

維持管理を目的とした箱型トンネルの施工法の調査部会
報告書

2025 年 12 月

はじめに

都市部のトンネルでは近接施工の影響等を除くと外力による変状は少なく、その維持管理において問題となっているのは、主に漏水とそれに起因する鉄筋腐食等の変状である。漏水発生メカニズムや漏水経路は、トンネルの施工法によって異なるが、多くの都市トンネルが経年 50 年を超えるものでは 100 年を超えて供用されている。その間、トンネルの施工技術は変遷・進歩し続いているため、現在の施工技術に基づいた場合、効果的な維持管理が難しいことがある。

既設トンネルを維持管理するうえで、そのトンネルの施工法を理解しておくことは重要である。しかし、特殊な施工法は事例の少なさもあって、とりまとめた公開資料が少ない。また、当時を知る技術者達も現役を離れつつある。時が経つにつれて、そのような情報を収集することが困難になるという危機感から「維持管理を目的とした箱型トンネルの施工法の調査部会」を立ち上げた。

本部会では、建設初期のケーソン工法によるトンネル、連壁本体利用の開削トンネル、河川部等で特別な開削工法により施工されたトンネルを対象として、その施工法、施工法に起因する漏水や劣化の発生状況を調査、整理した。

本部会の立上げ時期には COVID-19 感染拡大にもなう緊急事態宣言が繰り返されていた。従来のような議論が困難な状況下、精力的な活動で本報告書をとりまとめた委員各位、調査にご協力いただいた事業者の皆様に深謝の意を表する。本報告書が、特殊な施工法で建設された既設の箱型トンネルの長寿命化に、あるいは今後建設されるトンネルの品質向上に活用されれば幸いである。

2025 年 12 月
トンネル工学委員会 技術小委員会
維持管理を目的とした箱型トンネルの施工法の調査部会
部会長 小西真治

トンネル工学委員会 技術小委員会
維持管理を目的とした箱型トンネルの施工法の調査部会 名簿

部会長	小西 真治	(株) アサノ大成基礎エンジニアリング 事業推進本部
副部会長	岩波 基	株式会社 岩波地下構造技術士事務所
幹事長	牛田 貴士	(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル
委員兼幹事	麻生 勇人	東京地下鉄(株) 工務部
委員	伊藤 昌弘	東京都 交通局 建設工務部 保線課 計画調整担当
委員	今中 康貴	(株) 大林組 本社 土木本部 生産技術本部 設計第一部
委員	越後 卓也	パシフィックコンサルタンツ(株) 交通基盤事業本部
		トンネル部 都市トンネル室
委員	高木 一行	横浜市 交通局 工務部
委員	鍋島 寛之	大阪シティバス(株)
委員	並木 智和	オリエンタル白石(株) 本社技術本部
		技術部 国土強靭化対策チーム
委員	守田 貴裕	(株) 安藤・間 土木事業本部 土木技術第一部
		都市土木(開削) グループ
委員	山口 哲司	(株) 熊谷組 土木事業本部 土木設計統括部 土工・開削部
オブザーバー	菅原 健	東京地下鉄(株) 工務部
オブザーバー	鶴岡 正宏	横浜市 交通局 工務部 施設課
オブザーバー	西村 有加	横浜市 交通局 工務部 施設課 施設係
オブザーバー	深海 未歩	大阪市高速電気軌道(株) 交通事業本部
		次世代モビリティ推進部 モビリティ最適ミックス推進課
オブザーバー	柳川 知道	大阪市高速電気軌道(株) 交通事業本部
		次世代モビリティ推進部 推進担当課

前委員兼幹事	神澤 拓	東京地下鉄(株) 工務部*
前委員兼幹事	近藤 謙一	東京地下鉄(株) 工務部*
前委員兼幹事	角田 隆太	東京地下鉄(株) 工務部*
前委員	石井 聰	東京都 交通局 建設工務部 保線課統括*
前委員	江口 清司	大阪市高速電気軌道(株) 技術部 技術管理部*
前委員	甲斐 紳也	パシフィックコンサルタンツ(株) 交通基盤事業本部
		構造技術部 都市トンネル室*
前委員	土川 孝雄	東京都 交通局 建設工務部 保線課 計画調整担当*
前委員	橋本 芳実	横浜市 交通局 工務部*

前オブザーバー 上杉 知 横浜市 交通局 工務部 施設課*

前オブザーバー 望月 啓明 横浜市 交通局 工務部 施設課*

前オブザーバー 田中 和也 東京地下鉄（株） 工務部*

*所属は当時

維持管理を目的とした箱型トンネルの施工法の調査部会 報告書
目次

1. はじめに	I-1
1.1 背景	I-1
1.2 目的と意義	I-2
1.3 用語の定義	I-3
2. 特殊な箱型トンネルの現状調査	II-1
2.1 調査の方法	II-1
2.2 ケーソントンネルに関する調査結果の概要	II-2
2.3 連壁本体利用の開削トンネルに関する調査結果の概要	II-5
3. 建設初期のケーソントンネル	III-1
3.1 構造・施工法の特徴	III-1
3.2 想定される漏水メカニズム	III-11
3.3 維持管理の事例	III-14
3.4 維持管理における留意点	III-28
3.5 現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点	III-29
4. 連壁本体利用の開削トンネル	IV-1
4.1 構造・施工法の特徴	IV-1
4.2 想定される漏水メカニズム	IV-7
4.3 維持管理の事例	IV-10
4.4 維持管理における留意点	IV-21
4.5 現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点	IV-23
5. その他の特殊な開削トンネル	V-1
5.1 構造および施工法の紹介	V-1
5.2 構造物の変状と想定されるメカニズム	V-7
5.3 維持管理の事例	V-10
5.4 維持管理における留意点	V-11
5.5 現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点	V-12
6. まとめ	VI-1

1. はじめに

1.1 背景

都市部のトンネルは安定した地盤内に建設されていることから、近接施工の影響を除いて、山岳部のトンネルのように地盤の膨張圧や斜面のすべり等の外力により変状することは少ない。とくに、都市部の箱型トンネルの維持管理で問題になっているのは漏水とそれに起因する鉄筋の腐食やコンクリートの劣化がほとんどである。これらは、供用開始後の急激な環境変化というよりは施工方法に起因する場合が多いと考えられている。様々な調査結果を包括的にみると、とくに建設初期のケーソン工法により設置された函体を繋げたトンネル（以下、ケーソントンネルと呼ぶ）や地下連続壁を本体利用した開削トンネルあるいは河川部等で特別な開削工法により施工されたトンネルといった特殊な箱型トンネルでは、漏水やそれに伴う塩害等の変状が発生しているケースが多くみられる。これらに対する対策は取られているものの、建設当時の正確な施工方法を把握せずに対応している場合が多く、再劣化を起こした例も見られる¹⁾。また、剥落などの不具合が生じた際に、すべての箇所を簡易に点検するより、同様の現象が起きやすい、同じ施工を行った箇所を重点的に調査する方が効率もよく合理的である。この様なことから、維持管理を行ううえで、施工方法を理解しておくことは重要である。

しかし、今回、対象としているケーソントンネルは、現在では、ほとんど施工されておらず、資料も各事業者が個別に所有しており、詳細な施工方法が分からなくなりつつある。また、地下連続壁を本体利用する開削トンネルは時代とともに施工方法や構造の考え方が変化しており、維持管理上は古い時代の資料を残しておく必要がある。さらに、河川部等で特別な開削工法により施工されたトンネルについても、様々なケースがあり資料を整理して残しておく必要がある。

このように将来の維持管理のためにも、これらの古い箱型トンネルの施工方法や構造の考え方を調査し次の世代に引き継ぐことが必要である。そこで本部会では、それらの構造物の劣化事象をまとめるとともに、その原因と考えられる当時の施工方法について調査して報告書をとりまとめた。

参考文献

- 1) 瀬筒新弥、山本努：河川を横断する地下鉄潜函トンネルの塩害対策、土木学会トンネル工学報告集、Vol. 20, pp. 395-402, 2008.

1.2 目的と意義

都市部の箱型トンネルで劣化を引き起こす原因となっている漏水について、その発生メカニズムを整理するとともに、影響が大きいと想定される施工方法について調査する。具体的には、建設初期のケーソントンネル、地下連続壁を本体利用した開削トンネル、河川部等で特別な開削工法により施工された箱型トンネルについて、当時の施工方法および止水工法を調査し、将来のためにそれらの情報が逸散しないように記録を残すとともに、現在の漏水や劣化の発生状況を調査、整理した。

本部会で調査・整理した情報が、既設トンネルの長寿命化に、あるいは新設トンネルの品質向上に寄与することを願って本報告書をとりまとめた。

1.3 用語の定義

本報告書で用いる主な用語を以下に示す。ここに記載のない用語は『トンネルライブラリー第26号 トンネル用語辞典2013年版』等を参考にされたい。

- ケーソントンネル : 複数のケーソンを繋ぎ合わせてトンネルを構築したもの。
- 連壁本体利用 : 開削トンネルの構築に使用した地下連続壁を本体構造物として利用すること。そのように施工された開削トンネルを、本報告書では地下連続壁を本体利用した開削トンネル、あるいは連壁本体利用の開削トンネルと称する。
- 継手部 : ケーソントンネルにおいては、ケーソン間の接続部分またはケーソン沈設後に地中で施工された部分。連壁本体利用の開削トンネルにおいては、エレメント間あるいは鉄筋かごの接続部分。
- シャフト孔跡 : シャフトを貫通させるために底版スラブや中床スラブに設けられた施工時開口を、施工後に閉塞した部分。

2. 特殊な箱型トンネルの現状調査

2.1 調査の方法

特殊な箱型トンネルの現状調査は、本部会で対象とした特殊な箱型トンネルのいずれかを保有することが想定された事業者を対象とした。6社の鉄道事業者、2社の道路事業者に依頼し、全社にご協力をいただいた。

現状調査は、全体的な状況把握、個別事例の情報収集の2段階で実施した。全体的な状況把握では表2.1-1のアンケートおよびヒアリングにご協力いただいた。その際、各社の保有する全構造物についてではなく、施工年代や構造物の現状等を勘案のうえ、対象を抽出して回答していた。また、個別事例の情報収集では、さらに対象構造物を選定して、当該構造物の施工方法や現状に関する情報・資料をご提供いただいた。

表2.1-1 アンケート項目

質問	備考
1 対象構造物保有の有無	その他開削トンネルは工法名をご記入ください。 有の場合、代表的な構造物名と施工年代をご記入ください。 とくに、①施工年代が古い（今と施工法が異なる）、②維持管理上の苦労がある構造物について、ご回答いただければ幸いです。
2 変状・不具合	有・無でご回答ください。
3 主な変状・不具合の内容	記述おねがいします。
4 補修・補強・計測監視の内容	記述おねがいします。
5 今後の維持管理計画	補修・補強・計測監視等の個別対応の計画がありましたらご回答ください
6 資料提供の可否	今後、別途、資料提供をご相談させていただけますでしょうか。難しい場合は「否」でご回答ください。 ① 設計・施工に関する資料 例：設計計算書、設計図、竣工図、施工記録、工事史、公開文献等etc… ② 維持管理に関する資料 例：変状の調査報告書、補修・補強・計測監視に関する設計・施工の記録、公開文献等etc…

・その他開削トンネルは、一般的な開削工法とは異なる方法で施工されたものを想定しています。

例：トレーニング工法、河川締切工法、パイプルーフ工法、沈埋トンネル

・それぞれ対象構造物がない場合は、2番以降の記入は不要です

・可能な範囲でご回答いただければ幸いです。

2.2 ケーソントンネルに関する調査結果の概要

2.2.1 概要

全体的な状況把握のアンケート調査結果から、ケーソントンネルを保有していた鉄道事業者6社および道路事業者1社に詳細なヒアリング調査を行った。各社のケーソントンネル保有量は、A社が延長3722.5 m（工事区間24箇所）、B社が延長2637.5 m（工事区間21箇所）、C社が延長541.7 m（工事区間4箇所）、D社が延長456.5 m（工事区間2箇所）、E社が延長104.0 m（工事区間1箇所）、F社が延長104.0 m（工事区間1箇所）、G社が延長50.0 m（工事区間2箇所）であった。なお、電力洞道や下水道等を管理する事業者にも問い合わせたが、ケーソン工法でトンネルを施工した事例はとくにないとのことであった。

ケーソンを接続してトンネルを構築する工法は、日本では河川横断部や軟弱地盤部を対象に1930年代から採用され、1960～1970年代に多くのトンネルが施工されている。

しかし、河川を長期間締切り、洪水に対する安全性や船の航行の障害になることが問題になっていた。1980年代以降、凍結工法やシールド工法の技術が発展し施工事例が増えると、これらの工法で河川横断工事を行い、ケーソントンネルは数例を除いてほとんど建設されなくなった。ケーソントンネルに関する詳細は、本報告書の3章にとりまとめた。

2.2.2 構造物の状況について

アンケートおよびヒアリング調査の結果、ほぼすべてのトンネルで、漏水、浮き、コンクリートの剥落、鉄筋露出、鉄筋腐食が見られるとの回答であった。また、塩害による不具合が多く、とくに、ケーソン間の継手部からの漏水に伴う鉄筋腐食、コンクリートのひび割れや爆裂、断面欠損、補修部分の補修材の浮きが見られるとのことであった。**図2.2.2-1、2.2.2-2**に例を示す。ケーソン同士を接続したトンネル以外に、ケーソンと沈埋函を接続した例もあるが、こちらも継手部分に同様の不具合が報告されている。これらの不具合は、施工時の条件や工法の影響が大きいと考えられる。

ヒアリング調査から、漏水に起因する不具合が一番問題で、とくに、塩害が問題であることを確認した。漏水については、ケーソン間の継手部に多く発生しており、圧気用のシャフト孔跡からの漏水（**図2.2.2-3**）も問題になっていた。また、底版（下床版）については鉄道ではインバートや道床が存在して目視観察ができないため、変状が直接確認されることはない。しかし、漏水による排水量が側壁、頂版（上床版）からの漏水量より多い場合が多く、底版（下床版）からの漏水についても注意が必要と事業者が考えていることが分かった。

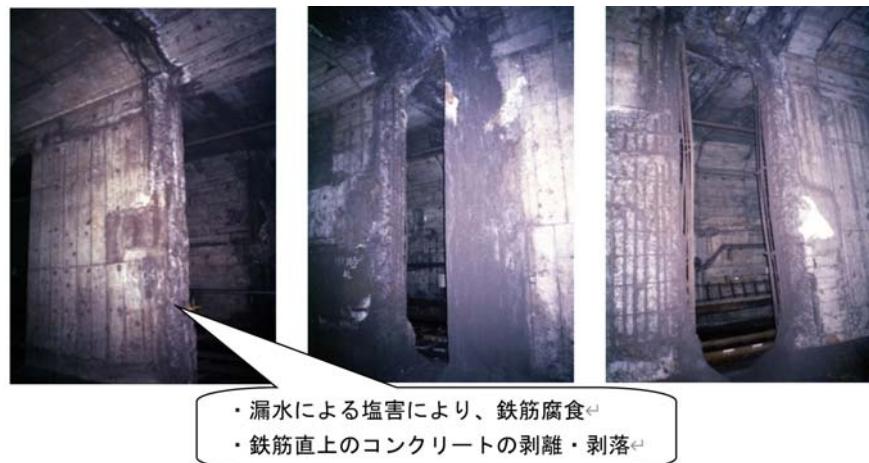


図2.2.2-1 ケーソン継手部の変状例¹⁾

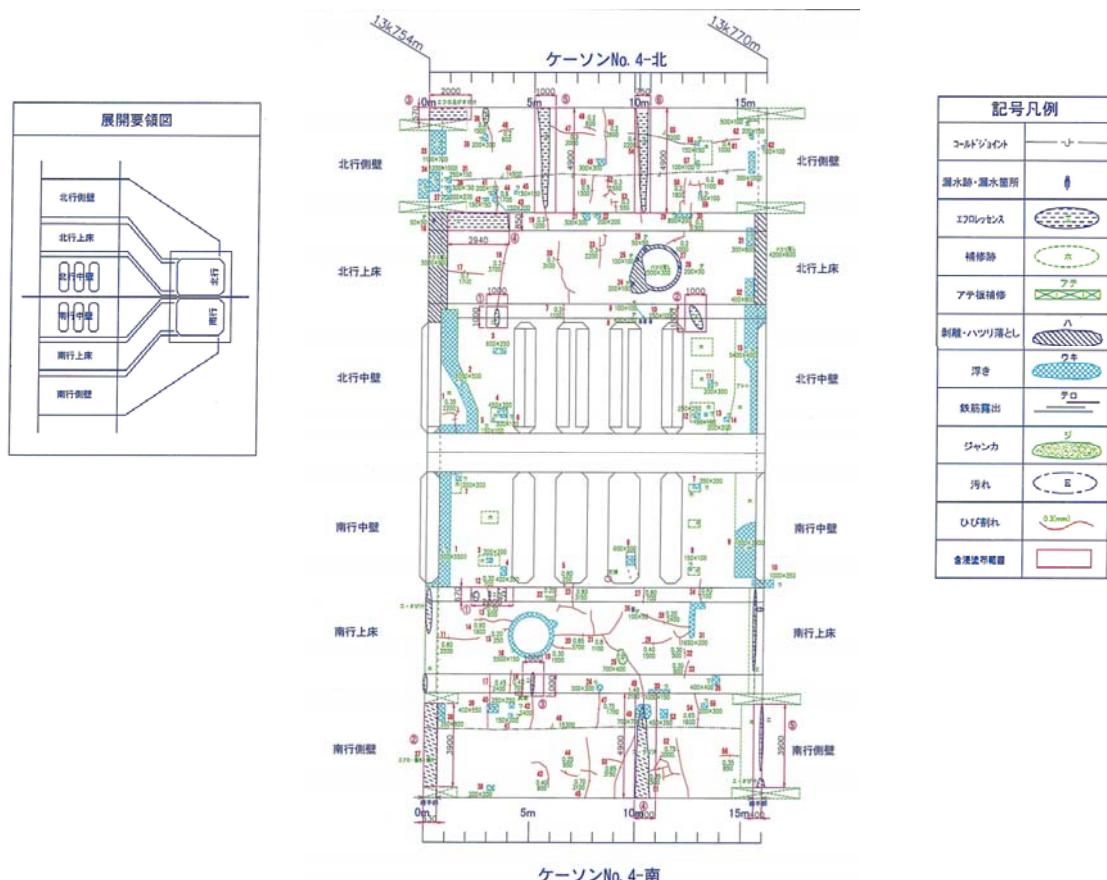


図2.2.2-2 ケーソントンネルの変状例¹⁾



図2.2.2-3 シャフト孔跡の補修例²⁾

2.2.3 維持管理について

維持管理については各社とも打音点検を行い、劣化部分をはつり落とし、必要に応じて止水注入あるいは樋設置による導水、断面修復等の補修を行っているとの回答であった。塩害対策として、鉄筋の防錆処理、犠牲陽極材設置、断面修復、含侵剤塗布を行っているケースが多かった。犠牲陽極材の代わりに塩分吸着材を鉄筋の周りに設置する例もあった。

そのほか、はく落に対する予防保全として表面保護被覆、剥落防止ネットの設置等が行われているとの回答もあった。また、継手部の漏水に対して、現在、導水樋の設置および犠牲陽極による管理を検討中との回答もあった。

参考文献

- 1) 亀井啓太,阿部敏秀,野口正則,辻口貴大：河川下の地下鉄潜函トンネルの塩害対策工事、地下空間シンポジウム論文・報告集第22巻, pp. 44-48, 2016.
- 2) 東京都交通局：浅草線日本橋川交差部構築調査委託報告書、東京都交通局, 2007.

2.3 連壁本体利用の開削トンネルに関する調査結果の概要

2.3.1 概要

ヒアリングにご協力いただいた鉄道事業者6社と道路事業者1社が連壁本体利用の開削トンネルを保有していた。各社の保有量に関する全数調査は実施していないが、全延長に占める割合は小さいと想定された。連壁本体利用は、主に近接構造物との離隔が近い場合等に掘削幅縮小を目的として採用されていた。我が国では1961年に地下鉄丸ノ内線¹⁾において連壁本体利用が初めて行われ、イコス工法が適用されている。当時は、特殊クラムシェルを櫓からワイヤーで吊り下げて、それを上下させて掘削が行われた。図2.3.1-1および図2.3.1-2に当時の施工状況を示す。

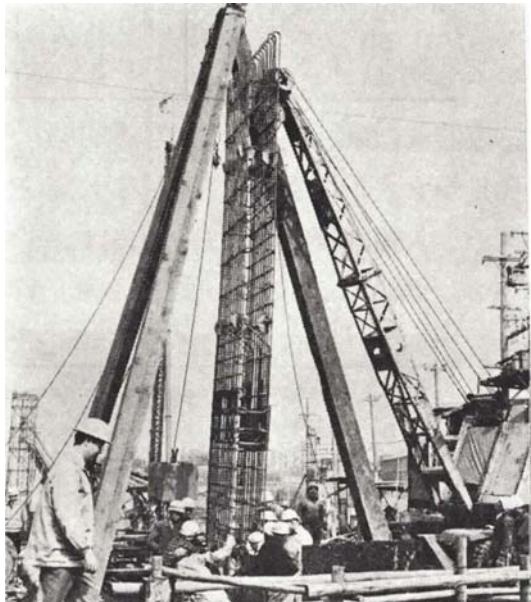


図2.3.1-1 鉄筋かご吊り込み状況¹⁾



図2.3.1-2 完成したイコス式隧道¹⁾

一般的な開削トンネルでは、躯体の施工に必要な掘削幅が確保されれば、土留め壁の施工精度は本体構造物に直接影響を及ぼさない。しかし、連壁本体利用では土留め壁を本体構造物として利用するため、傾斜等が直接的に影響することになる。その対応として、側壁と下床版の接続部に縦断方向鉄筋を配置することで対応した事例もあった。

連壁本体利用は基本的な施工方法は当初のものを踏襲しつつ、エレメント間継手の開発等が行われながら、近年も用いられていることが分かった。また、RC製または鋼製の地下連続壁を本体利用する事例が多くを占めたが、プレキャストPC版を本体利用した事例も情報提供いただいた。これらの連壁本体利用の開削トンネルに関する詳細は、本報告書の4章にとりまとめた。

2.3.2 構造物の状況について

アンケートおよびヒアリング調査の結果、ほぼすべてのトンネルで、漏水が見られるとの回答であり、変状の種類は一般的な開削トンネルと同様であった。また、発生箇所については内壁等で特定は困難であることが多いものの、連壁本体利用区間と一般区間の境界付近で変状がみられるという回答もあった。なお、いずれも変状の程度が軽微、継続監視あるいは対策済み等の理由により、現時点ではトンネルの健全性に大きな影響はないと考えられていた。

ここで、開削トンネルでは、防水シート等により外防水を施すことが一般的である。しかし、連壁本体利用の開削トンネルでは、側壁の外防水を施すことができない。本調査では、因果関係を結論付けるには至らなかったが、そのような構造的特徴に起因して漏水が発生し、その他の変状を誘発した可能性が考えられる。

2.3.3 維持管理について

維持管理については各社とも必要により樋設置による導水、経過観察を行っているとの回答であった。また、耐力向上を目的に鋼板補強を実施した事例もあったが、一般的な開削トンネルと同様に、多くは漏水対策を主目的としたものであった。

連壁本体利用の開削トンネルでは、側壁に内壁（化粧壁の場合も含む）を施工して、内空側表面はRC部材となることが多い。そのため、一般的な開削トンネルとおおむね同様の維持管理が行われているものと考えられる。なお、変状の発生位置については、内壁等で特定は困難であることが多いものの、連壁本体利用区間と一般区間の境界付近で変状がみられるという回答もあった。

参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道 萩窪線建設史、1967.

3. 建設初期のケーネントンネル

3.1 構造・施工法の特徴

3.1.1 本体部の施工について

ケーソン工法は本体を構築する位置によって、河底方式（河川内の築島で構築して沈設）、フローティング方式（他の場所で構築したものを曳航して沈設）、路上方式（路上で構築して沈設）、路下方式（路下で構築して沈設）に分けられる（図3.1.1-1、図3.1.1-2）。また、掘削については、圧気を用いる場合、用いない場合があり、無圧気の場合は、薬液注入や凍結工法で止水が行われていた。

一般に、河川部を横断する施工の場合は、河川の一部分を鋼矢板等で締め切って、その内部に築島して、ケーソンを施工、沈下させる。この際、圧気を用いる場合が多い（図3.1.1-3～図3.1.1-6）。

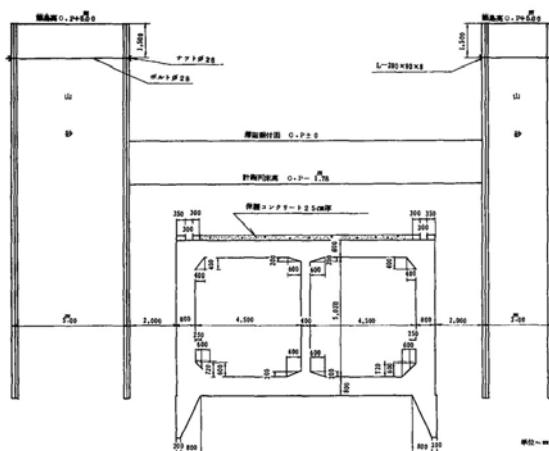


図3.1.1-1 フローティング方式の一例¹⁾

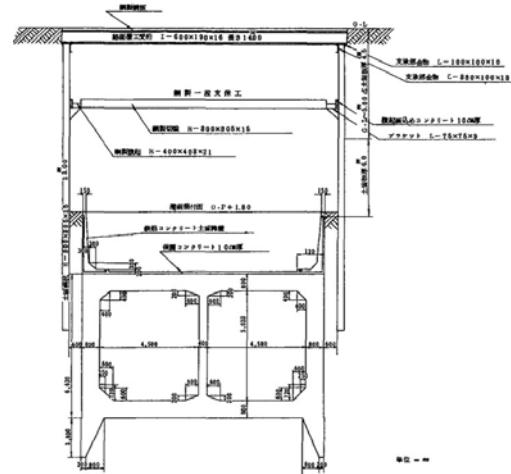


図3.1.1-2 路下方式の一例¹⁾

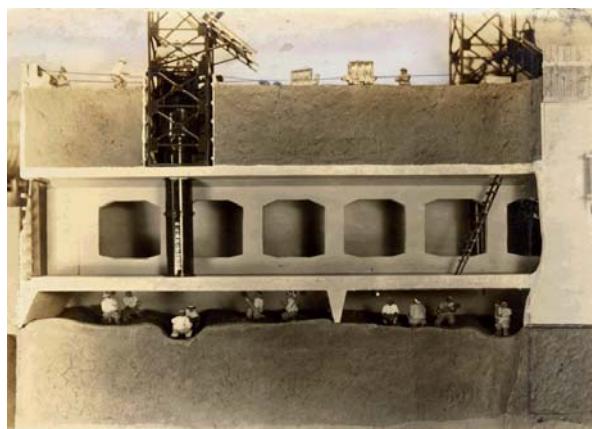


図3.1.1-3 潜函（ケソン）工法の説明模型²⁾

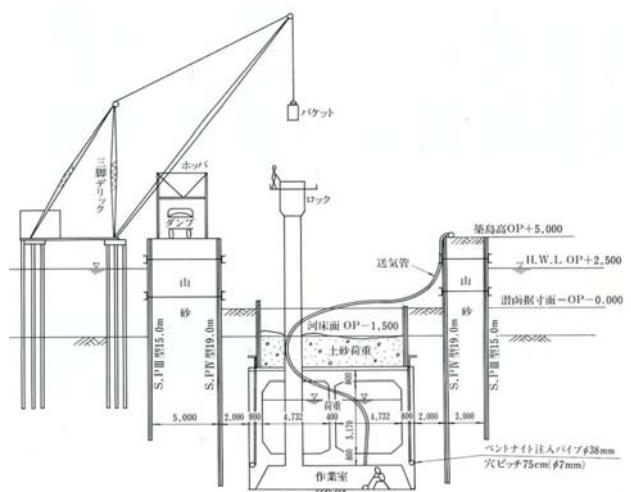


図3.1.1-4 一般的な圧気ケーソントンネル施工状況³⁾

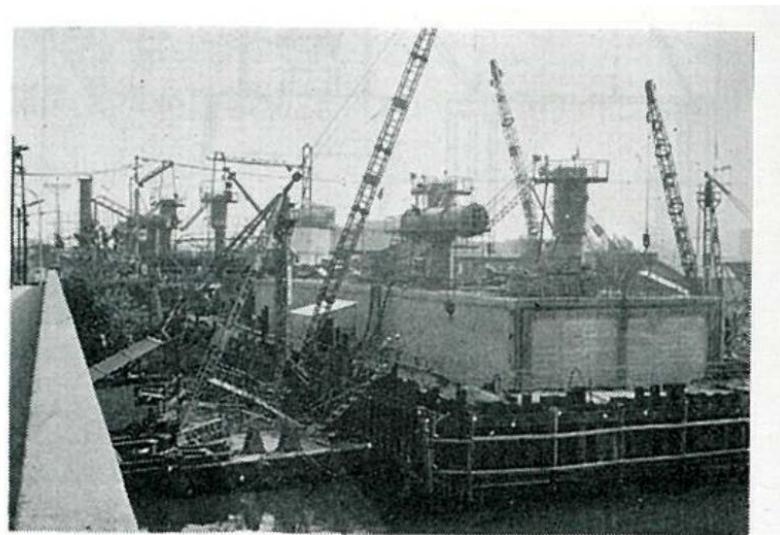


図3.1.1-5 ケーソン施工状況³⁾



図3.1.1-6 圧気掘削の様子³⁾

ここで、A社（東京メトロ）の事例を紹介する。工事位置は、川幅183m、最高水深8m、干満差が平時で1m、大潮時で2mを示す感潮区域で、流速は0~0.6m/secであった。地質は沖積層で、軟弱シルト層が河床面から約25m存在した。トンネルは両岸の陸上部を含め9基のケーソンを繋いで施工された（図3.1.1-7～図3.1.1-9）。施工位置には関東大震災で崩壊した橋りょうの残骸や橋台、橋脚が埋没していたため、それを撤去しながらの施工となりかなりの工期を要した。船舶の航行の問題から、川幅の約3分の2を常時航路に開放することになり、5次締切りで施工した。

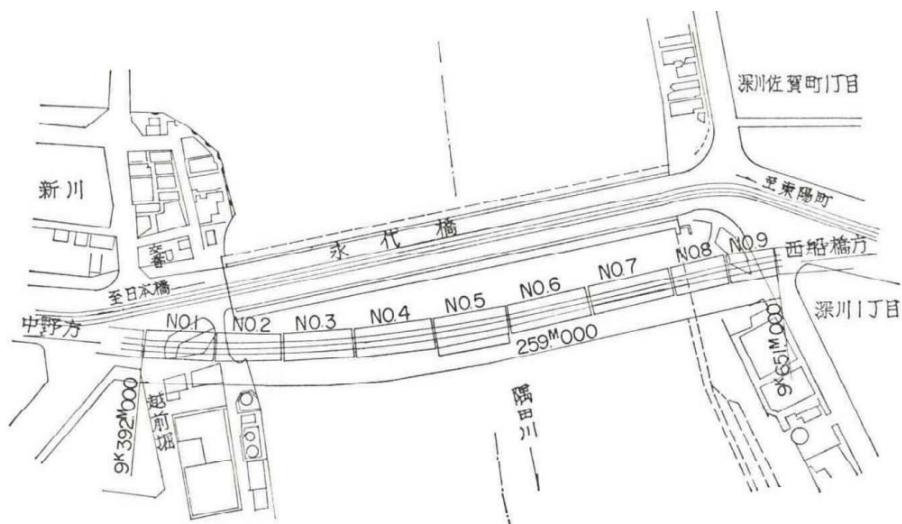


図3.1.1-7 ケーソントンネル平面図の例⁴⁾

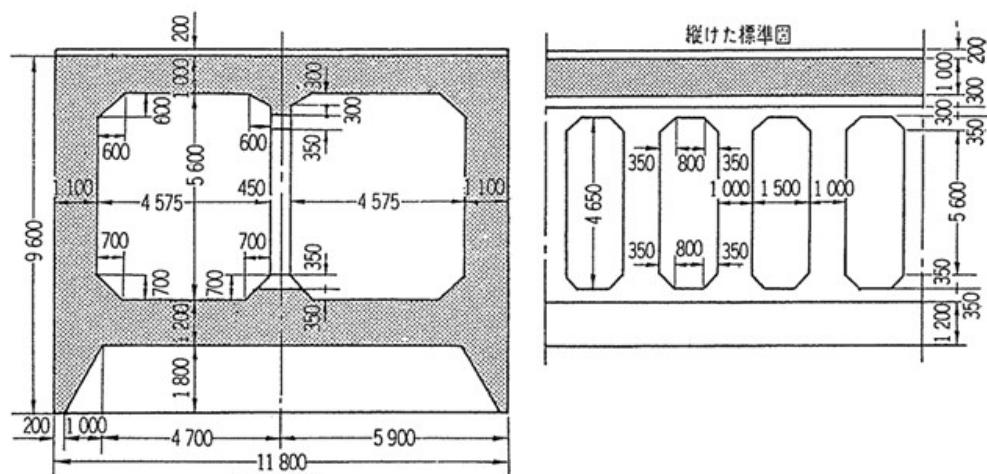


図3.1.1-8 ケーソントンネル断面図の例⁴⁾



図3.1.1-9 ケーソントンネル施工状況⁴⁾

次に、B社（大阪市交通局）のフローティング方式の例を紹介する。対象箇所は、一次締切り、二次締切りの2回に分けて施工することになっていたが、一次締切り時に、橋りょう桁下空間が少なく、鋼矢板打込みが不可能であったため、鋼製のフローティングケーソンを用いて図3.1.1-10中の3号ケーソンを仮締切りの一部として用いた。図3.1.1-11、図3.1.1-12にフローティングケーソンの施工順序と曳航状況を、図3.1.1-13に一般的なケーソンの断面図を示す。

C社（東京都交通局）の事例では、河川締切り期間を短くするため、護岸部をケーソン、河川部を沈埋トンネルで施工している。また、高速道路でも沿岸部のトンネルで事例があったが、運河下で開削トンネル、ケーソン、沈埋トンネルを接続したパターンが2か所存在した。

ケーソンを沈下させる際には、あらかじめ計算により策定した沈下関係図に従い、必要に応じてケーソン内への水の充填やケーソン上部への土砂荷重を載荷することにより所定の位置まで沈下させたが、現場条件によってはケーソン壁面の摩擦力を減少させるため、ベントナイト水溶液などの滑材注入を施した例もみられる。（図3.1.1-14～図3.1.1-16）

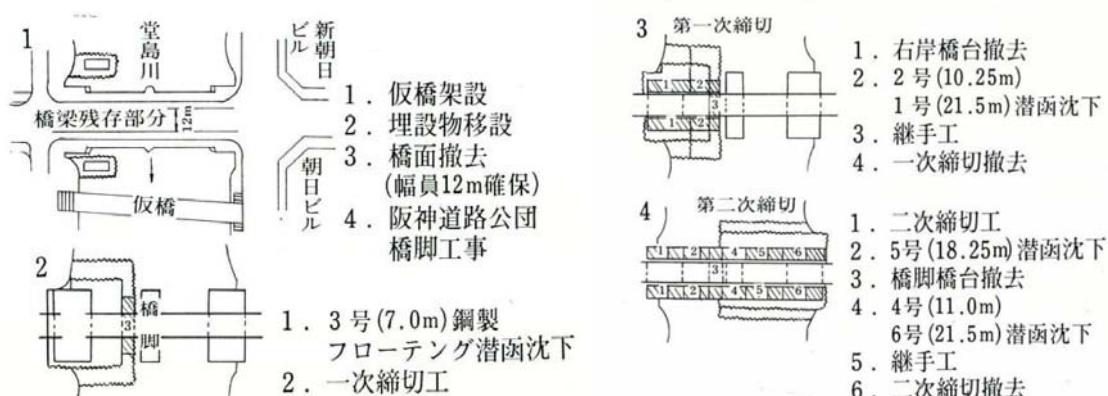


図3.1.1-10 全体施工順序図³⁾

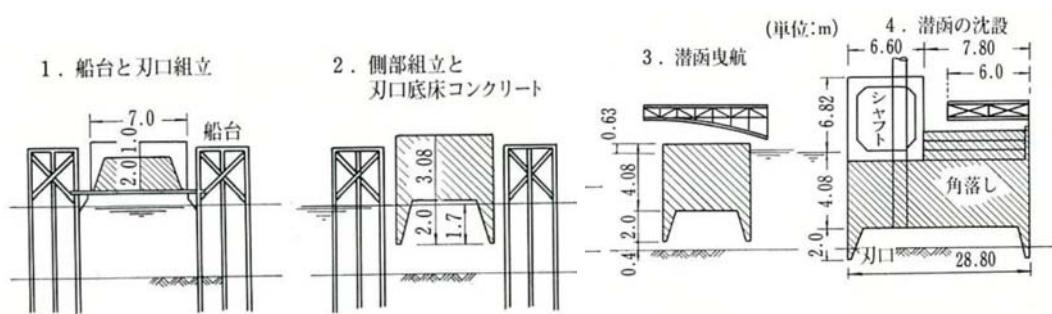


図3.1.1-11 フローティングケーソン施工順序図³⁾

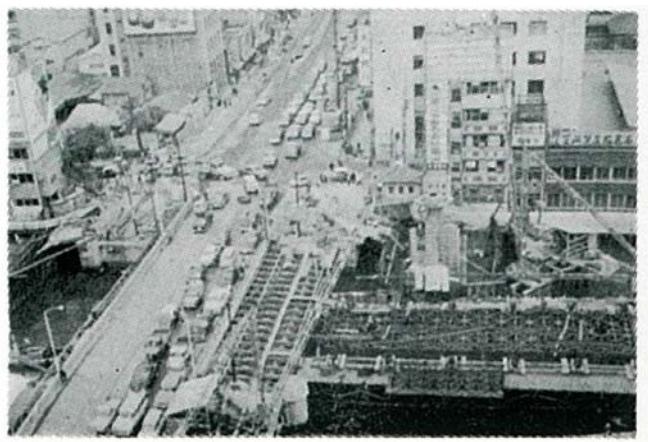


図3.1.1-12 フローティングケーソン曳航状況³⁾

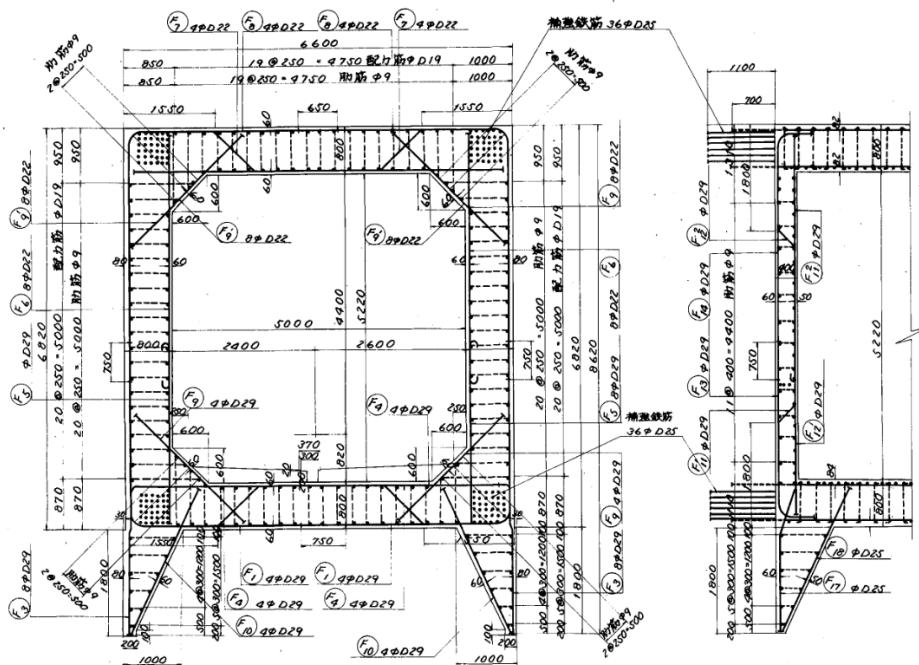


図3.1.1-13 ケーソン構造図⁵⁾

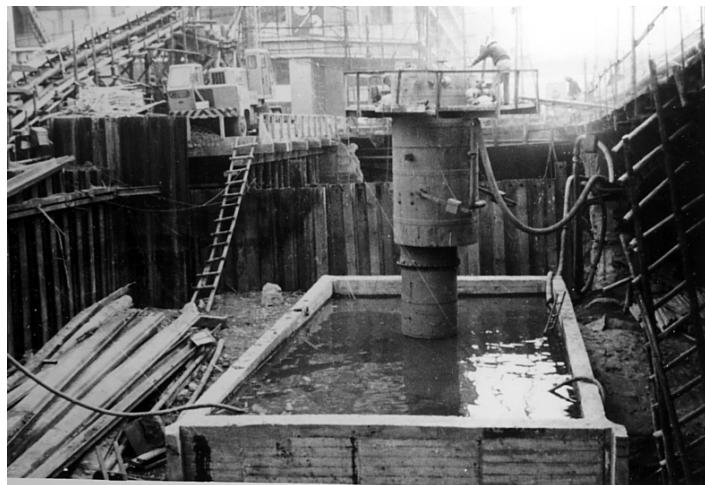


図3.1.1-14 ケーソン沈下状況（水充填）²⁾



図3.1.1-15 ケーソン沈下状況（上部へ土砂載荷）²⁾

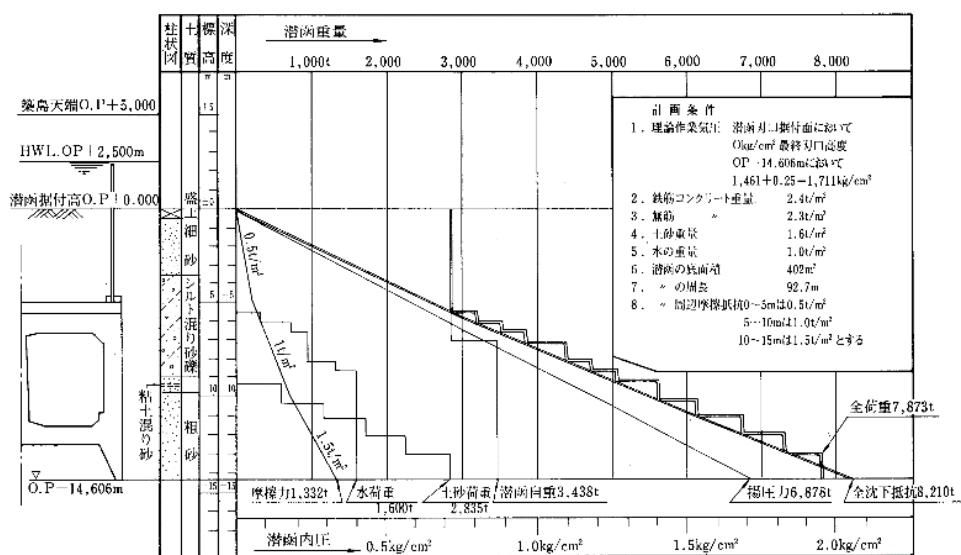


図3.1.1-16 ケーソン沈下関係図³⁾

3.1.2 継手部の施工について

調査では、ケーソン間の継手部の変状が問題になっているという結果であった。このため、継手部の施工方法についても調べた。ここでは、B社（大阪市交通局）の例を紹介する。

各ケーソンの間は1m程度（ここでは1.3m）離して施工し、沈設後圧気工法で継手部を構築した。この工法は、あらかじめケーソン沈下時に上床版上にカバーロック用の立上り壁を設けておき、両ケーソン沈設後に継手部分の土砂を開削工法で掘削し、カバーロックの上床版を打設した。これにシャフトを建て、圧気下でカバーロック上床版より下を掘削した。両側部分の土留めは、既設ケーソン外面に土留め板をはめ込み、漏気防止のため妻壁部の一次コンクリート（厚さ20cm）を逆巻きで打設した。床付け完了後に基礎コンクリートを打設し防水工を施して、底床版より順次構築を圧気内で施工し、養生後に圧気を停止してケーソン仮締切りを撤去し、両ケーソンを接続した（図3.1.2-1～図3.1.2-4）。ケーソン接手部の防水工は、内側にはモルタル防水、外側（地山側）にはシート防水と保護コンクリートを施工し、止水対策とした。また、シャフト部も同様の処置を行った。（図3.1.2-5、図3.1.2-6）

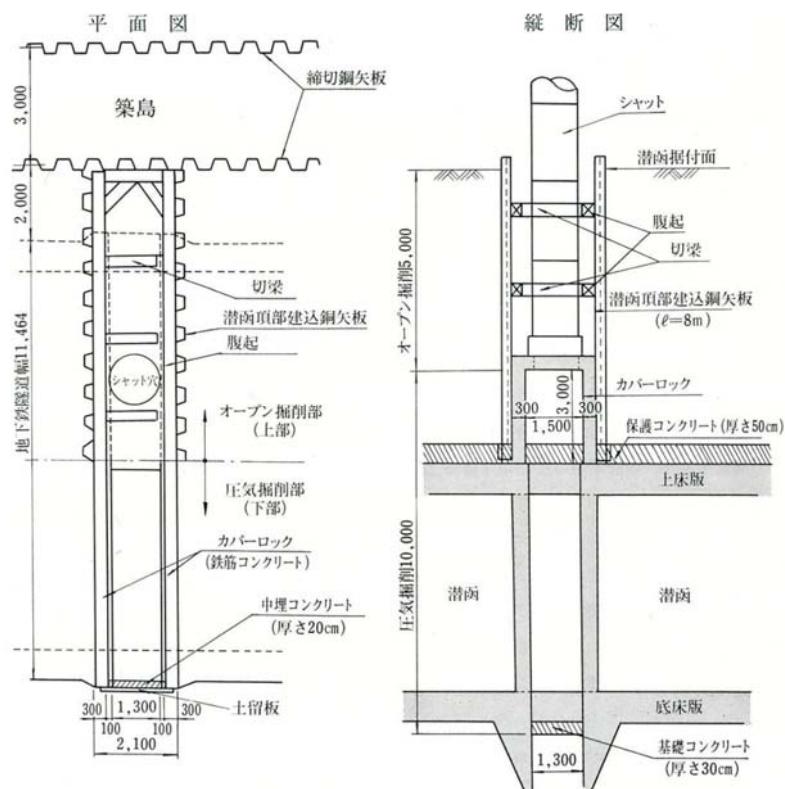


図3.1.2-1 ケーソン間継手部施工図³⁾

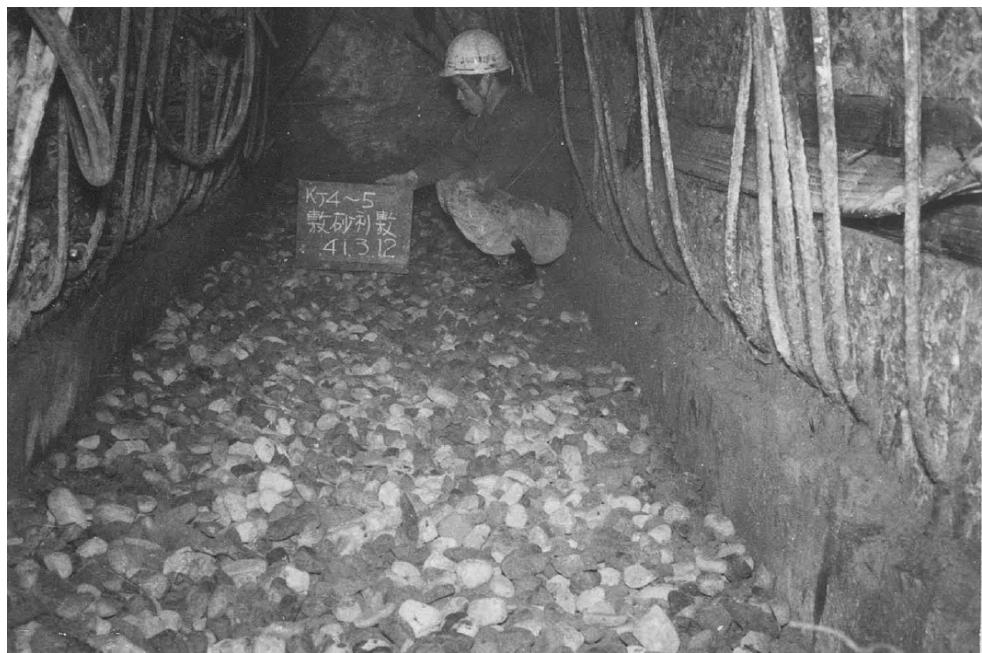


図3.1.2-2 ケーソン間接手部の状況（掘削完了敷砂利完了時の状況）⁶⁾



(a) 上床版鉄筋



(b) 底床版鉄筋

図3.1.2-3 ケーソン間継手部施工状況（鉄筋）⁶⁾

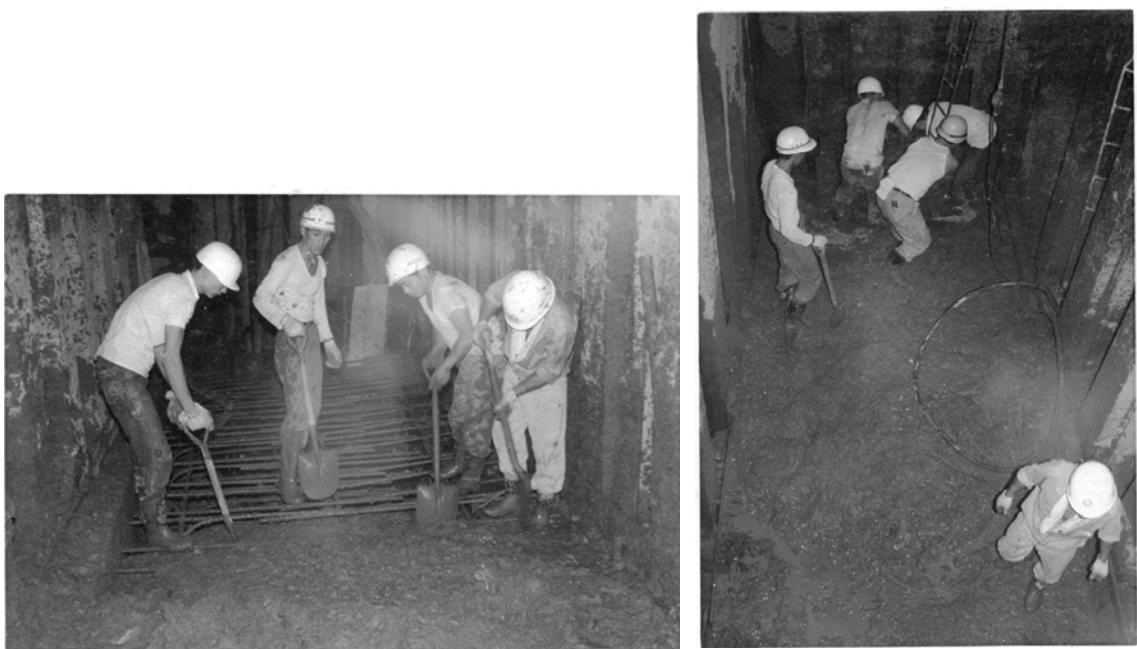


図3.1.2-4 ケーソン間継手部施工状況（コンクリート打設）⁶⁾



図3.1.2-5 接手部防水施工状況(モルタル防水)⁶⁾



図3.1.2-6 接手部(シャフト部)防水状況（地山側：シート防水+保護コンクリート）⁶⁾

A社（東京メトロ）の事例では、ケーソン沈設後、次期締切り用鋼矢板を延伸し、次のサイクルの締切り堤を構築するとともに、不要となった前回の締切り堤を撤去し、土砂を在来河底まで浚渫した。締切り完了後は2基統いてケーソンを沈設した後、上部に建て込んだ締切り用の鋼矢板を繋いで継手部を囲い、継手部上床版位置まで排水しながら掘削し、上床版コンクリートを打設した。同時に圧気設備を艤装して圧気しながら掘削し、下床版、側壁の順でコンクリートを打設してケーソンを継ぎ、その後仮壁を撤去して2基のケーソンを接続した。B社（大阪市交通局）との違いは、カバーロックがなく、直接上床版を施工しているところである（図3.1.2-7）。

また、A社（東京メトロ）では締切り撤去後に継手部を施工した事例もあった。護岸部で施工のケーソン設置が、旧橋台、橋脚、基礎撤去により大幅に遅延したため、河川部のケーソンとの接続が出水期となってしまった。このため、上床版コンクリートを打設し、圧気用シャフトを取り付けて、川中の締切り堤を撤去した後に継手部を施工した。この際、継手部を囲む締切り堤がないことにより懸念されるエアープローラや、ヒービング等を防止するため薬液注入により両側地盤を改良した。注入範囲は上床版より上2m、締切り鋼矢板のかわりとして側壁横の幅2mにわたって注入した（図3.1.2-8）。

このように、継手部の施工は、狭隘な空間で、十分な止水が出来ていない状態で進められたと考えられ、その品質も、ケーソン本体部よりは低くなつたと考えられる。

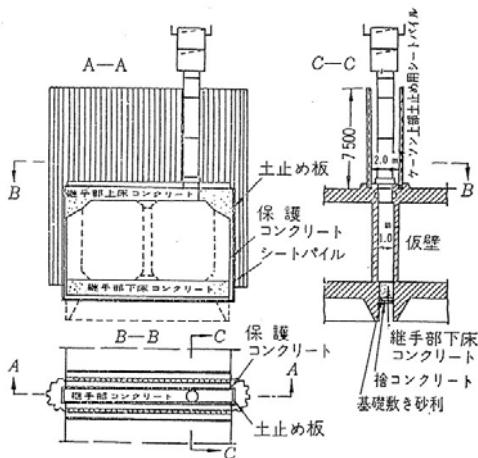


図3.1.2-7 ケーソン間継手部施工図⁴⁾

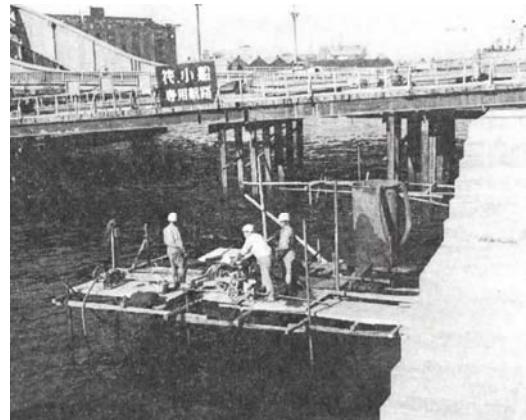


図3.1.2-8 ケーソン間継手部の薬液注入施工状況

参考文献

- 1) 大阪市交通局：高速電気軌道第2号線梅田～谷町四丁目間建設概要，1964.
- 2) 大阪市交通局：大阪市地下鉄建設70年のあゆみ，2003.
- 3) 大阪市交通局：大阪市地下鉄建設五十年史，1983.
- 4) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道東西線建設誌，1978.
- 5) 大阪市交通局：高速電気軌道第3号線西梅田～肥後橋間構造図，1963.
- 6) 大阪市交通局：高速電気軌道第4号線堺筋本町～谷町四丁目間（28工区）工事写真，1969.

3.2 想定される漏水メカニズム

ケーソントンネルの不具合発生の主原因である漏水と塩害については各社とも調査と対策検討を行っているが、ここではA社（東京メトロ）の検討を紹介する。A社（東京メトロ）では塩害区間の補修箇所が数年で再劣化したことにより、社内に検討委員会（委員長：大即信明東工大教授）を設置し約5年にわたって地下鉄トンネルの塩害についての劣化状況、メカニズムと対策方法についてまとめた^{1),2)}。

調査の結果、感潮河川を横断あるいは感潮河川に近傍したトンネルで、塩害が発生していた。そこで、トンネル躯体からの漏水に含まれる塩化物イオン濃度を把握するため、河川等と交差・近接する49箇所の中から漏水の多い20箇所を対象に漏水に含まれる塩化物イオン濃度を測定した^{1),2)}。当該調査の対象トンネルでは、感潮域河川下および河川端部から50m程度離れた位置まで漏水に高い濃度の塩化物イオンが含まれていることがわかった（図3.2-1）。ただし、この結果については、同様の調査を行ったB社（大阪市交通局）の例では、100m程度まで影響があり、地盤条件などによる地域性があると考えられる。

感潮域河川下にあるトンネル躯体のコンクリートから、103箇所のコアを採取し、トンネル内側表面（以下、トンネル内面と記す）からの深さと含有する塩化物イオン濃度を測定した。この結果、トンネル内面および鉄筋周辺において塩化物イオン濃度が高いことから（図3.2-2），トンネル内面側からトンネル躯体のコンクリート中に塩化物イオンが浸透し、塩害が生じている可能性が高いことがわかった（図3.2-3）。

次に、漏水に含まれる塩化物イオンのコンクリート壁への平面的な影響範囲について調査した。
①漏水跡箇所、漏水跡箇所の中心から、②300mm ③660mmおよび④1000mm離れた合計4箇所でコアを採取し、表面から深さ方向の塩化物イオン濃度を調査した。調査位置を図3.2-4に、調査結果を図3.2-5に示す。漏水跡の箇所で採取したコア①の塩化物イオン濃度は、表層部で11.0kg/m³以上あり、表層から深さ90mmの位置でも2.0kg/m³近い値であった。漏水箇所の中心から300mm離れた位置から採取したコア②の表層部における塩化物イオン濃度は3.6kg/m³であり、コア①の同位置と比較して著しく少なくなっている。また、コア②の内部およびコア③、コア④における塩化物イオン濃度は最大でも0.5kg/m³と非常に低い値であった。このことから建設時にコンクリート中に混入した塩化物イオン量（内在塩化物イオン量）は極めて少ないものと判断される。以上の結果から、漏水中の塩化物イオン濃度の面的な影響範囲は、漏水跡の認められている箇所の直下および漏水跡から200～300mmの範囲内であり、壁面の漏水からあまり広がらず浸透することがわかった^{1),2)}。

次に、ケーソントンネルに着目すると継手部の塩化物イオン濃度が高いことがわかった（図3.2-6）。そこで、トンネル内面から背面近くまで達する長尺コアを採取し、深さごとに5か所の塩化物イオン濃度の測定を行った（図3.2-7）。採取位置を図3.2-8に、塩化物イオン濃度分布を図3.2-9に示す。これらの結果から、ケーソントンネル継手部の目地付近の塩化物イオン濃度が高く、塩害が発生しやすいことがわかった^{1),2)}。

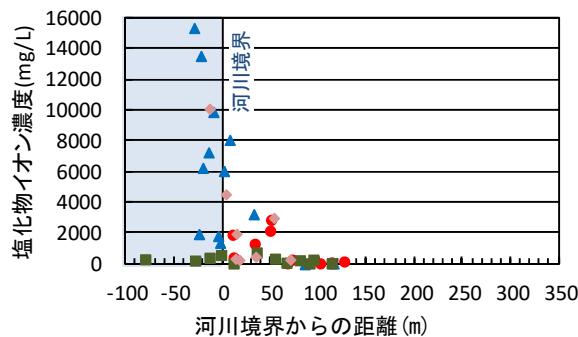


図3.2-1 感潮河川とトンネル漏水中の塩化物イオン濃度の関係¹⁾

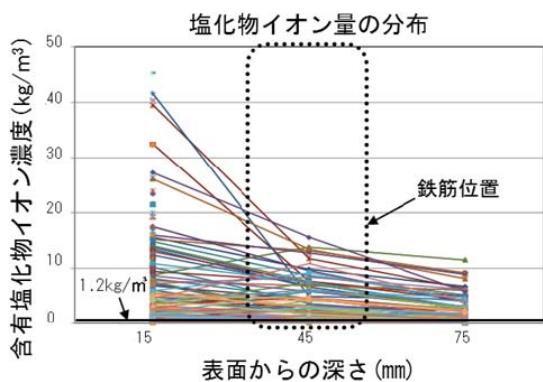


図3.2-2 箱型トンネルの塩化物イオン濃度の分布¹⁾ 図3.2-3 コンクリート内面への塩化物イオン浸透のイメージ²⁾

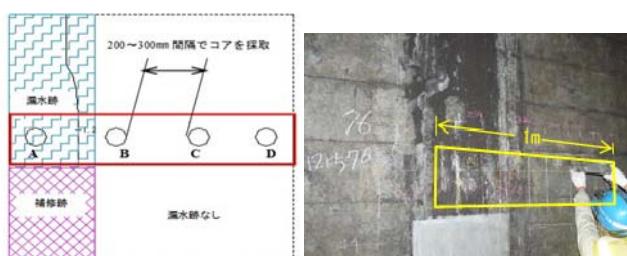
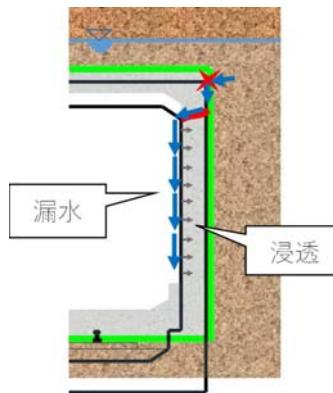


図3.2-4 塩化物イオン面的影響範囲調査用コア採取位置¹⁾

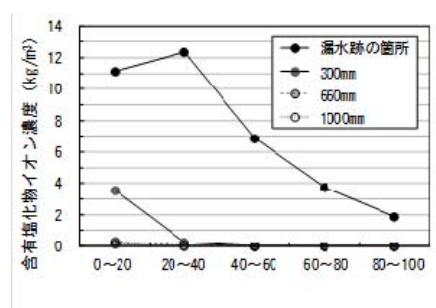


図3.2-5 採取位置別の塩化物イオン濃度¹⁾

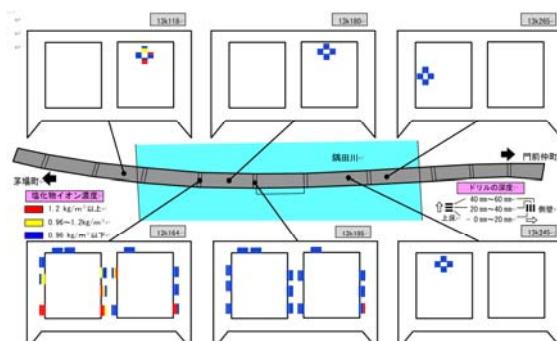


図3.2-6 ケーソントンネルの塩害調査結果²⁾

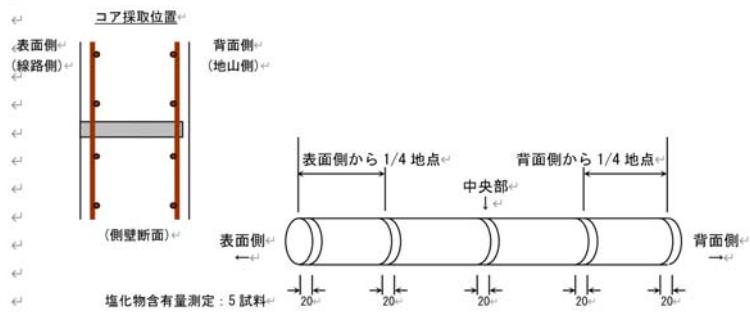


図3.2-7 ケーソントンネル側壁コア採取位置と測定位置¹⁾²⁾

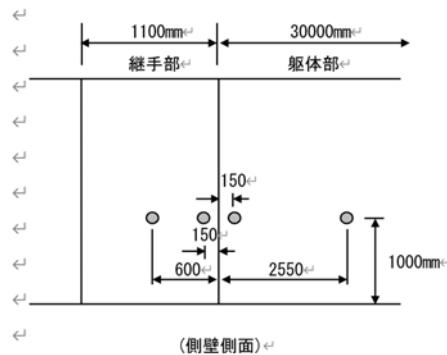


図3.2-8 ケーソントンネル側壁コア採取位置図²⁾

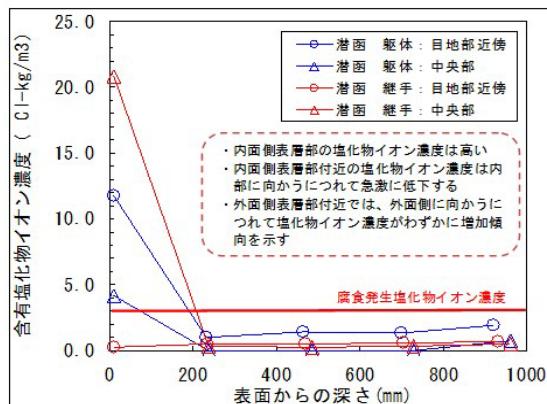


図3.2-9 ケーソントンネル側壁の塩化物イオン濃度分布図¹⁾²⁾

参考文献

- 1) 武藤義彦, 小西真治, 河畠充弘, 大即信明, 岸利治, 石田哲也 : 地下鉄箱型トンネルにおける塩害対策システムの構築, 土木学会論文集 E2, Vol.74, No.4, pp.275-292, 2018.
- 2) 武藤義彦 : 地下鉄箱型トンネルの塩害対策システム構築に関する研究, 東京大学博士論文, 2018.

3.3 維持管理の事例

3.3.1 概要

これまでのアンケート等により、ケーネルトンネルにおいては、工法的な特徴から継手部が弱点となり、漏水が多く発生していることが分かってきた。とくに、塩害による劣化が顕著に現れており、塩害を防ぐことが非常に重要な対策と考えられる。

そこで、本節では主に、塩害箇所における補修事例を紹介していく。

3.3.2 補修について

塩害の補修については、A社（東京メトロ）、B社（大阪市交通局）、C社（東京都交通局）は、犠牲陽極材を用いており、D社（横浜市交通局）は塩分吸着材を使用しているとの回答であった。

(1) A社（東京メトロ）の事例

A社（東京メトロ）の塩害対策における基本工法を表3.3.2-1に示す。まず、対象区間の漏水あるいは漏水跡がある箇所に硝酸銀を噴霧し、白く変色した部分を塩化物イオンが存在する部分と判断する。次に、この部分の打音検査を行い（図3.3.2-1），浮きがあれば、塩害が進行していると判断し補修範囲を定め、補修計画を立案する。補修は、漏水を止水した後この範囲を鉄筋背面まではり取り（図3.3.2-2），鉄筋の錆を除去した後、必要な場合は補強鉄筋を配置する。

表3.3.2-1 塩害対策における基本工法（A社（東京メトロ）の事例）¹⁾

No	変状状態	補修工法
①	漏水・漏水跡なし	対策なし
②	漏水・漏水跡あり (硝酸銀変化なし)	止水
③	漏水・漏水跡あり +硝酸銀白色に変化	止水 + 【塩害工法】表面含浸
④	漏水・漏水跡あり +硝酸銀白色に変化 + 濁音	止水 + 【塩害工法】犠牲陽極 + 断面修復 + 表面含浸

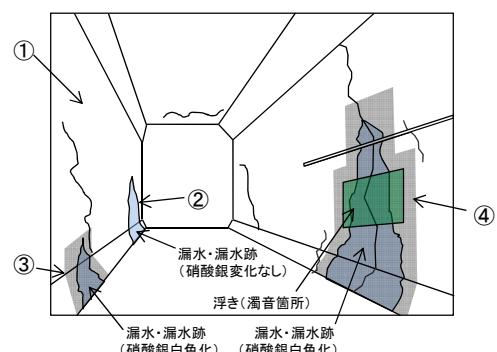




図3.3.2-1 硝酸銀噴霧と打音検査の様子¹⁾



図3.3.2-2 塩害部分



図3.3.2-3 犠牲陽極材と設置状況¹⁾

はつり取り後の状況¹⁾



図3.3.2-4 断面修復の様子¹⁾



図3.3.2-5 含浸材塗布の様子¹⁾

次に、犠牲陽極材（亜鉛）を鉄筋に設置（図3.3.2-3）し、超速硬型低電気抵抗性ポリマーセメントモルタルで断面修復（図3.3.2-4）を行う。最後に、断面修復した表面に含浸材を塗布する（図3.3.2-5）。A社（東京メトロ）では以前、表面被覆を行っていたが、数年後にコンクリート内部から発生したガスが被覆内に溜まったため、含浸材を用いている。しかし、予防保全として表面被覆を用いている事業者もあった。いずれにしても、コンクリート内の塩化物イオンを取り除いた後、新たな浸入を防いでおくことが必要である。なお、この犠牲陽極材は、設置5年後の現地調査の結果、効果持続期間が8年に満たないことがわかった²⁾。再度設置工事が必要となるため、さらに効率のよい方法を検討されている。

(2) B社（大阪市交通局）の事例

B社（大阪市交通局）においても、塩害対策後の維持管理を可能な限り低減させることも考慮した対策を実施している。塩分の供給源・塩害範囲を最小限に抑えるため、塩分を含む漏水の飛散防止として「導水樋」を設置した後、下記表3.3.2-2に記載の通り、対策箇所の漏水、変状、塩害の状況により、「塩分供給箇所：対策1」「塩分供給が断たれた箇所：対策2」「塩害変状の顕在化した箇所：対策3」と区分し、対策を組み合わせ実施している（図3.3.2-6、図3.3.2-7）。

表3.3.2-2 塩害対策における基本工法（B社（大阪市交通局）の事例）

対策箇所の状況 漏水／変状	詳細状況 漏水／変状	対策1	対策2	対策3
漏水あり／変状あり	新たに塩分が供給され続ける／塩害による変状が顕在化している	○	○	○
漏水なし(漏水跡)／変状あり	過去に塩分供給があったが今はない／塩害による変状が顕在化している	-	○	○
漏水あり／変状なし	新たに塩分が供給され続ける／塩害による変状が顕在化していない	○	○	-
漏水なし(漏水跡)／変状なし	過去に塩分供給があったが今はない／塩害による変状が顕在化していない	-	○	-

a) 対策1（外付け犠牲陽極材）

「導水樋」設置後も塩分は供給されるため、継続的な腐食対策として導水箇所を包含するよう 「外付け犠牲陽極材」を設置する。

従来の犠牲陽極材は、直接鉄筋に接続する方法で、新設・取替の都度に健全なコンクリートをはつり出す必要があり、構造物の健全性・維持管理面に課題であったため、取替時はつり量を少なくできる外付け犠牲陽極材を新たに開発し、試験施工を行っている。

現在は、ケーソン部ではなく一般の漏水箇所にて実施しているが、ケーソン部でも適用可能と考えられる。

b) 対策2（構造物洗浄後の表面被覆）

漏水の飛散による表面からの塩害範囲は「導水」により、新たな塩分供給がなくなることから、構造物洗浄により塩害リスクは大幅に低減される。さらに「表面被覆」施工により大気を遮断することで腐食の顕在化を抑えられ、万が一のはく落にも対応されている。

c) 対策3（塩分固化材入り断面修復材による断面修復）

塩分固定化材入りの断面修復材による対策を実施する。漏水拡散箇所で変状が顕在化した箇所は、塩化物イオンが鉄筋位置まで達していることから、効果の確認できた塩分固定化材入りの断面修復材等を用いた断面修復工法を採用している。

方法	通常の犠牲陽極材の使用法	犠牲陽極材をコンクリート表面に設置(今回試験施工)
概念図		
メリット	・犠牲陽極材の使用実績が多数あり、効果が明確	・コンクリートのはつりが少なくて済む(最小限)、塩害顕在化前の対策に向いている
デメリット	・健全なコンクリートをはつりとする必要がある	・使用実績がなく、効果の確認が必要

図3.3.2-6 外付け犠牲陽極材の試験施工

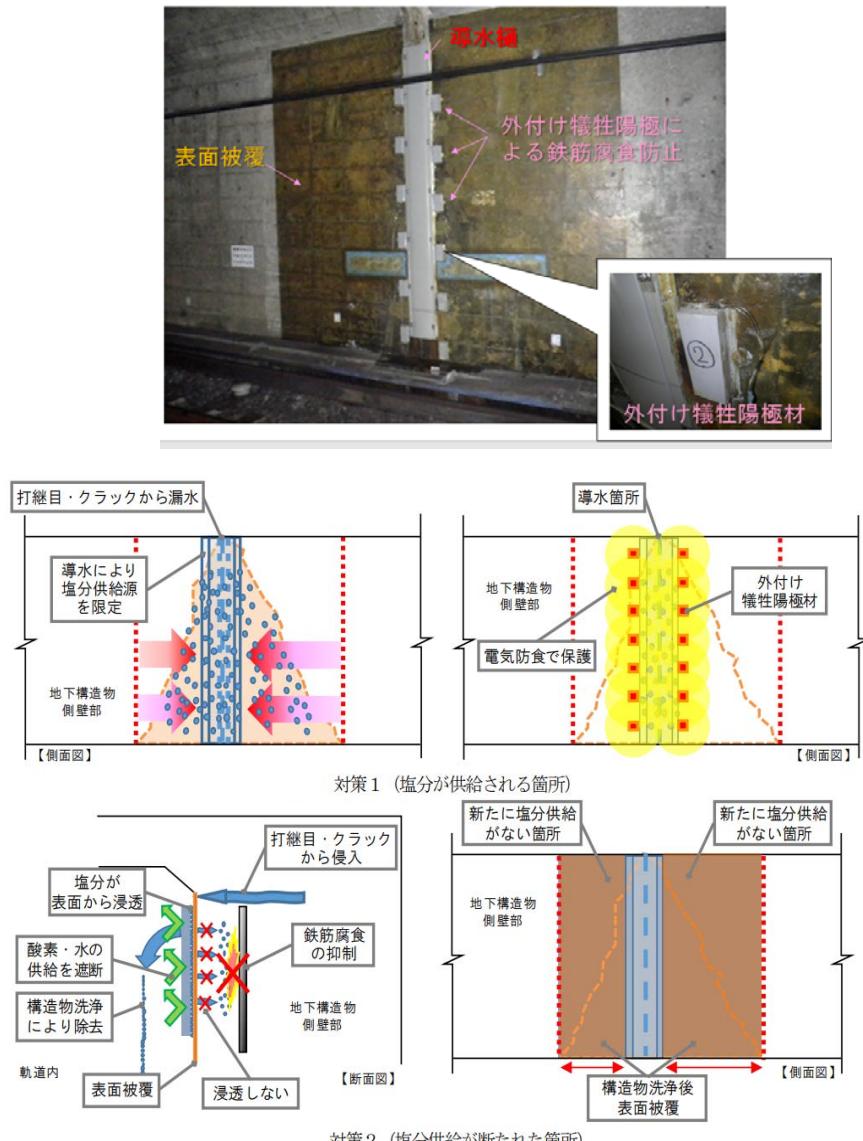


図3.3.2-7 犠牲陽極材設置状況

(3) C社（東京都交通局）の事例

C社（東京都交通局）においても他の鉄道事業者同様、経年と共に劣化が顕著に進んでいることから、1964年（昭和39年）に竣工したケーソンについて、2008年（平成20年）に構築調査を実施したので、その調査結果を報告する。

①調査内容

ケーソン部のひび割れ、コンクリートのはく離、鉄筋部の腐食等について調査を実施した。

②調査結果および補修

漏水や漏水跡の範囲では鉄筋腐食が進行していた。

ケーソンの継手部やコールドジョイント部より塩分を含んだ漏水が発生しており、鉄筋の腐食による断面積の減少、鉄筋の破断が見受けられたため、まずは、漏水を止めることが必須であることから止水注入工が実施された。腐食した鉄筋を切断し、残した鉄筋についてはケレン後、既設鉄筋に圧着機により節をつけ、機械式継手で圧着。主筋外側に配力筋を設置し、断面修復が行われた。また、補修後の新たな課題を想定した対策も併せて実施された。

想定される新たな課題

- ・新旧コンクリート継目のマクロセル腐食による鉄筋への影響
- ・大断面の壁面を無収縮モルタルで打設することによる乾燥収縮によるひび割れ

対策

- ・鉄筋に犠牲陽極を設置（図3.3.2-8）
- ・無収縮モルタルにひび割れ低減タイプを使用（図3.3.2-9）
- ・型枠脱型後に養生材の2回塗布を実施



図3.3.2-8 犠牲陽極材設置状況



図3.3.2-9 無収縮モルタル打設状況

(4) D社（横浜市交通局）の事例

D社（横浜市交通局）では、犠牲陽極の替わりに図3.3.2-10に示すような塩分吸着材を用いている⁴⁾。この工法は、1990年代に開発された比較的新しい工法である。東日本旅客鉄道株式会社では1998年に塩分吸着剤を用いた断面修復工をRC橋に試験施工し、20年後の2018年に追跡調査を実施した。ドリル削孔による鋼材近傍のコンクリート粉体試料から、鋼材近傍に残存するNO₂⁻量とCl⁻量を確認し、鋼材に対する防錆効果は20年が経過した現在でも持続されており、NO₂⁻の残存量から今後も効果が持続すると考えられている⁵⁾。これにより、地下トンネル用に塩分吸着材を配合した材料を使用した吹付けによる断面修復工法を開発している⁶⁾。

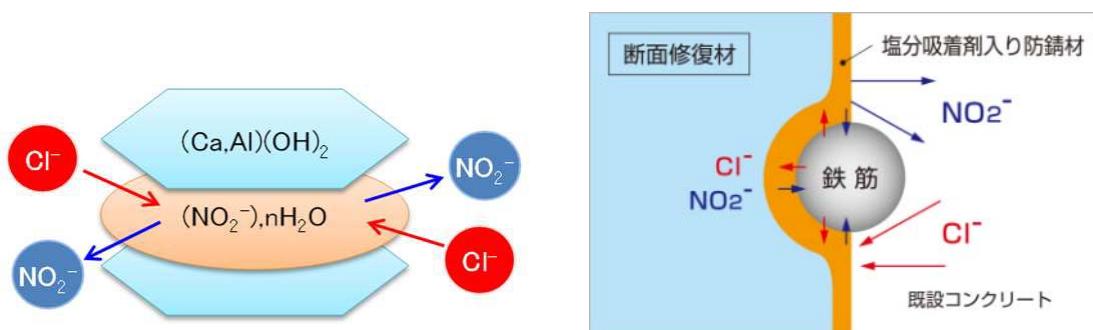


図3.3.2-10 塩分吸着材による鉄筋腐食防止の概念図⁴⁾

3.3.3 補強事例について

供用開始後に補強を行った事例も存在した、A社（東京メトロ）およびC社（東京都交通局）の事例を紹介する^{7),8)}。

(1) A社（東京メトロ）の事例

対象構造物は運河内にニューマチックケーソン工法で施工されたトンネルで、ケーソンは運河中央部において継手部で連結された長さ 28.0m 幅 12.0m の複線断面トンネルである。完成 5 年後にこの運河が埋め立てられ、トンネルの沈下が急増した。局部的な圧密沈下は最大 14cm に達し、継手部の目開きは最大 55mm となった（図 3.3.3-1）。

そこで、下床版上部に図 3.3.3-2 に示す RC の補強版を設置した。補強版の設置に必要な作業はバラスト撤去、工事桁架設、構築削孔、裏込め注入、止水版設置、補強版設置（鉄筋・H 鋼・ジベル筋・カプラー・コンクリート）、工事桁撤去・軌道復旧で、終電後の夜間 3 時間半での施工となり、約 120 日を要した。

ケーソン下は調査結果から泥水状態の被圧水であったことがわかり、補強版設置前にケーソン下にセメントベントナイト液を注入し、とくに継手部付近を重点的に行った。このように、ケーソン完成後も埋立てや近接構造物・ビルの建設といった要因により不具合が発生することがあるため、周辺環境の変化に注意しておく必要がある。

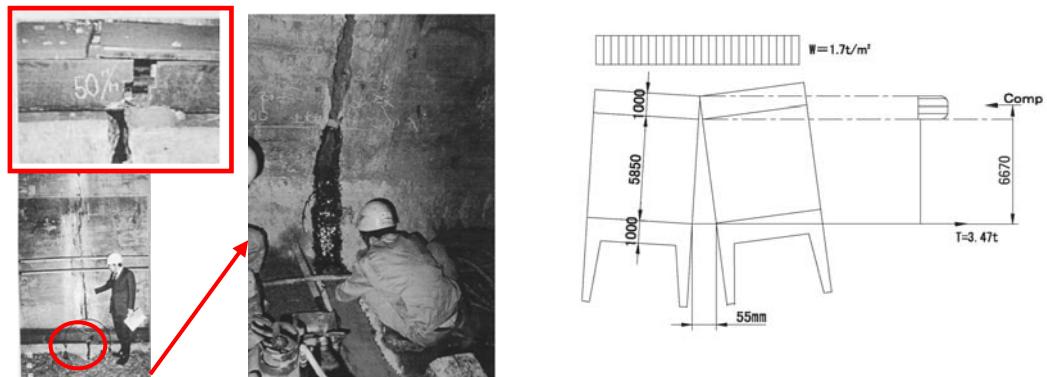


図3.3.3-1 ケーソントンネル継手部の目開きの状態⁷⁾

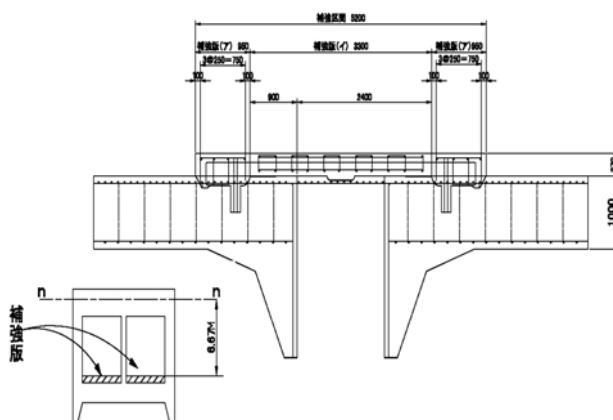


図3.3.3-2 補強版縦断面図⁷⁾

(2) C社（東京都交通局）の事例

C社（東京都交通局）においては、1995年（平成7年）1月17日の兵庫県南部地震を受けて、耐震補強を実施した事例もあったことから、その対策に至った経緯と施工法を紹介する。

a) 耐震補強に至った経緯

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震を受け、大規模地震に対する都営地下鉄施設の耐震補強の取り組みとしては、旧運輸省の鉄道施設耐震構造検討委員会の「既存の鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置について」（1995年7月26日付け）に基づき、緊急耐震補強計画を策定し、1995年度から5カ年間で補強工事を実施した。

この緊急措置に基づく耐震補強は、ラーメン高架橋およびラーメン橋台、開削トンネルの中柱、橋りょうの落橋防止工を対象に行うものであり、これ以外の構造物については、鉄道事業者が独自に取り組むことが必要であった。

そこで、兵庫県南部地震の被害例等から大規模地震に対する耐震性が必要と考えられる構造物のひとつとして、大河川横断箇所のケーソンおよび沈埋トンネルがあげられた。1996年1月から「地下鉄構造物耐震補強検討委員会」を立ち上げ、検討を重ねた結果、日本橋川ケーソンについては、以下のとおりの対策を行うことが決定した。

b) 対策工

日本橋川ケーソンは、大河川を横断する工法としてニューマチックケーソン工法を採用した箇所であり、1函体が20数メートルのケーソンを地上から沈め、これを接続してトンネルを築造した構造であり、ケーソン建設時の考え方では、地震時において継手部に変形が生じるとの考え方方は無かったことが確認できた。

同検討委員会にて、ケーソンと周辺地盤を力学モデルで表し、地震時の影響について計算で確認した結果、ケーソンを相互に繋ぐ継手部に数センチメートルのずれが生じることがわかった。

継手部に生ずるずれへの対応策は、トンネル内側から継手ごとに伸縮継手を設けて浸水を防ぐ方法が考えられた。しかしながら、各継手に伸縮継手を入れた場合は工事期間が長くなり、多額の費用が必要であることから、左右の河岸位置に伸縮継手を設け、他の継手は鋼板で連結する工法が適切であるという結論に至った（図3.3.3-3～図3.3.3-6）。

浅草線日本橋川ケーソン 補強対策平面図（案）



図3.3.3-3 検討委員会時の対策平面図（案）

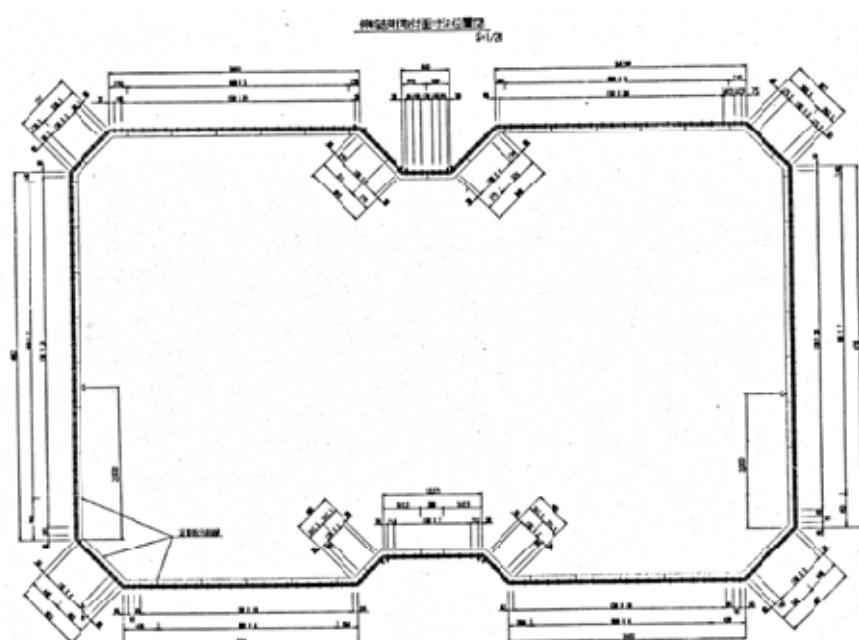


図3.3.3-4 伸縮部取付面寸法位置図

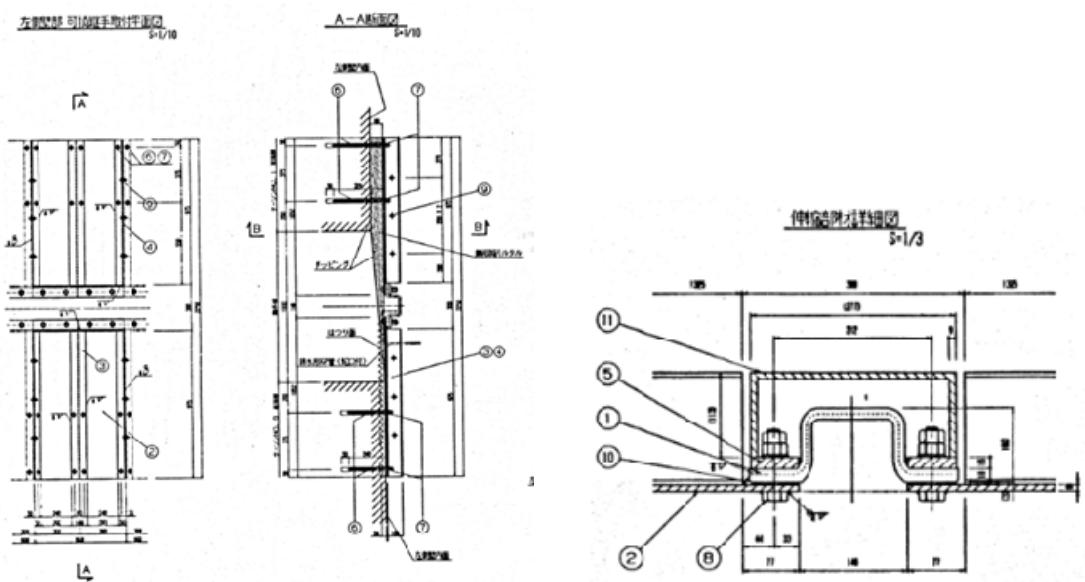


図3.3.3-5 側壁部可とう継手取付平面図

図3.3.3-6 伸縮部材詳細図

c) 耐震補強箇所の現在の状況について

図 3.3.3-7～図 3.3.3-11 のような伸縮継手箇所については、全周を覆っているため、健全度が保たれているが、図 3.3.3-12 のように鋼板補強のみの箇所については、鋼板以外の所は継ぎ手が露出しているため、補強していないケソンの継手箇所と同様に、漏水やはく離等の劣化が生じている状況である。



図3.3.3-7 伸縮継手現況写真（上床部）



図3.3.3-8 伸縮継手現況写真（側壁部）

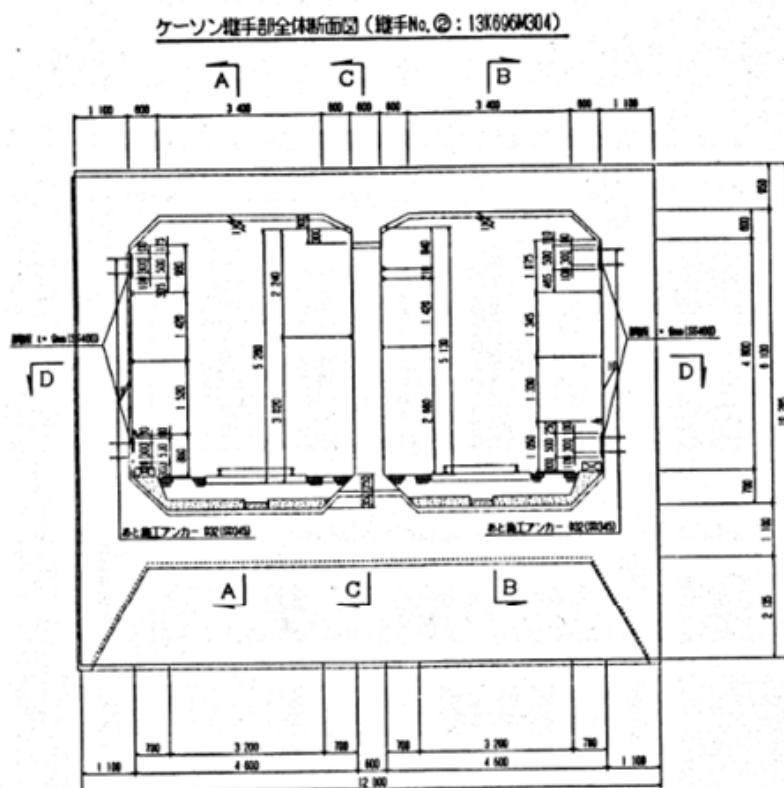


図3.3.3-9 鋼板補強断面図

$$A = A \otimes I_n \text{ (逐行側・側)}.$$

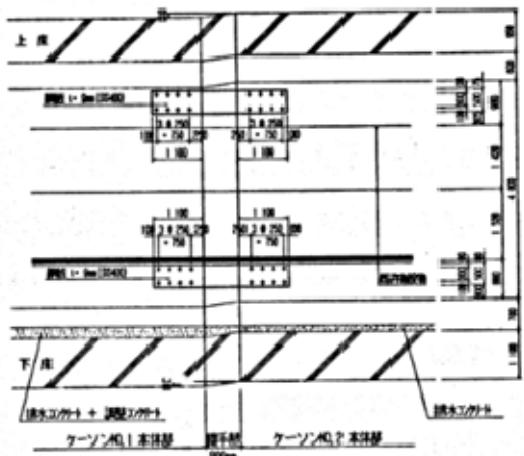


図3.3.3-10 鋼板補強平面図

図3.3.3-11 鋼板補強詳細図



図3.3.3-12 鋼板補強現況写真

参考文献

- 1) 亀井啓太, 阿部敏秀, 野口正則, 辻口貴大: 河川下の地下鉄潜函トンネルの塩害対策工事, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.22, pp.44-48, 2016.
 - 2) 田口真澄, 諸橋由治, 濑戸岳史, 篠原秀明, 米丸陸海, 小椋紀彦: 地下鉄開削トンネルにおける塩害補修工法の防食効果持続性の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74, VI-330, 2019.
 - 3) 日本地下鉄協会: 地下鉄短信「地下鉄施設の保守維持等に関する研究会(第18回土木部会)」

を開催, No.548, 2023.

- 4) 塩害対策工法研究会ホームページ <https://ssikk.jp> (2024年5月1日)
- 5) 鵜澤星一, 高山充直, 塚原高志, 池田泰博: 塩害環境下における鉄道コンクリート橋りょうの維持管理手法の提案, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.3, No.1, pp.248-257, 2024.
- 6) 帝都高速度交通営団: 東京地下鉄道東西線建設誌, 1978.
- 7) 東京都交通局提供資料: 地下鉄構造物耐震補強検討委員会, 1997.

3.4 維持管理における留意点

2.2 節で、ケーソントンネルに対するヒアリング調査から、漏水に起因する不具合が一番問題で、とくに塩害が問題であることを述べた。とくにケーソン間の継手部からの漏水に伴う鉄筋腐食、コンクリートのひび割れや爆裂、断面欠損、補修部分の補修材の浮きが見られることを述べた。3.2 節では、塩化物イオンの鉄筋への侵入経路が、感潮河川付近での漏水がトンネル内面を伝わり、そこから壁内に浸透し鉄筋に達することを述べた。また、侵入時の面的な広がりは少ないことを述べた。

これらのことから維持管理における方針としては、

1. 漏水をなくす
2. 漏水がトンネル内面を伝わらないようにする
3. トンネル内面からの塩化物イオンの侵入を防ぐ

ことが考えられる。これらに対する対策としては、

1. 注入工法等により積極的に止水を行う。
2. 漏水を止めきれない場合や、費用面で止水が難しい場合は、トンネル内面を伝わらないように導水する。
3. トンネル内面からの塩化物イオンの侵入を防ぐために、表面被覆や含浸材塗布を行う。

ことが必要になってくる。

また、塩化物イオンが侵入してしまったら、その部分をは取り取り、鉄筋の錆を落とし、犠牲陽極を取り付ける、あるいは塩分吸着材を用いて断面修復を行う。さらに、一度、補修工事を行っても、再劣化を起こす可能性が高く、補修した箇所も、継続的に点検を行うことが必要である。

3.5 現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点

3.5.1 概要

ケーソントンネルは1930年代から1980年代頃まで数多く建設された。現在のニューマチックケーソン工法は、当時と比べ、施工面では建設機械や圧気技術の進歩によって生産性・安全性が向上した。また品質面では、躯体コンクリートの品質・性能の向上とともに、各種の漏水対策が格段に進歩した。ケーソントンネルの漏水に関して、現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点を述べる。

3.5.2 ケーソントンネルの漏水の要因

ケーソントンネルにおける漏水は、①コンクリートのひび割れからの漏水、②コンクリートの打継ぎ部あるいはケーソンとケーソンを接続する継手部からの漏水、③底版のシャフト孔跡からの漏水に大別できる。

(1) コンクリートのひび割れからの漏水

ケーソントンネルのひび割れは、構造物が大型で部材が比較的大断面であることから、マスコンクリートによる温度ひび割れが主な要因と考えられる。ニューマチックケーソン工法は、コンクリート打込み完了後、引き続き行われる掘削・沈設作業の性質や施工能率の観点から養生期間をあまり長くとれない場合がある¹⁾。このような場合は、型枠解体直後にコンクリートの内外温度差が大きくなり内部応力が卓越するため、温度ひび割れの発生に留意する必要がある。

(2) コンクリート打継ぎ部およびケーソン継手部からの漏水

コンクリート打継ぎ部は、新旧コンクリートの接合面であり接合面に隙間があると漏水の要因となる。一般にケーソン躯体は、高さ3~5mを1リフトとして分割して構築するため²⁾、図3.5.2-1に示すようにリフト毎に水平方向のコンクリート打継ぎ部ができる。さらに近年では、ケーソンの大型化に伴い1リフトを平面的に分割し、鉛直方向のコンクリート打継ぎ部を設けてコンクリートを打ち込む場合もある。鉛直方向のコンクリート打継ぎ部は、水平方向と同様に周辺地盤と接する場合には漏水に留意する必要がある。

ケーソン継手部は、図3.5.2-2に示すように先行して沈設が完了したケーソン同士の接続箇所である。ケーソン継手部の幅は1~2m程度であり、ごく狭い範囲に水平方向と鉛直方向のコンクリート打継ぎ部が存在していることから漏水する可能性が高い。

(3) 底版のシャフト孔跡からの漏水

底版のシャフト孔は、図3.5.2-3に示すように、掘削土砂の搬出や資機材の搬出入、作業員の出入りのために設けられた作業室に通じる施工時開口である。中埋めコンクリート充填後の作業

室は、作業室内面が平滑で中埋めコンクリートとの一体性が乏しいため、作業室内面と中埋めコンクリートとの境界面に地下水が浸水していると考えられる。シャフト孔内面も同様に平滑であり、単にシャフト孔をコンクリートで閉塞しただけでは、作業室内の地下水が浸水してシャフト孔跡から漏水する恐れがある。

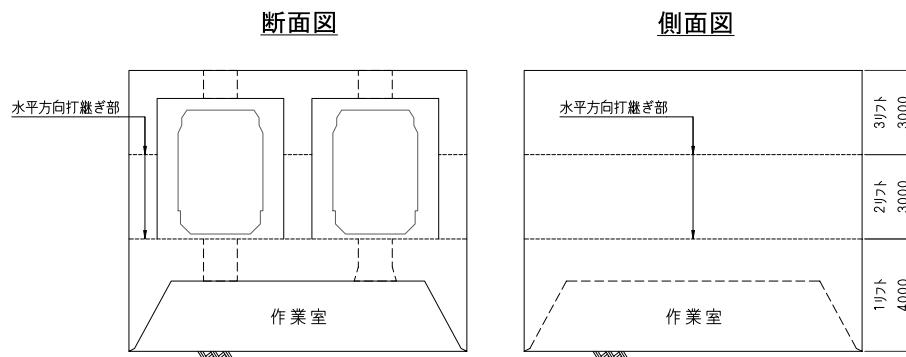


図3.5.2-1 ケーソントンネルの水平方向コンクリート打継ぎ

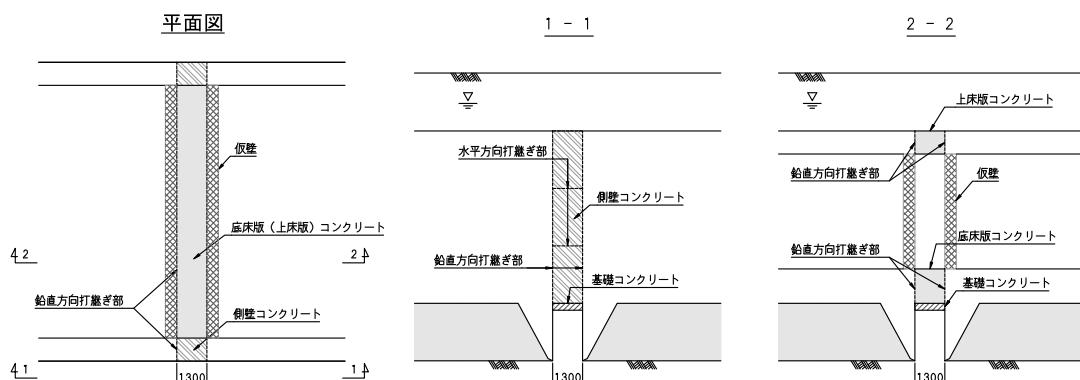


図3.5.2-2 ケーソントンネルの継手

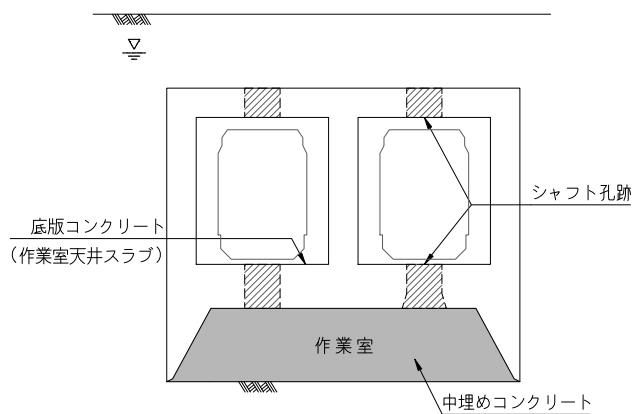


図3.5.2-3 ケーソントンネル断面図

3.5.3 漏水対策

(1) コンクリートのひび割れ対策

a) 温度ひび割れ対策工

本対策は、マスコンクリートに対するひび割れ対策の考え方を基本に実施する。温度ひび割れに対する検討の結果、中庸熱セメントや低熱セメント等の低発熱セメントの適用を検討する場合は、調達可能なセメントの種類や強度保証材齢の設定について考慮する必要がある³⁾。

b) 止水鋼板工

本対策は、ケーソン躯体の外壁面を鋼板（以下、止水鋼板と言う。図3.5.3-1参照）で覆うことで躯体内への地下水の侵入を遮断するものである。止水鋼板は鉄筋組立後に設置し、埋設型枠として外壁面のコンクリートと一体化する⁴⁾。止水鋼板の継手を現場溶接とする場合は、溶接部の止水性を確保するために真空箱検査（図3.5.3-2参照）を実施する。

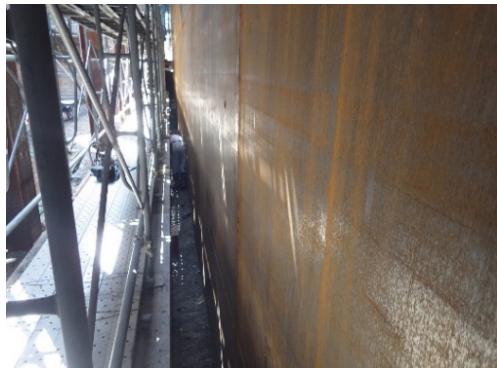


図3.5.3-1 止水鋼板⁴⁾



図3.5.3-2 真空箱検査⁴⁾

c) 塗膜防水工

本対策は、ケーソン躯体の外壁面に塗膜防水を形成することで躯体内への地下水の侵入を遮断するものである。塗膜防水は、ケーソンの沈下による周面地盤との摩擦によって損傷しないよう、耐摩耗性に優れたポリウレタン樹脂系防水材を使用する場合が多い。塗膜防水工の施工フローを図3.5.3-3に、作業状況を図3.5.3-4に示す。施工手順は、型枠解体後、コンクリートとの付着不良がないよう、躯体表面のケレンやピンホール穴埋め等の下地処理を行う。次に第1プライマーをコテやローラーで塗布し、珪砂を散布する。第1プライマーの硬化後、第2プライマーを塗布し防水材を吹き付ける。吹付けによる塗膜防水の品質は、温度、湿度およびコンクリート表面の湿分が影響するため、それらの計測管理に留意する必要がある。



図3.5.3-3 塗膜防水施工フロー

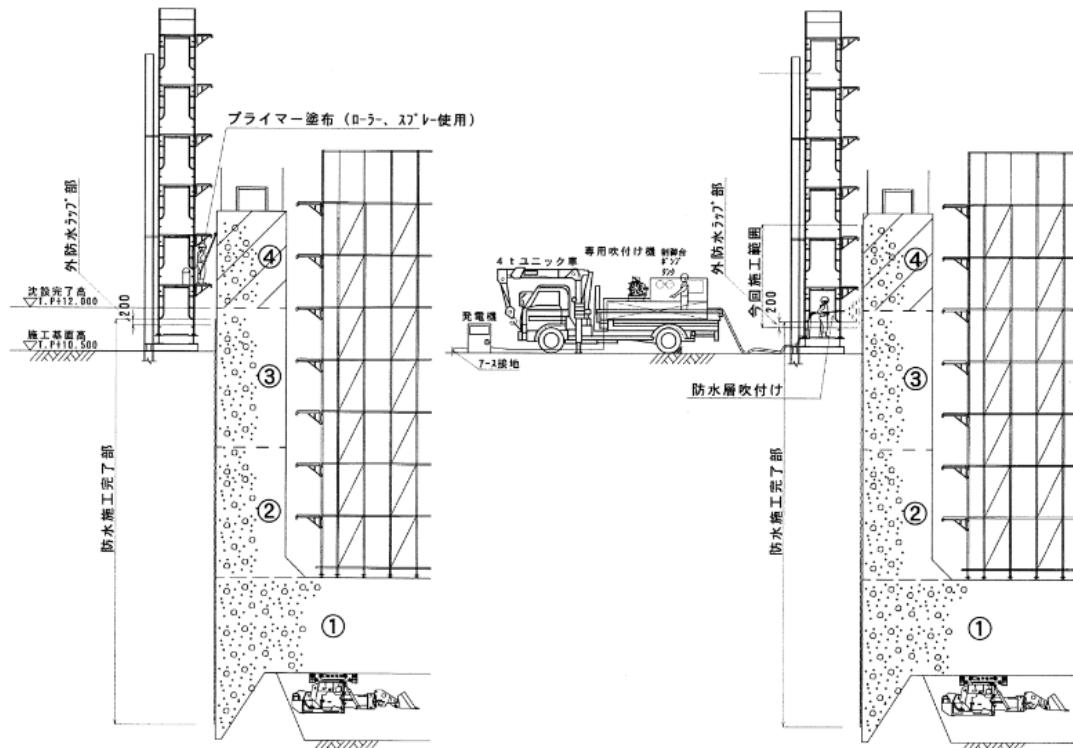


図3.5.3-4 塗膜防水施工状況

(2) コンクリート打継ぎ部およびケーソン継手部の対策

a) 止水板工

本対策は、コンクリート打継ぎ部およびケーソン継手部の躯体内に止水板を埋設することで、ケーソントンネル内への漏水を防止するものである。止水板には、先打設コンクリートの打継ぎ部に板状の止水板を半分程度埋め込んでおく方法や、先打設コンクリートの硬化後、後打設コンクリートの打設前に打継ぎ部にロープ状の止水板を取り付ける方法等がある。止水板の材質は、水によって膨張し、その膨張圧によって高圧な地下水を遮断する水膨張ゴム（クロロプロレンゴム製）や、セメントのCaO（酸化カルシウム）と反応してコンクリートと強力に接着することで地下水を遮断する非加硫ブチルゴム等がある。

b) 止水材注入工

本対策は、コンクリート打継ぎ部およびケーソン継手部の新旧コンクリートの隙間を強制的に閉塞することで、ケーソントンネル内への漏水を防止するものである。先打設コンクリートの打継ぎ部に中空部材（図3.5.3-5のPWホース）を埋設しておき、後打ちコンクリートの打設後約4週間を目安に止水材を注入する。中空部材には止水材注入前に水を注水する。水と止水材との発泡膨張圧によって、図3.5.3-6に示すように、中空部材内やその周囲だけでなく新旧コンクリートの隙間が閉塞する。

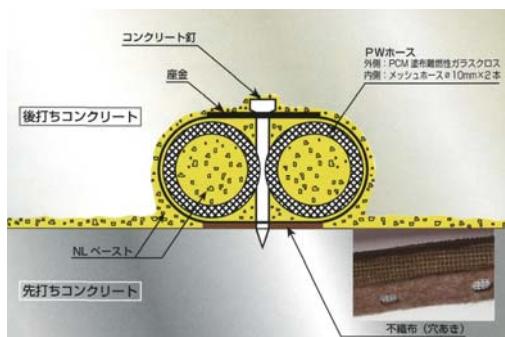


図3.5.3-5 止水材注入工概要図⁵⁾



図3.5.3-6 止水材注入充填状況⁵⁾

(3) 底版のシャフト孔跡の対策

本対策は、シャフト孔内部に鋼製部材を設置することで、シャフト孔跡からの漏水を防止するものである。鋼製部材は、図3.5.3-7に示すように、シャフト鋼板および止水蓋、中埋め用蓋で構成される。シャフト孔の閉塞方法は、図3.5.3-8に示すように、まず中埋め用蓋を設置したのちに中埋めコンクリートを打設し、シャフト鋼板の内側に止水蓋を設置し全周溶接で密閉する。次に、止水蓋のコンクリート打設管を用いて、止水蓋と中埋め用蓋の間をコンクリートで充填する。最後に、止水蓋上部のシャフト孔をコンクリートで閉塞する。止水蓋・中埋め用蓋の設計にあたっては、ケーソン施工時の作業気圧、打設中の中埋めコンクリートの圧力および完成後の水圧などを考慮する³⁾。

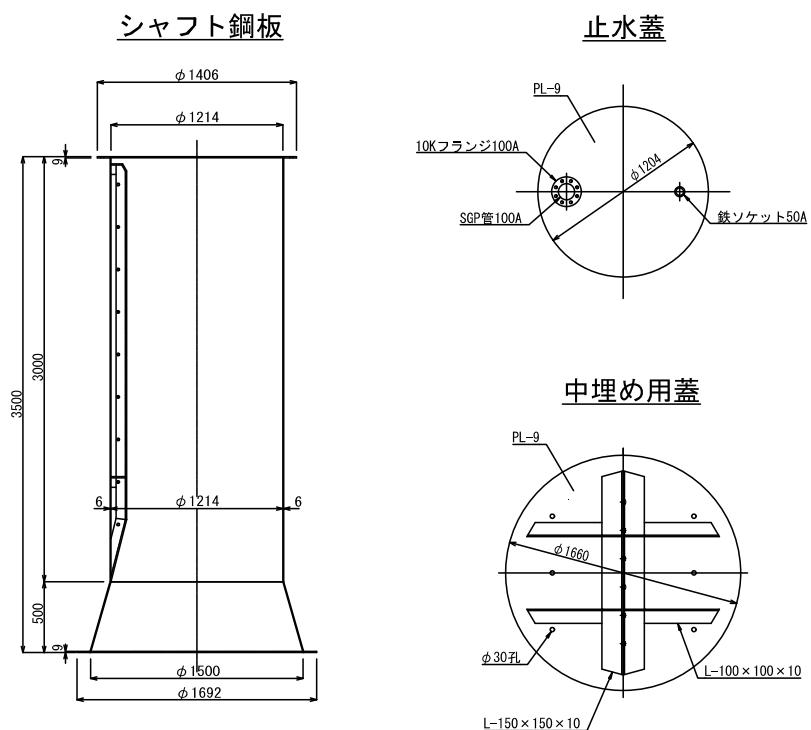


図3.5.3-7 シャフト鋼板、止水蓋、中埋め用蓋³⁾を修正加

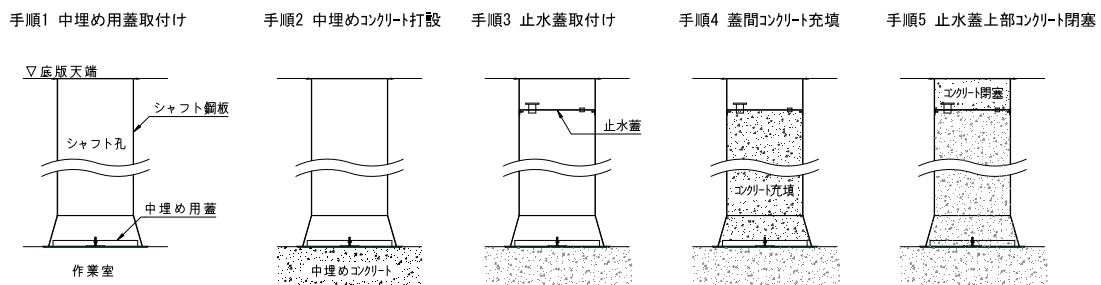


図3.5.3-8 鋼製部材によるシャフト孔の漏水対策

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 2017.
- 2) 日本圧気技術協会：ニューマチックケーソン工法積算資料, 2023.
- 3) 日本圧気技術協会：大型・大深度地下構造物ケーソン設計マニュアル, 2022.
- 4) 野城智也, 川添善行, 富永祐明, 遠藤和雄：ニューマチックケーソン工法による地下書庫の構築, 基礎工, Vol.50, No.11, pp.42-45, 2022.
- 5) ピングラウト協議会：ピングラウト工法PW止水システムカタログ, 2023年4月時点.

4. 連壁本体利用の開削トンネル

4.1 構造・施工法の特徴

4.1.1 工法の概要

(1) 地下連續壁工法の歴史

我が国の地下連續壁工法は、1959年（昭和34年）にイコス工法（イタリア）による中部電力畠瀬ダムの止水壁施工¹⁾が初めての適用であった。内部掘削を伴う地下構造物本体壁としては、1961年（昭和36年）に地下鉄丸ノ内線への適用が初めてであり、イコス工法が適用されている。当時の掘削方法は、特殊クラムシェルを櫓からワイヤーで吊り下げ、上下させて掘削を行うものであった。図4.1.1-1および図4.1.1-2に当時の状況写真を示す。

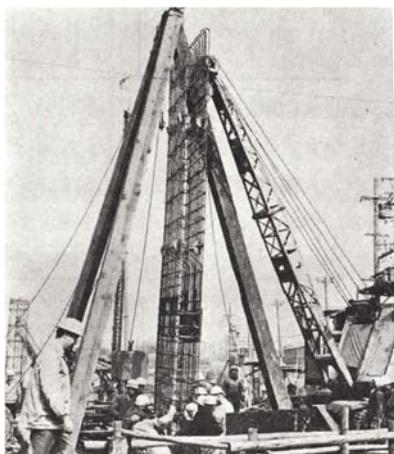


図4.1.1-1 鉄筋かご吊り込み状況²⁾



図4.1.1-2 完成したイコス式隧道²⁾

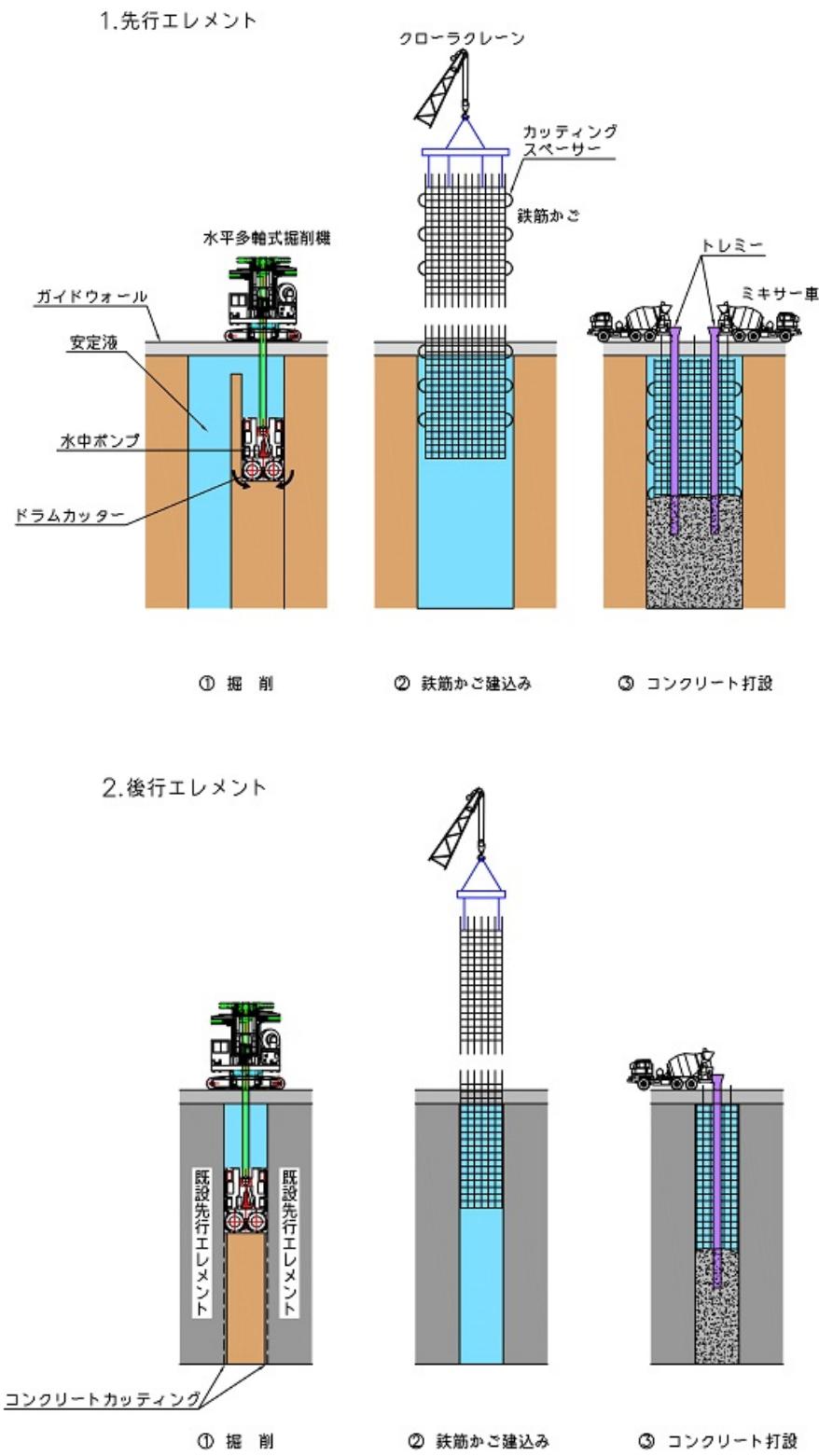
(2) 地下連續壁の施工方法

地下連續壁は、泥水などの安定液を用いて溝壁の安定を図りながら地盤を溝状に掘削し、この中に鉄筋かごを建て込んだのち、安定液をコンクリートと置換して地中に壁体を構築する工法である。鉄筋かごに代わり、鋼製の連続部材を使用する工法や、形鋼やプレキャスト板を建て込んで安定液を直接固化させる工法がある。

地下連續壁の施工順序を、鉄筋コンクリート地下連續壁を例に示す。また、図4.1.1-3にコンクリートカッティング工法の場合の施工フロー図を示す。

- ① 施工箇所の支障物の処理および布掘りと仮覆工
- ② ガイドウォールの築造
- ③ 掘削機械搬入組立て、安定液プラント設置
- ④ 掘削、安定液管理
- ⑤ 掘削土処分
- ⑥ 一次スライム除去および良液置換
- ⑦ 継手材（必要のある場合）および鉄筋かごの建込み

- ⑧ 二次スライム除去、トレミーの設置
- ⑨ コンクリート打込み
- ⑩ 継手材の引抜き（必要のある場合）
- ⑪ 廃棄安定液の処理



(3) 本体利用時の施工方法

地下連続壁の本体利用とは、地中に構築された壁体を施工時の仮土留めとして使用したのち、本体の側壁としても使用することで施工の合理化を図るものである。順巻き工法による施工手順を図4.1.1-4に示す。

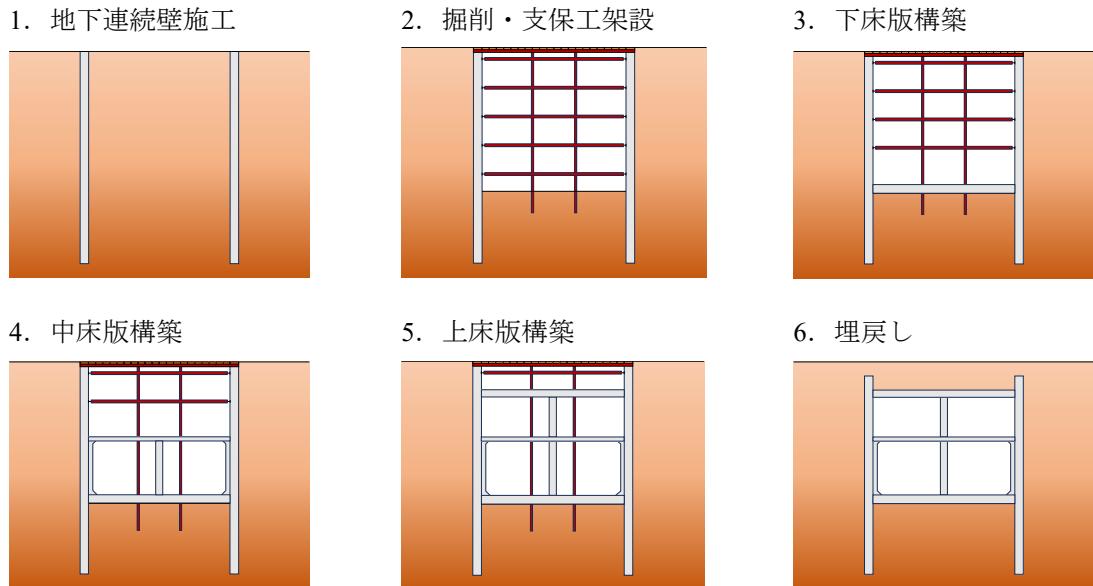


図 4.1.1-4 連壁本体利用の施工手順（順巻き工法）

4.1.2 施工における留意点

(1) 地下連続壁施工時の留意点

地下連続壁は、掘削時の溝壁の精度がそのままコンクリート壁体の仕上がり精度となるため、掘削壁面の鉛直性、平面性には特に留意する必要がある。そのため、掘削中は壁面の状態を測定して、掘削壁面の鉛直精度、平面性を絶えず確認する必要がある。

コンクリートの打込み時には、コンクリート内に安定液中の浮遊土が混入し、強度低下や漏水を引き起こす原因とならないよう、スライム除去を十分な時間をかけて丁寧に行う必要がある。また、コンクリートが安定液と混ざらないよう、トレミー管の先端は 2m 以上コンクリート中に挿入した状態としなければならない。コンクリートの充填性を考慮した配合の選定も重要である。

(2) 本体構築時の留意点

地下連続壁を本体利用する場合、掘削時に土留め壁として利用するが、施工時の応力状態と完成時の応力状態が異なることに留意する必要がある。施工時に過大な変形や応力が生じないよう、土留め壁としての設計を行うとともに、施工中には計測管理を行い、壁体の応力や変形の状態を確認する必要がある。

地下連続壁と各床版の接合部は、鉄筋の継手が同一断面に集中するため、継手の選定や信頼度の高い継手施工管理が重要となってくる。また、接合部からの漏水リスクを低減するために、止水板の配置や防水工の端部処理も重要である。

4.1.3 構造上の特徴

(1) エレメント間継手

地下連続壁は、延長 3m～7m 程度のエレメント（パネル）に分割して施工するのが一般的である。エレメント間の継手には、剛結継手、接合鋼板、コンクリートカッティング等を用いる方法がある。表 4.1.3-1 に継手の構造例を示す。導入当初は、インターロッキングパイプ継手が主流であったが、近年は継手剛性や止水性の向上を目的に継手の開発が行われ、構造物の要求性能に応じて継手が選定されている。

表 4.1.3-1 エレメント間継手の例⁴⁾⁵⁾

継手の種類	名称	伝達可能な断面力	概要図
フリー継手	インター ロッキング	軸圧縮力	
	接合鋼板		
	コンクリート カッティング		
ヒンジ継手		せん断力 軸力	
剛結継手		曲げモーメント せん断力 軸力	

(2) 地下連続壁を本体壁とする場合の構造形式

地下連続壁を本体利用する場合の構造形式として、①一体壁形式、②単独壁形式の2形式がある。以下にそれぞれの特徴を示す。

一体壁形式

一体壁形式は、地下連続壁と内壁の接合面にジベル筋などを取り付けるなどして、完全に一体の壁として荷重に抵抗するようにしたものであり、施工時に必要な壁厚より完成時に必要な壁厚が厚い場合などに有効な構造である。

単独壁形式

単独壁形式は、内壁を設けずに地下連続壁のみで荷重に抵抗するようにした構造形式である。深くなつた場合には、壁厚が厚くなり、一体壁形式と比較して不経済となることがある。また、内壁を施工しないため、止水や導水には特に配慮する必要がある。

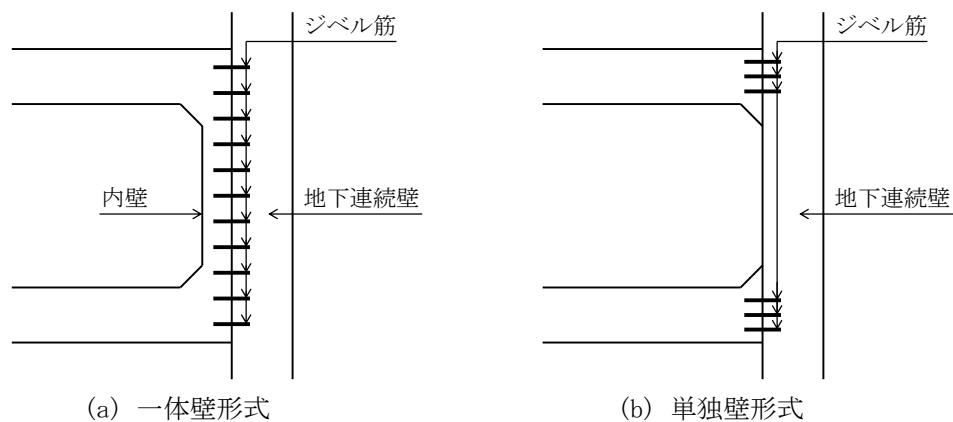


図 4.1.3-1 本体利用の壁形式⁶⁾

(3) 地下連続壁と床版の接合部

地下連続壁を本体利用する場合、先行構築した地下連続壁と床版を接合する必要がある。床版との接合には、近年では機械式継手を使用するのが一般的であるが、適用初期の頃は鉄筋を曲げ戻す方法も採用されており、継手にはガス圧接継手や重ね継手が適用されていた。図 4.1.3-2 に床版接合部の構造例を示す。

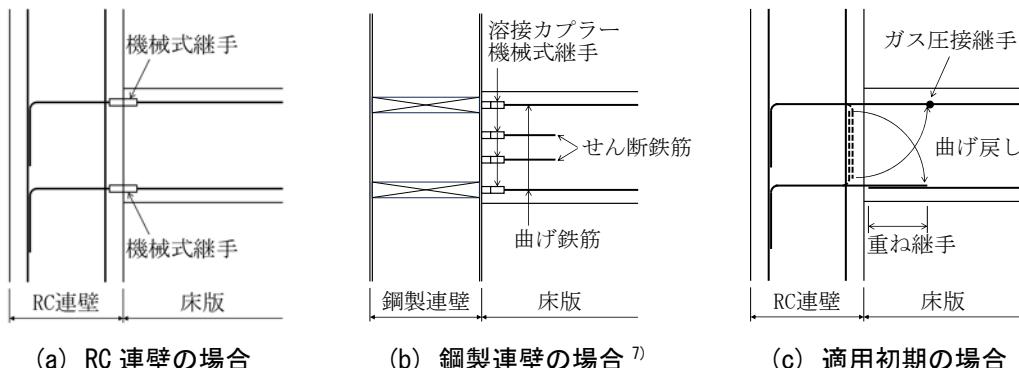


図 4.1.3-2 床版接合部の例

参考文献

- 1) 日本建設機械協会 : <https://jcmanet.or.jp/> (2024年4月1日)
- 2) 帝都高速度交通営団 : 東京地下鉄道 荻窪線建設史, pp.204-213, 1967
- 3) 地中壁施工協会ウェブサイト : <https://www.renpeki.jp/> (2024年4月1日)
- 4) 地中連続壁基礎協会 : 技術資料I 地中連続壁基礎施工指針 (案), 1986.
- 5) 地中連続壁協会 : 技術資料I 地中連続壁施工指針 (案), p.8, 2022.
- 6) 土木学会 : トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説, p.112, 2016.
- 7) 鋼製地中連続壁協会 : 鋼製地中連続壁工法-I 設計施工指針 (案), p.47, 2019.

4.2 想定される漏水メカニズム

4.2.1 エレメント間継手からの漏水

エレメント間継手の漏水の原因として、以下に示す項目が考えられる。

① 継手面へのスライム等の不純物の付着

継手面の清掃不足や安定液中のスライム（ベントナイトゲル化物や微細土粒子）の除去が不十分な場合、継手面にスライムが付着した状態でコンクリートが打設される。このスライムが、内部掘削後の土水圧の作用により除去されることで、水みちが形成され漏水に至ることが考えられる。

② コンクリート打設時の継手部へのスライムの残留

安定液のスライム処理が不十分な場合、コンクリート表面部に付着したスライムが継手方向に押し出され、スライム溜りが形成されると、継手部にスライムが残留し、土水圧の作用により水みちが形成され漏水に至ることが考えられる。

③ 壁体の変位

内部掘削時に、壁体に変位が生じると継手部に目開きが発生し、水みちが形成され漏水に至ることが考えられる。

4.2.2 後行エレメントの温度ひび割れによる漏水

ほとんどの地下連続壁工法では、まず先行エレメントを離散的に施工し、その間に後行エレメントの施工をして連続的な地中壁を構築する。先行エレメントはコンクリート打設時に周囲4面すべて地盤となるため、一般に温度ひび割れが生じるような大きな拘束とはならない。一方、後行エレメントは先行打設した先行エレメントに両側を挟まれ、特に先行エレメント幅が後行エレメント幅よりも大きい場合に、コンクリートの硬化時に大きな拘束を受ける。図4.2.2-1に後行エレメントのひび割れ発生メカニズムを示す。後行エレメントは先行エレメントによる拘束で自由収縮が阻害され、継手部に引張応力が発生する。この応力がコンクリートの引張強度を超えると水平方向にひび割れが生じる。このような外部拘束によるひび割れは貫通ひび割れとなるため漏水の原因となる。

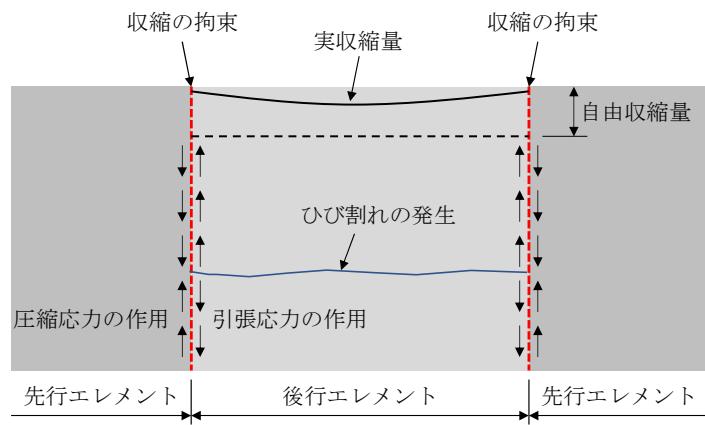


図4.2.2-1 後行エレメントの温度ひび割れ発生メカニズム¹⁾

4.2.3 上下床版接合部からの漏水

単独壁形式における連壁本体利用の場合、外圧が作用する上下床版と地下連続壁の接合部は、漏水のリスクが大きい部位となる。地下連続壁には外防水の施工ができないため、上下床版の外面防水層は地下連続壁で適切な端部処理を施し、地下水の侵入を防止する必要がある。また、上下床版と地下連続壁の打継ぎ部は水みちとなる可能性が高いため、接合面への止水板の設置などで漏水に対するリスクを低減する必要がある。**図4.2.3-1**に上下床版接合部の漏水メカニズムを示す。

一方、一体壁形式における連壁本体利用の場合、内壁が健全であれば漏水リスクは小さいが、内壁のひび割れや型枠固定用のセパレーターから漏水する可能性がある。

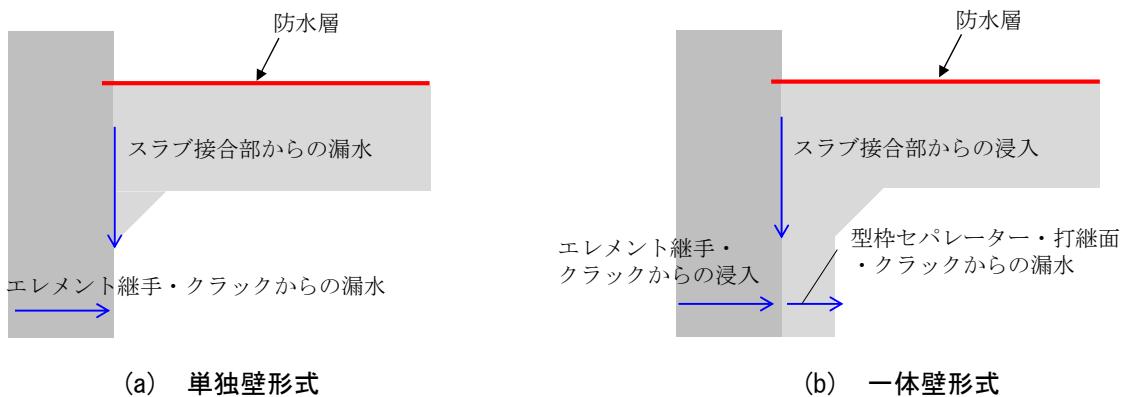


図4.2.3-1 上下床版接合部の漏水メカニズム

4.2.4 コンクリートの不具合による漏水

地下連続壁の壁体コンクリートの不具合による漏水原因として、以下に示す項目が考えられる。

① コンクリートの強度不足

コンクリート打込み時に、安定液の濃度管理不足によりコンクリート中に安定液が混ざると所定の強度を発揮できない。特に導入初期のコンクリートは水中分離性が現在ほど高くなく、泥水の影響を受けやすかった。また、コンクリート打込み時の溝壁崩壊により、土砂がコンクリートに混入し局所的に脆弱なコンクリートとなる可能性がある。このような箇所は、外圧に対する抵抗力が小さいためひび割れが発生しやすく、水みちとなりやすい。特に地山側や内部は内部掘削時に発見することが困難であるため、漏水が生じた場合には外面や内部に空洞が生じる可能性もあり、壁体の耐力に大きく影響する劣化につながる可能性がある。

② コンクリートの充填不良

コンクリートの流動性が悪い場合や、過密配筋の場合は、コンクリートの充填不足による空洞の発生や、骨材が行き渡らないことによる強度のばらつきなどが生じる可能性がある。鉄筋かごの補強鋼材も充填性に影響を与えるため、補強枠は必要剛性の確保とともに、コンクリートの充填性に影響を与えない断面形状や寸法の鋼材の使用を計画する必要がある。また、コンクリートは材料分

離に対する抵抗性や流動性を考慮し、配合を決定する必要がある。

参考文献

- 1) 木村克彦、中原邦明、黒田正信、梅原秀哲：地下連続壁の温度ひび割れ評価方法に関する研究、土木学会論文集 No.585/V-38, pp.19-29, 1998.

4.3 維持管理の事例

4.3.1 地下連続壁を本体利用した開削トンネルの事例

地下連続壁を本体利用した表 4.3.1-1 に示す 4 つの事例を対象に、施工方法、施工時や現在の構造物の状況について紹介する。

表 4.3.1-1 本節で紹介する事例

事業者名	東京メトロ	東京都交通局	横浜市交通局	福岡市交通局
路線名	丸ノ内線	大江戸線	グリーンライン	空港線
位置・区間	中野富士見町駅～ 方南町駅間	中野坂上駅	高田駅	唐人町駅～ 大濠公園駅間
建設年次	1961 年	1998 年	2003 年	1978 年
構造形式	壁 継手	単独壁 インターロッキン グパイプ	一体壁 接合鋼板 (仕切り板 鋼板継手)	一体壁 コンクリート カッティング ヒンジ
備考 (採用工法等)	イコス工法	坑内地下連続壁	透かし掘り工法	パナソル工法

4.3.2 東京メトロ丸ノ内線の事例

(1) 対象構造物の概要

東京メトロ丸ノ内線中野富士見町・方南町駅間の一部に、1961年（昭和36年）に着工、竣工された日本国内で初めての地下連続壁が本体利用されたトンネル（延長24m）が存在する。当時の地下鉄トンネルの工法は、一般的には杭打ち後掘削の上、その中でトンネルを築造するのが一般的であったが、当時の最新工法の導入を目的に、試験工の位置づけでイコス工法と呼ばれる工法（図4.3.2-1）が採用された。なお、イコス（ICOS）とは、1951年（昭和26年）にイタリア・ミラノの地下鉄道建設にあたり当工法を応用したミラノの建設会社の名称 Impresadi Construzione Opera Specializzare の頭文字である。

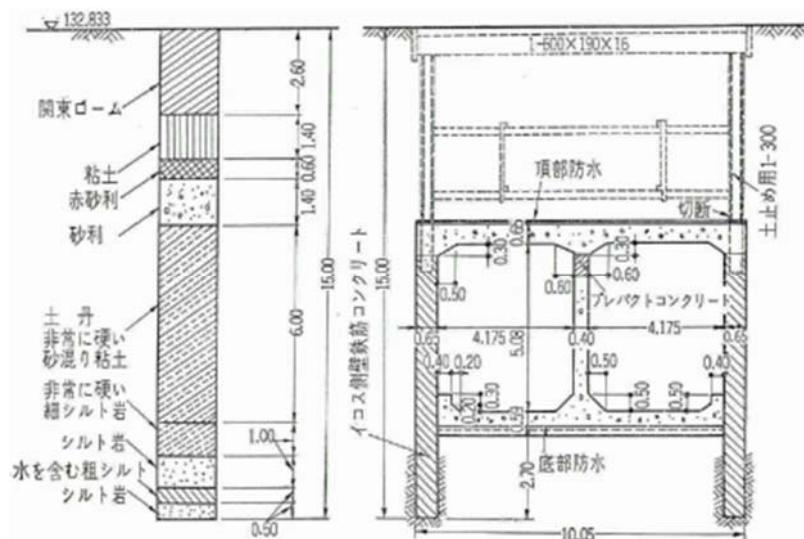


図4.3.2-1 イコス工法施工断面図¹⁾

(2) 対象構造物の工法概要

イコス工法は、土砂内に浸透すると土砂を安定させる性質をもつベントナイト液の特徴を利用して、鋼矢板を打たずにトンネルの壁を築造する工法である。ベントナイト液をみたした縦坑内を掘り下げていき、その中へ図4.3.2-2のように鉄筋かごを建て込んでコンクリートを打設する。この方法で、トンネルの両側の壁を築造したのち、路面を掘り、路面覆工してから上床部をつくり、埋め戻す。その後、トンネル内部を掘り下げ、下床版、中壁などを築造していくことで、トンネルを完成させる。



図 4.3.2-2 鉄筋コンクリート建込み時の様子¹⁾

(3) 施工時の問題点と対策

図 4.3.2-3 に示す下床版を築造する際、側壁から下床版へつなぐ鉄筋はガス圧接をしているが、側壁築造時に鉄筋かごが一部斜めに傾いて建て込まれたことから、下床版取り付け部の鉄筋の高さの不揃いが発生し、わずかながら部分的に無筋状態の箇所ができてしまった。この対応のために、将来的にトラフ台となる構築の突出部を桁状にし、その中に下床版鉄筋を組み込み、コンクリートを打設した。

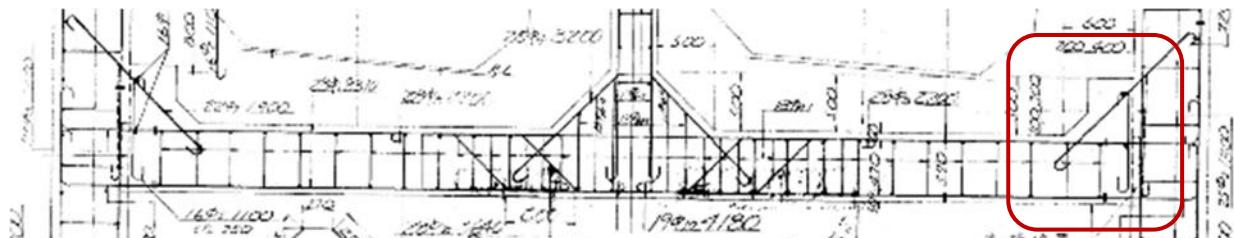


図 4.3.2-3 側壁と下床版の配筋図²⁾

(4) 現在の状況と対策

当該区間の始終端部の構造形式の変化点に一部漏水が発生しているが、現時点では構造上や耐久性上、早急に対策が必要な変状ではない。

4.3.3 東京都交通局都営大江戸線の事例

(1) 対象構造物の概要

都営大江戸線中野坂上駅は、図4.3.3-1に示すように地下鉄と首都高速道路中央環状線が一体構造となっている5層のラーメン構造のトンネルである。工事着手日は1992年（平成4年）3月であったが、首都高速道路を築造するには環状6号線（山手通り）を22mから40mに拡幅する必要があり、拡幅に必要な用地買収が進んでいない状態であった。トンネル部の実際の工事着手は1993年（平成5年）6月であったが、工事ができる場所からできる工種で始めるという状況であった。本格的な工事は1995年（平成7年）10月からで、同じような構造形式の東中野駅、中井駅に比べて約1年の遅れであった。一方、当時は東京都長期計画で大江戸線新宿～練馬間の開業時期が明示されており、東京都交通局も目標にしていたことから、工事開始の遅れを取り戻すことおよび早期開業を目指すべき工期の大幅短縮を図る必要があった。

これらの状況を踏まえ、首都高速道路床付けまでは鋼製支保工7段で掘削する仮設工法を全面的に見直し、首都高速道路部の上床版、中床版、下床版を逆巻き工法へ変更（地下鉄部は当初計画から逆巻き工法）、および地下鉄部の坑内土留杭を柱列式土留杭から地下連続壁の本体利用に変更して1997年（平成9年）12月の開業に間に合わせ、1998年（平成10年）3月に全ての工事が完了した。

当構造物において地下連続壁は、軀体外側の土留めとなる地下連続壁と、地下鉄部の土留め壁となる坑内地下連続壁の2箇所で施工されているが、ここでは地下鉄部の坑内地下連続壁を中心に述べる。

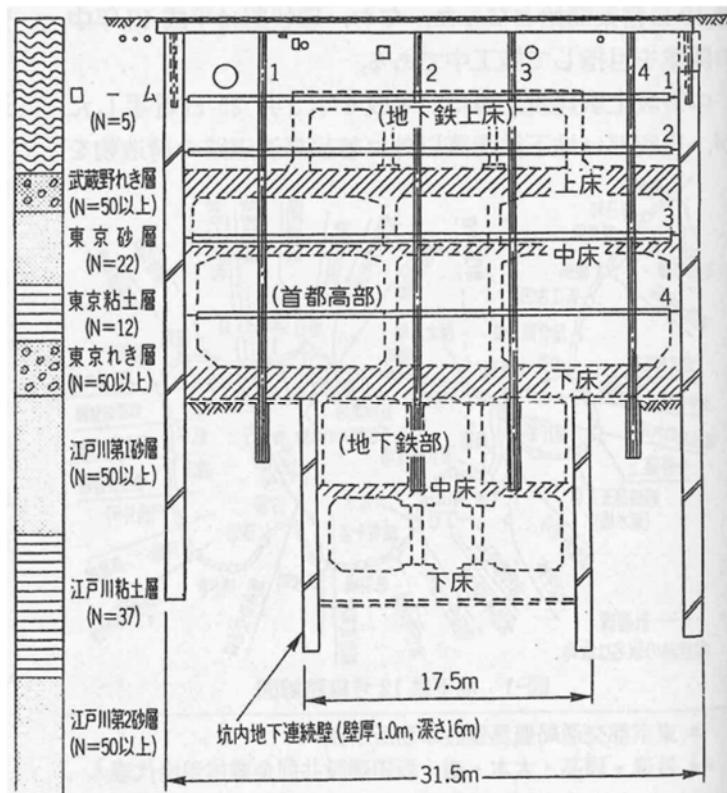


図4.3.3-1 横断面図³⁾

(2) 対象構造物の工法概要

図 4.3.3-2 に施工状況図を示す。首都高速道路部の下床までの掘削、床付け・基礎を施工後、作業床コンクリートと同時に逆 L 字型ガイドウォールを併せて打設し、支障となる中間杭を計測値および現場状況を確認して切断したのち、坑内地下連続壁の施工を行った。

また、施工地盤は高被圧の地下水を多量に含む江戸川砂層にあるため、路下施工での坑内地下連続壁の施工に先立ち、江戸川砂層の揚圧力を低減するため、ディープウェルを施工した。汲み上げた地下水は地表に近い武藏野レキ層、東京砂層にリチャージウェルで注入し、排水量を減らすとともに地盤沈下を抑えた。

掘削機械は作業床から首都高中床版までの 8.5~9.0m に機体高さが収まり、路上での工事に実績のある水平多軸カッター方式の掘削機（MBC-30）を採用した。

先行エレメントは 1 ガット掘削（幅 2,800mm）を行い 1 エレメントとし、後行エレメントは 3 ガット 1 エレメントの状態で、先行エレメントの両端部には仕切り鋼板を取り付けた。

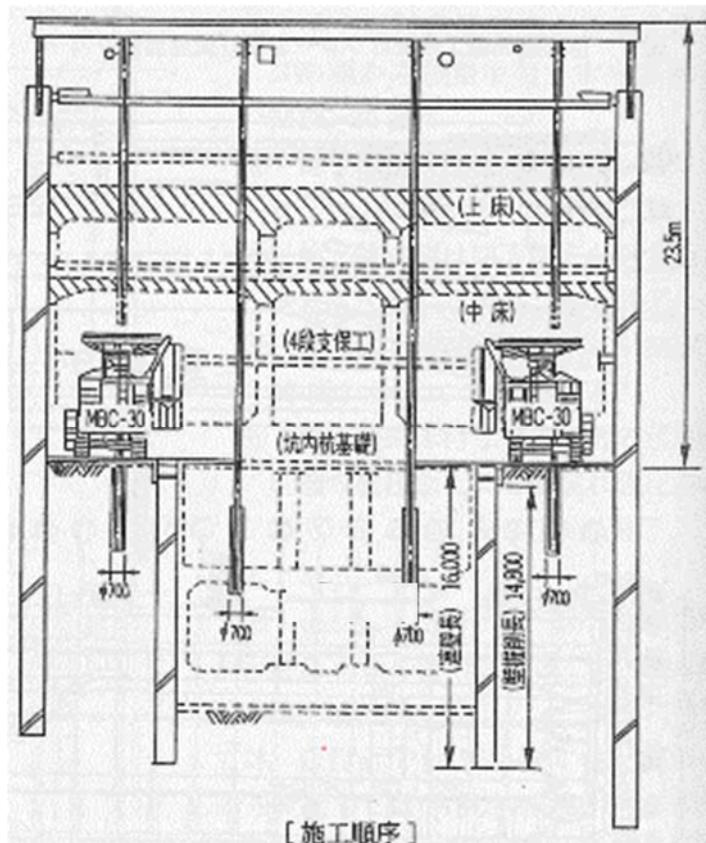


図 4.3.3-2 坑内地下連壁施工状況図³⁾

(3) 施工時の問題点と対策

図 4.3.3-3 に示す坑内地下連続壁の打設コンクリートの頭部は、レイタンスおよび安定液の混入による強度低下が危惧されたため、バキュームにて除去し清水できれいなコンクリートを洗い出すのを確認してから、新しいコンクリートを増し打ちした。

また、坑内地下連続壁施工の際、坑内作業では妻壁端部から 1.5m 以内は狭隘で水平多軸カッター方式の掘削機（MBC-30）では施工が不可能であった。そこで、その部分を BH 掘削機（φ 500）で削孔し、土砂を攪拌し、端部から 1.5m 離れた箇所を水平多軸掘削機で掘削し、その土砂を排土した。

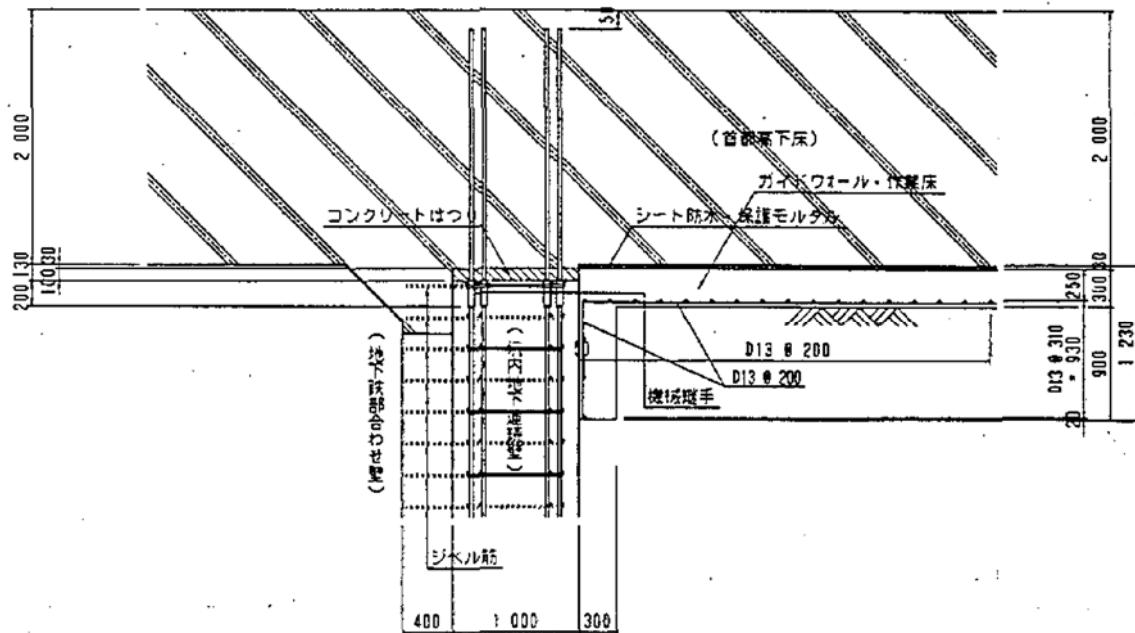


図 4.3.3-3 坑内地下連続壁・本体構築打継部詳細図⁴⁾

(4) 現在の状況と対策

漏水やひび割れ、浮きなど軽微な変状はあるものの、現時点では構造上や耐久性上、早急に対策が必要ではなく、通常全般検査にて追跡調査を実施している。

4.3.4 横浜市交通局の事例

(1) 対象構造物の概要

事例となる対象構造物は、近接する地下に埋設する下水幹線との離隔を確保するために、地下連続壁を地下鉄駅舎の本体壁として利用する構造として2003年（平成15年）5月～12月の期間に施工されたものである。図4.3.4-1および図4.3.4-2に概要図を示す。なお、地下連続壁はRC連壁で地下躯体と一緒に壁構造として構築されたものである。

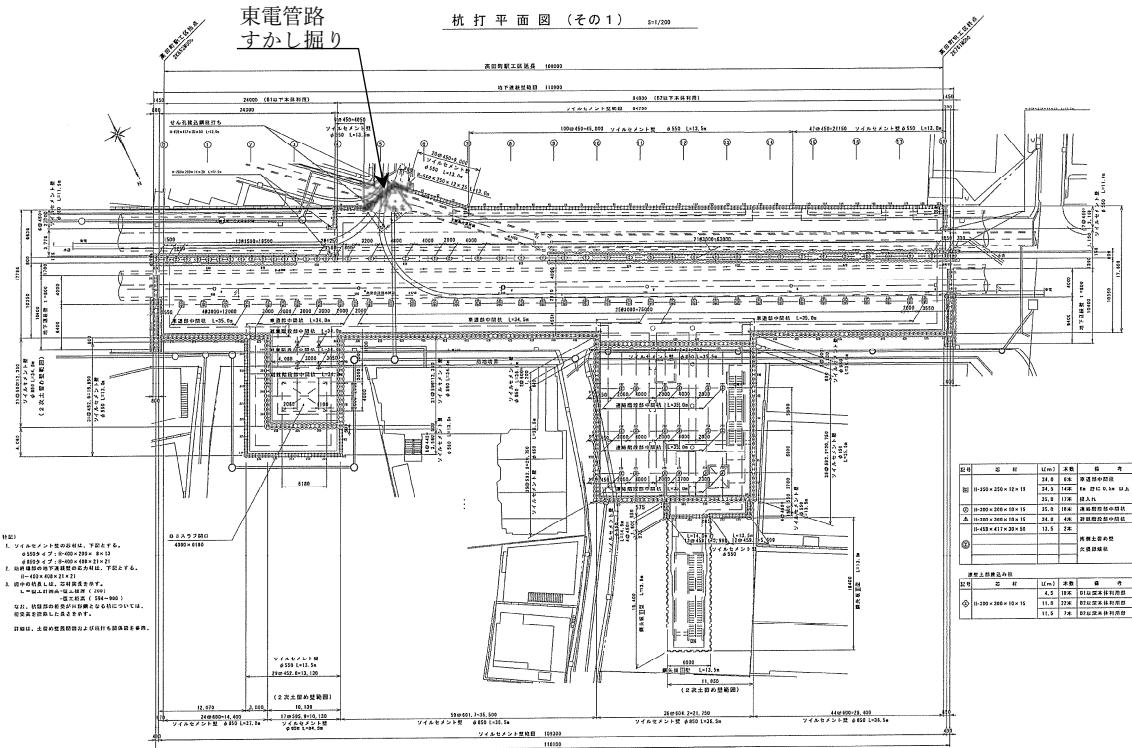


図4.3.4-1 概要図（平面図）⁵⁾

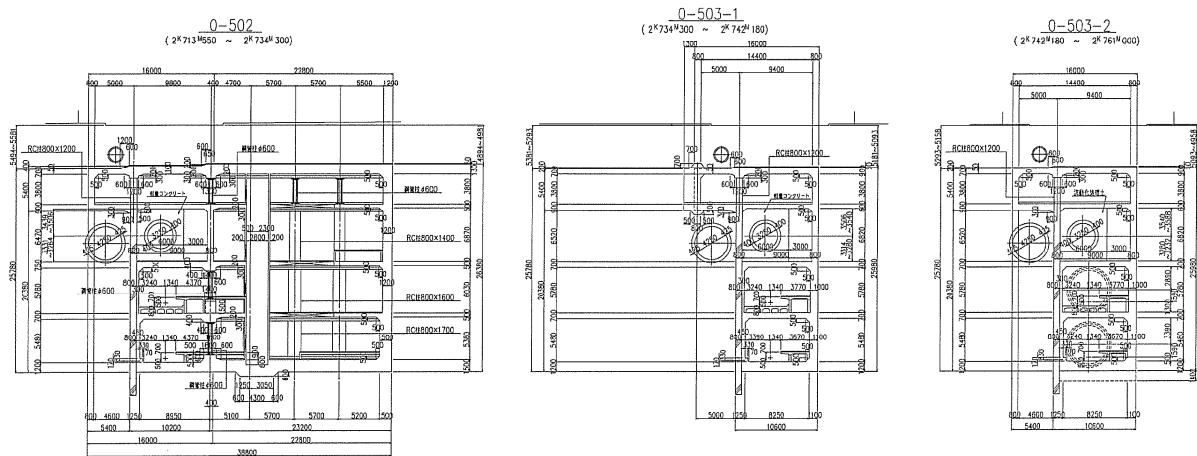


図4.3.4-2 概要図（断面図）⁵⁾

(2) 対象構造物の工法概要

地下連続壁は、始終点部および直線部の一部において埋設管があったため、透し掘り工法を採用して構築している。図 4.3.4-3 のエレメント割付図に透し掘り範囲を示す。地下連続壁の掘削深さは 37.7m、幅 0.9m、延長 110.9m であり、施工数量 3,735m² を構築している。

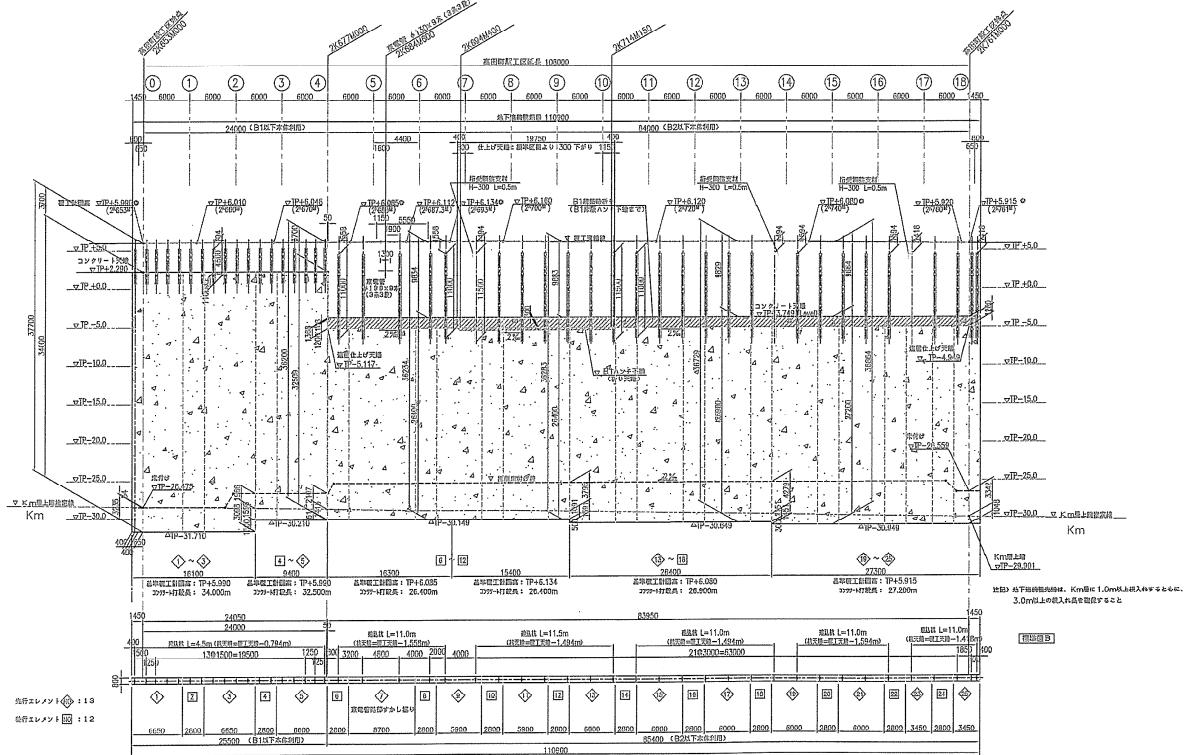


図 4.3.4-3 地下連続壁エレメント割付図および断面図⁵⁾

(3) 施工時の問題点と対策

後行エレメントの掘削において、鉛直方向の施工誤差は許容範囲内であったが、壁面のズレが最大 20cm 発生した（図 4.3.4-4）。その原因是、後行エレメントの掘削時に溝壁測定を 1 箇所しか行わなかったため、地下連続壁構築時に壁面のズレが発生していることを確認できなかつたことから、内部掘削完了後に壁面のズレを確認した。そのため、連壁面は内壁を施工する設計となっていたことから、壁厚を変更することにより壁面のズレを解消する対策を採用している。その後、本経験を踏まえて連壁の施工においては、後行エレメントの掘削時には最低 2 箇所の溝壁測定を行い、鉛直方向の精度だけではなく、壁面方向のズレにも留意するようになった。

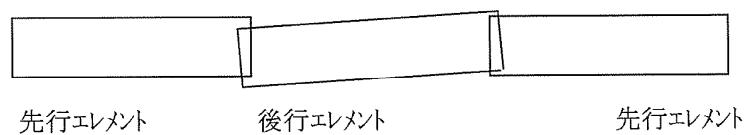


図 4.3.4-4 エレメントの施工誤差概念図⁵⁾

(4) 現在の状況と対策

現在、20箇所の漏水とひび割れが確認されており、通常全般検査にて追跡調査を行っている。接近点検時にたたき点検を実施し、必要に応じて樋を設置して導水による補修を行っている。

4.3.5 福岡市交通局の事例

(1) 対象構造物の概要

事例となる対象構造物は、道路幅員が広く、土被りが浅く、直線に近い約 100m 区間の側壁である。ベントナイト、水、セメントに特殊な硬化遅延材を混入したグラウト材を土留め掘削における安定液として使用するとともに、プレキャスト PC 版（以下、PC 版）を建て込み残置して躯体と一体壁とする地下連続壁工法（パナソル工法）を 1976 年（昭和 51 年）4 月～1978 年（昭和 53 年）10 月の工事期間にて試験的に採用され構築されたものである。図 4.3.5-1～図 4.3.5-4 に地下連続壁断面図と PC 版図を示す。

この PC 版は、隅角部剛結の状態でのフルプレストッシング部材であり、隅角部剛度が低下し、負の曲げモーメントが当初の 50%に減衰してもひび割れが発生しない範囲を限度として設計されていたが、PC 版をセットした直後に数枚の PC 版に 4~9 か所のひび割れや漏水が発生した。

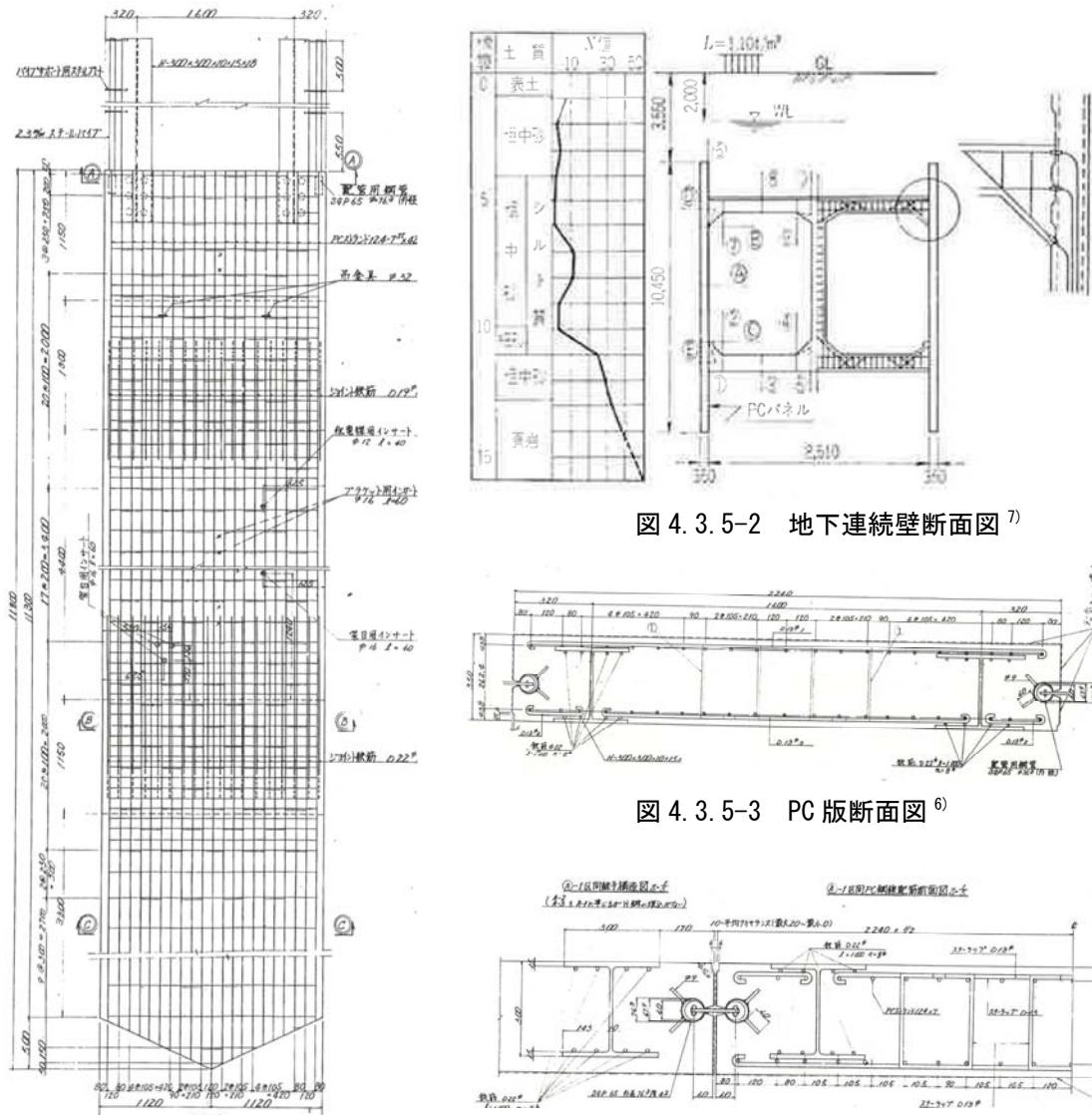


図4.3.5-1 PC版平面図⁶⁾

(2) 対象構造物の工法概要

地下連続壁工法は、一般に肉眼では確認できない地中の泥水の中に鉄筋かごを吊込みコンクリートを打ち込む工法であるが、建設当時は壁体の精度と強度に懸念があった。本工事で採用したパナソル工法は、側壁をPC版とし、PC版を地上から建て込んで改良を図る工法である。

(3) 施工時の問題点と対策

PC版をセットした直後にひび割れが縦方向に4~9か所発生しており、その直後に耐力向上を目的に鋼板補強を実施しているが、漏水が発生している状況である。鋼板補強は、全長にわたり全面に貼り付けており、1m幅の鋼板をアンカー2列でPC版に固定している。なお、PC版間ジョイント部の硬化グラウトに、若干の軽微な水の滲み出しが現れたが、これらは時間の経過とともに収まる傾向を示していた。

(4) 現在の状況と対策

鋼板補強しているため、ひび割れ幅の経年的な進行は確認できており、補強鋼板には錆がでているが断面欠損をしていない状況と想定している。内空寸法の測定を年1回実施するとともに、漏水には若干の塩化物イオンが含まれているため、補強鋼板の健全性を保つためにフッ素樹脂塗装を10年に1回の頻度で実施する維持管理を実施している。これらはパナソル工法特有の維持管理方法であり、内空および鋼板の厚みは20年以上変化がない。打音検査では、PC版の健全性を確認しており、鋼板の浮きが確認された箇所はあるが、構造的な問題は生じていない。

なお、設計時において塩害対策に関する資料がない状況である。

参考文献

- 1) 東京地下鉄株式会社：営団地下鉄 建設技術史, 2006.
- 2) 東京地下鉄株式会社提供資料
- 3) 岡田泰一, 白杵進, 大和田裕：逆巻き工法で首都高トンネルと一体施工 都営地下鉄12号線 中野坂上工区, トンネルと地下, Vol.29, No.3, pp.25-31, 1998.
- 4) 東京都交通局提供資料
- 5) 横浜市交通局：高速鉄道4号線高田町駅工区土木工事 工事記録, 2007.
- 6) 福岡市交通局提供資料
- 7) 津高正高, 前原昭一郎：PC版建て込みによる地中壁工事 福岡市地下鉄のパナソル工法, トンネルと地下, Vol.9, No.4, pp.35-43, 1978.

4.4 維持管理における留意点

本節では、連壁本体利用の開削トンネルの維持管理における留意点を示す。

4.4.1 施工時記録の引継ぎ

施工時の情報は、構造物の維持管理において変状発生時の原因特定および対策の検討時に有用な情報となりうる。連壁本体利用の構造物において、変状原因の推定や対策工の選定に有用な情報となりうる施工時記録を以下に例示する。

- ① 施工方法・使用材料
- ② 繼手構造および継手部の止水対策
- ③ 溝壁測定の結果
- ④ 地下連続壁施工時の逸水等の事象に関する記録
- ⑤ 掘削・埋戻し時の地下連続壁の変位の計測データ
- ⑥ 掘削・埋戻し時の地下連続壁の漏水状況
- ⑦ 完成時の検査・補修記録

4.4.2 検査結果の記録および保存

施工時の状況や周辺環境、過去の事例等から、変状リスクが大きいと推定される箇所は、特に注意して検査を行うことが望ましい。たとえば、連壁本体利用の構造物では、防水工の選定において、一般的な開削トンネルよりも選択肢が限られる。漏水に起因する変状は進行性を有する場合もあるため、必要に応じて過去の検査記録を参照できるように適切に記録・保存することが重要となる。連壁本体利用の構造物における検査時の主な留意点等を以下および図4.4.2-1に例示する。

- ① 構造形式の変化点となる連壁本体利用構造の始終端部に変状が生じる場合がある。
- ② 作用する水圧が大きい場合、特に漏水の発生状況に留意する。
- ③ 逆巻き工法の場合、床版と側壁の接合部で漏水が生じる場合がある。

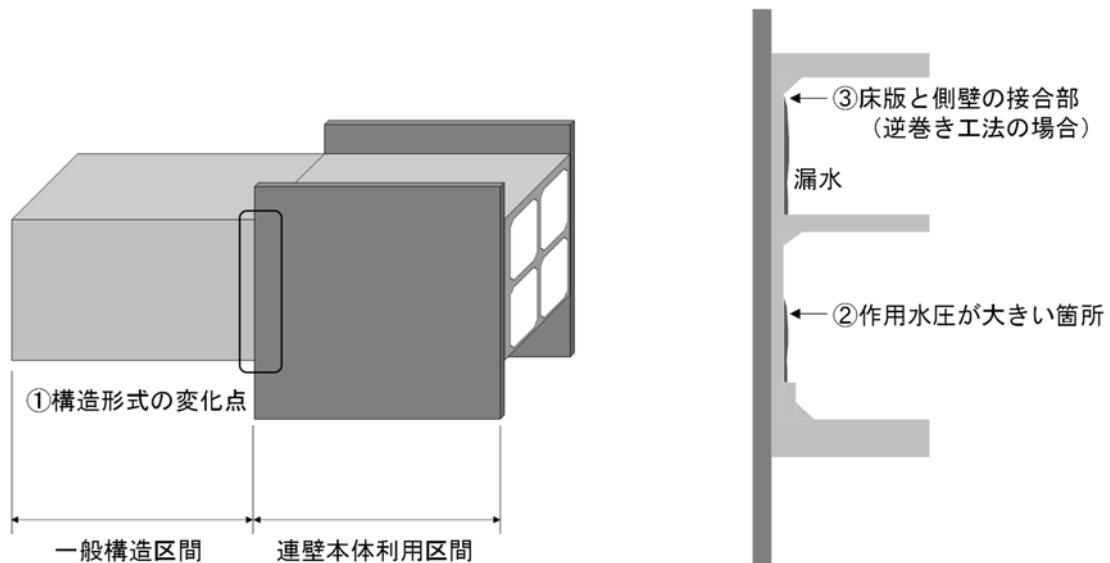


図 4.4.2-1 検査時の主な留意点

4.4.3 変状発生後の措置

変状が発生した場合、その種類や程度に応じて経過観察、調査、計測、補修・補強等を実施する。地下構造物は、近年高速道路で実施されている橋梁や舗装の大規模更新のような補修・補強工事の実施が非常に難しい構造物であるため、既存構造物の長寿命化が重要となる。そのため、変状を早期に発見して、適切な措置を施すことが肝要となる。今回の調査では、4.3.5節の鋼板補強を除くと、工法に特有の措置は行われていなかった。連壁本体利用の開削トンネルでは、一般的な開削トンネルと比較して防水工の選定に制約が強いことを鑑みて、漏水対策工と合わせて、措置の例を以下に示す。

措置の例

- ・導水樋等（漏水中に塩化物イオン等の有害な成分が含まれていない場合等）
- ・止水注入等（漏水中に塩化物イオン等の有害な成分が含まれている場合、漏水位置が明確な場合、漏水量が多い場合等。）
- ・鋼板補強等（施工時や供用中の部材の損傷や経年劣化、地下水位の変化等の環境によって耐力を向上する必要がある場合等） 4.3.5 参照

※塩害対策工については、第3章を参照されたい。

補修・補強工法の選定、仕様の決定においては、その構造物の施工法や環境条件に関する情報が重要なとなる。本章で示す連壁本体利用の構造物の特徴に加えて、当該構造物の施工時の記録、検査結果、施工間合い等の共用状況を総合的に考慮して判断することが肝要となる。

4.5 現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点

本節では、連壁本体利用について、現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点を示す。

4.5.1 エレメント継手部での止水性確保

エレメント継手の種類は、応力伝達で要求される継手性能から決定される。継手の種類により、止水に対する考え方は異なるため、継手の種類に応じた止水対策や継手部に不具合を生じさせないための施工計画の立案が必要となる。

4.5.2 水中コンクリートの品質確保

地下連続壁のコンクリートは、トレミー管を使用して水中に打ち込まれるため、流動性に富んでいることが必要である。流動性が乏しい場合は、トレミー管を中心に山形状にコンクリートが打ち込まれ、ジョイント部分に土砂、掘くず等のスライムが溜まったり、スライムや安定液の巻き込みによるコンクリートの局部的劣化や空洞が生じることがある。また、過密配筋や鉄筋間隔が狭い場合には、コンクリートの充填が不十分になる等の恐れがある。スランプで管理するコンクリートの場合、スランプが21cmを超えると材料分離が生じやすくなり、18cm未満とすると流動性が悪くなる場合もあり、注意する必要がある。

水中コンクリートに関する留意事項、検討項目の詳細については、「コンクリート標準示方書〔施工編：特殊コンクリート〕、土木学会」を参考にするとよい。

4.5.3 後行エレメントの温度ひび割れ対策

地下連続壁の設計時に温度応力解析を実施し、後行エレメントの先行エレメントによる拘束の影響を定量的に把握し、ひび割れ指数に応じて適切な対策を講じる。外部拘束による水平方向の温度ひび割れ対策としては、例えば、鉛直鉄筋の鉄筋量増加や、中庸熱セメントや低熱ポルトランドセメントへの変更が考えられる。

4.5.4 溝壁の精度確保

連壁本体利用の場合、溝壁の精度がそのまま壁体の精度につながるため、溝壁の精度確保が重要である。溝壁の鉛直精度を確保する手段として、溝壁のリアルタイムモニタリングが有効な手段となるが、リアルタイムモニタリングの実施が困難な場合は、超音波での溝壁測定頻度を上げるなどして、掘削しながらの確実な修正での対応が可能なように、事前の精度確保の対策を検討しておく必要がある。

4.5.5 床版接続部の止水性確保

上下床版と地下連続壁の接合部は、止水板を配置するとともに、防水シート端部を地下連続壁に確実に定着し水みちを遮断することが重要となる。また、エレメント間継手は水みちとなる可能性が高いため、あとの対応が困難な床版接続部は、エレメント継手間に止水注入を実施したり、事後注入が可能なように止水注入用のホースを設置しておくことも有効な対策となる。

4.5.6 環境条件に合わせた漏水リスクに対する計画

地下連続壁の漏水リスクへの対策は、環境条件により異なる。まず、塩害が懸念される環境条件の場合は、かぶりを十分に確保するとともに、塩化物イオンの浸入を抑制するため高炉セメントの使用や水セメント比の小さい配合とし、密実なコンクリートとなるように配合設計を行うことが重要である。また、共用中に漏水が生じた場合は、止水を第一に考え、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透を防止する必要がある。

一般の環境の場合は、止水だけではなく、導水・排水による漏水リスクへの対応が考えられる。連壁本体利用の場合は壁形式により漏水リスクは異なる。一体壁形式は、内壁も構造壁の一部となり、床版と一緒に構築されるため、内壁に水みちとなるひび割れやコンクリートの不具合が生じない限り漏水が生じる可能性は低い。一方、単独壁形式では、地下連続壁のみが外壁となるため、ひび割れや継手部からの漏水の可能性が高い。しかし、どちらの形式に対しても、漏水発生時には導水、排水が可能となるよう、壁体前面に排水用の側溝を計画するとともに、排水ピットへの導水経路を当初より計画しておく必要がある。排水ピットの容量やポンプ容量は、設計時に想定した漏水量により決定されるため、その計画漏水量を上回る漏水が生じた場合は、止水注入等で漏水量の低減を図る必要がある。

4.5.7 BIM/CIM 活用による施工記録の維持管理への引継ぎ

設計段階で BIM/CIM モデルを作成し、施工から維持管理に情報を引き継ぐことが期待されている。施工時には、設計段階で作成された BIM/CIM モデルの更新が重要となる。使用材料の品質管理記録のほかに、掘削時の溝壁測定記録などの施工時記録を BIM/CIM モデルにリンクされることで、工事記録や検査記録を参照することなく施工時の状況を確認できるようになることから、共用期間中の変状発生時には、変状発生原因の推定に用いることが可能となると考えられる。また、施工時の不具合対応記録とリンクさせることで、不具合箇所を維持管理時の重点管理項目に設定できるなど、施工から維持管理への引継ぎが容易となるため、今後の活用に期待したい。

5. その他の特殊な開削トンネル

5.1 構造および施工法の紹介

ここでは、道路下や河川下においてパイプルーフおよび河川締切工法を用い、トレーンチ工法により施工された箱型トンネルの施工事例について示す。

5.1.1 パイプルーフを併用したトレーンチ工法の紹介

横浜市営地下鉄3号線中川駅～あざみ野駅間における東名高速道路との交差部は土被りが約4mと非常に小さいことから、あざみ野駅側に発進立坑、中川駅側に到達立坑を設け、延長66.0m、40本の矩形パイプルーフを施工した後、トレーンチ工法による掘削および躯体構築を行った。施工期間は、1988年（昭和63年）7月から1991年（平成3年）3月までである。

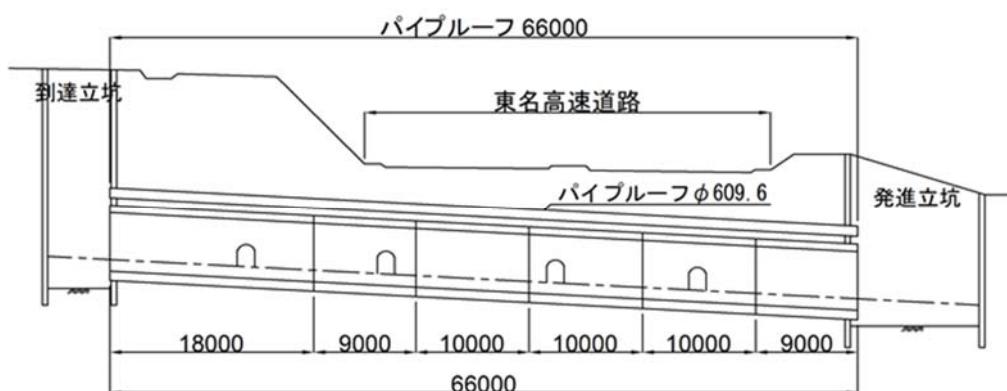


図 5.1.1-1 縦断図¹⁾

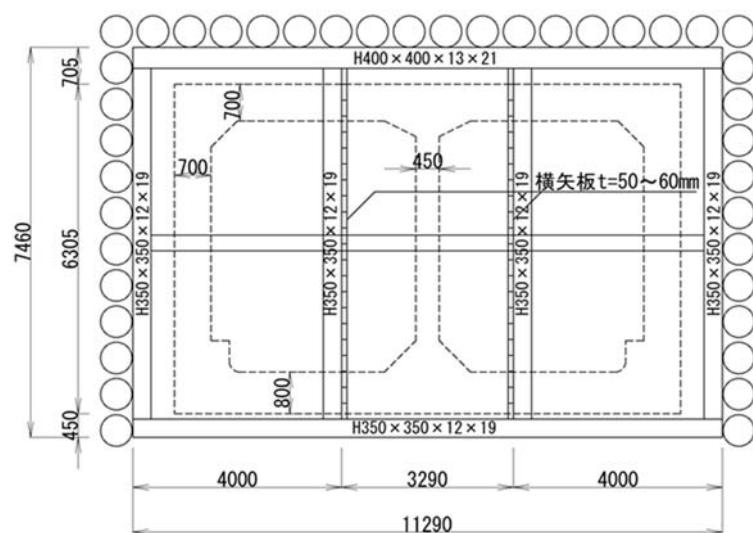


図 5.1.1-2 断面図¹⁾

パイプルーフの施工については、延長が 66mと長大であることから、1/1000 程度の精度が要求されるため、基準管に先導管方式が採用されている。

先導管は、下水道工事で多く採用されている推進方向の制御可能なホレッター式先導管を使用している。

先導管が到達した後、基準管となる鋼管を接続して圧入し、到達側で順次回収を行い、続いてパイプルーフの圧入を行う。パイプルーフは、6mに分割した鋼管を 11 本繋ぎ合わせたものを 40 本施工されている。

トレンチ工法については、パイプルーフで囲まれた断面にトレント支保工・横矢板を設け左右および中央の 3 つの坑に分け、a, b, c 坑とし、さらに各坑を上下半に分割し、計 6 分割のトレント掘削を行った。支保工は 1.2m ピッチで設置し、掘削後ただちに建込ジャッキアップを行い、支保工とパイプルーフ間、パイプルーフと背面地山間の緩みをなくした。また、縦断方向にも 6 つのブロックに分割し、トンネル両端部のブロックを施工後、発進立坑側のブロックから到達立坑に向けて施工を進めた。ブロックごとの施工順序を以下に示す。

- ① トンネル側部の a 坑上半から掘削し、4m 遅れて下半を掘削し、1 ブロック (9~10m) の掘削が完了した後、側壁部の構築を行う。
- ② a 坑掘削完了後、引き続き b 坑掘削を a 坑と同様の要領で施工し、1 ブロックの掘削完了後、b 坑の側壁部を構築する。
- ③ a 坑および b 坑の側部躯体完了後に c 坑の掘削を行い、掘削完了後、下床、中壁および上床の構築を行い 1 ブロックを完了する。
- ④ 先行ブロックの構築完了後、次ブロックの施工を①～③の要領で繰り返し行う。

各ブロックにて躯体コンクリート打設完了後に上床裏込モルタルを打設した。横断方向に 3 箇所、縦断方向に 20m ごとに躯体内に 4 インチ配管を配置し、ポンプ吹上により打設した。

外防水は躯体を貫通する支保工部のみ施工している。なお、打継ぎ目に「塩化ビニール樹脂製止水板」を入れているほか、中間杭および切梁切断部は防水モルタルで埋めて止水した。

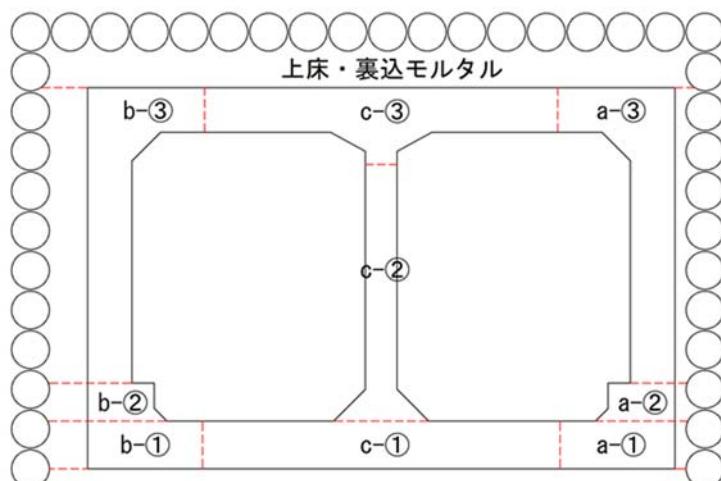


図 5.1.1-3 打設ロット割り²⁾

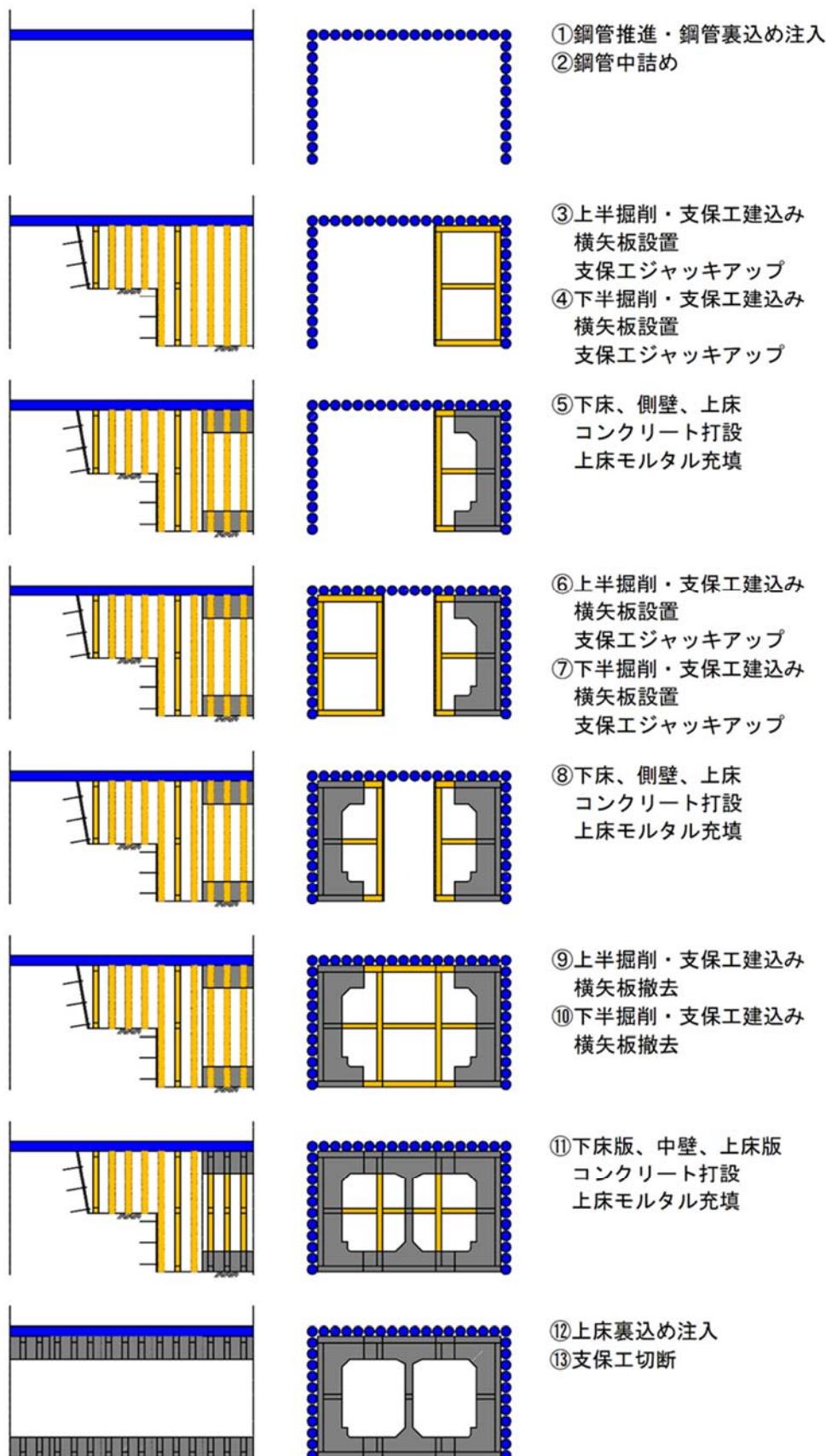


図 5.1.1-4 施工順序図



図 5.1.1-5 トレンチ中央坑坑口部掘削の様子²⁾

5.1.2 河川締切を併用したトレンチ工法の紹介

横浜市営地下鉄 3 号線弘明寺駅～上大岡駅間における大岡川との交差部は、道路に沿って幹線下水道が計画されているため、地下鉄構造物の占用可能な道路幅員が狭く上下 2 層式の箱型トンネルとなっている。施工にあたっては、道路交通や河川機能を維持しながら河川下に地下鉄構造物を構築するため、橋梁下部で河川締切工法を行ったうえでトレンチ工法を採用した。

まず初めに現状の河川機能を維持すると共に河川下での施工を考慮し河床版を構築することとし、渇水期に半断面ずつ河川締切により施工を行った。河床版は、鉄筋コンクリート板(厚さ 300 mm)で覆い、その上に河水を流す河床張りの方法をとり、河床鉄筋コンクリートを支持するため、H 鋼 (H-300) の杭を桁下よりボーリングマシンで建込みを行っている。なお、この杭はトレンチ掘削の支保工としての機能を兼ねる。

その後トレンチ工法により橋台下に箱型トンネルの築造を行った。トレンチ工法の施工手順は、まず橋台下部にトンネルの側壁部分を溝堀した後側壁コンクリートを打ち、側壁で橋台を受け、次に上床部分を造り、橋台を完全に支持してから順次内部を掘削して躯体を完成させた。

掘削は、幅 2m のトレンチを片側ずつ順番に掘削した。掘削高さは安全性の観点から 2m 以下とし、それ以上の場合は段切りとした。掘削方法は様々な検討を行った結果、人力による掘削としている。側壁については順巻きでコンクリートを打設し、将来的に空間となる部分については貧配合コンクリートを充填している。このトレンチ掘削における切梁間隔は 1m となっており、これが躯体内に残置されることから防水工の施工は行えていない。

側壁を施工後、中央部の施工にあたっては両側壁の変動を抑制するため逆巻工法によりコンクリート打設を行う。コンクリートの乾燥収縮によるクラック発生防止のため、中央部について無収縮コンクリートを採用している。

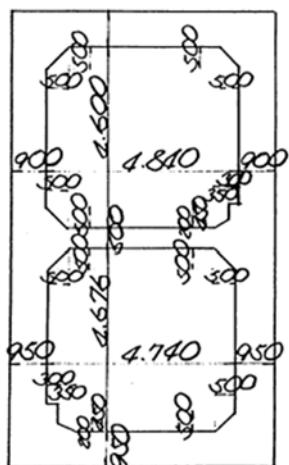


図 5.1.2-1 構造図



図 5.1.2-2 断面図

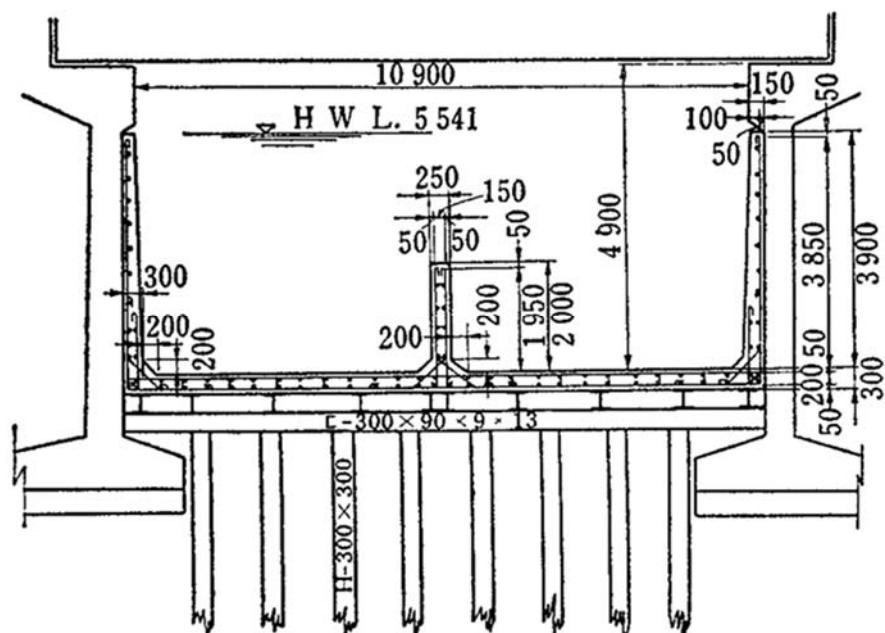


図 5.1.2-3 橋下河床止水工³⁾

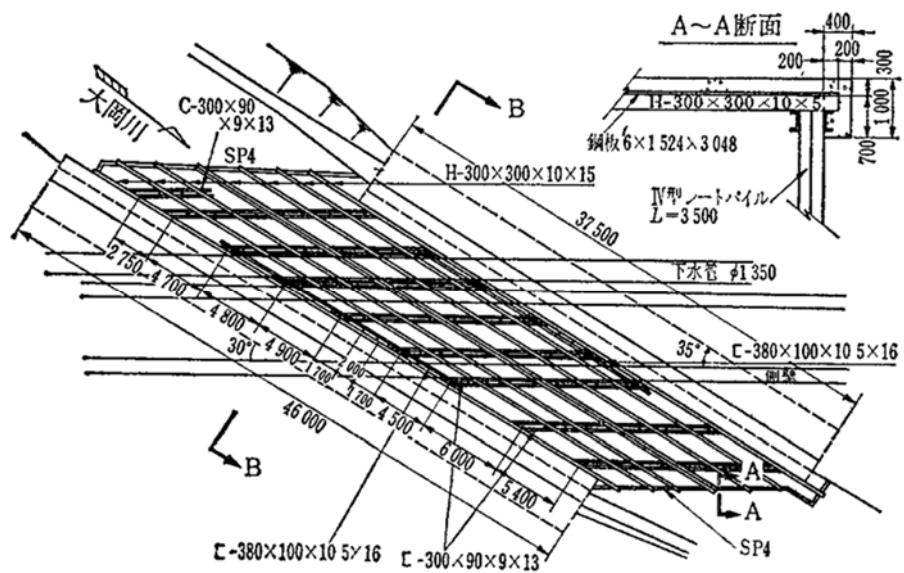


図 5.1.2-4 橋下構築および河床止水工³⁾

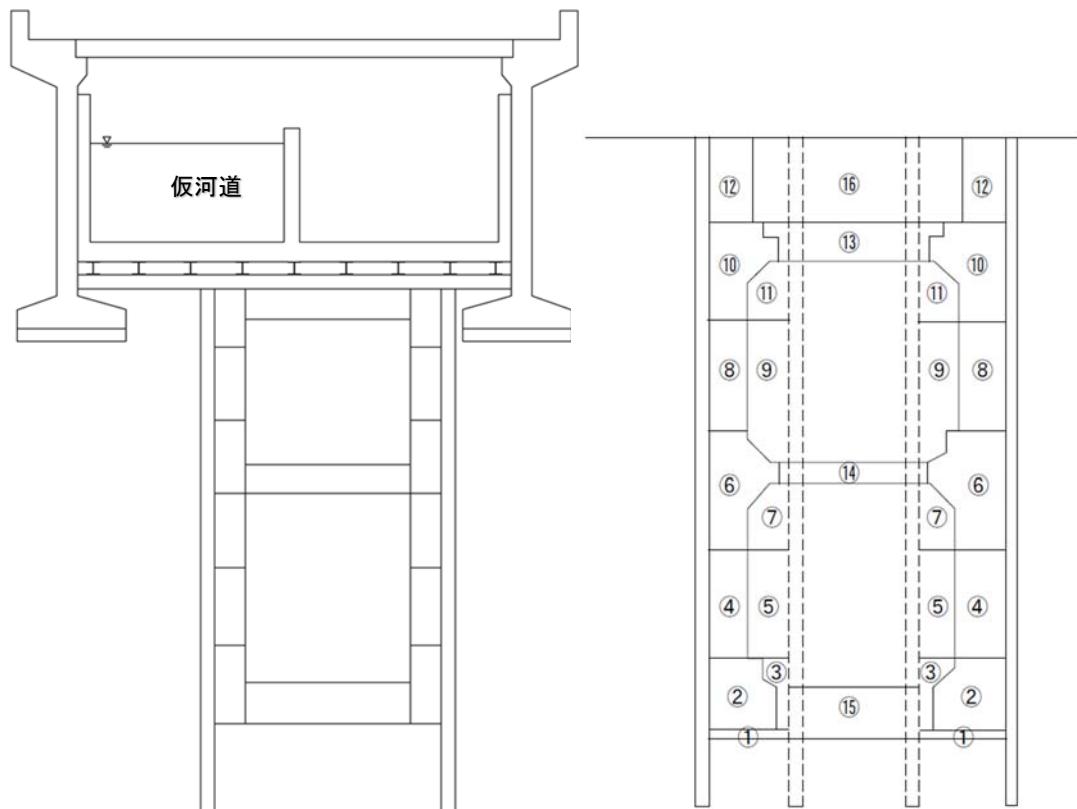


図 5.1.2-5 打設ブロック図³⁾

5.2 構造物の変状と想定されるメカニズム

5.2.1 パイプルーフを併用したトレンチ工法における変状と想定されるメカニズム

当該区間は、丘陵地ではあるがパイプルーフがあることで偏土圧が地下構造物にかかることがないため、構造物の変状は比較的少なく、漏水も少ない。このため、隣接する一般的な開削工法による施工箇所と比較して、鉄筋腐食が特別進んでいる兆候は見られない。

しかし、今後は下記に示す要因から構造上漏水リスクは高くなると考えられる。漏水への事前対応としては、縦断方向の施工目地に止水板を設置しているほか、支保工の巻き込み箇所では躯体を切り欠いて打設したうえで防水モルタルによりキャッピングを行っている。

- 漏水リスクが高くなると考えられる要因
 - 打継ぎ目が多いため、そこからの漏水が発生することが考えられる。
 - 躯体外側の防水は支保工周辺部しか施工していないため、地下水位より低い範囲についてコンクリート収縮ひび割れ等から漏水する。
 - 支保工や配管を巻き込んで躯体を構築するため、躯体を貫通する形で残置される支保工に沿って水みちができる。

また、施工目地や支保工処置箇所が多く、コンクリートひび割れの発生しやすい状況にある。とくに、縦断方向の施工目地、横断方向の施工目地および支保工処置が近接する箇所については、閉合クラックが発生している箇所も見られコンクリートの剥落の危険性が高まっている。施工時の各坑の作業空間は狭小であり、とくに妻型枠の設置および上床コンクリート打設に手間がかかりブロック間の施工継目の品質確保が困難な施工状況であったと考えられる。

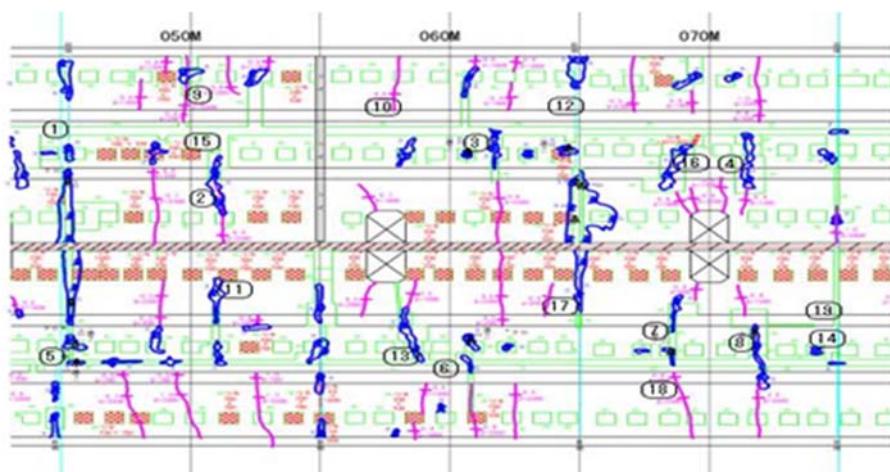


図 5.2.1-1 変状展開図

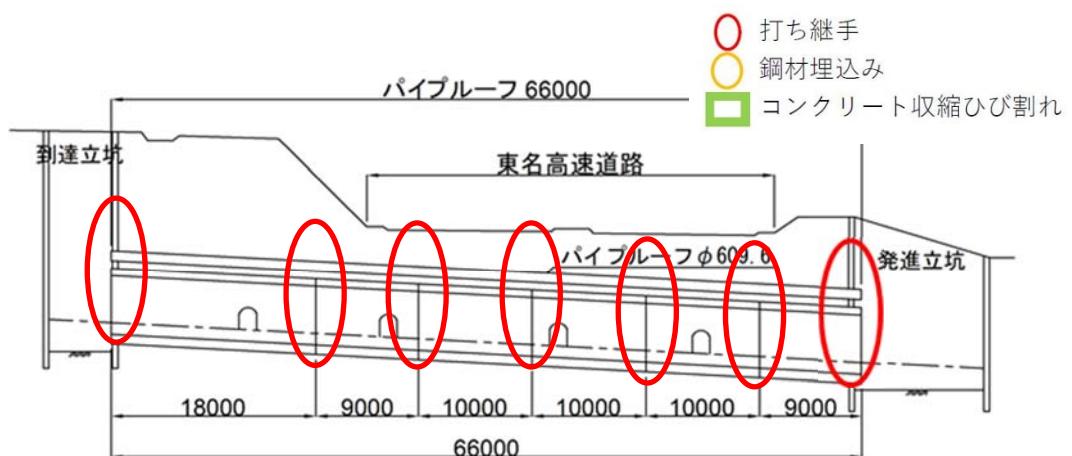


図 5.2.1-2 打継ぎ手位置図(縦断図)

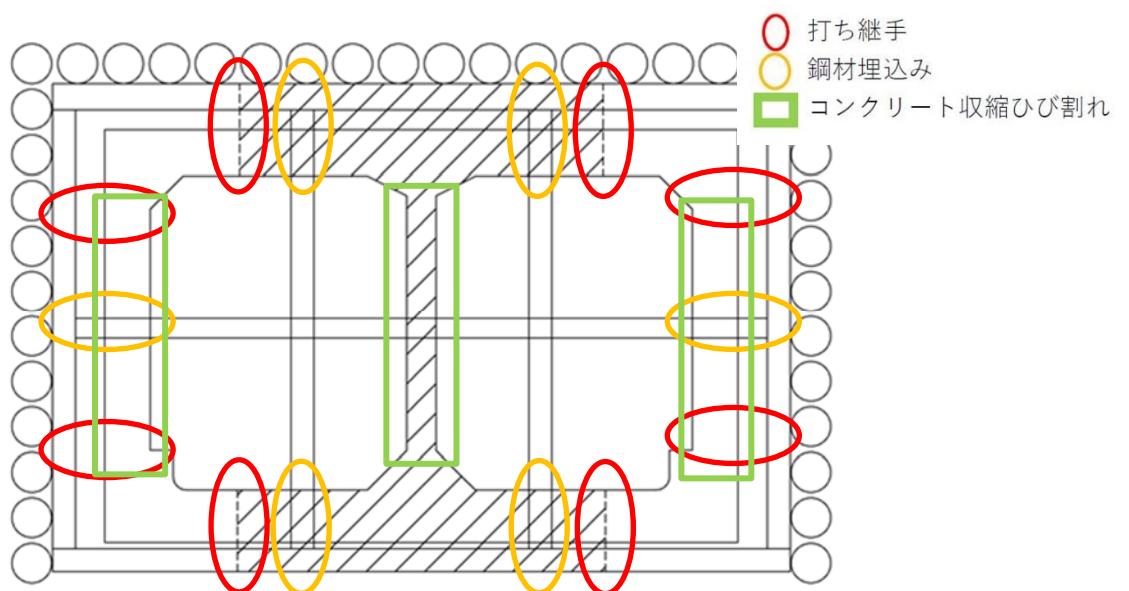


図 5.2.1-3 打継ぎ手等位置図(横断図)



図 5.2.1-4 状況写真

5.2.2 河川締切を併用したトレンチ工法における変状のメカニズム

施工時の記録では、「コンクリートの乾燥収縮による発生防止のため無収縮コンクリートを使用した結果、横断方向のクラックは発生せず、残置された切梁の影響により縦方向のクラックが数か所発生している」とあるが、現在の状況は横断方向のひび割れやそこからの漏水も多くみられる。とくに打継ぎ目や中間杭処置あとからの漏水が多くみられ、防水工が未施工となっていることが大きな要因になっていると考えられる。

また、とくに上床版においてかぶり不足のため鉄筋が露出している箇所が見られた。狭小な作業空間での上床版のコンクリート打設における品質確保の難しさがあったと考えられる。一般的な開削工法で施工した前後の区間と比較して、当該区間の軸体の変状は明らかに多く、劣化が顕著となっている。

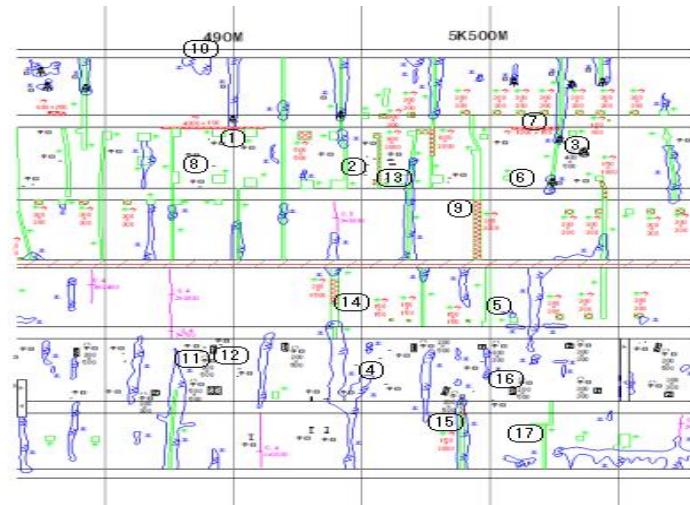


図 5.2.2-1 変状展開図



図 5.2.2-2 上床版の様子



図 5.2.2-3 側壁の様子

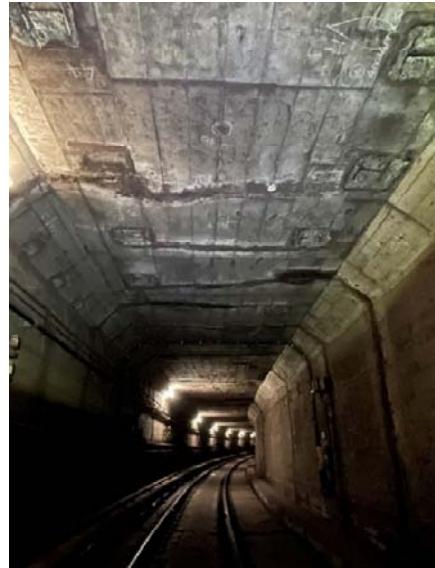


図 5.2.2-4 全景の様子

5.3 維持管理の事例

トレンチ工法に特質した補修は、行っていない。一般的な漏水対策である止水材を注入する止水工や躯体に樋を設置する導水工による対策を行うほか、上床の縦断方向の施工目地については、表面被覆による剥落防止措置の対応を行っている。

また、中間杭跡において建設当時に設けた無収縮モルタルの変状が見られ、剥落の恐れがあるため、無収縮モルタルを撤去し、H鋼の防鏽処理を行っている。



図 5.3 上床版導水工の様子

5.4 維持管理における留意点

トレーニング工法による箱型トンネルの構造および維持管理の留意点を以下に示す。

(1) 外防水工の実施

現在は吹付防水や塗布防水など多様な防水工法が選択できる。残置される支保工の周辺やパイプルーフ部など、シート防水の施工が困難な箇所においても防水工が可能であり、構造物全体について防水工を施工し漏水の発生を抑制することができる。

(2) 目地部の防水およびひび割れの抑制

施工目地が多い構造物であり、目地部からの漏水が考えられることから、設置する止水板については入念に検討することが必要となる。また、あらかじめ表面被覆を行い、クラックや漏水の発生を抑制するとともに、コンクリート表面の剥落を防止する。

(3) 支保工の検討および切断面の処理

中間杭や切梁はランクアップ等により本数を極力少なくし、軸体内の残置物を極力少なくするとともに、作業空間を広く確保することで品質の確保につなげることができる。

現在では供用中の剥落が懸念されるため支保工切断面にモルタルを施工することはせず、防錆塗装で処理する方法が一般的となっている。

(4) 検査結果の記録および保存

構造物検査で確認された変状において、適切に変状を記録・保存することで変状の進行性を確認し、補修計画を立てることが重要と考える。

5.5 現在の技術を前提とした計画・設計・施工の留意点

5.5.1 特殊トンネル工法

都市部における鉄道や道路等の長距離トンネルの工事には、一般的にシールド工法が用いられているが、平面交差部等の短いトンネルを構築する工事では、直上部の鉄道や道路等への影響を最小限するために、特殊な施工方法が用いられている。これら特殊なトンネル施工方法は、土木学会トンネルライブラリー¹⁾において、「特殊トンネル工法」として下表に示すように整理されている。

本節では、特殊トンネル工法の計画・設計・施工に関する留意点について示す。

表 5.5.1 特殊トンネル工法一覧

構造形式	構造と施工の概要		工法名
下路桁形式	挿入したエレメントを床版（横桁）とし、主桁、橋台により支持する	角形鋼管	URT 工法
		中空角形 PC 桁	PCR 工法
		鋼管を内部から補剛	NNCB 工法
箱型形式	エレメントを横方向に剛結する	PC による横締め	URT 工法
			PCR 工法
		継手による一体化	JES 工法
		RC で一体化	MMST 工法
		RC ボックスの製作	ハーモニカ工法
箱型形式	路下で函体を場所打ちする	鋼管を支保工で支持	パイプルーフ工法
		継手で一体化した鋼管を主桁で支持	パイプビーム工法
		分割施工した仮設セグメントで支持	URUP 工法（分割シールド形式）
		地盤を切削して支保工で支持	COMPASS 工法
	函体を地中に挿入する	防護鋼管下で函体をけん引	フロンティヤッキング工法
		防護鋼管下で分割函体を交互に推進	ESA 工法
		角形鋼管ループと函体を置換え	R&C 工法
		ロの字配置の角形鋼管と函体を置換え	SFT 工法
		支保工内で函体をけん引	COMPASS 工法
	掘削機の後方で本設セグメントを組み立てる	軸付き横配置のカッターを採用	パドルシールド工法
		搖動式カッターを採用	R-SWING 工法

5.5.2 特殊トンネルの計画・設計・施工の留意点

既存の鉄道や道路等に立体交差させる特殊トンネルの施工にあたっては、上部交通による時間的な制約、地上設備や地下埋設物等の支障物による制約、交差構造物の条件による制約等、様々な制約を受ける。これら制約に対応できるように、計画・設計することが重要である。以下に留意点を示す。

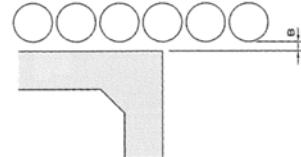
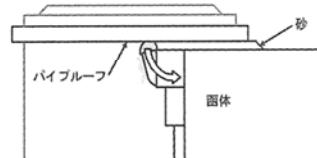
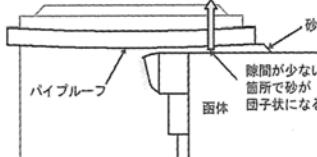
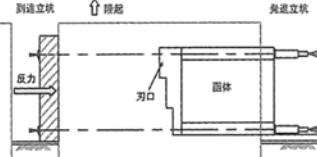
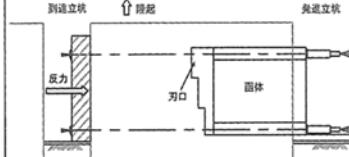
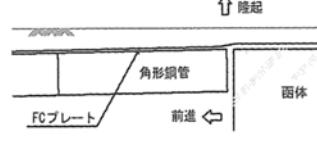
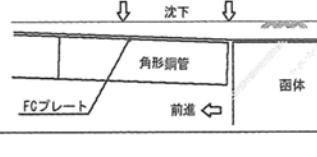
線路下横断工の計画・協議は、その後の設計・施工や工事費に与える影響が最も大きく重要な要素となる。事業主体独自で計画された線路下横断工の中には、鉄道事業者としての観点が反映されず、施工性や安全性が悪くなり、工事期間が長くなつたことで、周辺住民の生活環境にも大きな影響を与えた事例が数多くある。このような状況を踏まえ、線路下横断の計画・調査・協議にあたっては下記の点に留意する必要があるが、詳細については、「トンネルライブラリー第31号 特殊トンネル工法（土木学会）」を参照されたい。

- 制約条件を確認する。
- 線路下横断構造物の設置は分岐器区間を避ける。
- 内空断面は工事施工および長期の供用を考慮した相当の施工余裕を確保する。
- 立坑の路線に対する位置は、線路の施工基面の縁端から十分な離隔を確保する。

道路下横断工の計画においては、路面下には排水管やます等の排水施設、ガードレール基礎や道路標識等の基礎、上下水道等の各種埋設物が存在することから、交差構造物の土被りは施工上面から路面まで約2mを確保することを基本としている。また、交差角度は交差する延長が長くなると道路直下を施工する期間も長くなることや、偏土圧等の荷重に対する構造検討が必要となるため、可能な限り道路と直行するように計画することが望ましい。

前述したように、一般的に表5.5.1に示す特殊トンネル工法は、近接する既設構造物への影響を最小限にするために採用されることが多いが、これら工法においては、止水のために行う薬液注入および地下水位の低下、立坑の施工、土留め用タイロッドのための水平ボーリング、エレメントの推進やけん引、けん引設置用の水平ボーリング、ガイド導坑、函体のけん引や推進等、多くの工種が近接する構造物に影響を与えるリスクがある。これら近接施工時の変状リスクは、「トンネルライブラリー第34号 都市における近接トンネル（土木学会）」に詳細に記載されているが、本稿では函体推進・けん引工法（R&C工法等）特有の函体推進時の変状リスク要因およびその対策について、抜粋して表5.2.2に示す。

表 5.5.2 函体前進時のリスク要因²⁾

施工方法	路盤変状の要因	対 策	摘 要
<u>切羽で掘削しながら函体を前進させる場合</u>	函体切羽での地盤の緩みや流動化による鋼管ルーフの沈下、たわみ	<ul style="list-style-type: none"> ・函体前進時に掘削する土塊部への事前の薬液注入を行う。 ・安全ループを設置する。 ・切羽の安定性向上のため、薬液注入を行う。 	—
FJ工法 ESA工法 R&C工法	函体が到達部に近くなり地盤抵抗が急激に減少し、函体が必要以上に一度に進む。	<ul style="list-style-type: none"> ・R&C工法では、ジャッキ収納管に設置したルーフジャッキをショックアブソーバーとして使用する。 ・補助推進ジャッキを函体後部に設置して推進を行う。 	—
<u>パイプルーフの下で函体をけん引する場合</u>	<p>パイプルーフの初期たわみ部を函体が持ち上げることによる路盤の隆起</p> <p>パイプルーフと函体間の土の掘削あるいは落下によるパイプの沈下</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・函体に支障する箇所のパイプルーフは、函体の前進時に切羽面からパイプルーフの部分的な除去および補強を行う。 ・パイプルーフの剛性を高くる。 ・パイプルーフと函体天端との離隔を確保する。 <ul style="list-style-type: none"> ・空隙に対して、切羽側からの砂袋充填、発進側から砂の敷込み、または、滑材効果のある空隙充填材の注入 	 <p>一般に、$B=150(\text{mm})+L(\text{mm})/300$ B : 函体天端とパイプルーフ下端との離隔 L : パイプルーフ施工長さ</p>  
FJ工法 ESA工法	パイプルーフと函体間にできた空隙に入れた砂の集塊化によるパイプの隆起	<ul style="list-style-type: none"> ・パイプルーフの設置精度の向上 ・函体到達立坑側からパイプルーフを施工をするなどして、パイプルーフ推進設置から函体推進までの期間を短縮し、たわみの増加を抑制する。 	
<u>箱形ルーフと函体とを置き換える場合</u>	片引きけん引方式で反力壁が路盤に近接する場合に受働土圧により路盤が隆起	<ul style="list-style-type: none"> ・到達立坑と反力立坑の分離 ・受働土圧範囲を考慮したけん引範囲の設定 	
R&C工法 SFT工法	<p>箱形ルーフの設置誤差による路盤の隆起、沈下</p> <p>・箱形ルーフの設置位置が所定より低い場合、函体前進時に路盤を隆起させる。</p> <p>・箱形ルーフの設置位置が所定より高い場合、函体前進時に路盤が沈下する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・手掘りによる精度向上 ・箱形ルーフの上げ越し（軌道整備の簡素化） ・函体前進時の路盤変状を予測し対応する。 ・施工誤差の大きい箱形ルーフを入れ替える。 ・函体前進直前にも箱形ルーフの設置精度（形状）を測量し水平部ルーフ上面を面的に管理する。 	 
	函体とともにFCプレートが水平移動し、路盤も移動する。	・FCプレート定着工の実施 →桁式、タイロッド式、自動制御式	—

参考文献

- 1) 土木学会: トンネルライブラリー第31号 特殊トンネル工法 道路や鉄道との立体交差トンネル, p. I-4, 2019.
- 2) 土木学会: トンネルライブラリー第34号 都市における近接トンネル, p.III-46, 土木学会, 2025.

6. まとめ

本部会では、建設初期のケーソン工法によるトンネル、連壁本体利用の開削トンネル、河川部等で特殊な開削工法により施工されたトンネルを対象として、その施工法に起因する漏水や劣化の発生状況を調査、整理した。調査にあたっては、多くの事業者から情報提供、執筆にご協力いただいた。ここに深謝の意を表する。

箱型トンネルの維持管理においては、漏水経路や変状原因を推定するうえで、当該構造物の施工方法への理解が重要となる。調査の結果、現在生じている変状が、当時の施工方法や施工時の対応に起因している例も見られることから、建設当時の施工方法を把握した上で維持管理を行うことが重要であるとあらためて感じた。本報告書で取り上げたように特殊な施工法で建設された構造物は数が少なく、古い時代に施工されたものも多いことから、建設当時の施工方法の記録が残っていない場合もあるだろう。

今後、本報告書が、そのようなトンネルの維持管理に携わる技術者にとって有用な情報源となり、日々の維持管理やトンネルの長寿命化、あるいは今後建設されるトンネルの品質向上の一助となれば幸いである。