

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

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 3 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。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示す。

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ておき、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、継手の締結時の拳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。