

2. 対象橋梁の現況

対象橋梁の現状把握については、現地において必要な部材や部位について近接目点検を行い、最新の状態（変状発生状況など）を整理し、計画対象橋梁の現状把握と健全度評価を行った。

2.1 計画対象橋梁の現状把握と健全度評価の分析のポイント

供用開始から現在までの点検・診断、詳細調査、措置、記録の確認と現時点で発生している変状の種類と程度の確認、変状発生の原因、進行度予測、健全度の診断及び評価を行う。

現状の評価分析ポイントを以下に示す。

- ① 安全性、使用性確保に必要な耐荷性能を保有、確保すること。
- ② 物理的及び経済的耐用年数確保に必要な耐久性能を保有、確保すること。
- ③ 想定される作用等によって発生した変状（損傷）を受けて性能が低下した場合、所定の修復性能を保有、確保すること。
- ④ 東京国際空港の位置づけから求められる景観性能を保有、確保すること。
- ⑤ トータルライフサイクルコストの観点から必要となる、所定の維持管理性能を保有、確保すること。

上記にあたって、現状把握を目的とした以下の詳細な調査を実施し、インフラスマートメンテナンスを進めるために必要な要素技術等を確認し、対象橋梁に求められる利用者等のニーズと現時点でニーズに対応する東京航空局及び我が国が保有するシーズを整理した。

- ・鋼床版の疲労亀裂調査（近接目視調査、切削調査、磁粉探傷試験、応力計測等）
- ・鋼斜張橋のケーブル性能及び耐風調査（近接目視調査、張力及び振動測定、ダンパー等性能、変状調査）
- ・構造物洗浄に関する耐久性向上調査（ウルトラファインバブルの基本原理確認、生成技術及び生成装置の性能調査、洗浄試験施工、影響度及び効果の確認）
- ・先進的メンテナンス手法の調査、分析等（ICT、センサー、DX、解析手法など）

2.2 各詳細調査の実施と結果概要

2.2.1 鋼床版（鋼桁）の亀裂詳細調査

鋼床版橋梁を対象として実施した亀裂詳細調査施と結果について、以下に亀裂詳細調査のまとめを示す。

(1) 目視調査

鋼床版、鋼桁及び鋼製橋脚の疲労亀裂発生の有無に着目し、これまで行ってきた定期点検における近接目視点検結果のレビューを行った。目視調査の箇所は、アクセス道路連絡橋、中央北連絡橋、環八跨道橋、東京方面 ON ランプ橋の 4 橋を対象とした。その結果、本委員会設置前に指摘された、直近に行った定期点検における鋼床版の亀裂（塗膜のひび割れや疲労亀裂）の見落としや見誤りについて再調査を行い、現状を確認した。また、東側上層道路空港アクセス 2F 取付橋では、主桁間に化粧板が設置されており、橋梁を構成する各部材や部位を近接目視するには、化粧板を撤去する必要があることが明らかとなった。供用開始後に行われている定期点検では、当該橋梁の桁下空間の多くは点検不可箇所となっており、対象部位の点検が適切に行われていない。これらの未確認状態で見過ごされている部位の疲労亀裂に直結する塗膜割れの有無を把握するために、詳細目視調査を行った。その結果、現状においては、疲労亀裂に直結する塗膜割れは確認されなかった。

これらの調査結果については、今回策定した「東京国際空港道路橋点検・診断要領（案）」において、点検手法、確認項目等について取り纏め示している。

(2) 切削調査

エアサイド連絡橋、アクセス道路連絡橋、中央北連絡橋、中央南連絡橋を対象に、平成 24 年度に実施した確認した亀裂を対象に行った磁粉探傷試験の結果から、明確に亀裂発生が確認された 14 箇所を対象に切削調査を実施した。当該箇所の亀裂進展状況を確認する目的で棒グラインダーを用いた切削調査を行った後、再度当該箇所の磁粉探傷試験を行った結果、切削後も亀裂の残存が確認された箇所が 5 箇所存在したが、いずれの亀裂も進展していないことが明らかとなった。

(3) 抜き取り磁粉探傷試験

令和 2 年度に実施された中央北連絡橋を対象とした定期点検において、当初塗膜割れ箇所 23 箇所の報告がなされたが、再点検を指示したところ変状箇所が 1021 箇所増え、

トータル 1024 箇所ありと最終報告された事例があった。今回は、当該事例を対象に近接目視点検を行い、危険度が高い箇所 30 箇所を抽出し、磁粉探傷試験による亀裂調査を行った。その結果、車道部 20 箇所の塗膜割れ箇所において 7 箇所の亀裂指示模様を確認。歩道部 10 箇所において 1 箇所の亀裂指示模様を確認した。今回の調査を行った車道部、歩道部合計の 8 箇所については、7 箇所は溶接欠陥による指示模様であることから、今回の調査結果から推定すると、全塗膜割れ 1024 箇所についても同様に溶接欠陥に伴う塗膜割れであると判断される。

また、東京方面 ON ランプ道路橋では、過去に実施された定期点検の磁粉探傷試験（MT）にて、8 箇所の磁粉指示模様が確認されている。また、先に示す指示模様が確認された対象箇所周辺においては、多数の塗膜割れが確認されている。そこで今回、過去に確認された亀裂について亀裂進展有無を確認するとともに、今年度行った調査において塗膜割れが確認された対象箇所について、抜き取りで 16 箇所の磁粉探傷試験（MT）を実施した。その結果、過年度に確認された亀裂 8 箇所の亀裂進展度確認においては、亀裂の進展は無かったため、現時点においては深刻な問題（措置が必要な重大疲労亀裂）となっていないと判断される。

（４） 荷重環境調査

対象橋梁の疲労亀裂の発生、進展性に着目して、荷重環境の調査を行った。その結果、既存資料から疲労環境が厳しい国道 357 号有明と対比して、エアサイド連絡橋と中央北連絡橋は、国道 357 号有明の疲労寿命と比較して 30 倍程度あること、また、アクセス道路橋は、疲労寿命が約 8 倍程度あることを算出し、確認した。

（５） 応力計測調査

東側上層道路空港アクセス 2F 取付橋を対象として、橋梁の安全性確保に影響のある疲労亀裂発生の可能性について、主桁横桁交差部の溶接部及び主桁と横構ガセット溶接部に着目して応力計測を行った。応力計測の結果、変動振幅応力の打ち切り限界を考慮したマイナー則、打ち切り限界以下の応力範囲を考慮した修正マイナー則、双方で累積損傷度を算出した結果、疲労寿命はマイナー則でほぼ無限大、安全側で評価する修正マイナー則で約 2700 年との結果となり、現状の荷重環境下であれば疲労亀裂発生する可能性は極めて小さいとの結果が得られた。

(6) まとめ

今回行った亀裂詳細調査結果から、今後の対応方針を以下に示す。

- 今回策定する「東京国際空港道路橋点検・診断要領（案）」及び要領を具体化した「点検の手引き（案）」を用いて引き続き、入念な近接目視点検を行う。
- 点検の手引き（案）には、上部工製作会社の溶接等の特徴を反映させる。
- 確認している溶接欠陥、疲労亀裂個所は、今後行う定期点検時において定期監視（MT）を実施し、確認している亀裂進展有無の確認を行う。
- 作用荷重の変化等で疲労亀裂発生が危惧された場合で疲労亀裂発生に対処するモニタリングを行う必要があると判断した場合は、現状で亀裂が残存し、荷重環境が厳しい『アクセス道路橋』を対象としてモニタリングを行うことが好ましい。ただし、疲労モニタリング実施時には、再度現況調査を行い、確認している亀裂の進展程度を調査し、最終判断を行う。
- 令和4年3月に開通した『多摩川スカイブリッジ』の供用開始によって、疲労亀裂発生環境に影響を与える大型車交通量の交通環境変化が生じる可能性があることから、引き続き交通流に関する注視が必要である。

2.2.2 鋼斜張橋のケーブル張力、振動測定及び変状対策

羽田スカイアーチ・中央北・南連絡橋には、架設時に渦励振が発生したことから、渦励振対策としてケーブル基部定着部に制振用粘性ダンパーが設置されている。

また、羽田スカイアーチ・中央北・南連絡橋、エアサイド連絡橋及びアクセス連絡橋に使用されているケーブルは、ノングラウトタイプ NEW-PWS であり、過去の NEW-PWS を採用した吊り構造系橋梁を調べるとウェイクギャロピングやレインバイブレーションが発生した事例もある。

今回は、過去に羽田スカイアーチ・中央北・南連絡橋において発生した渦励振及びレインバイブレーションの報告やケーブル振動性状調査結果（「東京国際空港斜張橋ケーブル振動性状調査」平成 12 年 3 月）、No. 604 粘性ダンパーのオイル漏れ事象等から、対象橋梁 3 橋のケーブル張力測定及びケーブル振動調査を行い、今後措置が必要か否かの検討を行う。また、平成 15 年 1 月 27 日（月曜日）の午前 10 時 40 分ごろ東京国際空港東側立体駐車場新築工事の請負業者（清水・大成・不動特定工事建設共同企業体）のトレーラーが中央北連絡橋の N0614 ケーブルに接触事故を起こし、接触部分の補修工事を行っていることが明らかとなった。そこで今回は、N0. 614 ケーブルの補修箇所を対象に近接目視調査を行い補修箇所の現状確認、性能診断を行う。

(1) 鋼斜張橋のケーブル張力測定

斜張橋ケーブルを対象として実施したアクセス道路連絡橋及び中央北連絡橋において実施した張力測定の結果について、図-2.1 及び図-2.2 に示す。張力の測定は、今回で通算 3 回の実施であるが、1 回目の架設時と完成から 10 年程度経過した平成 11 年において測定結果に差異が生じていたが、今回の測定結果による推定結果では、2 回目の平成 11 年のデータとほぼ同じ値であり、この間の変動はほとんどないことを確認した。

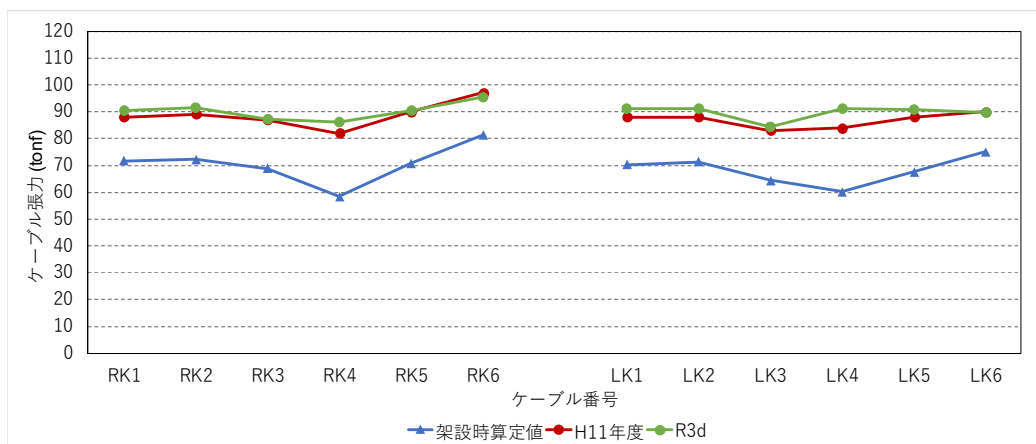


図-2.1 張力計測結果 (アクセス道路連絡橋)

架設時測定した結果から算定したケーブル張力は、70tonf程度であったが、供用開始後7年後の平成11年、30年後の令和3年は、90tonf程度で推移している。

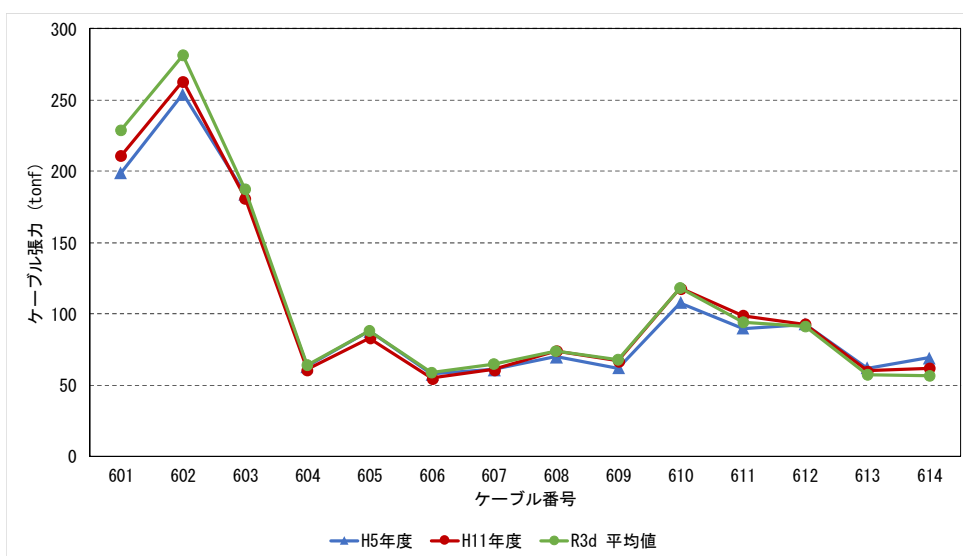


図-2.2 張力計測結果 (中央北連絡橋)

架設時、供用開始後7年の平成11年、30年の令和3年に測定した結果から算定したケーブル張力は、ほぼ同一値で推移している。今回の調査結果から、いずれのケーブルも張力変動が少なく、問題が無いことを確認した。

(2) 鋼斜張橋のケーブル振動

アクセス道路連絡橋及び中央北連絡橋において実施した振動測定の結果を示す。

① アクセス道路連絡橋

令和3年11月10日の午後、12m/sを超える風が吹く状況下において、ケーブルと主塔の振動が確認された。風向きは、横からの風で、振動の振幅は非常に小さく、桁の振動の発生はなかった。図-2.3にアクセス道路連絡橋のケーブル振動方向等を示す。

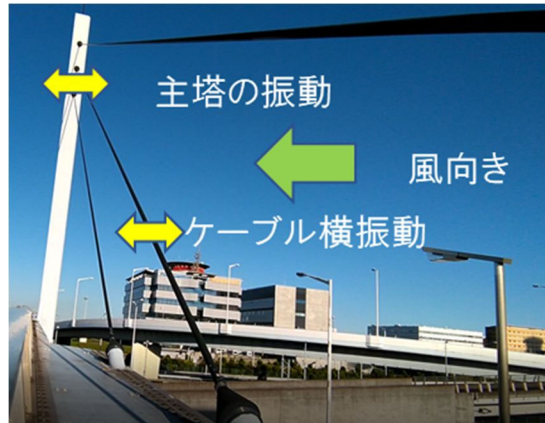


図-2.3 アクセス道路連絡橋のケーブル振動（令和3年11月10日午後）

② 中央北連絡橋

令和3年11月22日夜間に、降雨と風速10m/s程度の風の条件下におけるケーブルの状況確認を行った。今回の計測においては、懸念されたケーブルの振動の発生はなかった。図-2.4に中央連絡橋のケーブル振動計測状況を示す。

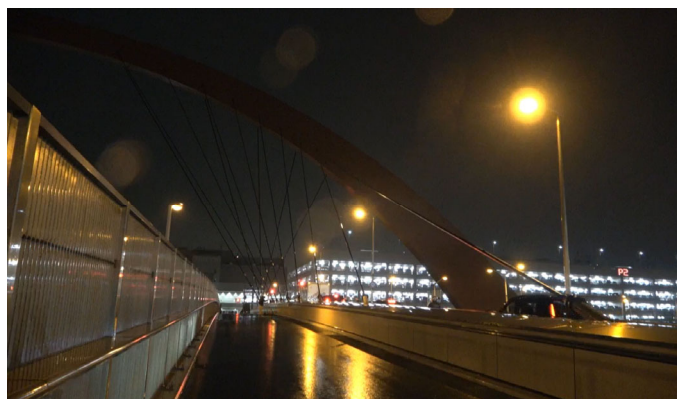


図-2.4 中央北連絡橋のケーブル振動計測（振動なし）

(3) 斜張橋ケーブルの耐風対策についてのまとめ

ケーブルの張力については、今回行った計測によって現時点で安定していることが確認されたことから、新たな措置（耐風対策）を講じる必要はない。

ケーブルの振動現象については、今回の計測では、アクセス道路連絡橋のケーブルと主塔の振動が確認されたが、振動の振幅は非常に小さく、桁の振動発生に至っていないことを踏まえると前回計測時に懸念していた深刻な状況ではないと考えられる。

また、中央北連絡橋は、今回行った測定範囲において、平成12年に報告のあったレインバイブレーションなどの異常な振動の発生は確認できなかったことから、現時点の判断では新たな追加措置（耐風対策）を講じる必要はないと判断する。

(4) 中央北連絡橋 No. 614 ケーブル損傷に関する対応

中央北連絡橋の No. 614 ケーブルは、平成15年1月17日に車両接触事故が発生し、被覆材の緊急補修を行っている。令和3年の調査によると補修したポリエチレン被覆材に一部クラック発生が確認されたことから、当該箇所の腐食等の調査、確認及び措置が必要である。図-2.5に中央北連絡橋 No. 614 ケーブルの変状状況（ひび割れと変形）を示す。

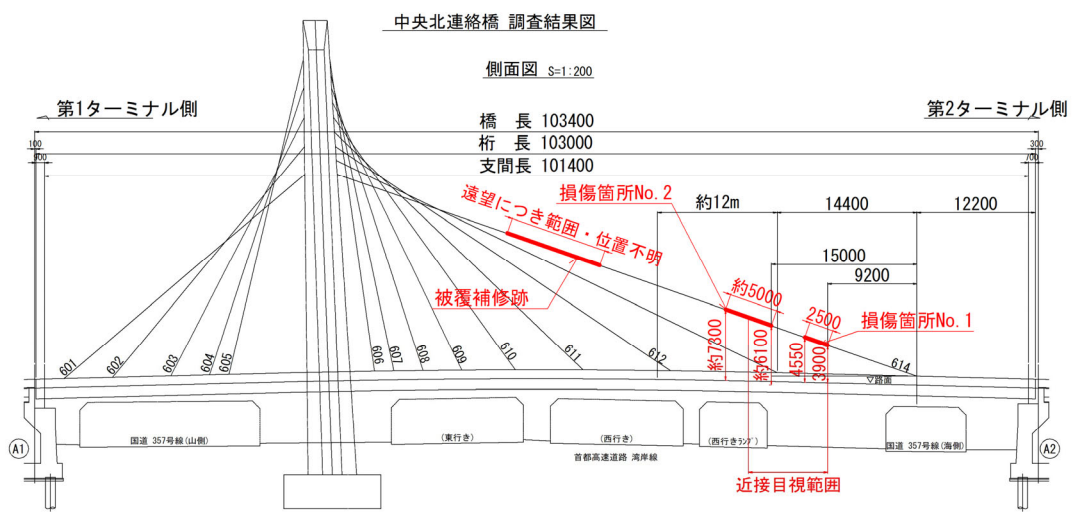
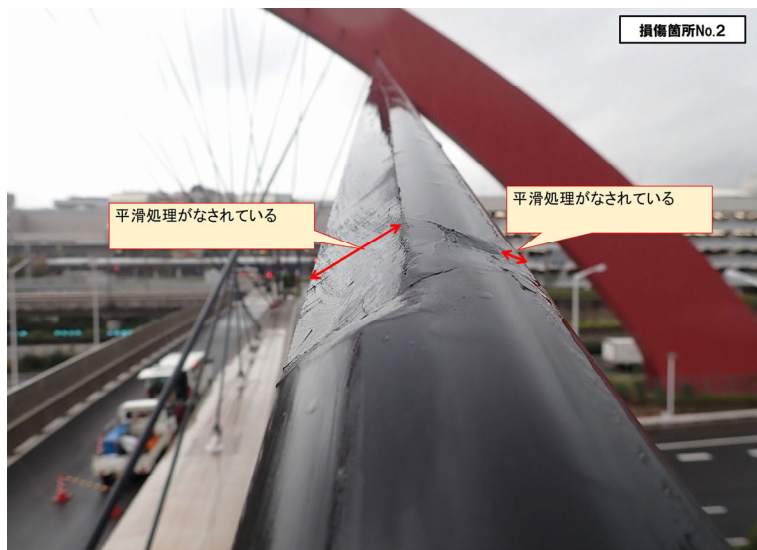


図 - 2.5 中央北連絡橋 No. 614 ケーブル変状状況

2.2.3 橋梁洗浄の試験施工及び効果確認調査

社会基盤施設には耐用年数はあるが、当初想定していた耐用年数を種々な措置を効果的に行うことで延ばすことが可能であることが近年の研究や実施事例等で明らかとなってきた。今回羽田空港管内の道路橋について耐用年数を延ばすことは、更新費用の縮減が可能となり、社会的課題となっているカーボンニュートラルにも寄与することになる。道路橋の耐用年数を延ばす方策としては、鋼構造であれば、鋼材の腐食や疲労亀裂の発生・進展を抑えること、腐食を抑える防食対策として用いている塗装やメッキ、金属溶射の劣化を抑えることなどがあり、コンクリート構造であれば、コンクリート内部の鉄筋やPC鋼材の腐食を抑えるために、その原因となっている中性化や塩害を抑えることなどがある。しかしながら、鋼材の防食対策として施工されている塗装やメッキ、金属溶射の更新、コンクリート中の鉄筋やPC鋼材の腐食を抑える劣化防止剤含浸、塗布、更新には、防食対策の更新費用以外に大規模な仮設設備が必要となることから、多額の事業費、工事期間及び交通規制が必要となる。今回の検討では、鋼構造物の鋼材腐食や防食対策、及びコンクリート構造物の内在鉄筋やPC鋼材の腐食抑止となる工法として、米国等において効果を確認している水を用いた構造物（道路橋）の洗浄について着目し、一般的な洗浄材料として使用している水道水と比較して汚れ除去効果と実績のあるウルトラファインバブル水を含めた洗浄効果と塗装面への影響について種々な試験を行い、分析、検討を行った。今回行った構造物を対象とした洗浄の目的及び効果を以下に示す。

○構造物洗浄の目的及び効果

- ・構造物に付着している塩分及び土砂、塵埃等の除去方法検証試験
- ・ウルトラファインバブルの生成技術及び生成装置の検証
- ・水道水及びウルトラファインバブル水洗浄による塗装耐久性の向上
- ・水道水及びウルトラファインバブル水洗浄による塗膜外観の改善、耐久性向上
- ・塩分及び堆積物除去による腐食環境の改善
- ・点検作業環境の改善による近接目視点検精度の向上

国内において、新潟県や東北地方整備局で現在行われている構造物洗浄は、鋼部材の表面に付着している塩分の除去を主目的とし、特に、桁端部の鋼部材の著しい腐食や断面欠損の主原因となっている付着塩分除去を目的として行われている。このようなことから、水道水を用いて5MPa程度の高水圧で対象部材表面に噴出させ、塩分除去を行うことが施工条件と規定されている。その結果、これまで行ってきた構造物洗浄においては、大量の水が必要となり、高圧で洗浄することから周辺への洗浄水飛散による影響を少なくするための仮設備や交通規制が必要となっている。

今回の構造物洗浄に関する取り組みは、少量の洗浄水によって塩分や塵埃等を確実に除去することを第一とし、防食被覆の塗膜への影響を最小限に留め、洗浄対象の周辺への洗浄水飛散による影響を最小限に留めることを条件として、効果的・効率的な洗浄技術の開発、検討を行うものである。特に、これまで行ってきた桁端部や支承回りなどの局所的な洗浄から、鋼構造物全体の防食塗膜について耐久性の向上を目的とする洗浄水の検討、洗浄技術の開発、施工方法の検討を行うものである。令和3年度の試験施工結果と課題を基に令和4年度で取り組んだ構造物を対象とした洗浄方法について、調査結果の概要を以下に示す。

(1) 調査内容

塩分を付着させた試験板ならびに既設橋の塗装面を対象に洗浄効果確認試験を行い、塗装に対する洗浄効果、既存塗膜への影響度、橋洗浄における作業能率、施工に要する概算費用、及び施工時の環境影響等を確認するものである。また、構造物洗浄確認試験を行うにあたって、近年、その高い洗浄効果で注目されているウルトラファインバブル（以下、UFB）水に着目し、水道水による洗浄と対比して確認試験を供試体及び既設橋を対象に行い、効果的な洗浄方法の検討、定量的な洗浄効果の確認を行った。

○検討内容

- ・UFB水の生成及び生成装置
- ・UFB 個体濃度と水温の関係
- ・UFB水と水道水を用いた洗浄の比較
- ・洗浄方法（ノズルの操作方法、水圧、噴射距離）の検討
- ・洗浄による付着物の除去効果、塗装外観の改善効果の検証
- ・洗浄面圧力と洗浄吐出圧及び洗浄距離の関係

○測定項目

- ・鋼桁塗装面：洗浄前後で付着塩分量、光沢度を測定

(2) 調査の流れ

令和4年度に行った検討の流れを図-2.6に示す。令和4年度は、令和3年度の構造物洗浄検討結果及び課題を踏まえ、本調査の主目的の一つであるUFB水による洗浄を主眼に、既設橋における確実な施工が可能となるよう構造物洗浄の検討計画を策定、計画を基に試験施工を行い、最終成果としてUFB水を用いた構造物洗浄のマニュアル最終案を作成した。

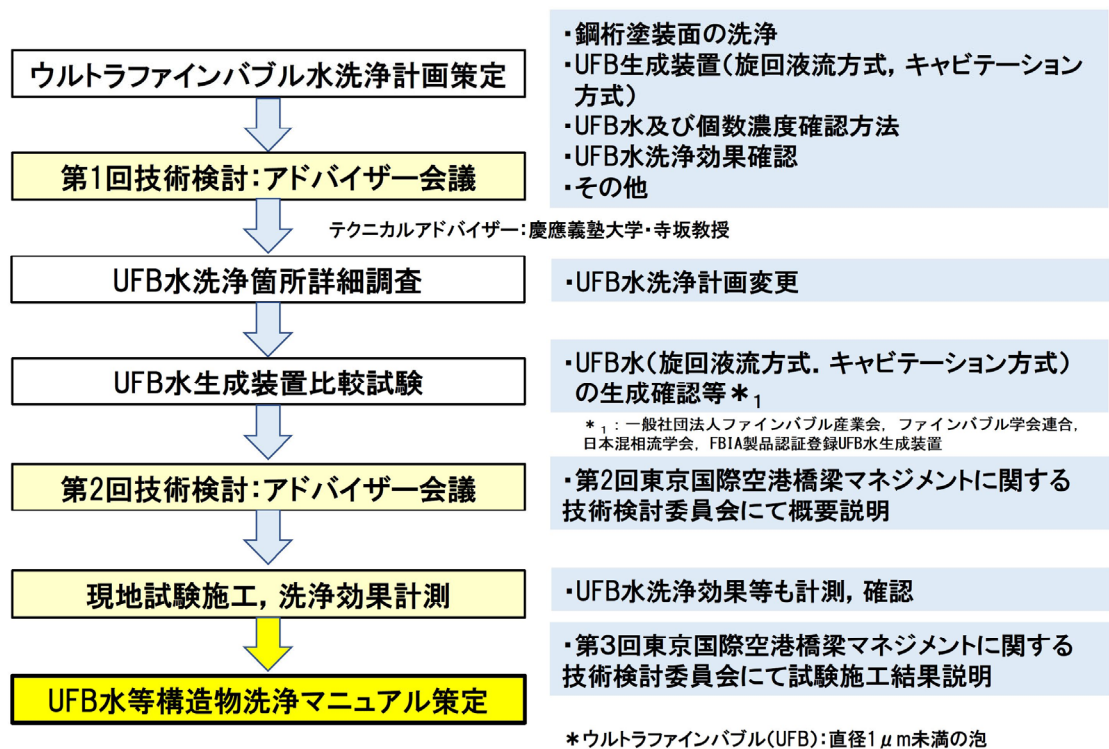


図-2.6 構造物洗浄の技術検討の流れ

(3) UFB水に関する予備検討

現在、社会で注目されているUFB水による洗浄メカニズムは、UFB水の基本となるウルトラファインバブル（以下、UFB）とは、直径が1μm（マイクロメートル・1/100万m）未満の微小な気泡を指す。UFBの生成は、水に溶けたガス（酸素、窒素、炭酸ガス、アルゴンなど）を高速かつ一定の圧力で放出し、その後、圧力を急激に低下させることで、UFBを生成することができる。

① UFB水生成装置の比較

生成する方法としては、静電気、超音波、振動子、膜、繊維、及びノズルなどによる様々な手法がある。生成装置の種類としては、超音波によるバブル生成装置、静電気を利用したバブル生成装置、ノズル式バブル生成装置、フラッシュ混合法によるバブル生成装置、巡回液流方式などがある。今回は、昨年度の試験施工で採用した巡回液流方式による生成装置及びキャビテーション方式による生成装置によりUFB生成を比較した。巡回液流方式による生成装置は、ガスが溶解した水を高速で回転されることで遠心力が発生し、遠心力によって混入ガスは中心部に集まり、高速回転によるせん断力で細かく分断され、水との界面張力によって球形のUFBが生成される方式である。巡回液流方式のUFB生成原理を図-2.7に示す。一方、今年度新たに試験したキャビテーション方式による

生成装置は、流体力学的キャビテーションを利用する方法で、高速かつ強い流れを持たせた液体を微細な穴や狭い隙間を通過させることによって、液体中に微細な空洞（キャビテーションバブル）を形成させ、形成された空洞が一瞬の間に急速に収縮し、液体中にUFBを生成する方式である。キャビテーション方式のUFB生成原理を図-2.8に示す。

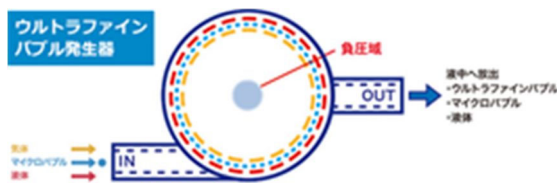


図-2.7 旋回液流方式

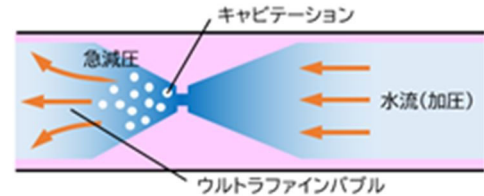


図-2.8 キャビテーション方式

令和4年度の生成装置比較では、旋回液流方式とキャビテーション方式の2種類の方式でUFB水を生成し両方式の違いを検討した。旋回液流方式の特徴は、気泡発生効率が高く、気泡サイズや気体種類を制御しやすいところにある。一方、キャビテーション方式の特徴は、空気を取り入れずに水中の溶存窒素を析出してUFBを生成できることから、気泡発生効率が高く、装置自体も小型となるのが特徴である。今回の構造物洗浄に必要なUFB個体濃度（液体中に存在するUFBの個数を単位体積当たりで表示したもの）について、令和3年度に行った試験施工で約2億個/ml以上確保することが必要とUFB個体濃度を規定している。両方式の生成能力を比較するために、気液混合せん断方式とキャビテーション方式についてどちらも900lの水量でUFB水を生成し個体濃度を確認した。この結果を表-2.1に示す。表-2.1のUFB個体濃度はナノトラッキング法により分析した。

表-2.1 生成方式の比較

方式	旋回液流方式	キャビテーション方式
水量(l)	900	
循環数	15	10
生成時間(分)	200	563
UFB個体濃度(個/ml)	1.5.E+08	1.5.E+08

両UFB生成装置を比較した結果、必要個体濃度のUFB水生成時間が旋回液流方式の場合は、0.222分/lに対しキャビテーション方式の場合は、0.624分/lと約2.8倍必要となる。また、UFB個体に影響する生成による温度上昇は、旋回液流方式が5.3℃上昇に対し、キャビテーション方式は9.9℃上昇と1.87倍となった。以上の結果から、生成装置自体の外形は、旋回液流方式よりもキャビテーション方式の方が小型となるが、UFB必要個体濃度の確保と温度上昇結果から旋回液流方式をUFB水による構造物洗浄に採用することが適切であると判断した。なお、今回の生成装置比較は、旋回液流方式生成装置として

BUVITAS（西日本高速道路エンジニアリング関西）とキャビテーション方式としてFB320MC（丸山製作所）で行っているが生成方式の定量的な比較とするには、種々な生成装置によって、条件を同一年、より詳細な比較、検討が必要である。また、令和3年度に生成装置として検証したBe-Life 20A（富士計器）はトルネード・ベンチュリー式であるが、昨年度の試験において生成後のUFB 個体濃度が目標値に達することが出来ず、併せて、構造物洗浄効果も水道水と比較して同程度であったことから構造物洗浄用のUFB 水生成装置としての採用には適さないと判断した。

② UFB 水の UFB 個体濃度の確認方法

UFB 水の UFB 個体濃度は、構造物洗浄において重要なパラメータである。一般的に UFB 個体濃度の計測には、レーザー回析・錯乱法、光学顕微鏡法、粒子軌跡解析法、動的光散乱法、共振式質量測定法、液中分散安定性評価法などがある。UFB 水を採取し、精度高く UFB 個体濃度を算出するには、粒子軌跡解析法（PTA 法）や光学顕微鏡法、レーザー回析・錯乱法を使用するのが一般的ではあるが、洗浄現地で短時間に個数濃度を算出することは困難である。令和3年度の課題として、UFB 個体濃度の簡易算出があることから令和4年度は、市場にある UFB 個体濃度計測器の適用性について検証した。適用性検証は、レーザー回析・錯乱法（レーザー光側面散乱測定方式）による UFB 個体濃度計測器である ALT-9F17（IDEC 社）について、モニタリング調査を行ったが、UFB 水を生成する原水（水道水）に不純物がかなりの量含有しており、適切な計測・算出が出来なかった。以上の結果、現地で水道水を原水とした UFB 水個体濃度検出を簡易に行うことは困難と判断し、従来の液中分散安定性評価法である一般的なレーザーポイントによる UFB 水判定を当面現地で使用して簡易判定することとした。

③ UFB 水の保管と水温の関係

UFB 水の生成における水温の影響は、水温が 50℃程度に上昇すると UFB の発生効率が低下すると言われ、これは水中の溶存酸素濃度の低下によって UFB 生成に必要な酸素分子が不足すると推定できる。また、UFB 水の保管時の水温上昇は、水温が高いほど UFB の消滅速度が自己加圧効果や不對電子を持つ分子であるフリーラジカルの生成が促進されるのが大きな要因である。このようなことから、夏季の UFB 水洗浄を想定し、夏季に想定されるタンク水温として 40℃まで UFB 水を上昇させて、そのまま温度を保持した後、試料を採取して個数濃度を分析した。その結果、40℃程度では個数濃度に大きな影響がないことを確認した。

(4) 試験板の洗浄試験

UFB 水の洗浄効果を確認するために、塩分を付着させた試験板を用いて洗浄試験を行った。洗浄には高圧洗浄車を用い、洗浄試験のパラメータは以下とした。

- ① 洗浄水の種類
- ② 吐出圧力と洗浄対象面における面圧力
- ③ 噴射角
- ④ 洗浄時間

洗浄試験に用いた試験板の形状を図-2.9 に示す。洗浄試験では付着塩分の除去能力に着目した。図-2.9 の試験板を塩水(濃度 4%)に 5 秒間浸漬した後、自然乾燥させることで塩分を付着させ、この試験板に対して高圧洗浄で付着塩分を除去した。洗浄状況を図-2.10 に示す。付着塩分量は表面塩分計を用いて測定した。

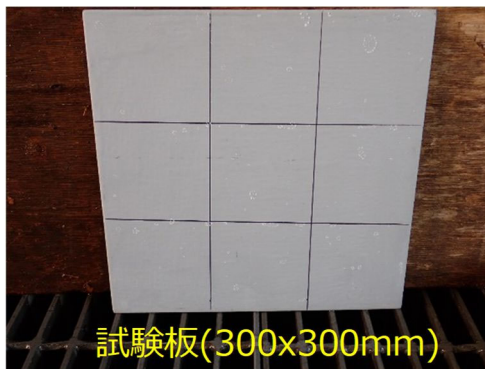


図-2.9 試験塗装鋼板



図-2.10 試験洗浄状況

(5) 既設橋での試験施工

洗浄対象とした既設橋は、事前に実施した付着塩分量計測結果に基づき、洗浄効果が明らかとなる塩分がある程度付着している橋梁に絞り込み、対象とした既設橋・鋼桁の塗装面 4 箇所に対して、高所作業車と高圧洗浄車を用いて、洗浄確認試験を実施した。

既設橋での施工試験状況を写真-2.1、試験に用いた資機材の一覧を表-2.2 に示す。また、洗浄施工試験の作業の流れを図-2.11 に示す。洗浄試験手順は、まず始めに①対象箇所の高架下規制を行い、②高所作業車、高圧洗浄車の配置と洗浄準備、③洗浄前調査、④洗浄作業と廃水の回収、⑤洗浄後調査、⑥片付け及び規制撤去とした。

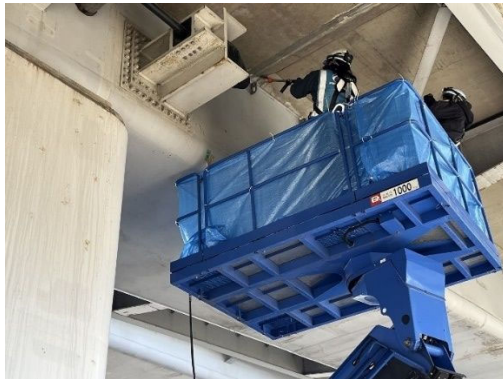
なお、本試験における UFB 生成装置には、生成時間が短時間で確実に UFB 個数濃度の UFB 水の生成が行える、巡回液流方式(今回の採用は、製品名称 BUVITAS)を採用した。



規制帯内の高圧洗浄車



高所作業車



洗浄状況（遠景）



洗浄状況（近景）

写真-2.1 洗浄試験施工状況（既設橋）

表-2.2 洗浄試験に用いた資機材一覧

	数量	備考
UFB 水生成装置	1 台	事前に UFB 水 1、2000 を生成
タンク	1 台	UFB 水生成装置：BUVITAS（型式 HYK-25/32）
高圧洗浄車	2 台	水道水用と UFB 水用の各 1 台
高所作業車	1 台	デッキタイプ 9.9m
交通規制機材	1 式	
表面塩分計	1 台	
ハンディ型光沢計	1 台	

*水道水：一般的な構造物洗浄に用いる浄化された水

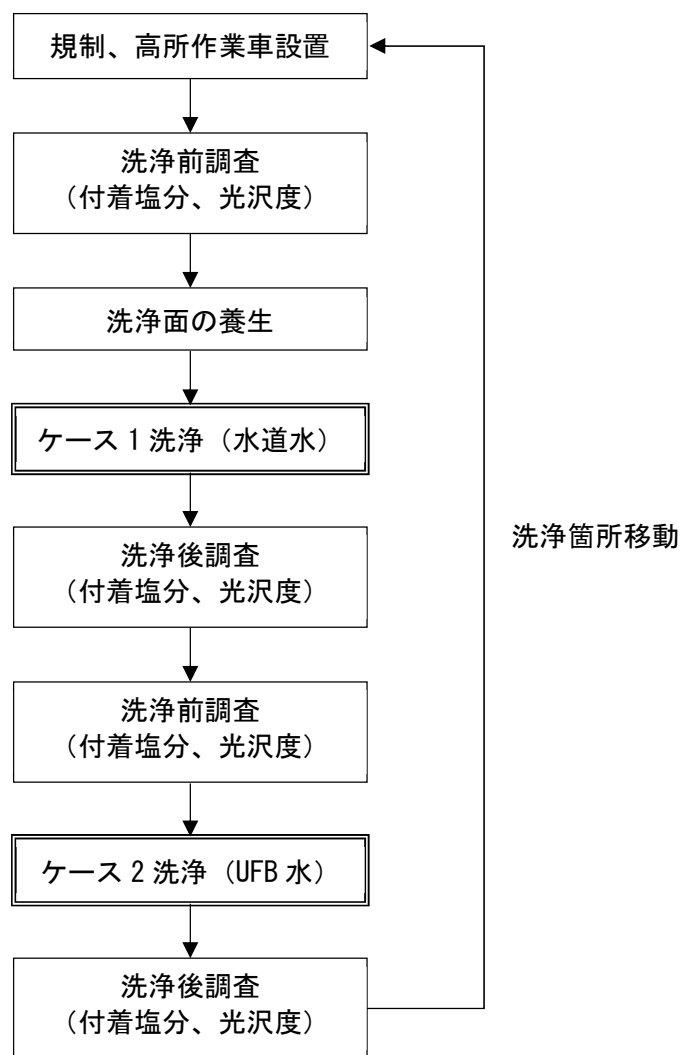


図-2.11 洗浄試験施工作業の流れ

(6) 試験板の洗浄試験結果

① 洗浄水の種類

UFB 水による洗浄効果を確認する目的で、UFB 水と水道水を用いて洗浄試験を行い、両者を比較した。UFB 水は巡回液流方式の生成装置を用いて生成し、UFB 水による洗浄は、高圧洗浄車にホースで接続した洗浄ガンによって試験板へ噴射した。

UFB 水による試験洗浄は、洗浄前に試験板の付着塩分量を測定し、その後、試験板に洗浄水を 3 秒間噴射して洗浄を行った。洗浄後が終了した時点で試験板の付着塩分量を測定した。なお、洗浄と付着塩分量の測定は 2 回繰り返した。

今回のその他の洗浄条件は、高圧洗浄車の吐出圧力を 1MPa、ノズルの噴射角を 10°、ノズル先端から試験板までの距離を 1m とした。

洗浄水の種類別洗浄試験の結果を図-2.12 に示す。同図には、表-2.1 の条件で生成した UFB 水の結果（図中、UFB 水と表示）、生成された UFB 水の個数濃度が目標値を下回った

場合を想定してUFB水を2倍に希釈したときの結果（図中、UFB水（2倍希釈）と表示）ならびに水道水を用いたときの結果を示している。

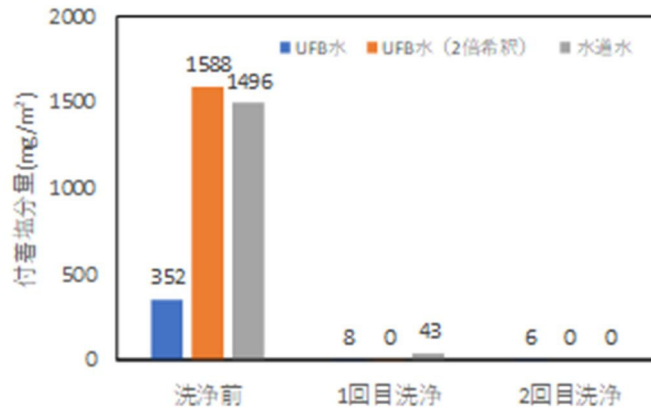


図-2.12 洗浄水の種類と洗浄効果

同図において、洗浄前の付着塩分量が試験ケース毎にばらついているが、これは、試験板の作成方法に起因するものと考えられる。

各試験ケースの洗浄効果についてみると、UFB水のケースでは、洗浄前で352mg/m²の付着塩分量が1回目の洗浄で8mg/m²まで減少し、2回目洗浄で6mg/m²まで減少している。UFB水（2倍希釈）のケースでは、洗浄前で1588mg/m²の付着塩分量が1回目の洗浄で完全に除去されている。水道水のケースでは、洗浄前で1496mg/m²の付着塩分量が43mg/m²まで減少し、2回目洗浄で付着塩分が完全に除去されている。

これらの結果から、試験板の塩分を十分に除去するためには、水道水の場合には2回の洗浄を要するのに対して、UFB水の場合には1回の洗浄で良いと考えられる。

② 吐出圧力の影響

洗浄水が試験板に衝突する強さが洗浄効果に与える影響を確認するために、吐出圧力を変化させた洗浄試験を行った。ここで、吐出圧力とは、高圧洗浄車に組み込まれたポンプの吐出圧力である。なお、この試験UFBで使用するUFB水はキャビテーション方式の生成装置を用いて表-2.1の条件で生成した。

ノズル先端から試験板までの距離を0.5mとし、吐出圧力を0.8、1.0、5.0MPaで変化させた場合、同距離を4mとし、吐出圧力を1.0、3.0、5.0MPaで変化させた場合について2回の洗浄を行った。ノズルの噴射角は10°とし、1回の洗浄の噴射時間は3秒とした。

吐出圧力に関する洗浄試験の結果を、ノズル先端から試験板までの距離が0.5mの場合について図-2.13に、同距離が4mの場合について図-2.14に示す。

図-2.13 から、ノズル先端から試験板までの距離が 0.5m の場合の結果をみると、吐出圧力 1、5MPa の場合は 1 回目洗浄で付着塩分を完全に除去できているのに対し、吐出圧力 0.8MPa の場合には 748mg/m² の塩分が残留していた。試験に用いた高压洗浄車の吐出圧力は 0~35MPa の範囲で調整できるが、0.8MPa はこの調整範囲の下限付近であることから圧力が安定せず、十分な洗浄効果が得られなかった可能性がある。本試験の高压洗浄車を構造物洗浄に用いる場合、吐出圧力は 1MPa 以上にする必要がある。

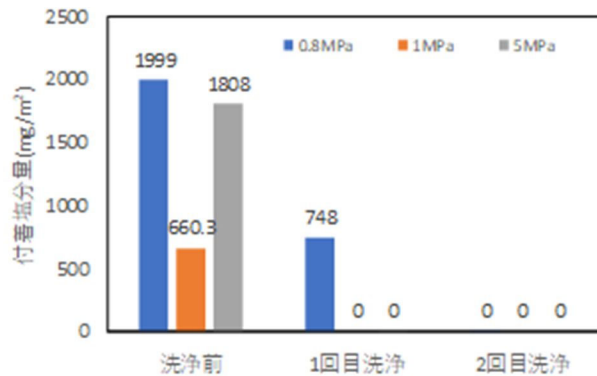


図-2.13 吐出圧の違いと洗浄効果(距離 0.5m)

次に、図-2.14 からノズル先端から試験板までの距離が 4m の場合の結果をみると、1 回目洗浄後はいずれの吐出圧力とも塩分が残留する結果で、吐出圧力が大きくなるほど、残留する塩分量は小さくなる。このことから、ノズル先端と洗浄対象物とが離れている場合は吐出圧を大きくする必要があり、距離 4m の場合は 5MPa 程度の吐出圧力とするか、吐出圧力 1MPa であれば洗浄回数を 2 回とするのが良いと考えられる。

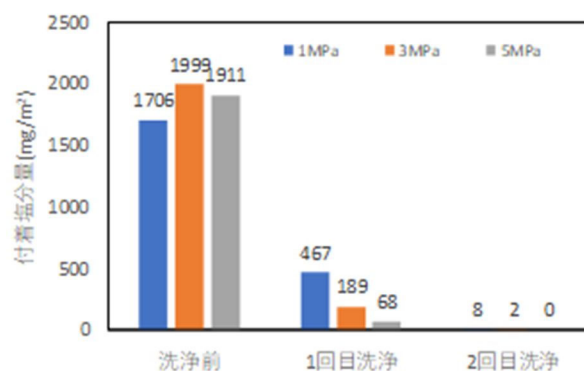


図-2.14 吐出圧の違いと洗浄効果(距離 4.0m)

③ 噴射角の影響

本試験に用いた洗浄ガンは噴射角を変化させることができる。噴射角を大きくすることで、一度に洗浄できる面積が広がるので、作業の効率化が期待できる。その一方で、噴射角を大きくすると洗浄水が広範囲に拡散するため、洗浄面に働く水の衝突圧が低下し、洗浄効果が低下する可能性がある。そこで、噴射角の違いが洗浄効果に与える影響を洗浄試験により確認した。噴射角は10、30°の2種類とした。噴射角を変化させた場合の洗浄水の拡散状況を図-2.15 噴射角度10° (a)、噴射角度30° (b)に示す。



図-2.15 洗浄水の拡散状況

この試験のUFB水はキャビテーション方式の生成装置を用いて表-2.1の条件で生成した。ノズル先端から試験板までの距離を1m、吐出圧力を1MPaとして、噴射角10°と30°について、それぞれ2回の洗浄を行った。1回の洗浄の噴射時間は3秒とした。

噴射角の影響に関する洗浄試験結果を図-2.16に示す。同図から、噴射角10°、30°のいずれも1回目の洗浄で塩分を除去できており、噴射角の違いは洗浄効果に影響していなかった。

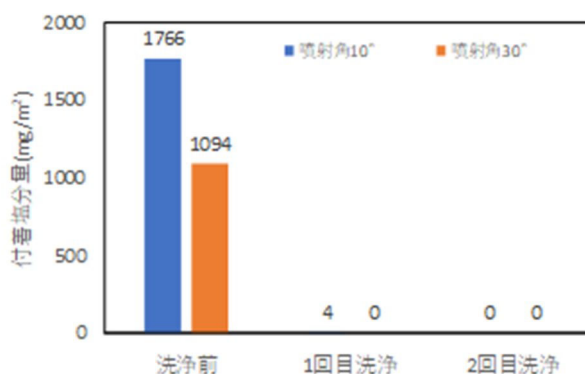


図-2.16 噴射角の違いと洗浄効果

④ 洗浄時間

洗浄効果に影響するパラメータの一つにぬれ時間がある。今回の試験では、ぬれ時間を厳密に管理することは難しかったので、洗浄水を試験板に噴射している時間（以下、洗浄時間）を変化させて洗浄効果を確認した。

この試験の UFB 水は気液混合せん断方式の生成装置を用いて表-2.1 の条件で生成した。ノズル先端から試験板までの距離を 1m、吐出圧力を 1MPa、噴射角を 30°として、洗浄時間 1、3、5 秒で洗浄を行った。洗浄時間の違いと洗浄効果の関係を図-2.17 に示す。同図から、洗浄時間 1 秒では 49mg/m²の塩分が残留すること、洗浄時間 3、5 秒では塩分をほぼ除去できていることが確認できる。このことから、試験板の面積 (0.09m²) に対して 3 秒程度の洗浄が必要と考えられる。これを実施工に換算すると、洗浄作業のみの施工速度は約 100m²/h となる。

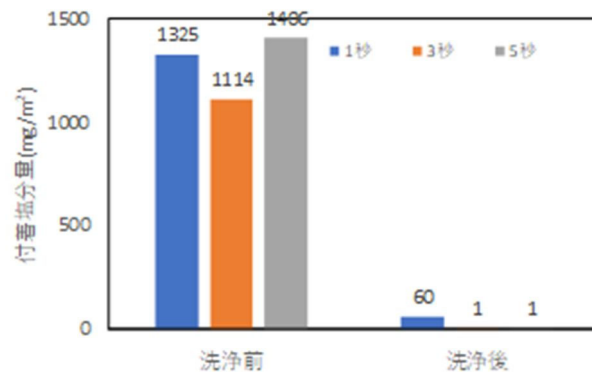


図-2.17 洗浄時間の違いと洗浄効果

(7) 既設橋での試験施工の結果

既設橋洗浄試験で得られた付着塩分量及び光沢度の測定結果を表-2.3 及び表-2.4 に示す。同表で示す塩分除去率は式(1)で計算した。

$$\text{塩分除去率} = \frac{S_0 - S_2}{S_0} \times 100 \quad \dots (1)$$

S0: 洗浄前の付着塩分量 (mg/m²)

S2: 2 回目洗浄後の付着塩分量 (mg/m²)

また、光沢度増加率は式(2)で計算した。

$$\text{光沢度増加率} = G_2 - G_0 \quad \dots (2)$$

G0: 洗浄前の光沢度 (%)

G2: 2 回目洗浄後の光沢度 (%)

表-2.3 付着塩分量及び光沢度の測定結果

橋	洗浄水	洗浄面	洗浄範囲		ノズル 操作速度 (m/s)	吐出圧 (MPa)	付着塩分量 (mg/m ²)			塩分 除去率 (%)	光沢度(%)				光沢度 増加率 (%)
			橋軸方向 長さ(m)	高さ/直角 方向長さ(m)			洗浄前	1回目 洗浄後	2回目 洗浄後		洗浄前		2回目洗浄後		
											橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	
A	UFB水	①	1.0	1.5	1.0	1.0	172	49	10	94.1	5.3	5.1	6.9	7.5	2.0
		②		2.0			200	19	12	94.2	2.2	2.4	8.0	6.7	5.0
		③		1.5			86	29	15	83.2	4.0	4.0	10.4	9.4	5.9
	水道水	①		1.5			263	51	9	96.6	5.6	5.9	6.4	6.0	0.4
		②		2.0			445	25	14	96.8	2.7	2.4	3.1	4.7	1.3
		③		1.5			64	14	9	85.3	4.3	4.1	8.4	9.5	4.7
B	UFB水	①	0.2	2.0	3.0	3.0	219	18	14	93.4	2.2	2.1	3.5	4.3	1.8
		②		2.0			148	25	15	89.7	1.9	1.9	2.7	2.8	0.9
		③		2.0			145	26	14	90.4	5.8	6.0	8.8	8.8	2.9
	水道水	①		2.0			362	10	9	97.5	2.2	2.0	3.0	2.5	0.6
		②		2.0			158	29	53	66.6	1.6	1.6	3.2	2.8	1.5
		③		2.0			164	28	8	95.0	5.5	3.8	9.4	6.9	3.6
C	UFB水	①	0.5	2.0	0.5	0.5	54	11	5	90.4	1.9	2.0	2.4	2.3	0.4
		②		2.0			331	45	43	87.1	化粧板のため計測せず				
	水道水	①		2.0			69	13	6	92.0	2.1	2.0	2.6	2.5	0.5
		②		2.0			275	104	45	83.5	化粧板のため計測せず				

表-2.4 塩分除去率の平均値と光沢度増加率の平均値

	塩分除去率の平均値 (%)	光沢度増加率の平均値 (%)
UFB水	87 (83.7) [90.2]	2.6 (4.3) [2.2]
水道水	89 (89.7) [86.9]	1.8 (1.8) [1.9]

() : 吐出圧 1.0MPa、[] : 吐出圧 3.0MPa

塩分除去率と洗浄前付着塩分量の関係を、1回目洗浄の場合について図-2.18に、2回目洗浄の場合について図-2.19に示す。なお、これらの図には令和3年度に実施した既設橋洗10浄試験のデータもプロットしている。

対象構造物に対して、1回目の洗浄結果を示す図-2.18から、洗浄前付着塩分量が50~100mg/m²の範囲における塩分除去率の下限値は、水道水(■)でもUFB水(●)でも約40%と殆ど差異がない。しかし、上限値(塩分除去率90~100%)に達した回数はUFB水(●)が6点に対し水道水(■)では1点のみであり、確率的にUFB水が優勢であるといえる。また、相関係数が低いとはいえ、塩分除去率の近似曲線は、UFB水が水道水を上回っている。

対象構造物に対して、2回目の洗浄結果を示す図-2.19から、UFB水と水道水の塩分除去の差は1回洗浄と比較して縮小した。また、2回洗浄では塩分除去率の近似曲線はUFB水と水道水で同等となった。

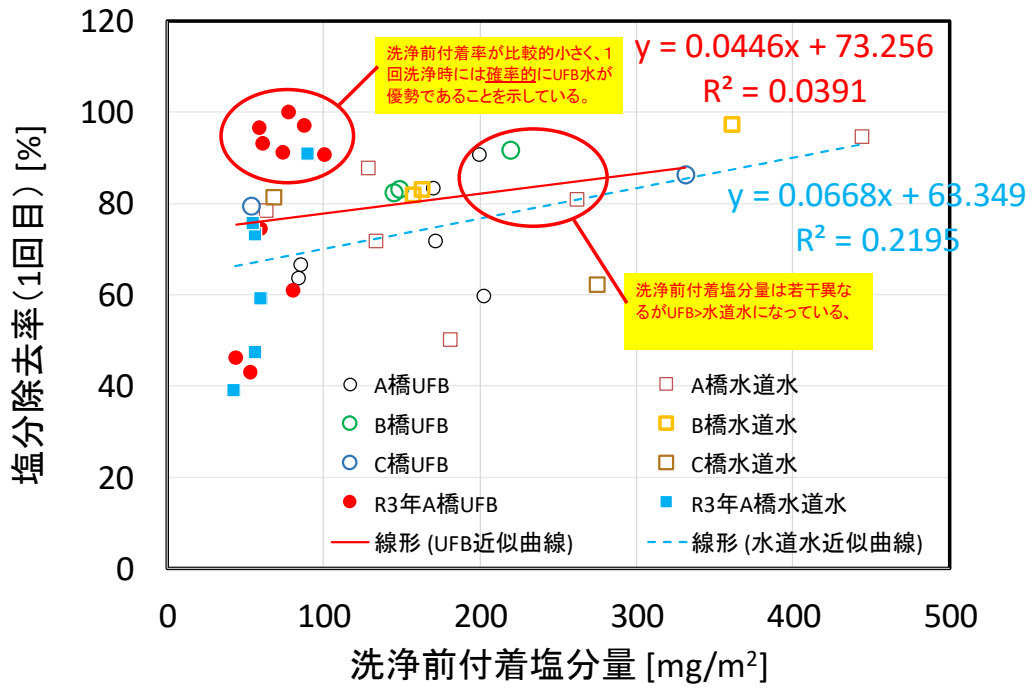


図-2.18 塩分除去率と付着塩分量の関係 (1 回目洗浄)

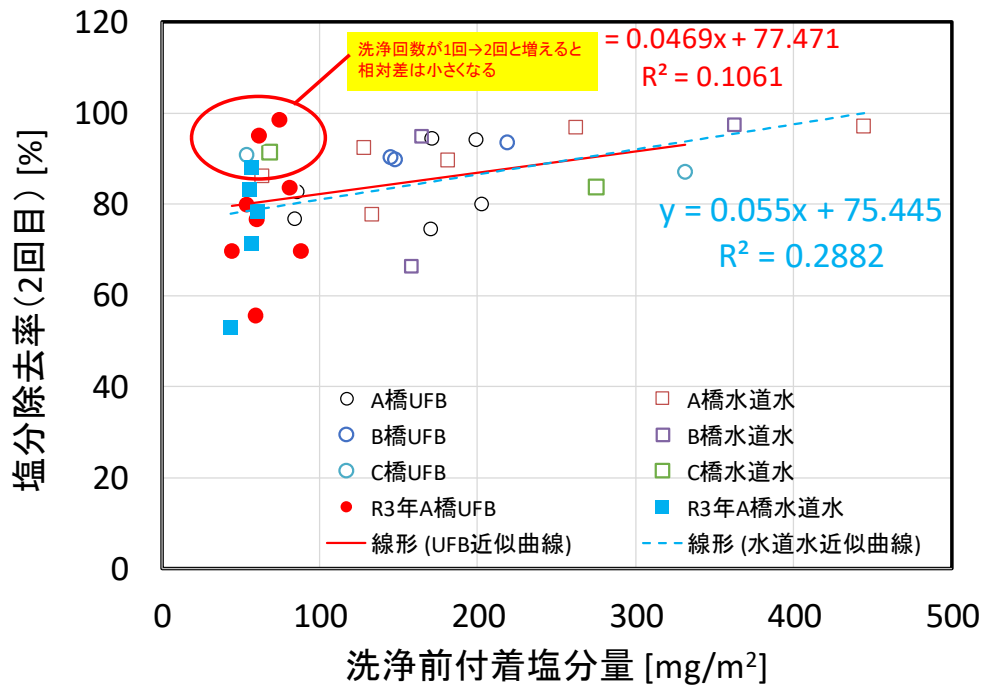


図-2.19 塩分除去率と付着塩分量の関係 (2 回目洗浄)

令和3年度の洗浄試験を行った対象橋梁の付着塩分量は、平均値で66.7mg/m²、令和4年度の対象橋梁の付着塩分量は、平均値で184.5mg/m²と2.8倍となっている。また、今回の

試験施工では、令和3年度の試験施工で課題となった対象鋼部材の付着塩分量のバラツキに対処する目的で、試験施工対象として鋼板供試体を製作し、鋼板を塩水に浸けることで課題解決を行った。塩水浸漬方法としては、濃度約4%の塩水に、試験板（表面塗装、裏面塗装無し）を5秒間浸漬し、引上げた後、自然乾燥させている。以上の方法で作成した塩水浸漬鋼板供試体の付着塩分量のバラツキは、想定と反して付着量の差異が少なくなるのではなく、 $1999\text{mg}/\text{m}^2\sim 286\text{mg}/\text{m}^2$ と最大値と最小値の差異が $1713\text{mg}/\text{m}^2$ と大きな差異となった。今回既設橋を対象として行った試験施工対象橋の付着塩分量は、 $445\text{mg}/\text{m}^2\sim 54\text{mg}/\text{m}^2$ であることから、最大値と最小値の差異は $391\text{mg}/\text{m}^2$ と振れ幅は先の供試体と比較して小さい。

塩水に浸漬した鋼板の塩分付着量が一定とならない理由としては、以下が考えられる。裸仕様の鋼板表面は平滑ではなく表面粗さとして $0.8\ \mu\text{m}\sim 6.3\ \mu\text{m}$ あり、今回使用した試験用鋼板供試体は腐食していることから凹凸としては、数 μm から数十 μm あることが一般的である。鋼材錆への塩の付着する薄さは塩物質の親水性、表面張力及び錆表面の粗さなどによって決定する。このようなことから錆表面の粗さが先に示すように大きかったことから、付着量にも大きな差異となったと考える。

付着塩分量に着目すると、27供試体のうち、11供試体が $1999\text{mg}/\text{m}^2$ 、1供試体が $1962\text{mg}/\text{m}^2$ と高付着の傾向があるが、試験施工対象橋梁は、付着塩分量に明確な傾向は掴めなかった。今回の塩水浸漬鋼板供試体を対象とした洗浄試験結果は、UFB水による洗浄効果が66.7%、水道水による洗浄結果は、66.3%となった。令和3年度の試験施工の付着塩分量、令和4年度の塩水浸漬鋼板供試体及び既設橋洗浄試験から、付着塩分量が $100\text{mg}/\text{m}^2$ 以下の場合、UFBの界面活性作用等の特性が十分に機能し、少ない洗浄回数で塩分を多く除去することが出来るが、塩分付着量が大きくなるとイオン結晶としての結合力や付着粗面の粗さ等からUFBの特性が十分発揮できない傾向があると考えられる。

また、洗浄水の吐出圧と洗浄面の面圧力であるが、今回の試験施工で得られた図-2.20 に洗浄面圧力と吐出圧の関係、図-2.21 に洗浄面圧力と距離の関係を示す。ノズルの差異による吐出圧に差異が生じないのは、吐出圧 3MPa（面圧力 0.04MPa）である。また、吐出圧 1MPa で洗浄した場合の面圧力は、洗浄面とノズル間距離が実作業を想定した 1m~4m 離隔した場合、ノズル B が面圧力 0.01MPa でほぼ一定であり、優位であることが明らかとなった。

塩水浸漬鋼板供試体を対象とした洗浄試験では、吐出圧 1MPa で洗浄した場合の洗浄効果は 81.0%、吐出圧 3MPa の場合は、85.6%と吐出圧が高い方が洗浄には優位であることが確認できた。また、洗浄水の吐出圧と洗浄面の面圧力についてあるが、このようなことから、既設橋を対象として構造物洗浄を行う場合、施工環境から同一箇所を数回行うことは困難であり、最大 2 回洗浄を条件として UFB 水による洗浄を行う場合、水圧と衝撃圧を考慮し既設構造物の洗浄には吐出圧を 3MPa とすることが適切と判断した。

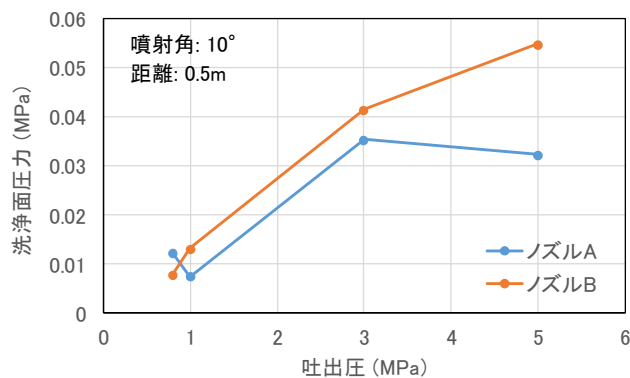


図-2.20 洗浄面圧力と吐出圧の関係

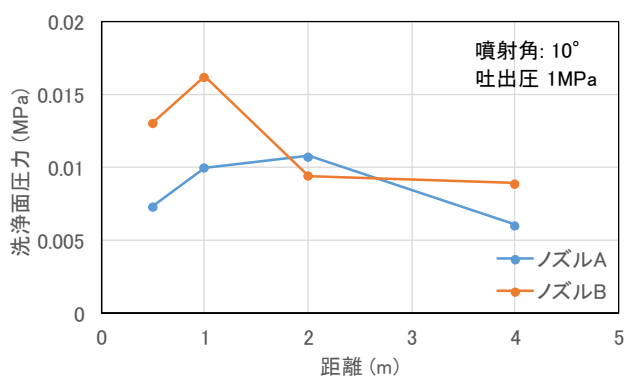


図-2.21 洗浄面圧力と距離の関係

また、今回の試験施工結果から、UFB 水による構造物洗浄に使用するノズルは可変タイプで B 形状（ $\phi 2.2\text{mm}$ ）が好ましいと判断する。

令和 4 年度の試験施工について、既設橋での施工試験を踏まえて得られた施工性と今後についての見通しについての知見及び課題の整理を行った。洗浄箇所への近接に関しては、足場必要箇所が出てくることや交通規制に伴う作業時間の制約が出てくるのがわかった。洗浄作業に関しては UFB の取り扱いに関する知見を改めて確認でき、強風時の対策が今後の課題として挙げられた。また、出来形管理方法や面積に対する施工日数に関する知見や意見も得ることができたので、構造物洗浄マニュアル最終案に反映することとした。



図-2.22 構造物洗浄用ノズル（2種類）