

道路トンネルの分岐合流部地中接合工法の開発

福居 雅也* 堀見 尉** 清水 智明***

1. はじめに

従来、道路トンネルにおいて地中に先行構築された本線トンネルにランプトンネルを接続する方法としては、分岐合流箇所を開削する工法が一般的であった。当該工法は、分岐合流箇所の大深度化への対応に加え、都市部において地上作業地の確保が難しいことや、周辺環境への振動・騒音などの問題があった。

それに対し、近年、本線トンネルとランプトンネルを地中で接続する工法として、別々に間隔を取って施工された両トンネルの離隔区間を地盤改良してから地山を掘削し、セグメントの一部を開口して分岐合流部を構築する工法¹⁾などが提案されている。しかし、これらの工法を採用した場合も、分岐合流部の接合箇所の幅員が大きくなり、都市計画道路幅内に収まらなくなることや、地盤改良が大規模となるため、施工コストおよび工期が増大することなどが課題となっている。

本報では、上記の課題を解決した新工法の概要、覆工構造検討、CV拡幅工法の概要および連続拡幅対応のテールシール性能確認実験等について報告する。

なお、本開発は日立造船(株)および新日本製鐵(株)との共同研究である。

地中で連続的に断面を拡幅、縮幅できるというCV拡幅工法の最大の特長を活かして、分岐合流部以外のランプトンネル施工区間では所要の建築限界を無駄なく掘進することが可能となる。また、分岐合流部の接合区間では本線トンネルを直接切削した後に内部構築することにより、道路幅員を最小限にできるとともに、直接切削箇所の補助工法も小さい範囲となる。

本線トンネル3車線、ランプトンネル2車線の道路トンネルの分岐合流部を例^{2),3)}に各区間の概要を以下に記す(図-1参照)。

区間Ⅰ：接合前であり、本線、ランプトンネルともRCセグメントの覆工とし、ランプトンネルは標準断面で掘進する。

区間Ⅱ：ランプトンネルを連続拡幅しながら最大拡幅断面(拡幅量：2,700mm)になるまで掘進を行う。本線、ランプトンネルとも鋼製セグメントの覆工となるが、本線トンネルの接合側には直接切削可能なセグメントを組立てておく。

区間Ⅲ：最大拡幅状態のままCV拡幅シールド機にて本線トンネルを直接切削する。この区間は車線合流前であり、中壁を設置する。

2. 工法全体概要

今回開発した「CV拡幅工法を用いた分岐合流部の地中接合工法」は、道路トンネルの非常駐車帯などの築造を目的として開発した「連続可変拡幅工法(CV拡幅工法：Continuously Variable Section Shield Method)」をランプトンネルの施工に採用し、先行構築された本線トンネルをランプトンネルのCV拡幅シールド機で直接切削することにより分岐合流部の接合を行う工法である。

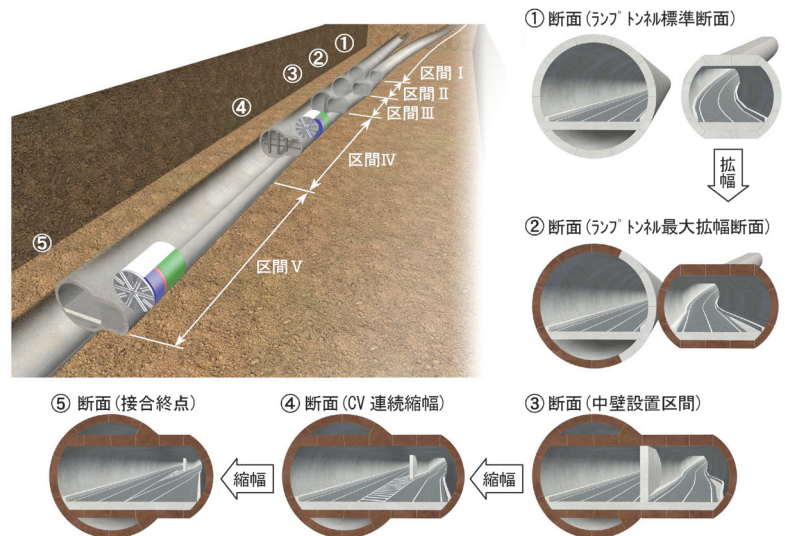


図-1 CV拡幅工法を用いた分岐合流部の地中接合工法の概要

*技術本部土木部 **東京支社土木技術部 ***技術研究所

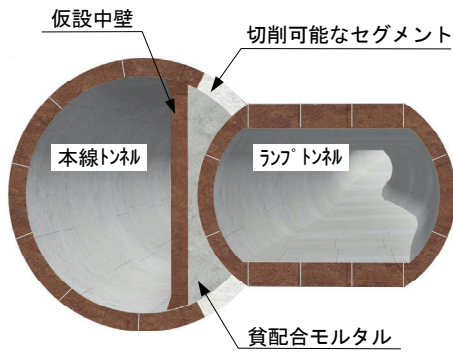


図-2 本線トンネルの直接切削

区間Ⅳ：ランプトンネルの車線が本線側に順次シフトしていくことから、ランプトンネルを連続縮幅しながら標準断面まで掘進する。

区間Ⅴ：接合終点までランプトンネルを標準断面で掘削する。

CV拡幅シールド機で本線トンネルを切削する際には、図-2に示すように本線トンネルの接合側に仮設中壁を設置し、貧配合モルタル等を充填しておく。また、接合部開口の際には、仮設部材（柱、横梁）を設置して荷重を受け、凍結工による止水の後、両トンネルの接合部に接続ピースを設置することにより構造の一体化を図る（図-3参照）。

以下に、工法の特長を記す。

- i. 本線トンネルは円形断面であり、本線シールド機は特別な仕様変更は不要となる
- ii. 施工区間ごとに掘削断面が必要最小限となることから敷設道路の幅員が小さく、都市計画道路幅が狭い場合に有利となるとともに、掘削土量が少なく環境への対応に優れている
- iii. 接合部の完成時は覆工+内部支保材（鋼製梁）のみで荷重を支持するため、外部からの補強構造が不要で非常にシンプルな構造となる

（図-1④断面参照）

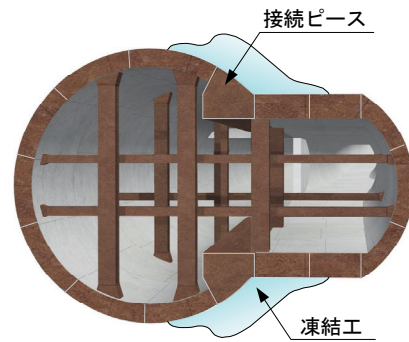


図-3 開口時の仮設部材の設置状況

iv. 分岐合流部は本線トンネルとランプトンネルの直接接合となることから、併設施工した双設トンネルを切広げる工法等と比べると補助工法が大幅に低減できる

3. 覆工構造

覆工構造の検討条件および荷重モデルを図-4、5に示す。

大深度を想定して土被りを40m、トンネル断面は本

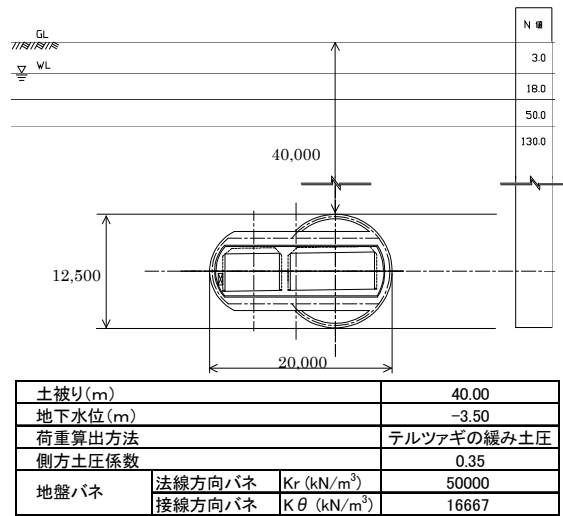


図-4 覆工構造の検討条件

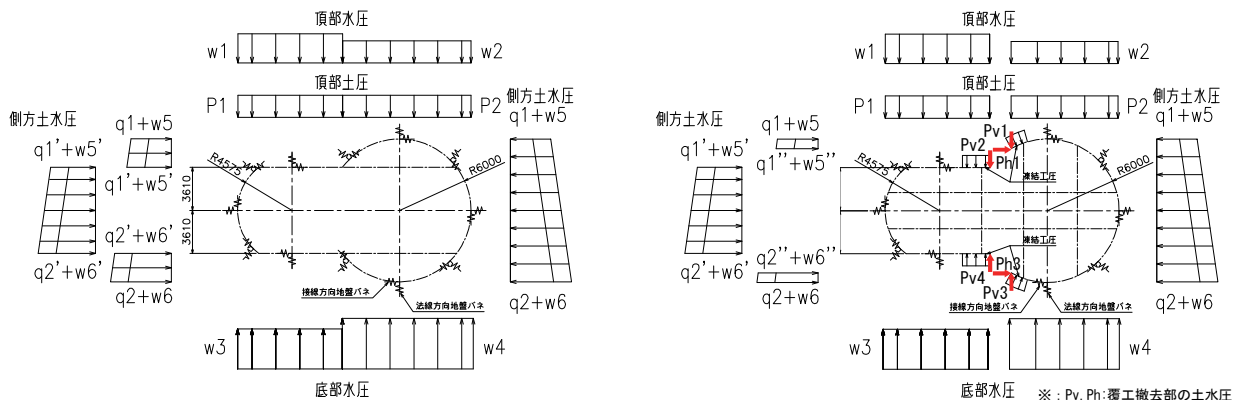


図-5 荷重モデル（左：完成時、右：施工時）

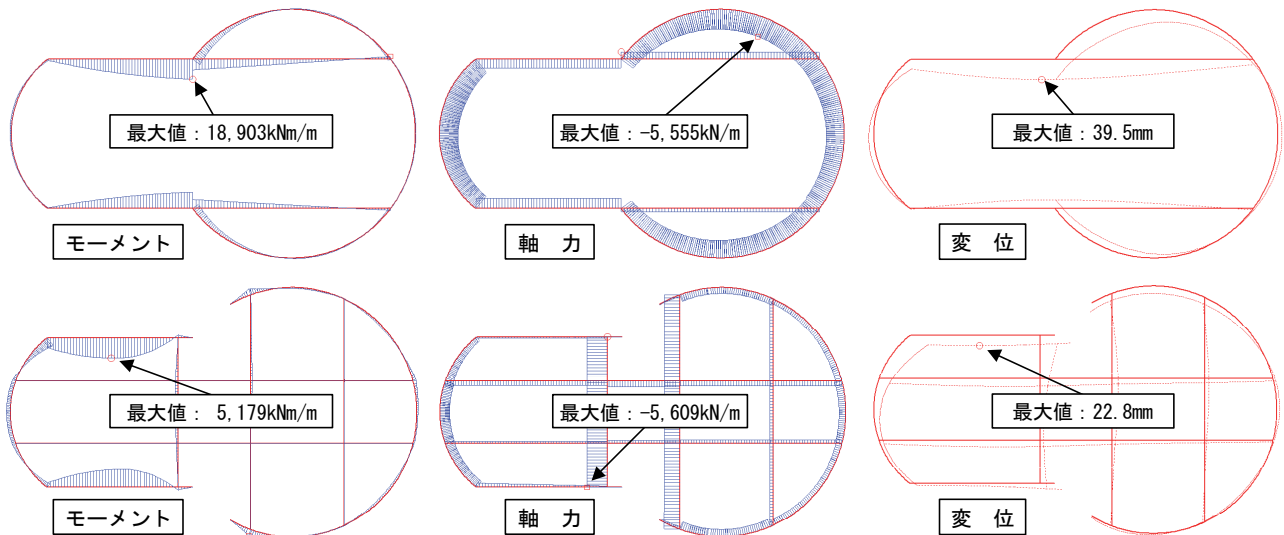


図-6 発生断面力（奥行き1.0mあたり）および変位（上段：完成時、下段：施工時）

線トンネル2車線（トンネル外径12.5m）、ランプトンネル1車線（トンネル外径8.72m×9.7m）とし、最大拡幅断面（図-1の④断面）を対象とした例である。

完成時および施工時の発生断面力、変位を図-6に示すとともに、部材割付を図-7に、覆工および仮設部材の照査結果の一覧を表-1に示す。

図-6より完成時では、最大モーメントおよび最大変位は本線トンネルとランプトンネルの接合箇所の横梁で、最大軸力（圧縮）はトンネル円弧部で大きくなっていることが判る。また、施工時では、最大モーメントは完成時の27%程度に収まるものの、最大軸力（圧縮）は仮設部材3で大きな値となっている。

各部材の照査結果より（表-1参照）、覆工部材の桁高は、本線円弧部（部材1、2）で500mm、ランプ部円弧部（部材4）で550mmとなり、横梁（部材3、5）は1500mmとなった。また、仮設部材1～4はいずれもH-400～H-500となった。しかしながら、今回の構造検討は中柱が設置できない構造的に最も厳しい最大拡幅断面での検討結果であり、他の断面では構造のスリム化が可能であると判断できる。

なお、別途、ランプトンネル標準断面のRCセグメント、本線トンネルの接合側の直接切削可能なセグメントの覆工構造検討および分岐合流部の施工ステップを反映した2次元FEM解析も行い構造の検証を実施している。

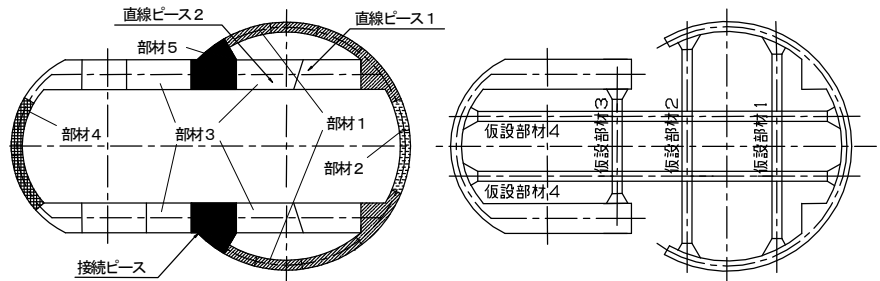


図-7 部材割付（左：完成時、右：施工時）

表-1 覆工および仮設部材の照査結果

部位	桁高さ	材質	許容応力度 (N/mm ²)	正曲げ時発生応力 (N/mm ²)	負曲げ時発生応力 (N/mm ²)
部材1	H= 500mm	SM570-H	270	-221.7	-108.2
部材2	H= 500mm	SM490	195	-	-130.0
部材3	本線部 H= 1500mm	SM490	195	-92.1	-21.0
	ランプ部 H= 1500mm	SM570-H	270	206.7	-
部材4	H= 550mm	SM520C-H	235	-191.4	-188.7
部材5	H= 1500mm	SM490	195	-95.2	-

部位	桁高さ	配置ピッチ	材質	座屈長 (mm)	照査結果			
					部材の安定	局部座屈(N/mm ²)		
仮設部材1	H= 400mm	/2ring	SM490	3,954	0.754	≤1	181.6	≤285
仮設部材2	H= 458mm	/1ring	SM490	4,157	0.805	≤1	194.9	≤285
仮設部材3	H= 498mm	/1ring	SM490	3,000	0.781	≤1	206.4	≤285
仮設部材4	H= 400mm	/1ring	SM490	7,822	0.753	≤1	122.5	≤285

※：応力度の符号（-）は圧縮、（+）は引張

ント、本線トンネルの接合側の直接切削可能なセグメントの覆工構造検討および分岐合流部の施工ステップを反映した2次元FEM解析も行い構造の検証を実施している。

4. CV拡幅工法（連続可変拡幅工法）

4.1 CV拡幅工法の概要

東京湾横断道路の開通以来、道路トンネルへのシーールド工法の適用が広まってきている。道路トンネルの特徴として、非常駐車帯、曲線部の視距拡幅部、ランプトンネルの分岐合流部等の設置が挙げられ、トンネ

ルの部分拡幅が必要となる。これらに対し、シールド機で直接部分拡幅を可能とする工法が開発・実用化されつつある。

図-8にCV拡幅工法（連続可変拡幅工法）の概要を示す。CV拡幅工法は、シールド機が地中で連続的に標準断面から傾斜拡幅し拡幅断面形状に必要な長さを掘進した後、傾斜縮幅して再び標準断面に戻る工法である。

また、図-9に従来の段階拡幅方式との比較を示す。段階拡幅方式では、予め拡幅部の掘削を機長分以上実施し、その空隙部に特殊充填材を充填する等の方法で地山の安定を確保するとともに、セグメントに段階的な拡幅構造が必要となる。一方、CV拡幅シールド機は、標準断面掘削時は円形断面形状であり、拡幅位置において徐々にマシンの片側の胴部を広げていくことが可能となっており、シールド機のスキンプレートは斜めに拡幅・縮幅できるため、地山の安定性に優れている。縮幅も同様に施工可能で、拡幅量は最大拡幅まで自由に設定可能で、何度でも繰返して施工することができる。滑らかに連続傾斜拡幅・縮幅を行うことで、地山の安定補助工法等は不要とすることができ、余掘り量も曲線施工と同等となる。なお、最大拡幅量はシールド機外径の22%まで可能である。

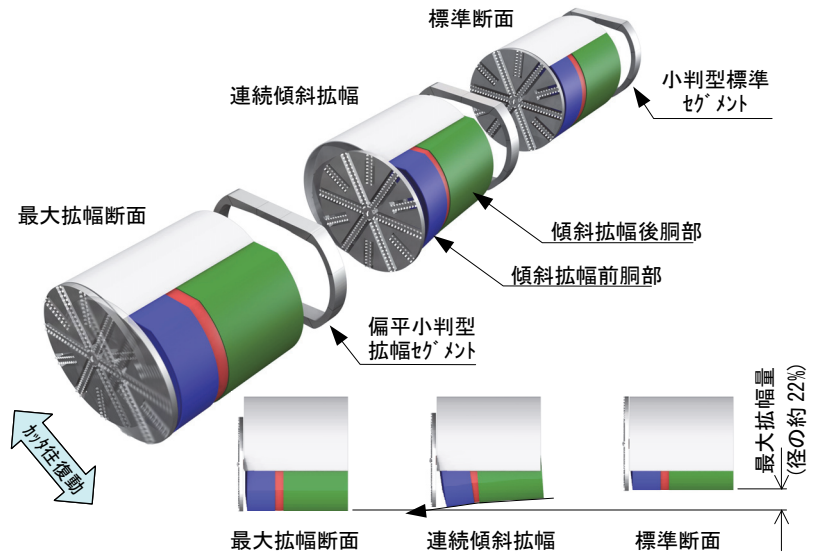


図-8 CV拡幅工法（連続可変拡幅工法）の概要

CV拡幅工法（連続可変拡幅工法）の特徴を以下に記す。

- i. シールド機本体は固定胴と拡幅胴から構成され、拡幅胴は傾斜拡幅前胴と傾斜拡幅後胴から構成される（連続傾斜角度：4～5°、最大拡幅量：シールド機外径の約22%）
- ii. 前部には拡幅断面に対応可能な掘削機構が設けられ、拡幅量の条件によって形式が選択される（分岐合流部の施工では、“円形面板平行移動カッタ方式”を採用）
- iii. 標準断面セグメントは上下面に平坦部を持つ小判型、拡幅時は平坦部の長さが徐々に変化する

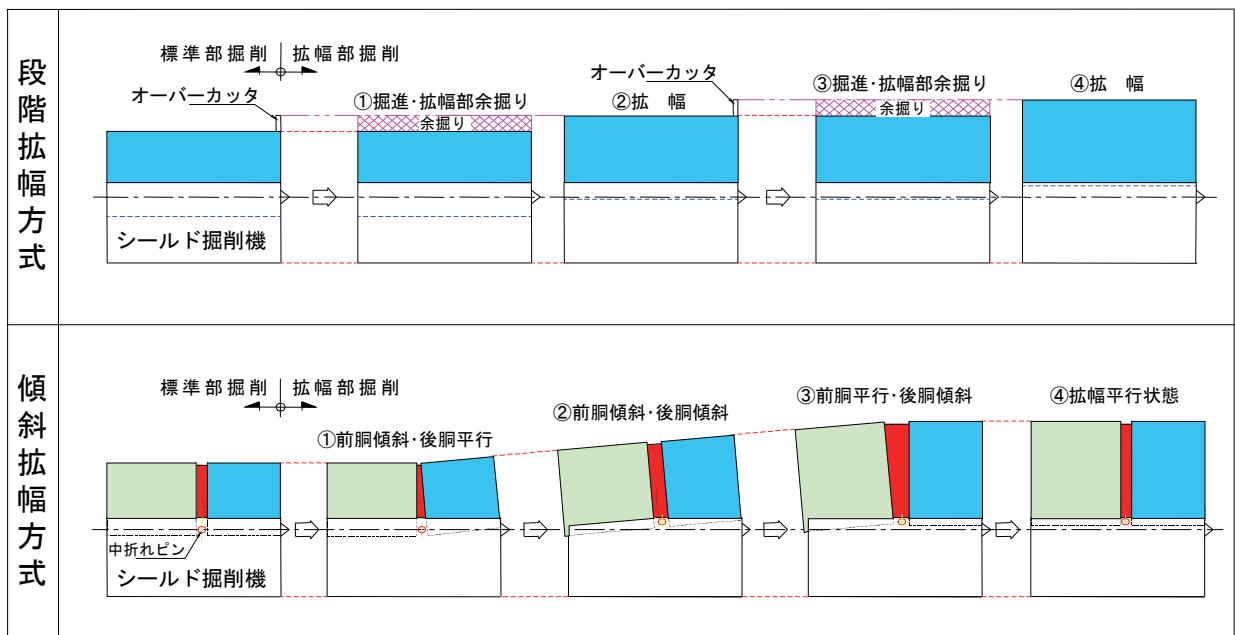


図-9 従来方式との比較

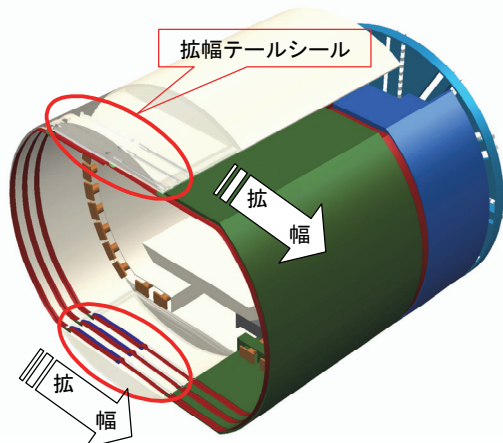


図-10 拡幅テールシール装備状況

る偏平小判型となる

4.2 テールシール構造

部分拡幅シールド機の最も大きな課題は断面変化に対応可能なテールシール構造である。さらに、CV拡幅シールド機のテールシール構造は、連続傾斜拡幅に伴う幅方向の伸縮、角度変位、本体撓み・ねじれ等に対応することが必要である。

図-10 に拡幅テールシールの装備状況を、図-11 に拡幅テールシール構造を示す。

テールシールはセグメントの上下面の平坦部に伸縮可能な拡幅テールシールを設置し、その両側に固定テールシールを連続的に配置して止水を行う構造である。拡幅移行状態では固定胴と拡幅胴に角度がつくため、シールド機本体からピンで吊り下げるにより平行の動き以外に角度にも対応する構造となっている。

4.3 テールシール性能確認実験

CV拡幅シールド機の拡幅テールシール構造の実証を目的として性能確認（止水性検証）実験を行った。

図-12 に実験装置を、表-2 に実験ケース一覧を示す。

また、写真-1 に実験状況（大気実験）を、図-13 に実験結果の例として、泥水圧昇圧実験（泥水圧：0.5MPa）および泥水中実験（泥水圧：0.3MPa、拡幅作動）を示す。泥水中実験においては、拡幅（縮幅）作動に伴い泥水およびパテグリースを適宜注入（抜取り）しながら圧力を保持した。図-13 より、泥水圧昇圧実験では、泥水圧の上昇に伴い

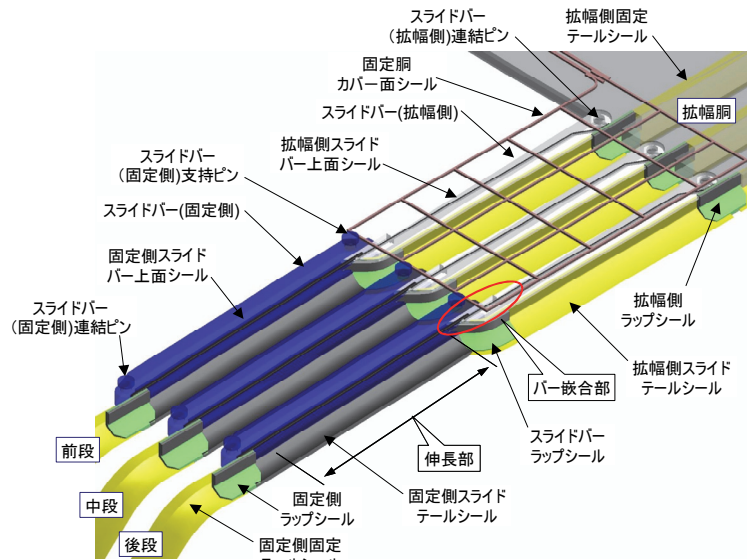


図-11 拡幅テールシール構造（最大拡幅時）

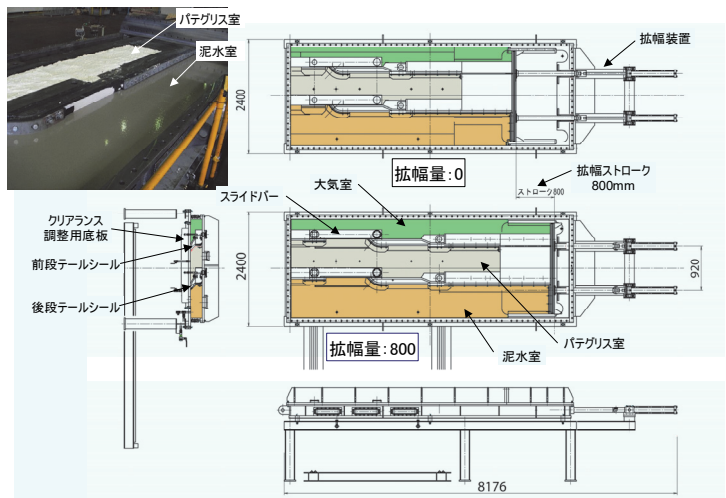


図-12 実験装置

表-2 実験ケース一覧

実験項目	実験条件
①大気実験 (拡幅・縮幅作動)	・大気開放状態(泥水、パテグリース充填なし) ・拡幅・縮幅作動速度:24mm/min ・テールクリアランス:標準、±30mm
②泥水圧昇圧実験	・縮幅状態において泥水圧を昇圧(パテグリース適宜注入) ・テールクリアランス:標準、±30mm
③泥水圧保持実験	・縮幅状態において泥水圧を昇圧し、10分間保持
④泥水中実験 (拡幅作動)	・泥水圧 保持状態で拡幅作動(パテグリース適宜注入) ・拡幅速度:24mm/min、ストローク:0~800mm ・テールクリアランス:標準、±30mm
⑤泥水中実験 (縮幅作動)	・泥水圧 保持状態で縮幅作動(パテグリース適宜注入) ・縮幅速度:24mm/min、ストローク:800~0mm ・テールクリアランス:標準、±30mm

パテグリース圧が0.02~0.03MPa 程度低い圧力で連動して上昇している。また、泥水中実験（拡幅作動）においても、泥水圧昇圧実験と同様の差圧で拡幅している状況が判る。

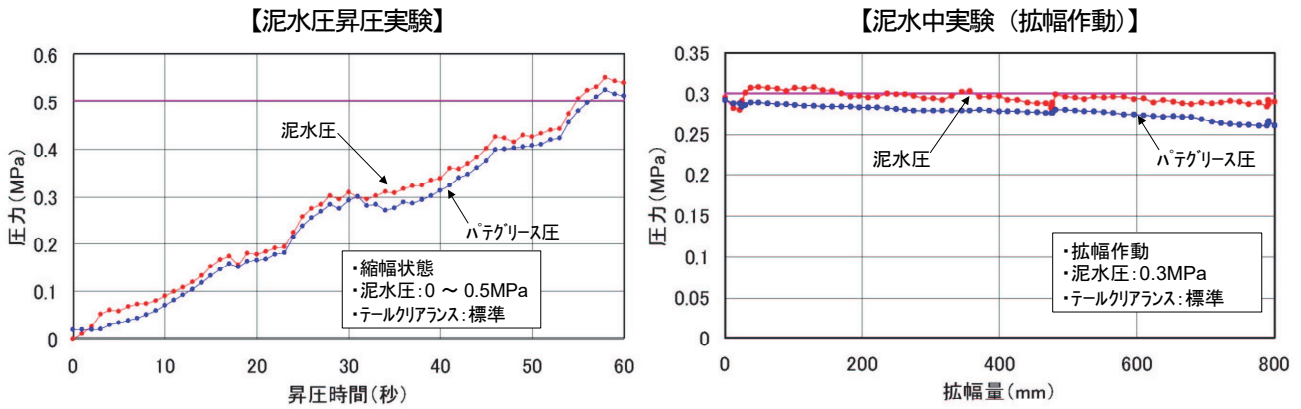


図-13 実験結果

実験により確認された事項を以下に記す。

- i. 大気実験によりテールシール伸縮構造に問題がないこと
- ii. 泥水圧昇圧、保持実験により泥水圧 0.5MPa の耐水圧があること
- iii. 泥水中実験により泥水圧下での拡幅、縮幅作動状態に問題がないこと
- iv. 拡幅、縮幅作動時においてパテグリースの圧力管理により、泥水圧保持が可能なこと

なお、実施工では拡幅、縮幅速度は 1.7～2.5mm/min (実験の拡幅、縮幅の速度は 24mm/min) でありほぼ静止状態の連続であることから、0.5MPa までの作動にも大きな支障はないものと判断する。

また、今回の一連の実験を通して、実用化に向けての課題の抽出を行った。実機への適用にあたっては、固定側スライドテールシールおよびラップシールの耐久性を向上させるためにワイヤ入りゴムシールの採用、また、バー嵌合部への土砂等の噛みこみ防止として、嵌合部シャッタ機構や洗浄装置等の採用を検討する (写真-2 参照)。しかしながら、いずれの課題についても現状での技術にて対応が可能であるものと考えられる。

5. おわりに

大深度におけるランプトンネルの地中分岐合流部の新しい施工法として「CV拡幅工法を用いた分岐合流部の地中接合法」の基本構想を確立した。さらに、当該工法における覆工構造の検証、CV拡幅シールド機の各機構の確定およびテールシール性能確認実験により所要の性能が確認でき、CV拡幅工法の実用化、

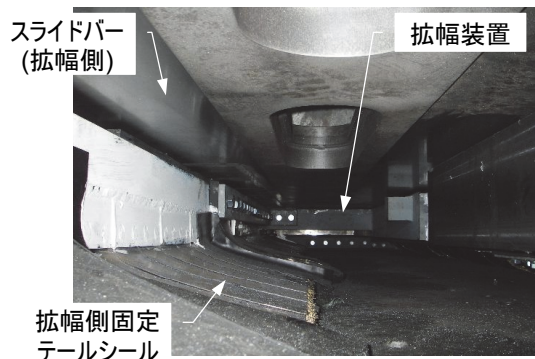


写真-1 実験状況 (大気実験)

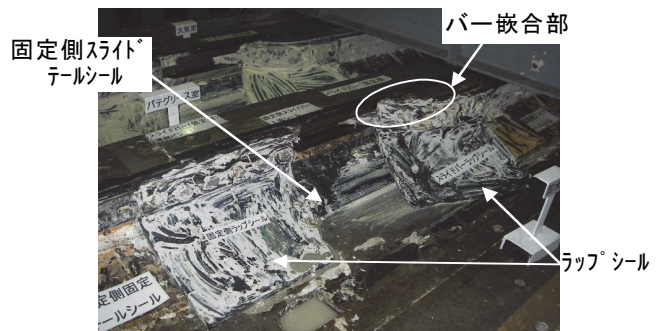


写真-2 実機への課題

本工法の実現性に目途が立った。

今後、積極的に技術提案を行うとともに、実工事への適用を目指したい。

【参考文献】

- 1) (社)土木学会、「トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説 (平成8年版)」, 丸善, p190、1996
- 2) (社)日本道路協会、「道路構造令の解説と運用」, 丸善, pp176～189、203～215、276～280、2004
- 3) 首都高速道路公団、「首都高速道路トンネル構造物設計要領」, pp14～16、26～28、39～50、2003