

ラッピング工法の開発

畑山栄一* 三澤孝史*
 福居雅也** 竹本光慶***

1. はじめに

シールドトンネルは、地下構造物の輻輳化によりますます大深度化する傾向にあり、高水圧に対応する止水技術が求められている。また、海底部や湾岸部では、塩害や腐食性環境下の地盤におけるセグメントの劣化を抑制する技術が求められている。これらの課題を解決することを目的に、シールドトンネル施工時にセグメント外周を止水性と耐久性に優れた防水シート（以下、シート）で覆うラッピング工法（外周被覆工法）を開発した。トンネルと地盤をシートで遮断することで、大深度の高水圧下における止水性の向上とトンネルの長寿命化を図ることができる。

また、ラッピング工法の付加技術として、その止水性を活かして施工性、経済性に優れたラッピング工法用可とうセグメントの開発も併せて行った。

2. ラッピング工法の概要

2.1 施工法

ラッピング工法の施工概念を図-1に示す。シールド

ト機テール部に装備したラッピング装置により、掘進中にセグメント1リング分のシートを巻立てて溶着する。掘進およびシートの巻立・溶着を終了すると、セグメントの組立を行う。以後、『掘進・シート巻立の同時施工』と『セグメント組立』を順次行い、トンネル全体をシートで覆う。施工サイクルタイムは従来のシールド工法と同じである。セグメントを覆ったシート外側への裏込注入は掘進中にシールド機から行う。

なお、セグメントリング間の約30m毎のシートに罫状の隔壁であるセーフティバリアを設けることで、万一、シートが破損しても区間を限定することで漏水箇所の発見と補修を容易に行うことができる。

2.2 特長

ラッピング工法の特長を以下に示す。

- i. トンネル全体をシートで覆うため、長期間にわたって地下水の漏水を防止できる
- ii. 耐久性に優れたシートでセグメントを土と水から遮断するため、トンネルの長寿命化が図れる
- iii. 塩害などの厳しい条件下でも二次覆工の省略が可能となり、大幅な工期短縮が図れる
- iv. 二次覆工省略の場合の工事コストダウンはもと

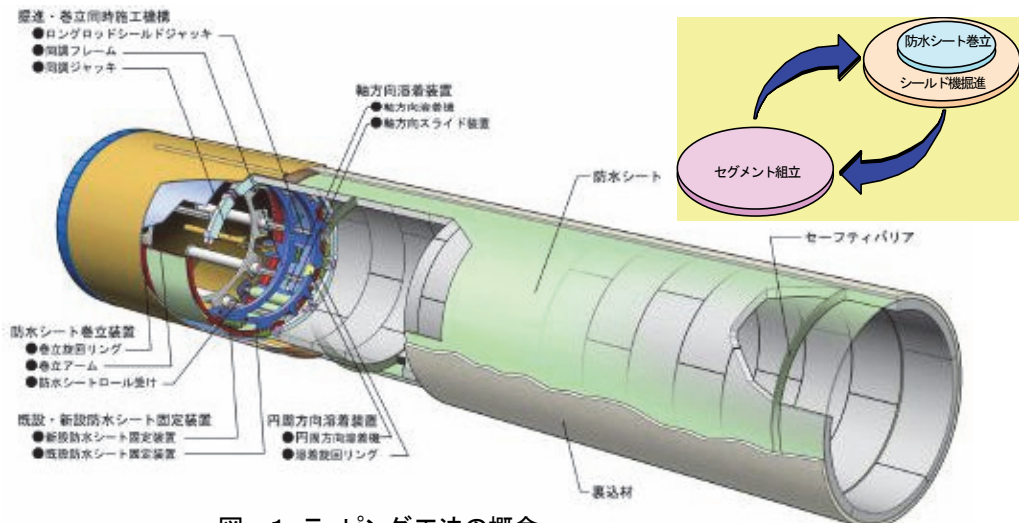


図-1 ラッピング工法の概念

*技術研究所 **技術本部技術開発部 ***東京支社土木部

より、供用中の排水処理など、ランニングコストが削減できる

- v. 止水性能が高いため地下水の変動や地盤沈下など、環境に対しての影響を防止できる

2.3 シート

シートは厚さ2mm以上のポリエチレンを使用する。材料の選定にあたっては、施工性、溶着性、経済性、耐久性を考慮した。なお、耐水圧性については、溶着部の接合強度によることから、シート接合部の耐水圧試験を実施し、2.0MPa以上の耐水圧性があることを確認した。

施工時におけるシートの巻立形状を図-2に示す。

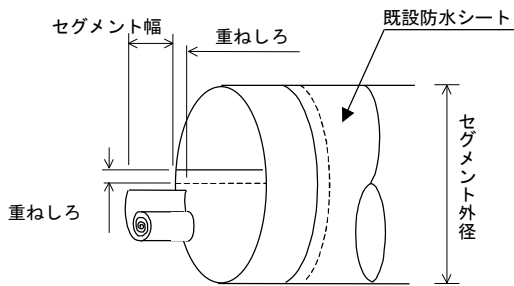


図-2 シートの巻立形状

2.4 ラッピング装置

ラッピング装置の構成を以下に示す(図-1参照)。掘進中にシートの巻立位置を既設シートに対して定位置に保つように掘進・巻立同時施工機構を組み込んだ。

- ①掘進・巻立同時施工機構
- ②防水シート巻立装置
- ③新設・既設防水シート固定装置
- ④円周方向溶着装置
- ⑤軸方向溶着装置
- ⑥防水シート破損防止機構

2.5 施工手順

施工手順を以下に述べる(図-3参照)。円筒形のアンビルの内径とセグメント外径を同じにすることで、セグメント外径と同じ径のシートの巻立が可能になる。

- ①掘進と同時に、防水シートロール受けにセットした新設シートの端部を巻立アームに把持し、巻立旋回リングを回転させてシートを巻き立てる
- ②新設・既設防水シート固定装置でシートをアンビル内面に押し付けて固定する(写真-1参照)
- ③既設シートと新設シートの重ね合わせ部に円周方向溶着機をセットし、溶着旋回リングを旋回さ

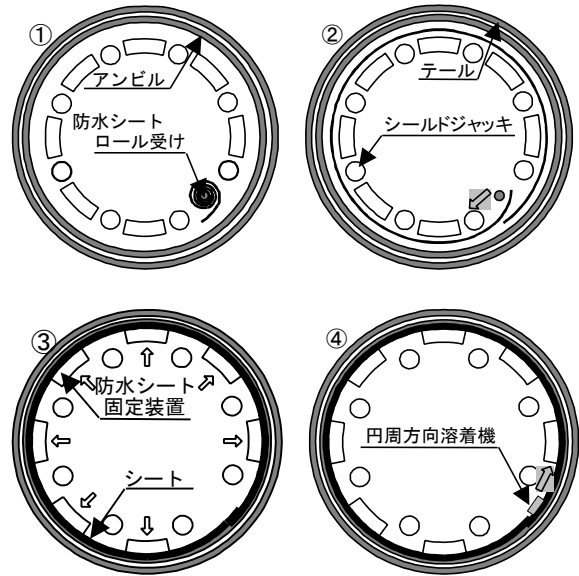


図-3 シート巻立手順



写真-1 新設防水シート固定装置

せて円周方向の溶着を行う

- ④新設シートの重ね合わせ部に軸方向溶着機をセットし、軸方向スライド装置で走行させ、軸方向の溶着を行う
- ⑤掘進およびシートの巻立と溶着が完了した後、シートの内側にセグメントを組み立てる

3. 総合実験

3.1 実験目的

外径 3478mm のシールド実験機を用いて屋外で総合実験を行い、施工性、シートの巻立精度、接合部の溶着強度(以下、接合部強さ)を調べる。

3.2 実験装置および実験方法

実験装置の仕様を表-1に示す。実験では、実施工と同じ手順で『シールド掘進・シート巻立』と『セグメント組立』作業を交互に行った(写真-2参照、セグメント12リング組立、R:50mの曲線部含む)。

なお、シートは表-2に示す厚さ2mmのポリエチレンシートを使用した。

表-1 実験装置の仕様

シールド機	外径	φ3478mm
	シールドジャッキ	ロングロッドシールドジャッキ 100kN×1450mm×10本 スプレッド(フリーロック装置)
	テールシール	ワイヤーブラシ2段
	防水シート高速被覆システム	同調フレーム/ガイドロッド 防水シート巻立装置 既設防水シート固定装置 新設防水シート固定装置 円周方向溶着装置/軸方向溶着装置
	シートプロテクタ	超高分子量ポリエチレン
セグメント	種類	スチール製/5分割/軸挿入式
防水シート	外径/内径/幅	φ3350mm/φ3050mm/900mm
	材質/厚さ	ポリエチレン/2.0mm

表-2 シートの物性

試験項目	単位	試験値	試験方法
比重	—	0.903	JIS K 6773
硬さ	—	97	JIS K 6773
厚さ	mm	2.09	JIS K 6008
引張り強さ	20℃	N/mm ²	JIS K 6773
	10℃		
伸び	20℃	%	
	10℃		
引裂強さ	N/mm	95	JIS K 6252 準拠
耐薬品性 質量変化率	アルカリ	±0.0	JIS K 6773 準拠
	酸	±0.0	
	食塩水	±0.0	



写真-2 総合実験状況

3.3 実験結果

a. シートの巻立

総合実験の前にシート巻立長と溶着の出来形を調べる要素実験を行った。実験結果から、シートをアンビル内周長よりも短く巻立てることで溶着に不具合(シートのしわやズレ)が生じないことがわかった。

この結果をもとに、シート巻立とセグメント組立の総合実験を行った。シート巻立結果を図-4に示す。シート巻立長はすべてアンビル内周長(10536mm)より約0.6%短くなり、溶着不良の発生も見られなかった。このことから、実施工においても溶着不良を発生させることなくシートの巻立が可能であることを確認した。

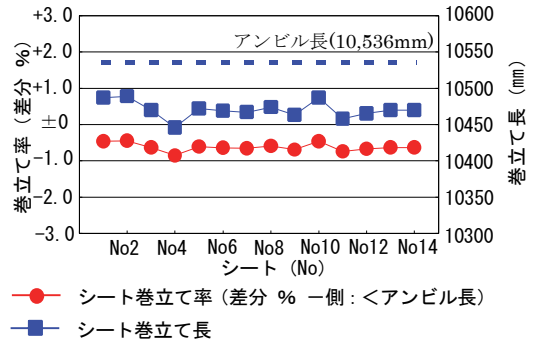


図-4 シート巻立て結果

b. シートの溶着

円周方向および軸方向のシート重ね合わせ部の接合は熱コテ(以下、ウェッジ)式の溶着装置を用いた。溶着装置の仕様を表-3に示す。

円周方向溶着装置を図-5、溶着状況を図-6に示す。ウェッジ、押圧ローラ、押圧ジャッキは一体構造で、溶着旋回リングに取り付けた。溶着方法は、新設シートと既設シートの間にはウェッジを挿入し、旋回しながらシートを溶かし、その後から押圧ローラでシートを押し付けて溶着接合する方法である。この時の溶着部の接合部強さは、溶着速度、溶着温度、押圧力の3要素に影響を受ける。

実験では、円周方向の溶着速度を2.5m/min、軸方向の溶着速度を1.0m/minで行った。円周方向溶着時のウェッジ温度および押圧力とシートの接合部強さの関係を図-7に示す。溶着温度460~520℃、押付力600~1000Nの範囲での接合部強さは約20N/mmである。シートの接合部強さの規格値は、「山岳トンネル工法における防水工指針」¹⁾によると6.3N/mmであり、溶着温度、および押付力の設定値に幅があっても、規格値以上の接合部強さを有することがわかった。

また、軸方向についても、溶着速度1.0m/minに

表-3 溶着装置の仕様

装置の種類	仕様
円周方向溶着装置 ・円周方向溶着機	AC100V、1.3kW 溶着温度：130~560℃ 溶着速度：~3m/min 旋回速度：4m/min
・溶着旋回リング	
軸方向溶着装置 ・軸方向溶着機	AC100V、1.3kW 溶着温度：130~560℃ 溶着速度：~2m/min 旋回速度：3m/min
・軸方向スライド装置	

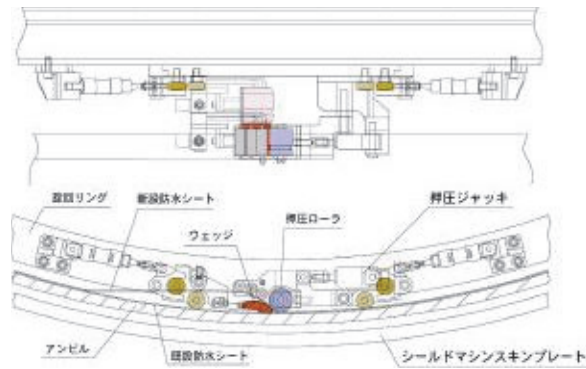


図-5 円周方向溶着装置

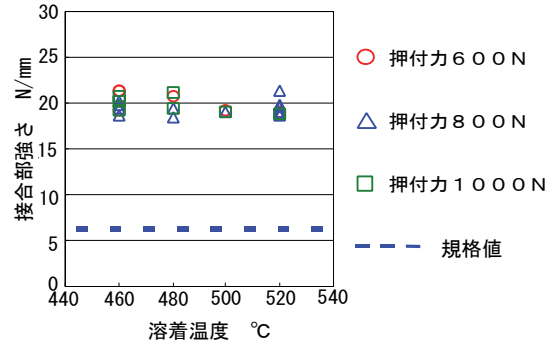


図-7 溶着温度と接合部強さの関係

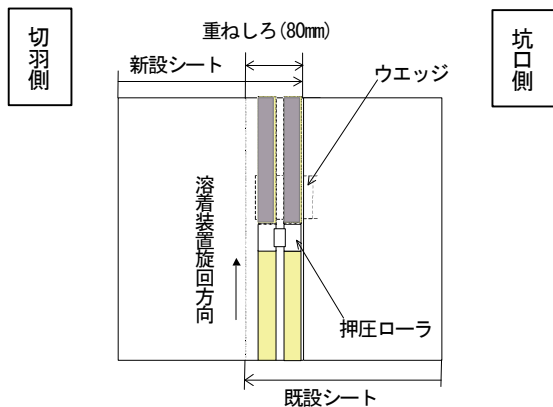


図-6 円周方向の溶着状況

対して、溶着温度 370～430℃、押付力 600～1000N の範囲の中で同様の強度を有することがわかった。

このことから、シート溶着の施工管理が容易であることが確認できた。

c. サイクルタイム

シート1リングの施工サイクルタイムは 24 分 40 秒である。各作業の内訳を図-8に示す。実験結果をもとに、中口径から大口径までのシート防水工のサイクルタイムを試算すると、すべて各シールド機外径毎の掘進時間内に収まり、シールド掘進とシート巻立・溶着の同時施工が可能であることが確認できた。

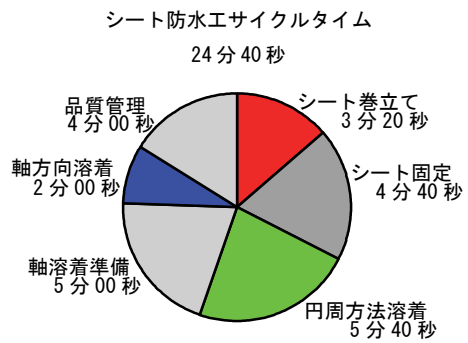


図-8 サイクルタイム

されたシールドトンネルの地震や不等沈下等により発生する応力や変位を吸収するものである。

写真-3にラッピング工法用可とうセグメントを示す。本可とうセグメントは、地震時等に変位を吸収する緩衝ゴムを、左右の外枠セグメント（鋼製）に取り付けている。ラッピング工法によりセグメント外周に被覆されたシートにより止水性を確保する構造であるので、従来の可とうセグメントのように止水性を確保するための止水ゴムの機内における設置、接続作業が不要である。

図-9に可とう部の構造を示す。図-10に緩衝ゴムの断面形状を示す。各部の役割を以下に述べる。

4. ラッピング工法用可とうセグメントの開発

4.1 概要

開発したラッピング工法用可とうセグメント²⁾は、ラッピング工法の付加技術として、ラッピング工法の高い止水性を活かし、施工性、経済性に優れた可とうセグメントである。

本可とうセグメントは、ラッピング工法により構築

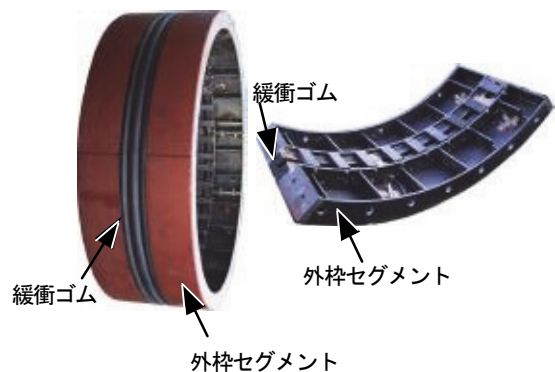
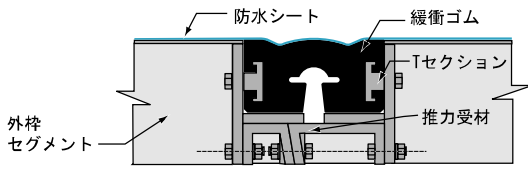


写真-3 ラッピング工法用可とうセグメント

シールド推力影響圏



シールド推力影響圏

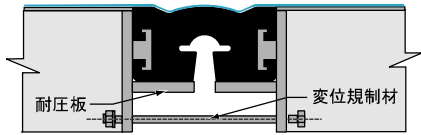


図-9 可とう部の構造

緩衝ゴムは、地震時等にトンネル変位を吸収する部材であり、土水圧に耐え、土水圧を耐圧板に伝達する。

引張り応力が生じないように、許容引張り変位量(20mm)分を予め圧縮しておく。また、シートの背面を保護する間詰め材的な役割もする。要素試験により、2.0MPa までの耐圧を確認している。

耐圧板は、緩衝ゴムを介して作用する土水圧に対抗する。

Tセクションは、緩衝ゴムを外枠セグメントに取り付けるT型金具である。

推力受材は、セグメントピースの時点で緩衝ゴム幅を所定の長さ(195mm)に保つとともに、シールド推力により可とう部が圧縮されないように推力を伝達する。

変位規制材は、可とう部が許容変位量を超えないように規制する部材。シールド推力の影響が無くなった時点で、推力受材を撤去し、取り付ける。

表-4に、本可とうセグメントの設計値を示す。許容変位量は従来の可とうセグメントを使用した工事実績や防水シートの弾性変形量を考慮して決定した。

4.2 適用箇所

適用箇所は図-11に示すように、従来の可とうセグメントと同様に、立坑とトンネルの接合部や地盤条変化部等である。

4.3 特長

本可とうセグメントの特長を以下に示す。

a. 構造の簡素化

外周に被覆されたシートが止水性を確保し、変位吸収性能を有する緩衝ゴムと耐圧板のみで、土水圧を支えるシンプルな構造である。

b. 優れた施工性

ピースの分割形状と1リングの組立方法は一般セグ

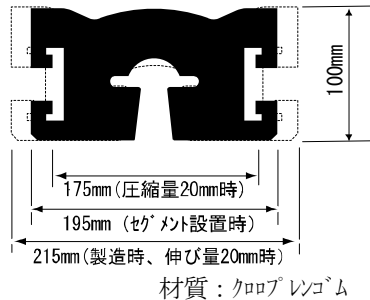


図-10 緩衝ゴムの外形寸法

表-4 開発目標性能

許容圧縮量	20mm
許容引張り量	20mm
許容偏心量	30mm
許容土水圧	1.0MPa (安全率2)

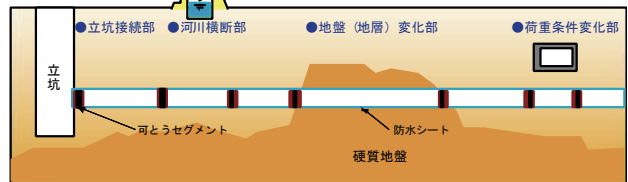


図-11 適用箇所

メントと同じである。従来の可とうセグメントのように止水ゴムの取付・接続等を行う必要がないため、施工サイクルに影響を与えない。

c. 優れた経済性

シンプルな構造と優れた施工性により大幅にコストを削減する。必要変位量が性能を超える場合、複数回使用しても経済的である。

4.4 性能確認実験³⁾

a. 実験目的

実大規模の試験体(外径φ2,800mm)を用いた性能確認実験により、開発した可とうセグメントの性能を確認する。

b. 実験方法

実験ケースを表-5に示す。外圧負荷実験は、外圧を作用させて、圧縮、伸び、偏心の各変形、偏心と圧縮・伸びを組み合わせた変形、および屈曲角(今回の試験体での値)について許容変位量まで与えた。外圧は、シート外周に設置した外筒管に注水加圧することにより0.5MPaまで作用させた。写真-4にシート設置状況、写真-5に実験状況を示す。

外圧無負荷実験は、緩衝ゴムの変形状態を確認するために、シートを設置する前に、外圧を作用させずに行った(写真-6参照)。また、変形裕度確認実験として、許容変位量の2倍近くまでの変形性能の余裕度の確認も行った。

計測項目は、荷重、変位、緩衝ゴムを外枠セグメントに固定する鋼材(Tセクション、耐圧板)に作用する圧力ひずみ、Tセクション固定ボルトの軸力および外圧(注水

表-5 実験ケース一覧表

実験名	実験内容						最大外圧
	圧縮	伸び	偏心	偏心+圧縮	偏心+伸び	屈曲角	
外圧負荷実験	0~20	0~20	0~30	偏 30+圧 0~20	偏 30+伸 0~20	0.8°	0.5MPa
外圧無負荷実験	0~20	0~20	0~30	偏 30+圧 0~20	偏 30+伸 0~20	0.8°	無し
変形裕度確認実験	0~30	0~40	—	—	偏 0~60+伸 20	1.6°	無し

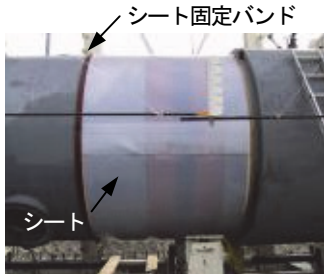


写真-4 シート設置状況



写真-5 外圧負荷実験状況

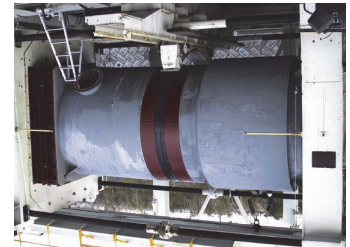


写真-6 外圧無負荷実験状況

圧)である。

c. 実験結果

i. 変形性能

外圧負荷実験より、最大外圧 0.5MPa 作用下において、許容変位量まで、全て問題なく変形することを確認した。また、本可とうセグメントの可とう部に使用している緩衝ゴムは、従来の可とうセグメントに使用される止水ゴムに比べ肉厚である。しかし、その作動抵抗力(剛性)は十分に小さく、可とう性に影響を及ぼすものではなかった。

緩衝ゴムの変形状態の一例として、写真-7に変形裕度確認実験における変形状況を示す。許容変位量の2倍程度まで変形させた変形裕度確認実験においても、ピース間の突き合わせ部も含め、問題となるような変形挙動は見られなかった。



写真-7 変形状況

ii. 止水性

外圧負荷実験より、外圧 0.5MPa 作用下においても漏水は見られなかった。これより、本可とうセグメントは、外周に敷設したシートの止水性に悪影響を与えることなく変形性能を発揮することを確認できた。

iii. 緩衝ゴム取付部材

全実験ケースにおいて、緩衝ゴムを外枠セグメントに固定する鋼材(Tセクション、Tセクション固定ボルト)および緩衝ゴムを介して土水圧に対抗する耐圧板に作用した応力は小さく、特に問題となるような応力は生じなかった。

5. おわりに

外周被覆工法であるメンブレンラッピング工法⁴⁾とラッピングシールド工法⁵⁾の技術を融合し、新たにラッピング工法を大成建設(株)、五洋建設(株)、日立建機(株)、石川島播磨重工業(株)との5社共同で開発した。総合実験を行って、巻立精度、溶着強度、施工サイクルなどを検証し、実用化の見通しを得ることができた。

また、本工法の特長を活かしたラッピング工法用可とうセグメントを大成建設(株)、五洋建設(株)と共同開発した。今後は、さらなる技術の向上を図り、実工事への適用を図る予定である。

【参考文献】

- 1) (社)日本トンネル技術協会、「山岳トンネル工法における防水工指針」、pp. 50~61、1996. 2
- 2) 島田他、「ラッピング工法用可とうセグメントの開発(その1)」、土木学会第57回年次学術講演会、第VI部門投稿中
- 3) 三澤他、「ラッピング工法用可とうセグメントの開発(その2)」、土木学会第57回年次学術講演会、第VI部門投稿中
- 4) 三島、畑山、「管被膜工法の開発(第2報)」、奥村組技術研究年報、No. 14、pp. 97~102、1988
- 5) 山本、中嶋他、「ラッピングシールド工法を重要構造物直下に採用」、トンネルと地下、2002. 1、pp. 37~44