

博士論文概要

論文題目

シールド工事用二次覆工一体型セグメントの
開発とその実用化に関する研究

Research on Development and Utilization
of Segments Combined with Secondary
Lining for Shield-driven Tunneling

申請者

松浦	將行
Masayuki	MATSUURA

2012年12月

下水道は、都民生活や都市機能を地下で支える重要な都市施設であり、その機能を低下させることは許されない。そのため、東京都では老朽管渠を造り替える再構築事業を主要な事業として推進している。再構築事業を円滑に進めるうえで、下水道管渠の築造に多く採用されるシールドトンネルの建設コスト縮減や工期短縮への取組みが重要な課題となっている。

近年、シールド工法の技術は著しく向上した。施工精度の向上は大規模な蛇行修正を必要としなくなり、また、水膨張性のシールド材が日本において開発された結果として、漏水はほとんど見られないほどに止水性が向上した。一方、シールドトンネルの主構造部材であるセグメントにも改良が重ねられ、とくにトンネルの内面が平滑になるような継手が開発された結果、下水の流れにも支障がなくなり所定の流量も確保できるようになった。これらのことから、下水道シールドにおける二次覆工は、防食機能の確保が主目的に施工されるものとして整理できる。

本研究は、二次覆工のもつ機能、とくに防食機能をセグメントにどのように代替させるか、セグメントの構造特性をどのように評価するか、また、各種の地盤条件に適応した構造解析手法はどのようなものがよいか、セグメントに作用する主荷重や施工時荷重である推力に対する耐荷性能をどのようにして確認するかなど、設計上や施工上の多くの課題に対して、「二次覆工一体型セグメント」を開発し、その実物大の載荷試験などを実施して、設計法などにも検討を加えたものである。

本論文は 6 章から構成されており、その概要は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的および論文の構成について述べている。また、本論文で使用している用語の定義を示している。

第 2 章は、東京における下水道の変遷と普及率が 100% を達成した後の新たな課題である再構築事業への取組みについて述べ、シールド工法の建設コスト縮減や工期短縮の取組みとして、二次覆工一体型セグメント導入の考え方や目的を整理した章である。東京の下水道は、明治 17 年に我が国初の近代下水道が神田に建設されたのが始まりで、それから 100 年余の歳月をかけて、平成 6 年度末に東京都区部の下水道普及率 100% がほぼ達成された。長い年月を費やして整備してきた下水道管渠は、現在では、地盤沈下の進行や急激なモータリゼーションなどの外的な影響を受け、物理的な劣化や機能の低下をきたしてきている。このような状況を踏まえ、東京都では、古くなった下水道管渠を新しく造り替えるとともに、既存施設の能力不足の解消を図る再構築事業を計画的に行っているところである。再構築事業で必要とされる幹線や主要枝線の建設は、土地の高度利用化、地下埋設物の輻輳化などから、周辺地盤や環境などへの影響が少ないシールド工法で施工される傾向にある。下水道用のシールドトンネルでは、一般的に現場打ちコンクリートなどによる二次覆工を巻き立てる場合が多い。二次覆工施工の目的のうち、「蛇行修正」、「内面平滑化」に関しては、施工精度の向上および内面が平滑な

セグメント（以降，内面平滑型セグメントと呼ぶ）の開発によって，一次覆工のみで下水道の使用目的に対し満足できる状況が得られるようになった．また，止水効果が高いシール材が開発されたことにより，二次覆工の省略が可能となり，一次覆工のみで実用上の問題は生じない．したがって，下水道用シールドトンネルにおける二次覆工の主目的は，防食機能の確保にしばられた．このような経緯から，二次覆工一体型セグメントの開発が進められることになった．第2章では，それまでのシールド技術の開発や施工実績，経済的合理性などを踏まえ，二次覆工一体型セグメントの実用化を進めるための考え方や目的を明確にした．

第3章は，二次覆工一体型セグメントの開発にあたり，まず，二次覆工を代替する機能としての防食層の確保について述べ，つぎに，二次覆工一体型セグメントの構造解析手法を確立するための試設計を行い，その施工性および耐久性の検討を行った章である．二次覆工一体型セグメントの基本構造については，構造体にトンネルの力学的挙動に実績のある「下水道工事用標準セグメント」を用いることを基本として，この標準セグメントの内面に防食層をあらかじめ一体的に成形させることとした．経年50年を想定したコンクリートの中酸化深さの推定値および建設後50年以上を経過した合流管渠を対象に実施した中酸化深さの実態調査結果，さらに施工上からの必要厚さを考慮し，防食層の厚さとして50mmを確保することとした．下水道用シールドに用いるセグメントは，従来，主に「慣用計算法」により設計されてきたが，二次覆工一体型セグメントは，地盤条件に応じて，セグメントの構造特性，すなわち，セグメント継手の曲げ剛性を考慮して設計することとした．なお，セグメント継手の曲げ剛性は無次元化した回転ばね定数で評価する．良質地盤では，セグメントの継手曲げ剛性によらないで「慣用計算法」が適用できるものとし，良質地盤以外の地盤条件では，セグメント継手の曲げ剛性が小さい場合には，「はり-ばねモデル計算法」を用いる必要があることを明らかにした．一方，二次覆工一体型セグメントの施工性については，セグメントの損傷を防止する対策の一つとして，セグメント継手がトンネル縦断方向に連続する組立て方，いわゆる「いも継ぎ」とする場合の検討を行った．セグメント分割数の決定にあたっては，構造計算のみならず，切羽でのセグメントの旋回など，施工面についても具体的な検討を行った．また，コンクリート系セグメントでは，耐久性の観点から曲げひび割れの照査を行う必要があるが，許容ひび割れ幅は，「コンクリート標準示方書」を参考に，下水道用であることを考慮して，とくに厳しい腐食性環境である0.0035c（cはかぶり）とした．

第4章は，硫化水素などに対する防食層コンクリートの耐久性や，セグメント単体の耐荷性能，施工時のジャッキ推力に対する耐荷性能，また，内面平滑型継手の開発と性能確認実験などを行った章である．防食層の耐久性の検証にあたっては，平均硫化水素ガス濃度が100ppmという厳しい条件下にある水再生センター濃縮槽内で，防食層に用いるセグメント用配合と現場打ち二次覆工用コンクリー

トの 2 種類の供試体を作成し，暴露試験による腐食度の相違を確認した．暴露試験結果から，防食層コンクリートの腐食量は二次覆工コンクリートの約半分程度であり，長期の腐食量を推定する式から，50 年の耐久性の確保に必要な厚さは約 50mm であることが確認できた．セグメントの耐荷性能については，単体曲げ載荷試験を実施し，防食層によるひび割れ発生の影響を調査し確認した．一体成形された防食層のコンクリートは，かぶり部の引張抵抗力がある程度期待できるため，ひび割れおよび変位の抑制に寄与でき，標準セグメントより耐荷性能の面で有利であることを確認した．また，二次覆工一体型セグメントは，無筋コンクリートの防食層が掘進施工時のシールド推力に対して弱点となることが考えられたため，実施工時の目違いなどを想定した条件で推力試験を実施し，防食層部の安全性を確認した．なお，推力試験に関しては，3 次元 FEM 解析により，ひび割れ発生個所やひび割れ発生荷重の妥当性を確認した．内面平滑型継手については，継手曲げ試験の結果，開発された継手を用いたセグメントは，「下水道用標準セグメント」と同様な設計法を用いることができ，その適用範囲も同様と考えてよいことが確認された．また，リング継手の引張強度およびせん断強度は，適切な補強鉄筋を配置することで十分に確保でき，その照査は継手金物の縮径部について行えばよいことを確認した．

第 5 章は，厳しい財政状況下において下水道再構築事業を進めるにあたり，建設費の縮減，環境への影響の低減，維持管理の効率化という視点から開発を進めた，「4 分割 3 ヒンジ構造のインバート溝付き二次覆工一体型セグメント」について述べた章である．ここでは，このセグメントに適した設計法について提案を行い，その実物大の供試体を用いた載荷試験を実施して，提案した設計法の妥当性を検証した．すなわち，トンネルの構造的な安定性とコスト縮減の立場から，セグメントリングの構造系を静的に安定となる「3 ヒンジリング構造」と評価することとし，シールドテール内でリングを閉合する際の施工上の問題に対処するために，セグメントリング自体は 4 分割とし，継手の 1 か所を剛結合にする構造にした．このセグメントを用いたリング載荷試験の結果，セグメントリングは「3 ヒンジ構造」として挙動することが確認できた．提案した設計法は，ヒンジ構造とみなした継手は完全なヒンジとして評価して，その回転ばね定数はゼロとし，剛結合とした継手は本体と同等の剛性を持つものと評価して，回転ばね定数は無限大とし，「はり-ばねモデルによる計算法」を適用するものである．

第 6 章は，結論を述べた章であり，本研究から得られた知見をまとめるとともに，今後の実施工の段階で確認または注意すべき事項，施工実績の増加にともなって，さらに改良が必要となる事項などについても言及している．

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 松浦 將行 印

(2012年12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文 論文	二次覆工一体型セグメントの実用化に関する研究，土木学会論文集，2007年11月，pp.482-493， <u>松浦將行</u> ，高久節夫，横田正和，小泉淳
○論文	大深度下水道シールドトンネルの地中接合に関する基礎的研究，第17回土木学会トンネル工学論文集，2007年11月，pp.43-54， <u>松浦將行</u> ，小林修，松田恭明，小阪陽克
○論文	Compact shield tunneling method, PROCEEDINGS OF THE 31ST ITA-AITES WORLD TUNNEL CONGRESS, 7-12 MAY 2005, ISTANBUL, TURKEY, Underground Space Use, Analysis of the Past and Lessons for the Future, pp.779-784, <u>M.Matsuura</u> , S.Takaku, Y.Nagashima and Y.Moriya
○論文 論文	Compact shield Method to Restore Sewer Line, TUNNELLING ACTIVITIES IN JAPAN 2004, pp.21, <u>Masayuki MATSUURA</u>
○論文	大深度急曲線シールド工事における施工時荷重の実態と分析，下水道協会誌1月号，2004年1月，pp.127-139，中村益美，足立一郎，大迫健一， <u>松浦將行</u>
○論文	内水圧を受ける4分割3ヒンジセグメントの挙動に関する実験的研究について，第13回土木学会トンネル工学研究論文・報告集，2003年11月，pp.75-82， <u>松浦將行</u> ，高久節夫，桐谷祥治，田中秀樹
○論文	二次覆工一体型4分割3ヒンジセグメントの開発と設計手法の提案，土木学会論文集，2003年9月，pp.155-172，前田正博，串山宏太郎， <u>松浦將行</u>
○論文	東京都におけるコンパクトシールド工法の役割，下水道協会誌8月号，2003年8月，pp.12-15， <u>松浦將行</u>
○論文 論文	二次覆工一体型セグメントとその標準化，第12回土木学会トンネル工学研究論文・報告集，2002年11月，pp.507-512， <u>松浦將行</u> ，高久節夫，齊藤正幸
論文	下水道管渠の老朽化分析と更生工法の開発・実用化に関する研究，下水道協会誌4月号，2001年4月，pp.110-120，大迫健一，高橋良文，鈴木宏， <u>松浦將行</u> ，伊東三夫
論文	流下型貯留方式による再構築事業の展開，下水道協会誌5月号，1998年5月，pp.128-142， <u>松浦將行</u>
○総説 総説	東京都の下水汚泥処理，処分におけるコンパクトシールド工法の活用について，第21回土木学会トンネル工学報告集，2011年11月，pp.339-345， <u>松浦將行</u> ，巖岩滋之，新谷康之，奥田千郎，高久節夫
総説	東京区部における計画的，効率的な下水道管渠の再構築，土木学会誌，2004年8月，pp.27-29， <u>松浦將行</u>
総説	下水道施設耐震計算例—管路施設編—の発刊について，下水道協会誌5月号，2001年5月，pp.65-69， <u>松浦將行</u>
講演 講演	貼付け型コーキング材の開発と適用実績，第59回土木学会年次学術講演会第VI部門，2004年9月，pp.83-84，蛭子延彦， <u>松浦將行</u> ，高久節夫，伊藤義一，田中秀樹
	二次覆工一体型セグメントのリング継手の開発とその構造，第58回土木学会年次学術講演会第III部門，2003年9月，pp.907-908，横田正和， <u>松浦將行</u> ，高久節夫，蘭康則，齊藤正幸

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	大深度におけるシールドトンネル工事の施工時荷重の現場計測結果について，第58回土木学会年次学術講演会第VI部門，2003年9月，pp.153-154，栗木実，中村益美， <u>松浦將行</u> ，佐藤裕明
講演	ホークカットアンカーを利用したリング継手の現場計測結果について，第58回土木学会年次学術講演会第VI部門，2003年9月，pp.171-172，宇田川徳彦， <u>松浦將行</u> ，守屋洋一，早川淳一，田中秀樹
講演	4分割3ヒンジ構造セグメントのリング載荷試験に関する一考察，第57回土木学会年次学術講演会第VI部門，2002年9月，pp.77-78，寺田武彦，前田正博， <u>松浦將行</u> ，武田邦夫，宇田川徳彦
講演	4分割3ヒンジ構造セグメントの現場計測計画について，第57回土木学会年次学術講演会第VI部門，2002年9月，pp.83-84，田中秀樹， <u>松浦將行</u> ，高久節夫，増澤伸司，守屋洋一
講演	シールド工事から発生する建設泥土改良システムの開発，第57回土木学会年次学術講演会第VI部門，2002年9月，pp.133-134，落合正水，伊東憲，細川勝己， <u>松浦將行</u> ，入出巧
著書	STANDARD SPECIFICATIONS FOR TUNNELING-2006:Shield Tunnels, Japan Society of Civil Engineers, 2007.8, トンネル工学委員会 トンネル工学示方書改訂小委員会 シールド工法英訳部会 部会長 <u>松浦將行</u>
著書	下水道シールドトンネルの歴史とその評価に関する調査研究，下水道新技術推進機構，2007年3月， <u>松浦將行</u> ，目黒享，松本清治郎，岡本健
著書	大深度下水道シールドトンネルの地中接続に関する調査研究，下水道新技術推進機構，2007年3月， <u>松浦將行</u> ，目黒享，小林修，松田恭明
著書	[2006年制定] トンネル標準示方書 [シールド工法]・同解説，土木学会，2006年7月改訂，トンネル工学委員会 トンネル標準示方書改訂小委員会 委員 <u>松浦將行</u>
著書	[2006年制定] トンネル標準示方書 [シールド工法]・同解説，土木学会，2006年7月改訂，トンネル工学委員会 トンネル標準示方書改訂小委員会 シールドトンネル小委員会 副委員長 <u>松浦將行</u>
著書	[2006年制定] トンネル標準示方書 [シールド工法]・同解説，土木学会，2006年7月改訂，施工分科会 主査 <u>松浦將行</u>
著書	下水道処理施設ネットワーク計画策定マニュアル，下水道新技術推進機構，2006年3月，研究第二部長 <u>松浦將行</u>
著書	下水道処理施設ネットワーク施工技術マニュアル，下水道新技術推進機構，2006年3月，研究第二部長 <u>松浦將行</u>
著書	下水道処理施設ネットワーク維持管理マニュアル，下水道新技術推進機構，2006年3月，研究第二部長 <u>松浦將行</u>
著書	（新）再構築クイックプラン～老朽施設の速やかな改善～，東京都下水道局，2004年9月，計画調整部計画課長 <u>松浦將行</u>
著書	東京都区部下水道事業 経営計画2004，東京都下水道局，2004年2月，計画調整部計画課長 <u>松浦將行</u>
著書	下水道仮設マニュアル，東京都下水道局建設部，2002年9月，設計調整課長 <u>松浦將行</u>
著書	二次覆工一体型セグメント設計・施工指針（案），東京都下水道局建設部，2002年5月，二次覆工一体型セグメント検討委員会 委員 <u>松浦將行</u>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
著書	大深度地下における地盤凍結工法による管渠地中接続工事の出水事故調査報告書，東京都下水道局，2002年3月，建設部設計調整課長 <u>松浦將行</u>
著書	シールド工用標準セグメントー下水道シールド工用セグメントー，土木学会，2001年7月改正，編集WG WGリーダー <u>松浦將行</u>
著書	シールド工用標準セグメントー下水道シールド工用セグメントー，日本下水道協会，2001年7月改正，下水道用資器材規格調査専門委員会 副委員長 <u>松浦將行</u>
著書	下水道施設耐震計算例ー管路施設編ー，日本下水道協会，2001年3月，下水道施設耐震計算例編集委員会 座長 <u>松浦將行</u>
その他	街を進化させる 街の高付加価値化を図る再構築ー再構築事業の着実な実施に向けてー，月刊下水道増刊号，2003年7月，pp.62-65， <u>松浦將行</u>
その他	転用を容易にしたコンパクトシールド工法ー後方設備内包型3分割シールド機の採用ー，建設の機械化5月号，2003年5月，pp.19-24， <u>松浦將行</u> ，高久節夫
その他	大深度の施工時荷重を考慮したセグメント設計 東京都下水道新赤坂幹線，トンネルと地下4月号，2003年4月，pp.305-311，中村益美， <u>松浦將行</u> ，西小野清治
その他	下水道に二次覆工ー一体型セグメントを導入，トンネルと地下4月号，2003年4月，pp.313-321，串山宏太郎， <u>松浦將行</u> ，服部弘司，小泉淳
その他	斬新的な二次覆工ー一体型セグメントの導入＝コンパクトシールド工法にて実現＝，建設機械2月号，2003年2月，pp.21-27， <u>松浦將行</u> ，高久節夫
その他	大深度シールドトンネルの施工時荷重とその対策，トンネルと地下1月号，2003年1月，pp.35-41，中村益美， <u>松浦將行</u>
その他	再構築事業に貢献するコンパクトシールド工法，月刊下水道11月号，2002年11月，pp.22-25， <u>松浦將行</u>
その他	シールド泥土を産廃から改良土に変身，トンネルと地下8月号，2002年8月，pp.657-665， <u>松浦將行</u> ，入出巧
その他	省面積立坑から3本のシールドを発進 東京都下水道千代田区外神田再構築工事，トンネルと地下5月号，2002年5月，pp.389-398，前田正博， <u>松浦將行</u> ，藤崎満，安本匡剛
その他	切削補強リング付きシールドで地中側面接合 東京都下水道港区赤坂，六本木再構築工事，トンネルと地下2月号，2002年2月，pp.125-131， <u>松浦將行</u> ，小川勝
その他	緊急的・重点的に取組む行動計画 都民生活の安全性，快適性を確保する再構築クイックプラン，月刊下水道11月号，2001年11月，pp.35-38， <u>松浦將行</u>
その他	新たな可能性探るトンネル技術 下水道普及後のトンネル工法のニーズ 浸水対策と再構築における活躍について，月刊下水道11月号，2000年11月，pp.2-5， <u>松浦將行</u>
その他	管内からシールドを斜め発進 都下水道和泉町幹線工事，トンネルと地下3月号，1997年3月，pp.241-250， <u>松浦將行</u>