセグメント」を夢見て頑張ってきました．皆様を代表してこの論文をまとめさせていただいたと思っております．本当にありがとうございました．

2003 年 6 月

佐藤 宏志

## 論文概要

### 施工性の向上を目指した ダクティルセグメントの開発とその実用化の研究

シールド工法は都市のインフラ整備のために不可欠なトンネルの構築工法として、その工事件数は増加し、あらゆる施工条件に適用でき、どのような地盤条件に対しても切羽の安定を確保できるように技術的に目覚ましい進歩を遂げてきた。この進歩はシールドマシンの発展によるところが大きい。一方で、シールド工法のもう一つの要素であるセグメントの発展はあまり顕著ではなかったように思われる。その原因は、急増するシールド工事を効率的に消化するために、セグメントが規格化され、標準化されて、セグメントの概念が固定化されたことによると言われている。

シールド工法で一般的に使われるセグメントには、その使用材料から鉄筋コンクリート製、鋼製および球状黒鉛鋳鉄製の3種類がある。これらのセグメントはセグメントどうしをつなぐセグメント継手を用いてリング状に組立てられ、また、リングどうしをつなぐリング継手によりトンネルが構築される。

バブル崩壊後の日本経済の低迷に伴い、公共工事やシールド工事も見直しやコスト縮減の検討が厳しく行われ、シールド工事における経済性、施工性、安全性などの向上が強く求められるようになった。シールド工事における施工性の向上のための方法はいろいろと考えられるが、その中でも最も効果的で実現性の高い項目は、セグメントの組立作業の効率化である。1980年代の後半には、セグメントの自動組立ての試みがなされたが、目覚ましい成果は得られなかった。その原因は、当時のセグメントがボルト締結式の継手構造をもつセグメントであり、そのセグメントを自動組立てすることに技術的な困難さや経済性の問題があったためと考えられる。

本研究は球状黒鉛鋳鉄製セグメント（以下ダクティルセグメントと呼ぶ）を対象として、シールド工事におけるセグメントの組立性を大幅に改善し、組立時間を短縮することによって、シールド工事の施工性を改善し、それにより、シールド工事の工期を短縮し、総合的なコスト縮減と安全性の向上を図ろうとするものである。本研究ではセグメントの継手構造そのものを新しい継手構造に置き換えることを基本的なコンセプトとして、ボルト締結式の継手構造と同等の性能を持ちながら、セグメントの組立性を格段に向上するセグメントの開発を行っている。

以下に各章の概要を示す。

第1章では本論文の概要と構成を述べている。シールド工法の経緯を述べながら、近年特に経済性、施工性、安全性の向上が求められており、ダクティルセグメントもその例外ではないこと、本研究の目的がそのための新しいセグメント

を開発することにあることを示す。

第 2 章はダクタイトルセグメントのシールド工事における位置づけについて、その歴史、特徴および使用実績などを紹介した章である。ここでは、ダクタイトルセグメントが、シールドトンネルの一部に使われる特殊なセグメントであったことから、技術開発が進まなかったという実状と、リング継ぎボルトが非常に多いために、これがセグメントの組立性を大きく阻害していることを指摘し、セグメントの組立性を改善するためには、ボルト締結式の継手構造では限界があることを述べている。

第 3 章では、まず、開発すべきセグメントの組立方法を提案した。すなわち、セグメントをエレクターで旋回し、組立位置まで移動させ、セグメントの姿勢を整えた後にシールドジャッキで坑口側に押し込むだけでセグメントの組立が完了する、いわゆる「ワンパス組立て」である。この組立方法では、セグメントがトンネル軸方向にスライドすることから、これを「Axial Slide Segment=AS セグメント」と呼ぶことにした。また、この組立方法を選択する際に、継手金物を「先付け」とするか「後付け」とするかを検討し、「先付け」とする方式がセグメントの組立性を向上するための絶対条件であることを述べた。最後に、継手金物を「先付け」とすることによる技術課題を提示し、それらの解決が本研究の主要課題となることを述べている。

第 4 章はセグメント継手の具体的な構造、その要素試験による性能の確認、セグメント継手を先付けした場合の問題点およびその解決策について述べた章である。まず、セグメント継手として、隣接するセグメント継手部に楔を挿入する方式を提案する。実際は断面が鉄アレー形をした楔をセグメント継手部に予め取り付けおき、その楔がセグメント継手部に設けられた、継手面に対して勾配をもつ孔とスリット（以下これらをテーパ孔と呼ぶ）に挿入される方式である。この継手構造を「AS ジョイント」、継手金物である楔を「AS 金物」と呼ぶことにした。次に、これらの継手構造の基本的な性能を確認するために、AS ジョイントの挿入試験と引張試験とを行い、AS 金物の材質、形状、寸法を具体的に決定するための方法を提示した。さらに、AS 金物を固定して先付けした場合に、継手の締結時の挙動から問題が生じる可能性を詳細に検討し、その解決には AS 金物が動く方式が必要であることを示した。この方式を採用するために、バックアップ材と呼ぶ部材を開発し、それを AS 金物に取り付けた上で AS 金物を可動式にすれば、AS 金物への所定の締結力が確実に導入でき、また、締結力の導入が任意に制御できることを示した。

第 5 章では、まずリング継手の構造を決定し、次にその要素試験から要求される性能が満足されることを確認して、それが実用化できることを示した。リング継手はホールインアンカーの原理を応用したワンタッチ式の継手構造であり、トンネル軸方向にセグメントが移動することによって締結が完了するものである。その継手構造を「アンカージョイント」と呼ぶことにした。アンカージョイントについては、締結に必要な圧入力を求め、締結後の引張特性と耐力を求めるなどの確認試験を行い、その性能を確認した。

第 6 章では具体的に設計したこれらの継手の強度と剛性を，実験から確認した結果を述べている．セグメント継手については，平板供試体を用いた継手曲げ試験を行ってその回転ばね定数を求め，従来のボルト締結式の継手と同等の回転剛性があることを確認し，さらに，継手曲げ試験を破壊まで行い，AS ジョイントの破壊挙動や耐力を確認したうえで，AS ジョイントが所定の剛性と強度を有することを示した．一方，リング継手については，2 本ずつのアンカージョイントで締結された平板供試体を用いてせん断試験を行い，結果としてアンカージョイントが実用的なせん断ばね定数を持ち，所定の強度を満足することを確認した．

第 7 章は室内におけるセグメントの組立試験について述べた章である．AS ジョイントおよびアンカージョイントを取り付けた 2 種類の供試体を用いて，コンセプトどおりの組立てが可能であることを確認している．特に，実物大のセグメントを用いた組立試験では，AS 金物に目標に近い締結力を導入できることが確認され，このセグメントが実用できることを示した．

第 8 章ではセグメント継手についてその設計法を述べている．継手部の断面力の算定には，「はり - ばねモデルによる計算法」を適用することとして，それに必要となるセグメント継手の回転ばね定数を計算から求める方法を検討した．その方法は「村上・小泉の理論」に準拠するものであるが，従来のボルト締結式の継手では継手板をボルト孔を有する格子ばりとして扱うのに対して，AS ジョイントではそれをテーパ孔とスリットを有した格子ばりとして扱うものである．

第 9 章は実際の現場における 2 つの施工事例をもとに，その施工状況と施工結果について詳細に述べた章である．一例目は AS セグメントの最初の試験施工として採用された営団地下鉄の単線シールドトンネルであり，外径 6.6m のセグメント 24 リングが施工された．二例目は初めて実施工に採用された首都圏外郭放水路第 4 工区の地下河川トンネルであり，外径 11.8m のセグメント 1002 リングが施工された．セグメントの組立ては，前者は手作業で，後者は無人の自動組立て方式で行われた．この二つの施工例から，AS セグメントの施工性について，

セグメントの組立てはコンセプトどおりにできること，セグメントの組立時間はボルト締結式の継手をもつセグメントの  $2/3 \sim 1/2$  程度であり，組立時間の大幅な短縮が実現できること，セグメントの手作業による組立てでは，ボルト締結式の継手をもつセグメントに比べて 1 名の省力化ができ，また，自動組立て方式では無人の組立てができること，セグメントが組立てられると同時に，AS セグメントのセグメント継手には目標に近い締結力が導入され，それが組立て後も長期間にわたって保持されること，などが確認された．

第 10 章は結論であり，各章で得られた知見をまとめて述べている．

以上のように，本研究はダクティルセグメントを対象に，効率的な組立てが可能となる新しい継手を開発し，その剛性や強度を確認するとともに，設計や施工における十分な実用性を提示したものである．

## SUMMARY

### DEVELOPMENT OF HIGH PERFORMANCE DUCTILE SEGMENT AND ITS APPLICATION TO SHIELD TUNNELING

Shield tunneling method has been increasing and remarkably developed in its technology to apply to all the ground condition and to maintain the stability of the work face in the shield tunneling as the indispensable method of the tunnel construction for urban infrastructure. This development was due to the development of the shield machine. On the other hand, it seemed that the segment which is another important element in the shield tunneling has not notably developed. The cause are follows. Generally saying, the segments were standardized and the concept of the segment was fixed for effectively carrying out many shield tunneling constructions.

The constructions for public and also shield tunneling were reexamined in their effect or cost reduction depend on the going down of Japanese economy after 'the bursting of bubble economy'. In the construction of shield tunneling the better performance of cost, productivity and safety in the construction have been severely required. The most effective and realizable method for the improvement of the productivity in the shield tunneling construction is increasing of efficiency in the erection of the segment. In the later half period of 1980 years the automated erection of the segment were tried but there were not remarkable effects. It seemed that the cause of the failure were the technological difficulty of automated erection of the segment or economical absurdity depend on the segment with bolted joints.

The aim of this research and development is to improve remarkably the productivity in the erection of the segment made by the spheroidal graphite cast iron (following described as ductile segment) in the shield tunneling construction by reduction of erection time. And it is considered that these improvement realize the reduction of the construction period and the total cost and advance of safety. The basic concept in this research is the development of the new segment which have the new joints with equal performance to the bolt joint method and by this segment the remarkable improvement in the erection of the segment is realized.

This paper are composed from ten chapters. General outline of these chapters are as follows.

Chapter 1 describes the aim, the outline and the compositions of this paper. The aim of the paper is shown as the development of the new ductile segment with high performance in the economy, productivity and safety.

Chapter 2 introduces the situations of the ductile segment in the shield tunneling with its history, character and the using examples. The ductile segment has not being developed due to the special segment in the shield tunneling. The ductile segment had the short-coming with many bolts for the longitudinal joint, therefore this segment has low performance of productivity in the erection of the segment. It seemed that the segment with bolted joints has limit to improve the productivity in the shield tunneling construction.

In chapter 3, the idea of the new erection method being developed is proposed. This idea is as follows. First, the segment is rotated with erector and removed to the erection position and second, the posture of the segment is controlled and then, the segment is removed to the direction of the shaft by the shield jack and the erection of the segment is over. This erection method is so called 'one path erection.' This segment is also called as 'Axial Slide Segment = AS segment'. And it is also described that the method of pre-setting the joint hardware is absolute condition to improve the performance of productivity in the erection of the segment. But another side, there is technological problem based on

the method of pre-setting the joint hardware. The solution of the problem is the main theme of this research.

Chapter 4 describes about the structure of the circumferential joint and its performance and also above that there is problem by the method of the circumferential joint built in the segment and its solution. The joint structure of the circumferential joint is the wedge shaped as a section of an iron dumbbell and the wedge is beforehand attached to the circumferential joint of the segment. In the erection of the segment the hole with gradient and slit is inserted to the wedge. This structure of the circumferential joint is called as 'AS joint' and wedge is called as 'AS hardware'. Next, the inserting and tensile test of the AS joint are performed to certify the basic performance of this joint structure. And based on these test, the method to decide the material, figure and dimensions are indicated. Further, in the case of the fixed pre-setting the joint hardware, the problem in the fastening action is described in detail. Following solutions are shown. A kind of hardware is attached to AS hardware in order to introduce and optionally control the prestress for AS hardware and AS hardware is removed but is fixed. This hardware is called as 'back up hardware'.

In chapter 5 the structure of the longitudinal joint is shown and the result that performance is satisfied by the basic structural test is shown. This joint is fastened by the moving of the segment to tunnel axial direction. The joint of the longitudinal joint is called as 'Anchor joint'.

Chapter 6 describes the results of the test for the strength and rigidity of the joints. The circumferential joint is certified that it has the constant of rotating spring equally to that of the bolt joint and the longitudinal joint is also confirmed that it has practical constant of shearing spring and expected strength.

Chapter 7 describes about the test of the erection for the segment in the test room. In the test using the actual segment with AS joints and Anchor joints, AS segment is erected like the concept of the erection and the aimed prestress is introduced to AS hardware.

In chapter 8 the method of the design for the joints is described. Constant of rotating spring which is required for calculation of the cross sectional force in the circumferential joint is calculated with calculating method based on 'Murakami-Koizumi's method'.

Chapter 9 describes about two example of the construction on the site. One was the first test construction and it was adopted to the shield tunnel for single subway in Teito Rapid Transit Authority. Out diameter of the segment is 6600 mm and 24 rings were constructed. Another one was the first actual construction and it was used to the underground river tunnel in the project 4 of the outer metropolitan flood control channel. Out diameter of its segment is 11800 mm and 1002 rings were constructed. In these two constructions followings were certified about AS segment.

The segment was erected according to the concept of the erection.

The time of the erection was approximately  $2/3 \sim 1/2$  compared with the erection time of the segment with bolted joint.

In the manual erection of the segment, the AS segment were erected with one worker less than the erection of the segment with bolted joint or in the automated erection of the segment it were erected without workers of the erection of the segment.

The expected prestress was introduced to the circumferential joint in the AS segment at the same time of the end of the segment erection and the prestress has been held long period.

Chapter 10 is conclusion. The major results of each chapter are described.

As above mentioned, in this study the development of the new joints with high performance in productivity of the segment erection are shown and its rigidity and strength were certified and practicality in design of joints or the erection of the segment were also clarified.

## 研究業績

種類別	題名、発表・発表掲載紙名、発表・発行年月日、連名者
1. 論文 ○論文	施工性向上を目指したダクティルセグメントの開発とその実用化，土木学会論文集，No.721 / - 57，pp . 177 ~ 191、2002 年 12 月， <u>佐藤宏志</u> ，向野勝彦，今野勉，辻本和則，小泉淳
○論文	Development of bolt-less, automated erection ductile cast iron segments, Challenges for the 21 <sup>st</sup> Century, volume 1 pp . 379 ~ 384,1999,May,ITA World Tunnel Congress `99 in Oslo, Atsushi Koizumi, Teruo Matsuda, Mitsuhiro Yasaka, <u>Hiroshi Sato</u> , Toshiyuki Aoki
○論文	トンネル軸方向挿入型ダクティルセグメントの開発，トンネル工学研究論文・報告集第 8 巻，pp . 39 ~ 46，1998 年 11 月，中島誠三，秋山真次，八坂光洋， <u>佐藤宏志</u> ，向野勝彦
2. 報告・講演 ○講演	DRC セグメントの外郭放水路第 4 工区トンネルへの適用～外郭放水路第 4 工区トンネル新設工事（その 1）～，第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集，，pp . 7 ~ 8，2002 年 9 月，白土正美，滝本邦彦，鈴木義信，向野勝彦， <u>佐藤宏志</u>
○講演	AS セグメントの急曲線施工，第 55 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B，pp . 260 ~ 261，2000 年 9 月，庄司功，深海仁司，酒本博， <u>佐藤宏志</u> ，青木敏行
○講演	AS セグメントの試験施工（その 1）組立，第 53 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B，pp . 284 ~ 285，1998 年 10 月，中島誠三，渡邊健，八坂光洋， <u>佐藤宏志</u> ，辻本和則
○講演	AS セグメントの実物大組立試験，第 52 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B，pp . 240 ~ 241，1997 年 9 月，石川幸彦，渡邊健，松井芳彦，辻本和則， <u>佐藤宏志</u>
○講演	AS ジョイントセグメントの施工性試験，第 51 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B，pp . 278 ~ 279，1996 年 9 月，石川幸彦，渡邊健，向野勝彦，奥山恵昭， <u>佐藤宏志</u>
○講演	ダクティ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），第 50 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B，pp . 1236 ~ 1237，1995 年 9 月，石川幸彦，渡邊健， <u>佐藤宏志</u> ，宮武順一，石井悟
3. その 他の 講演 (講演)	コンクリートセグメント用高剛性継手金物の開発，第 55 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B，pp . 262 ~ 263，1999 年 9 月， <u>佐藤宏志</u> ，渡辺仁，野村智之，横田三則，今井京平

## 研究業績

種類別	題名、発表・発表掲載紙名、発表・発行年月日、連名者
(講演)	ハイブリッド型ダクティルセグメントの開発，第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B， pp . 142 ~ 143， 1999 年 9 月， <u>佐藤宏志</u> ， 今野勉， 渡辺仁， 林勝幸， 渡邊崇志
(講演)	RC 平板型セグメント用 NF インサート式継手の継手性能試験，第 52 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B， pp . 286 ~ 287， 1997 年 9 月， 石川幸彦， 中村博征， <u>佐藤宏志</u> ， 鬼橋保祐
(講演)	軸力作用下での二次覆工省略型ダクティルセグメントの実物大継手曲げ試験報告，第 52 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B， pp . 236 ~ 237， 1997 年 9 月， <u>佐藤宏志</u> ， 渡辺崇志， 望月美知秋， 高屋敷光男， 中川雅由， 斎藤宗
(講演)	ダクティルセグメントの新型注入孔栓の実試用報告，第 50 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B， pp . 1240 ~ 1241， 1995 年 9 月， 中村哲治， <u>佐藤宏志</u> ， 古田勝， 酒井孝一
(講演)	球状黒鉛鋳鉄セグメントの注入孔栓の対振動特性について，第 49 回土木学会年次学術講演会講演概要集， B， pp . 1222 ~ 1223， 1994 年 9 月， 中島信， 藤木育雄， <u>佐藤宏志</u> ， 清水豊， 荻野義道
4 . 特許 ○特許	名称：合成セグメント 発明者： <u>佐藤宏志</u> 、向野勝彦、原廣、滝本邦彦、古市耕輔 ほか 出願日：2000 . 10 . 13 出願番号：特願 2000 - 313806
○特許	名称：トンネル用セグメント 発明者：宇賀田健、和田勝治、 <u>佐藤宏志</u> 、相場勉、石井悟 出願日：1993 . 4 . 13 出願番号：特願平 5 - 85013