

ラッピング工法（外周被覆工法）により構築されたシールドトンネルの耐震検討

三澤孝史¹・島田哲治²・野元義一³・高見沢計夫⁴・原 修一⁵・畑山栄一⁶

¹株式会社 技術研究所 第4研究グループ 主任研究員

(〒300-2612 茨城県つくば市大字大砂387)

E-mail: takashi.misawa@okumuragumi.jp

²大成建設株式会社 技術センター シールド・TBM開発室 課長代理 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: t-simada@ce.taisei.co.jp

³五洋建設株式会社 技術研究所 主任 (〒329-2746 栃木県那須郡那須町四区長1534-1)

E-mail: Yoshikazu.Nomoto@mail.penta-ocean.co.jp

⁴大成建設株式会社 技術センター シールド・TBM開発室 室長 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: k-takami@ce.taisei.co.jp

⁵五洋建設株式会社 技術研究所 部長 (〒329-2746 栃木県那須郡那須町四区長1534-1)

E-mail: Shuichi.Hara@mail.penta-ocean.co.jp

⁶株式会社 技術本部 技術開発部 次長 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

E-mail: eiichi.hatayama@okumuragumi.jp

ラッピング工法は、セグメント外周を止水性、耐久性に優れた防水シートで覆う、シールド工法における外防水型の外周被覆工法である。シートで覆うことにより、長期的にトンネルの防水性・耐久性を向上させる。耐震性の面から、ラッピング工法により構築されたシールドトンネルを考えた場合、地震時荷重により漏水の懸念がある目開きが生じても外周に設置された防水シートにより止水性が保たれる効果が期待できる。さらに、シートと地盤が滑ることによりトンネルに作用する地震時荷重の低減効果が期待できる。本報では、ラッピング工法の概要を述べた後、3次元FEMによる静的解析によりシートによる地震時荷重の低減効果について述べる。

Key Words : Shield Tunnel, Wrapping Method, water proof sheet, FEM

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、塩害等によるセグメントの劣化を抑止する技術も求められている。

ラッピング工法¹⁾は、シールド工法における外周被覆工法である。本工法はセグメントの外周を止水性と耐久性に優れた防水シートで覆うことにより、止水性の高いトンネルを構築する。また、耐久性の高い防水シート（材質：ポリエチレン）により、地下水とトンネルを遮断して、トンネルを劣化から守る工法である。耐震性の面からラッピング工法により構築されたトンネル（以下、ラッピングトンネルと称す）を考えた場合、地震時荷重により漏水の懸念がある目開きが生じても、外周に設置された防水シートにより止水性が保たれる効果が期待できる。また、近年、地下構造物においても免震構造^{2),3)}が

研究開発されているが、ラッピングトンネルにおいてもシートによりトンネルと地盤の縁が切れているため、地震時荷重がシートと地盤が滑ることにより低減される効果が期待できる。

本報では、3次元FEMによる静的解析によりシートによる低減効果に着目した試算を行い、その低減効果を検討した。

2. ラッピング工法の概要

(1) 工法の目的

ラッピング工法の工法概念を図-1に示す。

ラッピング工法は、シールド機に装備された防水シート被覆装置（以下、ラッピング装置と称す）を用いて、セグメント外周全体を止水性と耐久性に優れた防水シートで覆う外防水型のシールド施工技術

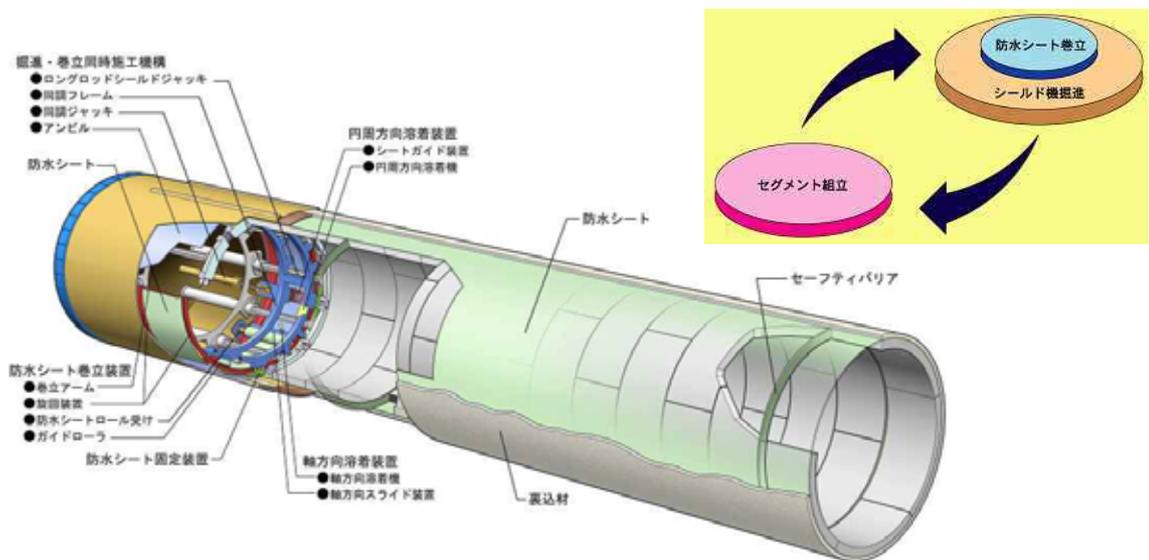


図-1 ラッピング工法の概念

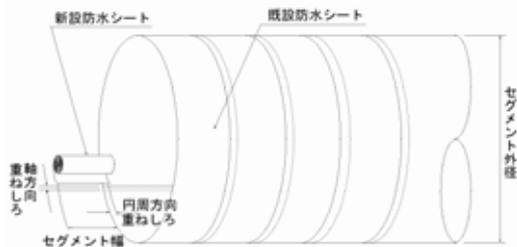


図-2 シートの巻立形状

である．大深度高水圧下や腐食性環境下の地盤においても長期的にトンネルの止水性・耐久性を向上させ、その効果として将来の維持管理費を含めたトータルコストダウンを実現するものである．

(2) 施工方法

ラッピング工法の施工手順は、シールド掘進と併行して、シールド機内で1リング分の防水シートをラッピング装置により巻立て溶着し、防水シートの内側でセグメントを組立てる（セグメント組み立てと併行することもできる）この作業を繰り返すことにより、トンネル外周全体を防水シートで覆う．シートの巻立形状を 図-2 に示す．また、セグメントリング間、約 30m 毎のシートに鏑状の隔壁であるセーフティバリアを設け、シートの万一の破損に対しても区間を限定することにより漏水箇所の発見と補修を容易に行うことができる．

(3) 防水シート

使用するシートは、厚さ 2mm 以上のポリエチレンシートである．材質は、施工性、溶着性、経済性、耐薬品性等を考慮するとともに、耐水圧試験等を実施して決定した．シートの物性の規格値を表-1 に示す．

(4) ラッピング装置

シールド機テール部に装備したラッピング装置を図-3 に示す．ラッピング装置による円周方向の巻立・溶着手順を図-4 に示す．

表-1 ラッピング工法用防水シートの規格値

試験項目	単位	規格値	試験方法	
比重	-	0.95 ± 0.05	JIS K 6773	
硬さ	-	85 ~ 98	JIS K 6773	
厚さ	mm	2.0 以上	JIS A 6008	
引張強さ	20	N/mm ²	14 以上	JIS K 6773
	-10		26 以上	
伸び	20	%	500 以上	JIS K 6773
	-10		400 以上	
引裂強さ	N/mm	50 以上	JIS K 6252 準拠	
接合部破断荷重	N/mm	10 以上	JIS K 6773 準拠 試験片 JIS K 6850	
耐薬品性 質量変化率	アルカリ	%	± 1 以内	JIS K 6773 準拠
	酸			
	食塩水			

上表は、「併進工法におけるシート防水工設計施工の手引き(案)・都市トンネル編」(日本鉄道建設公団監修 トンネル防水工研究委員会)の ECB シートに準拠する．但し耐薬品性質量変化率における(酸・食塩水)についてはラッピング工法研究会で独自に設定した．

シート巻立・溶着は、まず新設シート端部を巻立アームで把持し、旋回リングによりアンピル内側にシートが巻立てられる．次に、旋回リングが逆方向に旋回することで、円周方向溶着機前方のシートガイド装置⁴⁾がアンピルに新設シートを押し付けながら、円周方向溶着機が既設シートとの円周方向重なり部を接合していく．

3. ラッピングトンネルの耐震性の試算

ラッピングトンネルの耐震性について、3次元 FEM 静的解析による試算を行った．検討対象は、振動特性の違いにより地震時に応力が集中する立坑とシールドトンネルとの接合部とし、トンネル軸方向について検討した．

ラッピングトンネルは、セグメント外周に防水シ

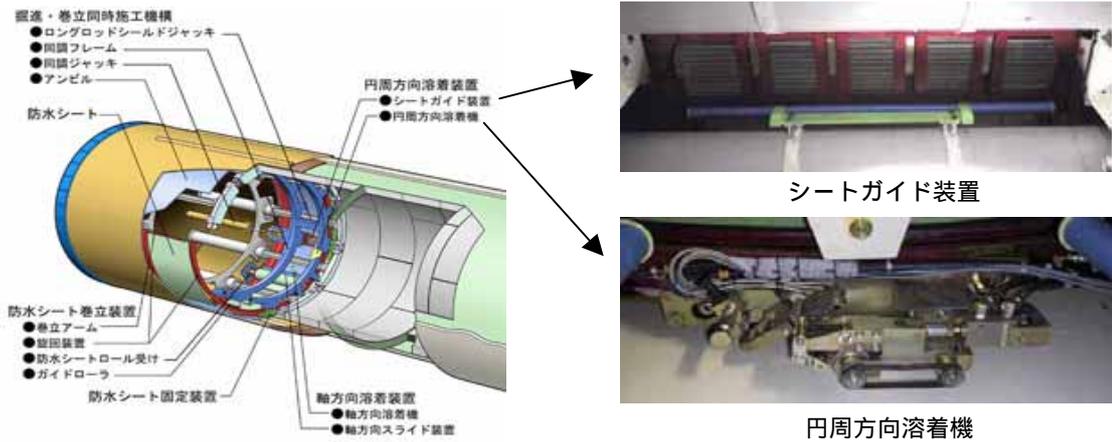


図-3 ラッピング装置

表-2 解析ケース

ケース No.	解析条件
	トンネルにシートを設置
	トンネルのみ
	トンネルに可とうセグメントを設置

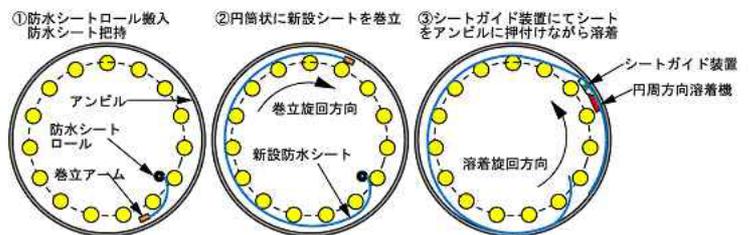


図-4 シートの巻立・溶着手順

ートが敷設されている．そのため地震時に，従来のシールドトンネルでは漏水が生じる目開きが生じたとしても防水シートにより，止水性が保たれることが期待できる．

さらに，トンネルと地盤が防水シートにより縁が切れており，シートと地盤が滑ることにより地震時にトンネルに伝達する地盤ひずみが低減される効果が期待できる．

今回は，その低減効果に着目して，シートと地盤の滑りを考慮した解析を行い，ラッピングトンネルの耐震性を検討した．

(1) 解析ケース

解析ケースを，表-2に示す．

解析は，トンネル外周にシートを考慮したケースの他に，比較のためにシートを考慮しないケースおよび可とうセグメントのみを配置したケースについても行った．また，ケース1では，シートの摩擦係数の影響を把握するために，摩擦係数 μ をパラメータとして $\mu = 0.3, 0.5, 0.6$ について解析した．

(2) 解析モデル

解析モデルは，層厚30mの一様地盤に，外径5.1mのシールドトンネルと立坑を配置したモデルを想定した．解析モデルは，対称性より1/2モデルとした．

図-5に要素分割図を示す．地盤，立坑，トンネルは，ソリッド要素を用いた．

防水シートについては，直交バネおよびせん断バネ要素を用いて表した．直交バネは線形とし，せん断バネは，摩擦係数に有効拘束圧を乗じた上限値を

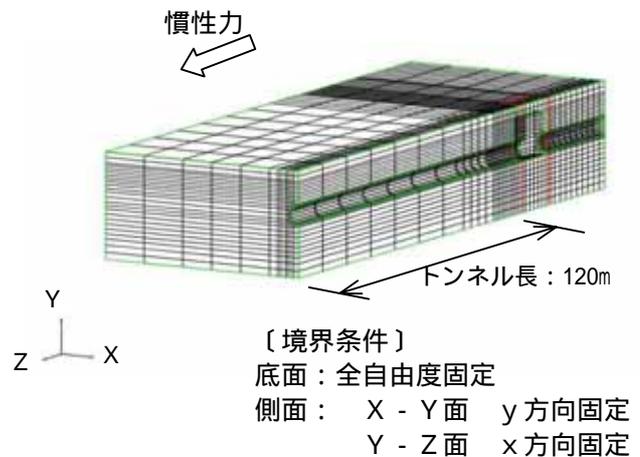


図-5 メッシュ図

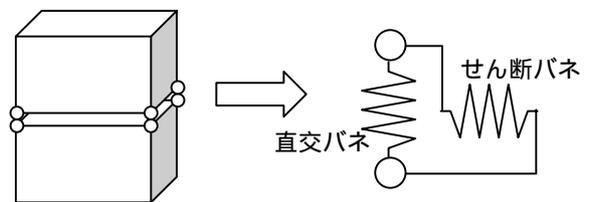


図-6 シートのモデル化概念図

持つバイリニアのバネとした．

図-6のモデル化の概念図に示すように，トンネル要素の節点とその外周の地盤要素の節点を二重節点とし，その要素間に直交バネおよびせん断バネを設置した．

表-3 物性値

	弾性係数 kN/m ²	ポアソン比	密度
地盤	3.85×10^4	0.49	1.6
トンネル	7.91×10^5	0.167	2.5
立坑	2.5×10^7	0.167	2.5
連壁	2.5×10^7	0.167	2.5

(3) 解析条件

解析に用いた物性を表-3に示す。

地盤物性は、N値が3程度の粘性土とし、地盤のせん断ひずみ依存性を考慮して設定した。

トンネル剛性は、等価引張剛性に合致するように弾性係数を設定した。可とうセグメントの要素は、弾性係数を1/100倍に低減させた。

入力は、ポートアイランドNS波(最大加速度817cm/s²)を入力動として一次元的解析により求めた加速度分布を慣性力としてトンネル軸方向に作用させた。

(4) 解析結果

図-7にトンネルの軸ひずみを示す。図中の軸ひずみは、軸方向の各断面において平均したひずみである。図より以下のことがわかる。

- ・シートを考慮したケース とケース の比較より、摩擦係数が0.6では、シートと地盤が滑ることにより軸ひずみが約10%、摩擦係数0.5では約20%低減している。
- ・摩擦係数を0.3としたケースでは、ケース と比べ、軸ひずみが約60%と大きく低減している。また、このケースでは、ほぼトンネル全体において滑りが生じていた。
- ・シートを考慮したケース (摩擦係数 $\mu=0.5$) と可とうセグメントを設置したケース を比較するとほぼ同じ程度、軸ひずみが低減しており可とうセグメントと同等の低減効果を示している。

以上のように、想定した条件においてであるが、シートと地盤が滑ることによる地震時断面力を低減する効果が確かめられた。また、その低減効果は摩擦係数が小さいほど顕著であった。

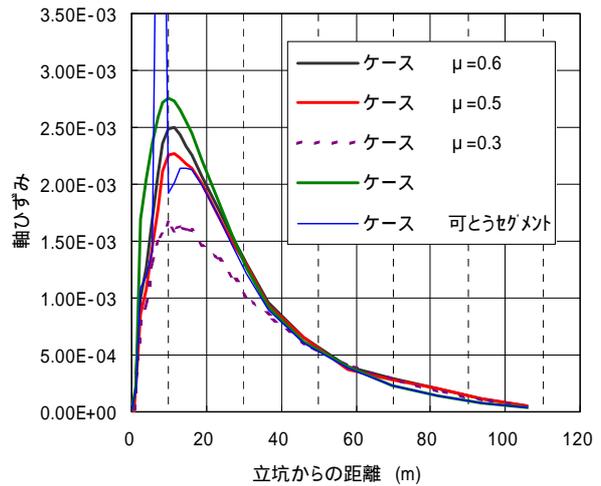


図-7 トンネルの軸ひずみ分布

4. おわりに

ラッピング工法は大成建設(株)、五洋建設(株)、(株)奥村組、石川島播磨重工業(株)、日立建機(株)の共同開発であり、現在、ラッピング工法研究会(全13社)として、その普及活動を行っている。

ラッピング工法は、長期的にトンネルの止水性・耐久性を向上させる目的で開発した工法であるが、今回、想定した条件下ではあるが地震時においてもトンネル断面力の低減効果が期待できることがわかった。この効果については、ラッピング工法の付加機能として、さらに詳細に検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 島田他：ラッピング工法(トンネル外周被覆工法)の開発(その1),土木学会第56回年次学術講演会,第 部門,2001.10
- 2) 建設省土木研究所他：地下構造物の免震設計法マニュアル(案),共同研究報告書第29号,1998.
- 3) 鈴木他：滑動塗料を用いた地下構造物の免震構造,土木学会第2回免震・制震コロキウム講演論文集,2000.11
- 4) 野元他：ラッピング工法・シートガイド装置の開発(その2),土木学会第58回年次学術講演会,第 部門,2003.10

(2003.9.12 受付)

THE EXAMINATION OF THE EARTHQUAKE RESISTANCE OF THE SHIELD TUNNEL CONSTRUCTED BY WRAPPING METHOD

Takashi MISAWA, Tetsuji SHIMADA, Yoshikazu NOMOTO, Shuichi HARA, Kazuo TAKAMIZAWA, Eiichi HATAYAMA,

Wrapping Method is developed in order to prevent the leakage into the tunnel under high water pressure at great depth and to elongate its life. It uses the high quality and durable waterproofing sheets and the perimeter of the segmental linings is wrapped with them. The effect of the seismic isolation by the slip of sheet and ground was examined. The earthquake response analysis for the joint of tunnel and vertical shaft was carried out by 3D-FEM. As a result, the effect of the seismic isolation was confirmed.