

外合23-3

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

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

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

申 請 者

佐 藤 宏 志

Hiroshi Sato

2003 年 6 月

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思われる。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てきている。

本研究は球状黒鉛鋳鉄製セグメント（以下ダクタイトセグメントと呼ぶ）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。具体的には、セグメントの継手構造そのものを新しい構造に置き換えることを基本的なコンセプトとして、従来からのボルト締結式の継手構造と同等の性能を持ちながら、組立性を格段に向上させることのできるセグメントについて、その開発の経緯と結果とが提示されている。

本論文は10章から構成されている。以下にその要点を各章ごとに示す。

第1章は本論文の目的、概要、および構成が示されている。シールド工法のこれまでの発展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、ダクタイト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記述している。

第2章はダクタイト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、特長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述べ、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指摘している。

第3章では、まず、開発すべきセグメントの組立方法が詳細に検討されている。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。次に、この組立方法を採用する際に、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が述べ

べられている。最後に、継手金物を「先付け」とすることによる技術的課題が提示され、それらの解決が本研究の主要課題となることが述べられている。

第4章はセグメント継手（以下 AS ジョイントと呼ぶ）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ている章である。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が提案されている。楔（以下 AS 金物と呼ぶ）はその断面が鉄アレー形をしたもので、セグメント継手部に予め取り付けられ、それ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に挿入される方式である。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、その結果から、AS 金物の材質、形状、寸法を具体的に決定するための方法が提示されている。さらに、AS 金物を固定にして先付けした場合には、継手の締結時の挙動から問題が生じる可能性があることを指摘し、これに詳細な検討を加えている。結果として、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ている。

第5章はリング継手（以下 アンカージョイントと呼ぶ）の具体的な構造、その要素試験による性能の確認などについて述べている章である。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。ここでは、リング継手の要素試験や圧入試験、引張試験などを行って、締結に必要な圧入力や締結後の引張特性および耐力など、リング継手に要求される性能が十分に得られること、この継手が十分に実用できることなどを確認している。

第6章はセグメント継手とリング継手とを具体的に設計し、その強度と剛性とを実験から確認した章である。セグメント継手である AS ジョイントについては、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するとともに、その破壊挙動や耐力を確認し、この継手が所定の剛性と強度とを有することを実証している。一方、リング継手であるアンカージョイントについては、平板供試体を用いた継手せん断試験を行い、結果として、このリング継手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実証している。

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。ここでは、平板供試体に AS ジョイントとアンカージョイントとを取り付け、実際の状況に近い状態で組立試験を実施し、結果として、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、目標に近い締結力を AS 金物に導入でき、このセグメントが十分に実用できること、効率の良い組立てが可能であることを確認している。

第 8 章にはセグメント継手である AS ジョイントの設計法が述べられている。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」を適用することを前提として、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が検討されている。結果として提案された方法は「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ー孔とスリットを有した格子ばりとして扱う点に独自の工夫がみられる。

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とについて詳細に述べた章である。一例目は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方式で行われた。この二つの施工例から、本研究で新たに開発されたこのセグメントは、想定したコンセプトどおりの組立てができること、そ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、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、などを確認している。

第 10 章は結論であり、各章で得られた知見がまとめて述べられている。

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構造を開発し、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。本研究によって開発されたこのセグメントは、その組立てにおける省力化や自動化を考える上で、今後とくに重要となる大きな要素を内包しており、シールド工法の発展、ひいてはトンネル工学の発展に寄与するところ大である。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる。

2003年5月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	小泉 淳
	副査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	依田照彦
		早稲田大学教授	工学博士（東京工業大学）	清宮 理
		早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	赤木寛一