

## 6 メンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：橋梁構造研究グループ長 星隈 順一

研究担当グループ：CAESAR（橋梁構造研究グループ）、iMaRRC（材料資源研究グループ）、地質・地盤研究グループ（特命、地質）、技術推進本部（先端技術チーム）、道路技術研究グループ（舗装チーム、トンネルチーム）、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）、技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

### 1. 研究の必要性

現在、社会資本の高齢化が急速に進展している。筐子トンネルの事故など、一部では劣化等に伴う重大な損傷が発生し、大きな社会問題となっている。こうした社会資本ストックの老朽化に対応するため、国土交通省では第 4 次社会資本整備重点計画（平成 27 年度～令和 2 年度）において「社会資本の戦略的な維持管理・更新」を重点目標に掲げ、関連施策を重点的に推進している。

例えば道路構造物に関しては、法改正に基づく点検の義務化が定められ、平成 26 年度より全ての道路管理者が点検等の維持管理を実施しているところである。ただし、点検・調査の効率化や高度化、健全性の合理的な評価や優先順位の付け方、不具合実態や現場条件に適合した補修補強方法など、現状では維持管理の実施に際して様々な技術的課題を抱えている。また、社会資本の多くは市町村が管理しているが、求められるサービス水準に対応した維持管理手法が明らかとなっておらず、点検等の維持管理実施に際しての課題となっている。

今中長期の後半からは、新たに AI（人工知能）等を駆使した戦略的予防保全型管理の構築に向けた技術開発に取り組み、インフラ分野の DX に資することが求められている。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、メンテナンスサイクルの各フェイズ（点検・調査、診断、措置（補修補強））における主要な技術的課題を解決する。また、市町村管理物のサービス水準への配慮など多様な管理レベルに対応した維持管理技術を開発する。

以上により、メンテナンスサイクルの技術面でのスパイラルアップを実現し、社会資本の健全性確保に貢献するために、以下の達成目標を設定した。

- (1) 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築
- (2) 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価
- (3) 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築
- (4) 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、第 4 期中長期間中（平成 28 年度～令和 3 年度）に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

#### (1) 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築

##### <舗装関連>

本研究は、多様な管理レベル下にある舗装を対象に、舗装マネジメントの事例分析や、舗装の構造破損および路面破損の実態調査、既設舗装の路面性状把握技術の改善等を通じ、新たな路面評価手法を提案することを目的としている。重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析した。その結果、重交通道路の修繕工法の選定にあたってはコア抜き

より有益な情報が得られること、軽交通道路ではボトムアップ疲労ひび割れの発生比率が高いこと等を明らかにした。また、ボトムアップひび割れが顕著な箇所等における各種試験調査の結果から、舗装体の健全度および適用すべき修繕工法を検討し、舗装の構造的損傷に対する診断と措置に関して、個々の技術を体系的に整理した。

## (2) 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価

### <橋梁関連>

近年、RC床版の土砂化という損傷が顕在化し、問題となっている。RC床版の土砂化は、床版上面に浸入した水が発生要因と考えられており、土砂化に対して予防保全を図るためには、床版上面に浸入した水を早期検知することが必要となることから、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを使用した床版上面の滞水検出手法の開発に取り組んでいる。令和3年度は、模型供試体を用いて令和2年度に構築した滞水推定アプリケーションの滞水推定精度の検証を行った。さらに、他の橋梁で整備した学習データを追加学習させることで、アプリケーションの推定精度向上を実現し、実橋においても従来の人間が判断する方法と同等の推定精度を有することを確認した。

### <舗装関連>

既設舗装を対象に、道路規制を必要としない移動式たわみ測定装置（MWD）を開発し、舗装の簡易な構造診断手法を構築することを目的に各種検討を実施した。平成28～30年度はMWDの測定手法について各種検証を実施し必要な測定条件等を整理するとともに、MWDたわみ量解析プログラムを作成した。令和1～3年度はMWDに適用可能なドップラ振動計を開発するとともに、MWDを用いた健全度評価手法を提案するとともに、ノイズを効果的に除去する新たなたわみ量解析手法を開発し、MWDの更なる精度向上を実現した。また、マルチチャンネル地中レーダによる舗装構造調査技術の実用化向上を図り、3次元記録による埋設物や舗装構造分布の検知能力を実証すると共に、電磁波の伝播速度情報を利用した推定深度の高精度化や水分分布の把握技術を開発した。また、多重反射ノイズを抑制し舗装構造調査に適合した一般道路で調査可能な装置を開発した。

## (3) 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### <橋梁関連>

1)斜張橋やアーチ橋（ローゼ橋）などの吊構造形式橋梁に用いられるケーブルの腐食損傷は、橋全体系の安全性に極めて大きな影響を及ぼす可能性がある一方、ポリエチレン被覆や塗装などの防食被覆によって覆われていることでケーブル内部の状態を把握するのが容易でなく、ケーブル内部の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、ポリエチレン被覆ケーブル内部の温湿度計測及び再現解析を実施することで、計測した温湿度によりケーブル内部の腐食環境評価の可能性を示した。さらに、措置として内部が腐食環境にあるポリエチレン被覆ケーブルの腐食環境改善方法の検討を行い、ケーブル内部に空気の流れを生み出すことで自然換気による方法及び乾燥剤と自然換気の併用による方法が適用できる可能性を示した。また、研究成果の一部は道路橋ケーブル構造便覧に反映された。

2)高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中で、トラス橋およびアーチ橋における主構部材の腐食損傷については、橋全体系の安全性に影響を及ぼす可能性があり、構造物の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、鋼トラス橋の格点部を対象として、高強度鋼を使用する際のフレット部の応力集中の影響について検討を行うとともに、ガセットの長さ・板厚・自由辺部の突出幅・斜材と弦材の離れに関する耐荷力の関係について検討した。その結果、高強度鋼の鋼トラス橋の格点部への適用可能性を確認するとともに、ガセットの耐荷力評価に資する知見が得られた。

3)PC橋関係では、損傷を有するPC橋について、荷重載荷される桁の耐力を実態に近いレベルで評価できる手法の検討を行った。令和29年度から令和2年度にかけ、実橋載荷試験等により、耐荷性能に与える要因はPC鋼材破断本数による他、載荷桁以外の荷重分配の影響が大きいことを確認し、損傷したPC橋の上部工全体系格子解析モデル（以下、損傷格子モデル）を用いて解析を行い、応答値の発生状況等について検討した。解析結果は、載荷桁G1において載荷試験時の残存耐力（破壊荷重時の耐力）を概ね再現可能な精度であり、損傷格子モデルが荷重分配を考慮した荷重載荷桁の耐力評価に用いることが可能であることが確認された。本研究成果は、損傷

を有する既設 PC 橋の交通規制を判断する際のツールなどとして活用することが期待される。

4)道路橋は、5年に1回を基本とした定期点検が義務化されているものの、措置の実施率は低く、特に予防保全型の修繕は進んでいない。持続的に橋の機能を保持していくためには、適切な診断を行い、予防保全対策を行いながら円滑なメンテナンスサイクルを実現していく必要がある。令和3年度は、令和2年度までに開発した橋梁診断支援 AI システムに新たに「桁橋」「トラス橋」を対象として追加し、診断 AI システム Ver.1.0 を開発するとともに、本システムの実証を行い、今後の課題や改良方針を明らかにした。

#### <舗装関連>

本研究では、既設舗装を対象に維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法を提案することおよび非接触表面波探査手法を用いた舗装の局所的な構造評価を提案することを目的とし、各種検討を実施した。その結果、ひび割れと FWD たわみ量の関係について、解析に加えて実験により傾向を把握することができた。また、舗装の構造的損傷に対する診断と措置に関して、個々の技術を体系的に整理するとともに技術の選択の基本的な考え方を整理した。

また、高周波表面波探査による舗装の S 波速度構造調査手法の開発を行った。表基層の高速な S 波速度の影響のため、路盤・路床の解析精度向上にはリーケージモードの解析が必要であることを解明した。そこで、地中レーダによる構造判定との組み合わせによる実用的な調査手法と提案した。さらに、高周波型の地中レーダを用い、高精度で表基層厚の連続分布を測定できることがわかった。

#### <管理用施設（機械設備）関連>

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。本研究では、機能回復時間等を考慮した信頼性評価による機器・部品の重要度判断や、保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立することを目的としている。これまでの「故障させない維持管理」に加え、「故障してからの対処」を考慮した設備維持管理マネジメントに資するため、機械設備の故障時からの機能回復の遅速の定量的評価を行う手法を考案した。また、この手法を取り入れた設備維持管理計画策定シミュレーション等の実施により活用効果を確認し、活用手法と評価の手引きについてとりまとめた。

### (4) 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

#### <橋梁関連>

1)高度成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな再劣化要因による損傷事例が報告されている。PC 橋の補強関係では、既設 PC 橋における、損傷による曲げ耐力不足の程度や範囲を耐荷性能に評価するための手法を開発するため、平成 29 年度から令和 2 年度にかけ載荷試験および解体調査にて既設 PC 鋼材破断およびグラウト充填不足が曲げ耐力に与える影響が大きいことを確認し、それらの結果に基づき、損傷を考慮した破壊抵抗曲げモーメントの算出方法の妥当性について、PCT 桁の梁モデルの解析結果と比較して検証した。損傷を考慮した PC 桁の破壊抵抗曲げモーメントの算出において、PC 鋼材破断に加えて PC 鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足を適切に評価することによって算出精度が向上することを確認した。また、算出した破壊抵抗曲げモーメントの妥当性は、過年度に実施した載荷試験結果と同定した梁モデル(ファイバーモデル)を用いて対比する手法で検証し、妥当であることを確認した。本研究での耐荷性能評価手法を用いることで、PC 鋼材一部破断による部分的な曲げ耐力低下を把握することができるため、たとえば、緊張させた炭素繊維プレートを曲げ耐力不足範囲に取り付けるなど、PC 鋼材が一部破断している既設 PC 橋への局所的な補強設計への活用が期待される。

2)PC 橋の補修関係では、表面被覆工法の品質・施工管理等の留意事項の提案を目的に、平成 29 年度から令和 2 年度にかけ既設 PC 桁の部位ごとに塩化物イオン量が異なることと、損傷等が生じていない表面被覆は一定年数経過後も高い遮塩性能を維持していることを確認し、塩害対策として表面被覆工法で補修された既設 PC 桁を対象に、補修前後のコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布等に着眼し整理・分析および詳細調査を実施した。詳細調査等により、表面被覆工法施工後に補修効果が発揮されない要因として、表面被覆工法施工後においても中性化(炭酸化)による塩化物イオンの内部拡散が発生することおよび、フランジテーパ部のような鋼材かぶ

り不足が発生し鋼材腐食するリスクがより大きな傾向である部位の存在が挙げられことを踏まえ、品質・施工管理上の留意事項と留意事項を踏まえた調査・補修例を整理した。実橋での調査を踏まえ整理した品質・施工管理上の留意事項を踏まえ調査・補修等の維持管理を行うことで、表面被覆工法による補修効果を確実に発揮させることができ、また補修効果を発揮させるための調査・補修技術の開発につながることを期待される。

3)塗布材料や部位の違いによりコンクリート内部の含水状態は変化する。水分は様々な劣化を誘発し、とくに鉄筋腐食環境に影響を及ぼすことから、補修においては水分等のコンクリート内部の環境状態を制御することが重要になる。表面保護工法による補修設計を高度化し、効果や信頼性を向上させることを目的として、表面保護工法の塗布部位に関する腐食抑制効果の長期耐久性評価、実大桁を用いたコンクリート含水状態の動態観測を行った。供試体暴露8年後までの鋼材腐食状況の調査から、塗布部位の相違や含浸材の適用により鋼材の腐食環境が大きく異なることがわかった。そして、表面保護材が異なる実大桁を用いて水分状態の変化を3.5年間観測し、内部水分を制御するための表面保護材料の特性を把握した。また、表面保護材料の適切な選定のための性能評価試験法の検討から、コンクリートの品質に応じた表面保護材料の評価指標を見出した。表面含浸材11製品による5年間の暴露(NETISテーマ設定型の分担調査)の結果、施工性と性能は必ずしも比例しなかったことから、それぞれ独立して評価する必要があることがわかった。一連の調査結果から、表面被覆や含浸材の種類と塗布範囲による水分状態の相違による腐食抑制効果への影響を把握し、適切な補修設計を行うための知見が得られた。

#### <舗装関連>

舗装の維持修繕では、表面のアスファルト劣化防止ならびに、ひび割れ処置および遮水性確保による路盤の保護が延命に直結する。現道採取材の試験から、表層の表面近傍1cm程度のアスファルト劣化が顕著であることを平成28年に示し、特に軽交通道路では表層機能の保全が特に重要であることを確認した。そこで表面処理工法やじょく層併用薄層補修工法等に関する、破損形態に応じた工法適用性の検討を平成29年度から実施した。予防保全が可能となる表面処理工法の適用目安を示すため、損傷段階や交通条件等が異なる複数の現道における試験舗装による検証をつくば市内で平成30年度に開始した。令和3年度までの追跡調査から、表層機能維持としての表面処理工法の適用条件として、下層の状態や交通量等の目安、浸透水の抑制効果を明らかにするとともに、劣化曲線を推定するための路面性状データ処理方法を得た。これらから、下層状態が比較的健全であれば交通量に応じた工法選定により路面機能の維持が可能であることがわかった。また、ひび割れ等の路面損傷部からの浸透水の調査方法を開発して抑制効果を確認し、表面処理の延命効果に基づき適用箇所に応じたライフサイクルコストを検討することにより、表面処理工法を有効に措置適用することが可能となった。

#### <管理用施設(機械設備)関連>

近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要と思われていなかった部品の故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、施設の健全性評価や早期機能回復のために点検診断・維持管理の容易な設備構造も検討する必要がある。本研究では、これまで実施してきた河川ポンプ設備を中心とした土木機械設備のストックマネジメントに関する研究結果を基に、点検診断が容易な設備構造を検討するため、設備構造及び点検技術の実態調査と、既往研究等により設備診断に有効と考えられる点検診断手法が現在の設備構造で適用可能か等の実証試験を実施し、有効な改造案、適切な点検手法、新設時に備えるべき構造等に関する知見を得た。それらを「維持管理しやすい設備構造 事例集」としてとりまとめ公開した。

#### <管理用施設(接合部)関連>

道路トンネルのジェットファン等の取付けに使用される金属系あと施工アンカーを主な対象とし、アンカーに作用する荷重や様々な条件下にあるアンカーの耐力について、現地計測や室内実験による検討を実施した。令和3年度は、これまでに得られた研究成果を取りまとめ、アンカー等の設計・施工・維持管理上の留意点を示した土木研究所資料の原稿を作成した。本報告書では、そのうち特筆すべき事項として、①トンネル現場にてジェットファンを支持するターンバックルの軸力を計測した結果、設計での計算値と計測値で乖離が認められたが、設計で確保される安全率を考慮すると小さい変動幅であると評価された。②アンカーがコーン状破壊した場合の設計耐力計算式について、想定するコーンより大きなコーンで破壊する点や、付属施設取付けの際のナット締付けでアンカーに導入される軸力にばらつきや経時的低下が生じる点等と、それに対する設計上の留意点、③穿孔径や穿孔深さが不適切な場合にアンカーの引張耐力が低下する点と、それに対する施工上の留意点、④供用中、母

材コンクリートにひび割れが生じると引張耐力が低下する点と、それに対する点検上の留意点、⑤母材コンクリートのひび割れ対策の一つである繊維シート接着工について、施工方法によってはアンカーの引張耐力に影響が及ぶ点と、それに対する措置上の留意点を記載した。

# STUDY ON EFFICIENCY AND IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF THE MAINTENANCE CYCLE

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Bridge and Structural Engineering Group  
HOSIKUMA Junichi

**Research Group** : Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research  
(Bridge and Structural Engineering Group)  
Innovative Materials and Resource Research Center  
(Materials and Resources Engineering Group)  
Geological and feature ground Engineering Group  
(Chief Researcher for Road Slope Management, Geology Research Team)  
Construction Technology Research Department  
(Advanced Technology Research Team)  
Road Technology Research Group (Tunnel Team, Pavement Research Team)  
Cold Region Maintenance Technology Research Group  
(Road Maintenance Research Team)  
Technology Development Coordination (Machinery Technology Research Team)

**Abstract** : In this R & D program, major technical problems in each phase of the maintenance cycle (inspection, survey, diagnosis, measures (repair reinforcement)) have been solving. We will also develop maintenance management technologies that respond to diverse management levels, such as consideration of service levels of municipal managed items.

In conclusion, in order to achieve spiral up in the technical aspect of the maintenance cycle and to contribute to securing the soundness of infrastructure, the following objectives were set.

- (1) Development of the maintenance technology corresponding to a variety of management levels (Country, cities, towns and villages)
- (2) Development of the efficiency, advancement technology of an investigation, the monitoring by the apparatus utilization
- (3) Development of the priority decision technique of a part, a point needing measures
- (4) Development of the most suitable maintenance repair technique, structure and materials corresponding to past phenomenon, the spot condition

**Key words** : maintenance, structures, materials, tunnel, pavement, machinery

## 6.1 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築

### 6.1.1 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、  
地質・地盤研究グループ（特命、地質）、材料  
資源研究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西  
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一  
弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹、  
若林由弥、佐藤圭洋

#### 【要旨】

本研究は、多様な管理レベル下にある舗装を対象に、舗装マネジメントの事例分析や、舗装の構造破損および路面破損の実態調査、既設舗装の路面性状把握技術の改善等を通じ、新たな路面評価手法を提案することを目的としている。平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。その結果、重交通道路の修繕工法の選定にあたってはコア抜きより有益な情報が得られること、軽交通道路ではボトムアップ疲労ひび割れの発生比率が高いこと等を明らかにした。平成 29 年度は、重交通道路を想定し、アスコン層の内部損傷を模擬した供試体に対する赤外線調査手法を用いた内部損傷の評価手法の検討を実施し、アスファルト層の内部損傷が面的に広がっている箇所では、路面温度の日最高温度や日最高温度からの低下傾向が健全部と異なることを把握した。軽交通舗装区間の路面性状を把握する低廉な手法として、車両に搭載した加速度計によって算定した国際ラフネス指数 IRI を活用する手法を検討した結果、計測やデータの表示が比較的容易であり、IRI 値と修繕要否判断との間に関連があることを確認した。平成 30 年度は、軽交通舗装区間の路面性状を把握する手法として自治体管理の幹線および生活道路の IRI を計測した結果、面的把握に有効な手段であることと、舗装の損傷と IRI 値の間に関連があることを確認した。令和元年度は、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。その結果、閾値を超過する加速度データの割合と IRI 値との間に相関関係があり、加速度ビッグデータから IRI 値が高い箇所の把握ができることを確認した。令和 2 年度は、ボトムアップひび割れが顕著な箇所における各種試験調査の結果から舗装体の健全度および適用すべき修繕工法を検討した。その結果、積雪寒冷地の軽交通道路においては、上層路盤にアスファルト安定処理を、凍上抑制層に粒状材を使用していることから、FWD たわみ量が小さく計測される可能性があるため、FWD の D0 許容たわみ量から舗装の健全度を判定するには留意が必要であることを確認した。令和 3 年度は、軽交通道路においてポットホールの発生を予測し、舗装体の構造的な健全性を評価する方法について、現道調査にて検討した。その結果、赤外線カメラ画像でのポットホール発生予測評価の有効性が確認され、赤外線カメラが構造的な健全性の評価にも有用であることを確認した。また、路面の改善による燃費の改善効果を定量化する手法を検討し、計測を実施した。その結果、OBD 接続機器による簡易な燃費計測手法の有効性が確認でき、As 舗装道路では砂利道に比べて燃費が 1.6 倍程度改善することを確認した。

キーワード：舗装、構造破損、路面破損、実態調査、コア抜き、疲労ひび割れ

#### 1. はじめに

多様な管理レベル下にある舗装については、その管理レベルに対応した路面評価手法が求められる。そのためには、様々な性格を有する道路の舗装を対象に、損傷の実態を把握することが必要である。

平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。

平成 29 年度は、アスコン層の様々な内部損傷を模擬した供試体を作成し、それら供試体に対して赤外線調査手法

を用いた内部損傷の評価手法の検討を行った。

平成 30 年度は、路面平坦性指標 IRI の簡易な計測手法で自治体管理の幹線および生活道路を計測し舗装の損傷と IRI 値との関連を検討した。

令和元年度は、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。

令和 2 年度は、ボトムアップひび割れが顕著な箇所における各種試験調査の結果から舗装体の健全度および適用すべき修繕工法を検討した。

令和 3 年度は、軽交通道路の損傷形態として近年課題となっているポットホールを対象に、ポットホールの発生を予測評価し、舗装体の構造的な健全性を評価する方法について、現道調査を実施して検討した。

## 2. 重交通道路における舗装の損傷実態調査

### 2.1 背景

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」(以下、「点検要領」という。)においては、損傷の進行が早い道路等に分類されたアスファルト舗装について、表層の供用年数に対する使用目標年数の設定を通じ、早期に劣化した区間に対しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。詳細調査の手法としては、FWD たわみ量調査、コア抜き調査および開削調査が点検要領の付録に例示されているが、開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においては FWD たわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく工法選定が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかはあまり明らかになっていない。

本研究では、コア抜き調査をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場にて、FWD たわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。

### 2.2 調査箇所

調査箇所は、コア抜き調査結果をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場とした。場所は、関東地方整備局管内の直轄国道(往復 2 車線)であり、平成 22 年道路交通センサス<sup>2)</sup>では、大型車交通量は舗装計画交通量  $N_6$  区分に該当する道路である。線形はほぼ直線であり、工事延長は  $L$  約 600m (上下線とも) である。

修繕工事前の舗装構成は、過去の修繕工事の設計図書の情報をもとにすると、起点側から約 430m を境に変化

しているものとなっており、その舗装構成を図-1 に示す。いずれもアスファルト混合物層(以下、「アスコン層」という。)厚は 25cm であり、また図中の路盤は舗装構成より粒状路盤と考えられる。なお、前回修繕工事は

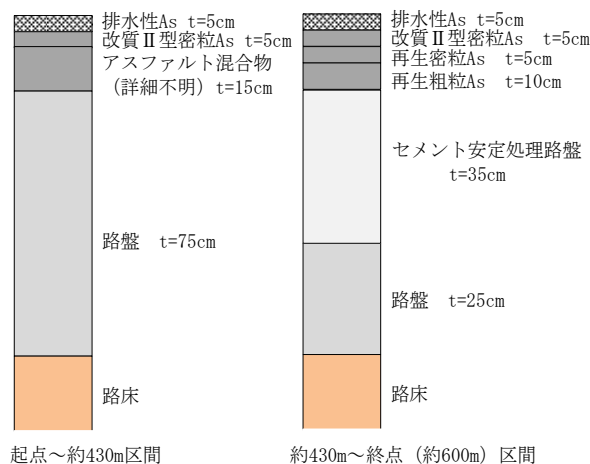


図-1 舗装構成

今回修繕工事の 16 年前に実施しており、起点側から約 430m までは 2 層 ( $t=10\text{cm}$ ) の切削オーバーレイ、約 430m 以降は舗装打換え(図-1 中のセメント安定処理路盤層より上の施工)である。

### 2.3 現場内のコア抜き本数

当該工事現場では、工事着手前に区間内のコア抜き調査が行われている。コア抜き調査は、道路管理者の指示の下、修繕工事受注業者が修繕前の路面の損傷状況を元に調査箇所を選定して実施し、その結果コア本数は下り車線が 11 本、上り車線が 13 本であった。

### 2.4 コア抜き調査結果を踏まえた修繕工法の選定

前節に示したコア抜き調査により、アスコン層内の損傷は一様でないことが明らかとなった。具体的には、表層の路面側を起点としたひび割れ(トップダウンひび割れ)が中間層までにとどまっているもの、ひび割れからの雨水の浸入に起因すると想定される層間剥離を引き起こしているもの、さらに進行して中間層、基層やアスファルト安定処理層部の混合物自体が剥離を引き起こしているもの、およびアスコン層 ( $t=25\text{cm}$ ) を貫通しているものと様々であった。当該修繕現場では、これらの状況を踏まえ、ひび割れ深さが 15cm 以上入っている区間をアスファルト混合物層の全層 ( $t=25\text{cm}$ ) 打換え、それ以外の区間を 2 層 ( $t=10\text{cm}$ ) の切削オーバーレイと修繕工法が選定された。このように、同一現場内でもアスファルト混合物層内部の損傷は様々となりうることを認識しておく必要がある。当該現場のコアの状況を図-2 に示す。なお、図中のうち、「ア





図-2 コア抜き調査結果

スコン層内部の混合物自体の剥離が進行／ひび割れがアスコン層を貫通」の写真の一部は、コア側面のひび割れ部分のチョークによるトレースができていない。

**2. 5 修繕工事前の路面性状調査**

当該修繕工事区間において、修繕前に路面性状調査を行った。その結果を表-1に示す。これより、上下車線共に損傷は進行しており、また、どちらかと言えばひび割れによる損傷が卓越した区間であることが分かる。実際の現場では、ひび割れの他車輪通過部にわだち部オーバーレイ工（レーンパッチング）の実施箇所が点在しており、日常的な維持管理に苦慮していた様子が観察される路面状況であった。修繕前の路面の代表写真を写真-1に示す。

**2. 6 修繕工事前後のFWDたわみ量調査**

修繕工事前後において、OWP（Outer Wheel Path：外側車輪通過位置）上で起点から20m間隔でFWDたわみ量調査を実施した。上下車線とも、路線の起点側を測点No.0とし、順に20m間隔で測点を振り、終点側を測点No.30とした。また、FWDたわみ量については、「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—」<sup>3)</sup>に従い20℃換算で補正している。

舗装の構造的健全度として、路床を含めた舗装全体の支

表-1 修繕工事前の路面性状調査結果

路面性状		下り車線	上り車線
ひび割れ率 (%)	区間平均	24	31
	最大値 (10m 単位)	69	72
わだち掘れ量 (mm)	区間平均	17	17
	最大値 (10m 単位)	32	46
平坦性 (mm)	区間平均	2.8	3.1



写真-1 修繕工事現場の路面状況

持力を示す載荷点直下の D0 たわみ量に着目し、それをグラフ化したものを図-3、図-4 に示す。また、同図中には、アスコン層全層 (t=25cm) 打換えの区間を表示している。この表示以外の区間は、t=10cm の切削オーバーレイの区間である。これより、当該現場では、2.4 に示したコア抜き調査によるひび割れ深さに着目して修繕工法を選定することが、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへと回復させることに大きく寄与したことが分かる。渡邊らは、別の現場にて一律の一層切削オーバーレイを実施した場合の修繕前後の構造評価を行った結果、当該区間内の構造的健全度のバラツキは概ねそのままであったことを報告している<sup>4)</sup>。この報告と照らし合わせると、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かる。この結果については、平成 29 年度の日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。なお、実際の修繕工事は、構造面のみならず路面機能面など様々な理由を勘案し道路管理者が総合的な判断のもとその区間・内容を決定するものであり、本報はその是非を議論するものではないことを申し添える。

当該現場では、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的にアスコン層内部の損傷状況を把握する手法の検討が必要と考えられる。

### 3. アスコン層内部損傷の評価手法の検討

#### 3.1 背景

前章より、アスコン層内部の損傷状況を把握することが構造的健全度の一律なレベルへの回復の観点から重要であることが明らかになった。コア抜き調査は直接的にアスコン層内部の損傷状況を確認できるが、破壊調査であり、現場制約の条件等から、非破壊で把握する手法が望ましい。

アスコン層内部に損傷が存在すると、アスコン層内に不連続面が存在することとなる。このような不連続面の有無により、太陽の日射によるアスコン層内部への熱伝導の過程が変化し、舗装路面の表面温度に差異が生じることが考えられる<sup>5)</sup>。

早野ら<sup>6)</sup>は、舗装の内部損傷を擬似的に再現した供試体を室内に設置し、ライトにより日照を再現し、その表面温度についてサーモグラフィを用いて観測している。その結果、舗装の内部損傷の有無により、表面温度に差異が生じることを報告しているが、気温、日射量等の気象を再現した環境試験装置内での観測であり、また空港舗装を対象としているため、4時、15時および22時を想定した時刻での供試体の表面温度の観測となっている。また、前川ら<sup>7)</sup>は、内部損傷を模擬した供試体を屋外に設置して表面温度を観測しているが、これも空港舗装を対象としているため、14時、19時、23時前後での3点の測定となっている。道路舗装は常時一般交通に供しており、時間を定めた定期的な表面温度の観測は通常困難であり、もっとも計測に適した時間帯の検討にあたっては、屋外で直接日射に暴露した状況下にて、よりきめ細かに表面温度を測定し、内部損傷を効果的に把握する時間帯等について検討を行うこと

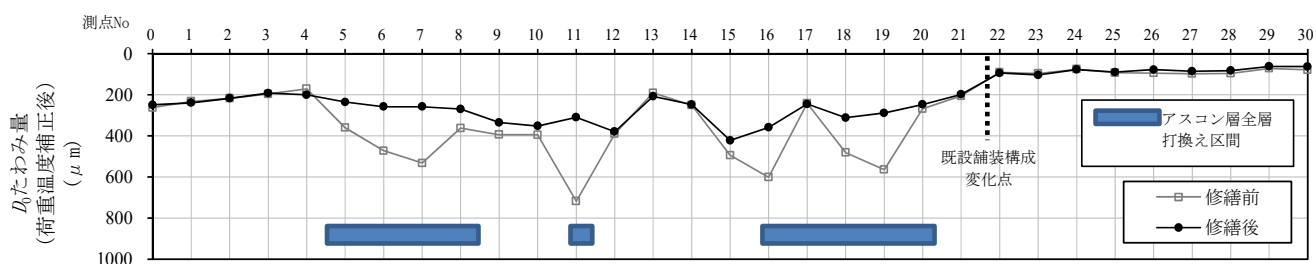


図-3 修繕工事施工前後の D0 たわみ量の比較 (下り車線)

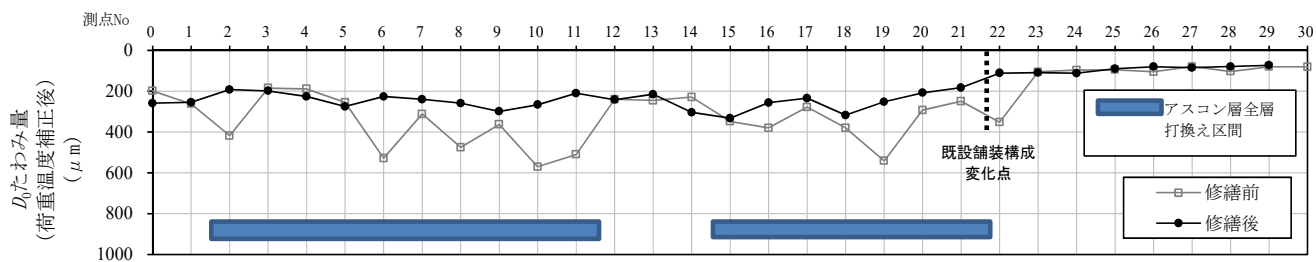


図-4 修繕工事施工前後の D0 たわみ量の比較 (上り車線)

が有効と考えられる。

そこで、本研究では、舗装の様々な内部損傷を模擬した供試体を屋外に設置し、サーモグラフィを用いて、その表面温度の経時変化をきめ細かく観測し、内部損傷の存在が表面温度にどのような差異を生じさせるか実験を行うこととした。

### 3. 2 供試体の作成

供試体の作成にあたっては、トップダウンクラックが多いとされる重交通道路を想定し、雨水の浸透によるアスコン層の内部損傷を想定した。具体的には、5cmのアスコン層3層（表層・中間層・基層）からなる供試体とし、供試体・損傷の大きさは図-5、図-6に示すとおりとし、図-7に示す断面を有する8種類の供試体を作成した。供試体の設置場所は、土木研究所舗装走行実験場の構内であり、均一な日射が確保できるような場所を選定している。それぞれの供試体の離隔は50cmとした。

なお、施工基盤は供試体の下に厚さ10cmの粒状路盤を設け、表層用アスファルト混合物は最大粒径13mmの新規密粒度混合物、中間層・基層用のアスファルト混合物は最大粒径20mmの新規粗粒度アスファルト混合物とした。模擬ひび割れは、設置対象とする層の施工時に、厚さ1mmの金属板（写真-2）を供試体に差し込みながらアスファルト混合物を敷均し、転圧し、その後に当該金属板を引き抜いていくこととした。中間層の模擬剥離は、半径25cmの円形木枠を供試体中心部に設置（写真-3）し、円形木枠の周りにアスファルト混合物を敷均し、転圧し、その後円形木枠を取り外し、設置後に粗粒度アスファルト混合物の骨材配合からなる骨材を敷均し、転圧し、その後の表層を敷

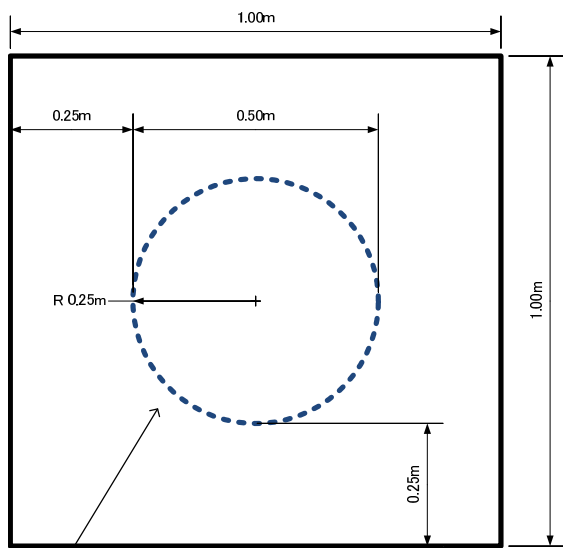
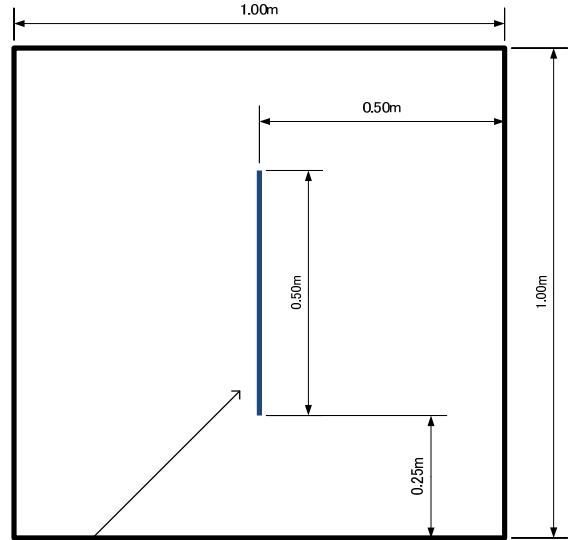


図-5 供試体と模擬ひび割れの大きさ

設することとした。層間剥離は、供試体中心部に半径25cm、厚さ5mm程度で砂を敷均し（写真-4）、その後に上部の層を敷設することによって作成することとした。なお、いずれの供試体においても、健全部の層間にはタックコートが塗布している。



模擬クラック

図-6 供試体と模擬剥離、層間剥離の大きさ

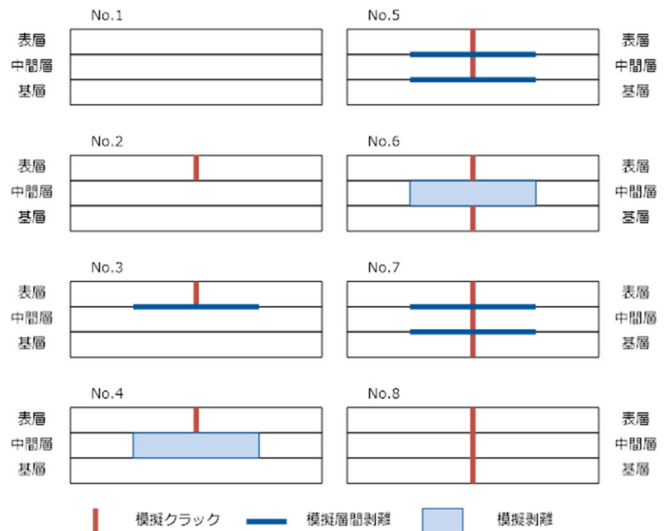


図-7 各供試体の断面



写真-2 模擬ひび割れ作成

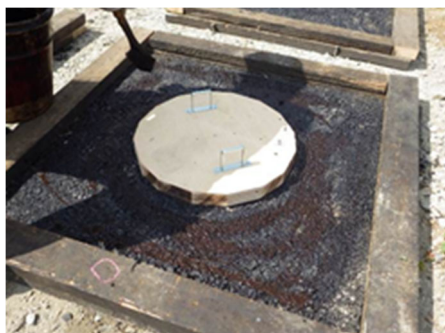


写真-3 模擬剥離部の円形木枠の設置



写真-4 模擬層間剥離作成

### 3.3 サーモグラフィ評価試験

様々なアスコン層内部損傷を模擬した供試体に対して、サーモグラフィを用いて表面温度の経時変化を1h置きに実施した。

使用したサーモグラフィは、現場での適用性を考慮して、安価に入手可能で、かつ可搬性が高いスマートフォンに接続してデータを取得する機種とした。熱画像解像度は160×120 (155万画素)、計測温度範囲は-20～400℃、温度分解能は0.15℃、視野角は55×43°の諸元を有しているものである。

試験実施日は平成29年11月7日であり、近傍のアメダス観測地点(つくば(館野))の当日の気象データは表-2に示すとおりである。なお、供試体作製後に模擬ひび割れから人為的に水を挿入したところ、層間を伝って供試体端部から水の浸みだしを確認し、供試体によってその浸みだし量はまちまちであった。これは、小さい供試体でありタンパ等の小型機械を中心とした締固めであったため、層間部での付着性にバラツキが生じたためと考えられる。そのため、内部の模擬損傷に雨水がたまっている状態という統一条件での試験の実施が困難であり、供試体が乾燥状態という条件下での比較試験とした。なお、上記アメダス観測地点において、試験前日および前々日も晴天で降雨量は0mmであり、各供試体の内部は乾燥している状態を保持している状態と考えられる。

表-2 試験当日 (H29.11.7の気象データ)

時刻	天気	日射量 (MJ)	気温 (℃)	降水量 (mm)	時刻	天気	日射量 (MJ)	気温 (℃)	降水量 (mm)
0	晴れ	0	5.8	0	12	晴れ	2.15	16.6	0
1	晴れ	0	5.6	0	13	晴れ	2.01	17.6	0
2	晴れ	0	5.0	0	14	晴れ	1.66	18.6	0
3	晴れ	0	4.8	0	15	晴れ	1.14	19.3	0
4	晴れ	0	4.5	0	16	晴れ	0.53	18.9	0
5	晴れ	0	3.9	0	17	晴れ	0.07	13.8	0
6	晴れ	0	3.8	0	18	晴れ	0	12.0	0
7	晴れ	0.14	5.4	0	19	晴れ	0	11.3	0
8	晴れ	0.7	7.6	0	20	晴れ	0	11.6	0
9	晴れ	1.31	10.8	0	21	晴れ	0	10.9	0
10	晴れ	1.8	13.6	0	22	晴れ	0	10.2	0
11	晴れ	2.1	15.5	0	23	晴れ	0	9.7	0

図-8 に用いたサーモグラフィで得られた温度画像のデータの例を示す。この温度データの評価にあたり、供試体端部は供試体と熱伝導率が異なる木製型枠が接触している影響を受けていることに留意が必要であることが分かる。その影響を避けるため、ひび割れに沿って幅20cm×60cm程度内の表面温度の平均値を基準値として、サーモグラフィの温度分解能である0.1℃刻みでグラデーション化した処理の例を図-9に示す。

各供試体の表面温度について、端部から10cmの範囲を除いた部分(供試体中央部)の平均温度の最高値および経時変化を図-10、表-3に示す。健全な供試体であるNo.1供試体が最も低く、表層のひび割れ模擬、および表層のひび割れと表層・中間層間の層間剥離にとどまるNo.2、3供試体が次いで低い。その次に低いのはNo.8供試体となるが、No.8供試体はクラックがアスコン層を貫通しているのみで、熱伝導の遮断が生じる層間剥離・内部剥離が存在していない影響が出ていると考えられる。それ以外の面的に損傷がひろがっている供試体(No.4～7)との供試体中央部の最高温度の差は1.5～2℃近くにも及び、表面の最高温度の差に着目することにより、面的に広がっている損傷を検知する可能性があることがわかる。

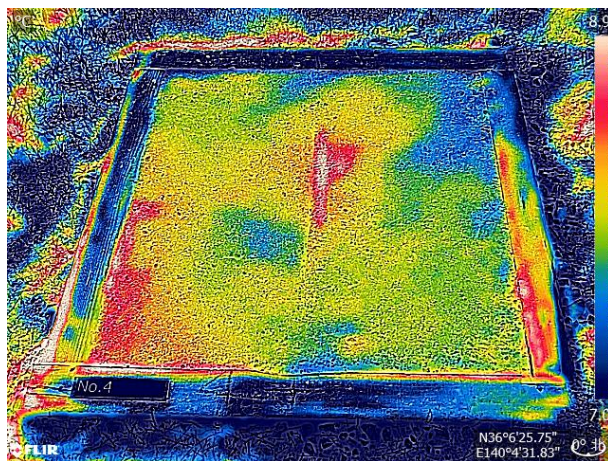


図-8 サーモグラフィによる撮影結果の例

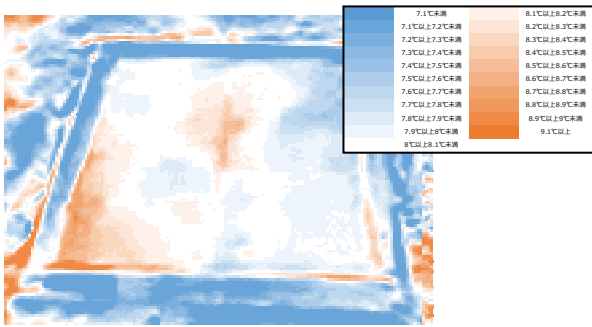


図-9 温度分布の処理例

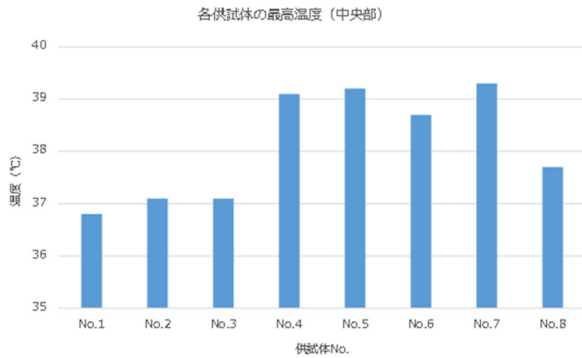


図-10 供試体中央部の平均温度の最高値

表-3 供試体中央部の平均温度の最高値と推移

時刻	表面温度 (°C)							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
7	7.2	8.0	7.7	8.2	7.9	7.4	8.1	7.4
8	10.9	12.0	11.1	14.5	14.6	14.2	14.4	13.7
9	18.3	20.5	19.8	20.6	20.7	20.5	20.9	20.3
10	29.9	30.6	30.2	31.1	30.9	30.9	31.5	30.1
11	33.4	33.6	33.1	34.0	33.8	33.4	34.5	35.2
12	35.9	36.9	37.1	37.7	39.2	38.3	39.3	37.7
13	36.8	37.1	37.0	39.1	38.7	38.7	39.0	37.2
14	34.6	34.0	34.5	34.5	34.1	33.9	34.2	36.4
15	29.6	29.5	29.8	32.7	31.4	31.4	31.9	31.0
16	25.1	24.7	25.2	25.4	24.2	25.1	25.5	25.2
17	19.7	19.2	19.4	19.4	18.4	18.5	20.0	19.8
18	18.4	17.8	18.3	18.2	17.6	17.6	18.0	18.4

次に、各供試体における供試体中央部の最高温度と 11 時および 14 時時点の平均温度の差を図-11 に示す。この経時変化の傾向も前述と同様、内部損傷が面的に広がっている供試体については、熱伝導が遮断されて表面側に熱がたまりやすい傾向が最高温度を示す前後 2 時間程度で顕著に出ることが分かる。特に、ピークアウト後の表面温度の低下時点で顕著であり、面的に損傷の有無の違いにより、温度差は 2°C~3°C 前後にも及ぶ。

これらのことより、アスファルト層の内部損傷がある箇所においては、健全部との路面温度の違いが、表面温度の最高温度、最高温度からの低下過程で顕著に表れることがわかった。

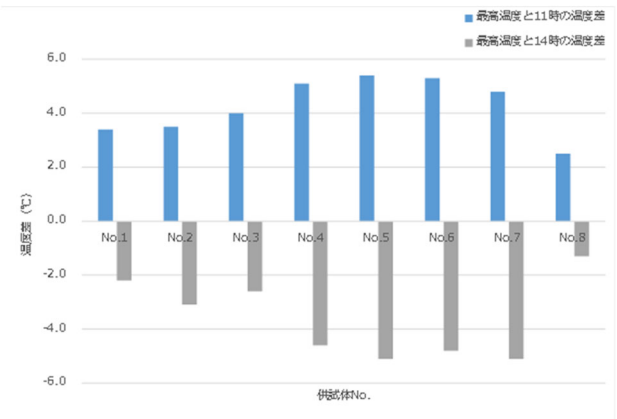


図-11 試体最高温度と11時および14時時点の平均温度差

#### 4. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

##### 4.1 背景

重交通道路と軽交通道路では、舗装の損傷形態に応じて点検診断時の着目点や維持管理手法が異なる可能性があるため、本研究では重交通道路と軽交通道路の損傷状況の特徴を把握する調査を行った。

##### 4.2 調査方法

北海道内の国道約 6,500km を対象にアスファルト舗装の損傷実態を把握した。具体的には、現道の目視調査を行って、舗装管理支援システムに記録されているデータの区間毎(約 100m 単位)のひび割れ種類を判別し、どのような種類のひび割れがどのような条件の路線に多いかを調べた。判別したひび割れの種類は以下の 4 種類である。通過車両の繰返し載荷によって発生し舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ(以下、ボトムアップひび割れ)、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ(以下、トップダウンひび割れ)、路床内の水分が凍結して形成されるアイスレンズが成長することで生じる凍上ひび割れ、気温の上昇・下降によるアスファルト混合物の温度応力によって生じる低温ひび割れである。一つの区間に複数種類のひび割れが発生している場合には、複数種類のひび割れが発生している区間として扱った。目視調査のデータを基に、ボトムアップひび割れ、トップダウンひび割れおよび凍上ひび割れに関しては、ひび割れ率が 5.0%以上の区間数を 10km 毎にカウントして地図上に表示した。低温ひび割れに関しては、1km 当たりの低温ひび割れ発生本数をカウントして地図上に表示した。さらに、各々のひび割れが N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>、N<sub>6</sub>、N<sub>7</sub> 交通断面のうちどのような区間に多いのかを整理した。ちなみに本研究では、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通を軽交通道路区間として扱っているので留意されたい。

なお、調査は自動車専用道路を除く下り車線を対象とし、構造物区間やコンクリート舗装区間など表-4 に該当するデータの区間長を除外した上で集計した。これらのデータを除外した理由は、一般的なアスファルト舗装区間に比べて舗装構成や基盤条件が特殊であり、除外するのが妥当と考えたためである。

表-4 除外区間一覧 (単位 : m)

項目	延長(m)
舗装延長	6,584,198
除外区間	
① 構造物	177,348
② 最新ひび割れ率が空欄	109,396
③ 最新調査後に工事	1,331,079
④ 上り・及び自専道	152,190
⑤ 最新調査時からルート変更・通行止め	16,702
⑥ Co舗装区間	135,109
⑦ 累積大型車交通量が空欄、舗装厚不明	127,112
舗装延長一除外区間	4,535,262

### 4.3 調査結果

図-12 にボトムアップひび割れの発生分布図を、図-13 にトップダウンひび割れの発生分布図を、図-14 に凍上ひび割れの発生分布図を、図-15 に低温ひび割れの発生分布図を示す。図-12 より、ボトムアップひび割れは、道内の広い範囲に発生しており、主に郊外部において多く発生していることがわかる。図-13 より、トップダウンひび割れは札幌近郊と札幌函館間や札幌旭川間などの幹線道路での発生が多い。図-14 と図-15 より、凍上ひび割れと低温ひび割れは道北地域や道東地域の内陸部に多く発生していることが分かる。表-5 には各ひび割れの発生延長および調査集計区間の延長に対する発生比率を示す。赤字で囲んだ部分に着目すると、ボトムアップひび割れ、凍上ひび割れ、低温ひび割れはN<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの舗装厚の薄い軽交通路線に多く発生していることが分かる。一方、

トップダウンひび割れはN<sub>6</sub>、N<sub>7</sub>交通断面などの混合物層厚が厚い重交通路線に発生している傾向が見られる。

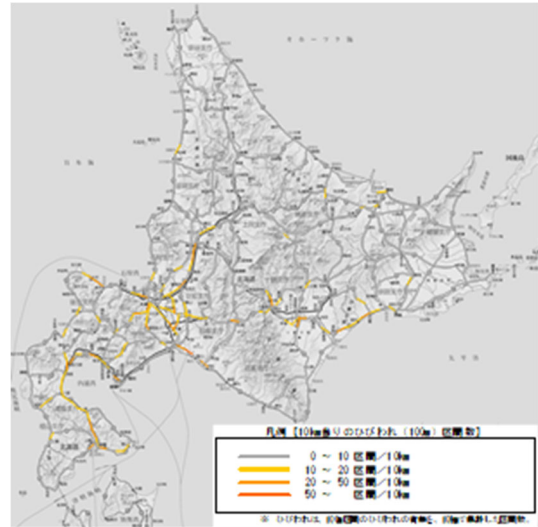


図-13 トップダウンひび割れの発生分布図

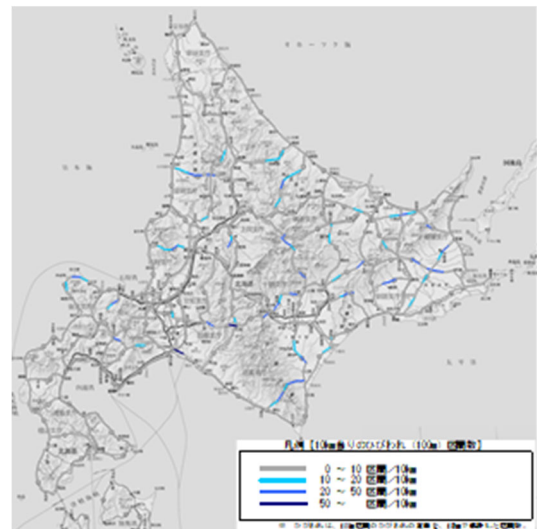


図-14 凍上ひび割れの発生分布図

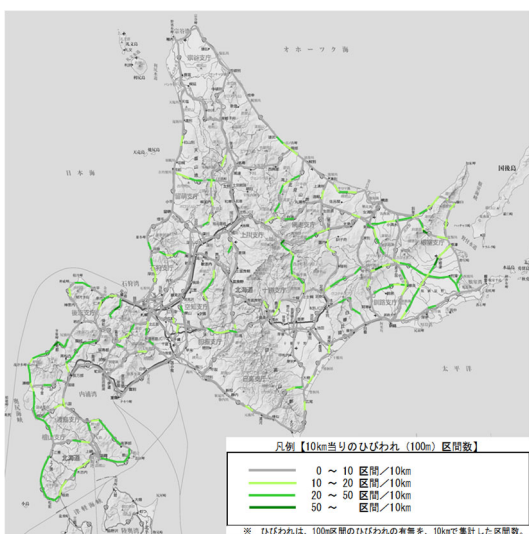


図-12 ボトムアップひび割れの発生分布図

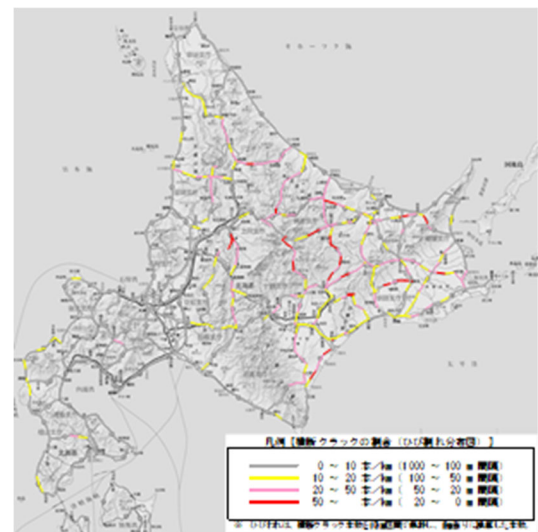


図-15 低温ひび割れの発生分布図

表-5 各ひび割れの発生延長および調査集計区間の延長に対する比率

交通量区分 ひび割れ種別	As混合物層厚 (cm)	14cm未満	14cm以上 20cm未満	20cm以上 30cm未満	30cm以上	合計
	旧	A	B	C	D	
	現	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	
ボトムアップ ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	4,535,262
	ひび割れ発生区間の延長(m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
トップダウン ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	ひび割れ発生区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
凍上ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	ひび割れ発生区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
低温ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	ひび割れ発生区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
ボトムアップ ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	4,535,262
	ひび割れ発生区間の延長(m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
トップダウン ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	ひび割れ発生区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
凍上ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	ひび割れ発生区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
低温ひび割れ	調査集計区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	ひび割れ発生区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478

軽交通路線は混合物層厚が薄いため、作用する力に対する抵抗性が小さく、様々なひび割れが発生し易いと推察される。軽交通区間では、特にボトムアップひび割れの発生区間延長が最も長く、次いで低温ひび割れ、凍上ひび割れの順であることが着目される。つまり、軽交通区間ではボトムアップひび割れに対する対処が最も多くなると理解できる。

以上のように、交通断面によってひび割れ損傷の形態は異なっている。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの混合物層厚の薄い軽交通路線区間に着目すると、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの軽交通路線区間の舗装マネジメントならびに舗装維持修繕計画を考える場合には、これらの損傷形態への対処方法を検討することが大切である。特に、ボトムアップひび割れは広い範囲で発生している実態にあり、今後舗装の老朽化が進行するにつれて増加する性質のひび割れであると考えられるため、要点であるといえる。

## 5. 目的や道路管理体制に応じた低廉な路面性状調査技術の開発

### 5.1 背景

軽交通舗装は供用延長が膨大であるため、その路面性状を把握するための手法は、経済的に安価で手間のかからない手法であることが望まれる。そこで、平坦性指標を活用した低廉な点検調査手法について検討を進めた。

## 5.2 調査方法

車両バネ上およびバネ下に設置した加速度計の加速度値から、リアルタイムで国際ラフネス指数(International Roughness Index、以下、IRI)を計測する装置(写真-5)を用い、地方自治体が管理する軽交通道路においてIRI計測を実施した。この計測装置は、2個の加速度計とGPSセンサ、アンプおよびデータ処理ソフトを内蔵したモバイルパソコンから構成され、任意の車両に取り付けることができ、走行しながらの計測が可能であることから、計測が非常に容易で短時間で広い範囲を計測できるため、経済的な負担も少ないことが特徴である。計測対象とした路線は、図-16に示す12の路線区間および図-17に示す24の路線区間である。図-16の計測路線区間は、道路管理者が修繕を実施する予定の区間と、健全と判断した路線区間があり、IRI計測を行い、両者のIRI値にどのような差異が見られるかを解析した。図-17の計測路線区間は、自治体管理の幹線および生活道路であり、面的なIRIの把握とあわせIRIと舗装損傷の関係について検討した。

また、大型自動車に積載された機器から自動的に蓄積される上下加速度のビックデータを用いて路面平坦性を推定する方法について、図-18に示す手順で検討を行った。この手法は、運行中の大型車両群から自動的に蓄積される加速度データを統計処理することによって任意の場所での路面平坦性を把握しようというものである。現場での計測作業を行う必要がなく、道路管理者の費用負担軽減や省力化が期待できる。



写真-5 IRI計測装置搭載車両



図-16 IRI計測路線区間(1)

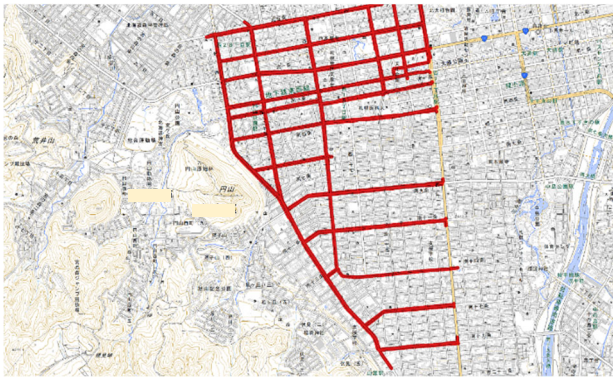


図-17 IRI 計測路線区間(2)



図-19 IRI 計測マップ表示の一例(1)

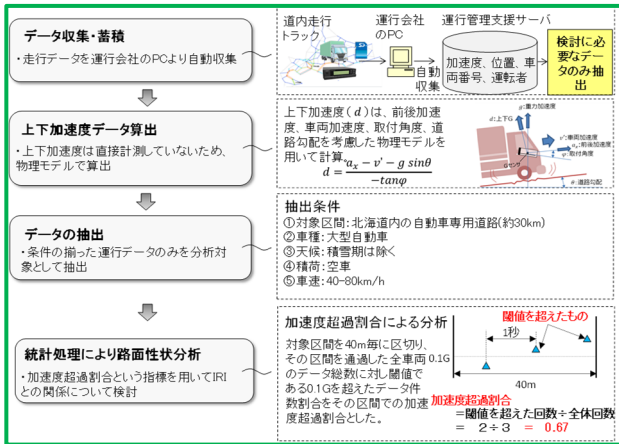


図-18 加速度ビックデータによる平坦性推定方法

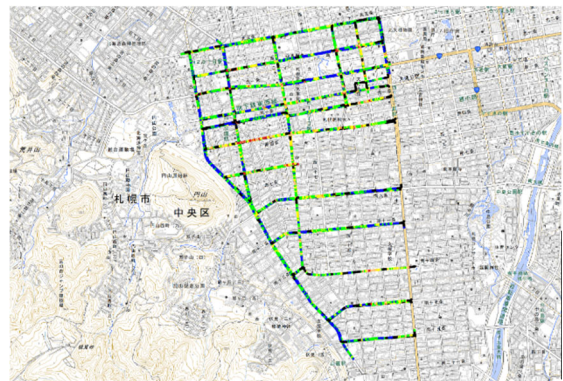


図-20 IRI 計測マップ表示の一例(2)

### 5.3 調査結果

IRI を計測した結果は、図-19 および図-20 に示すようにマップに表示することが可能であり、どの位置のIRIが悪いのかを視覚的に判別できる。また、図-16 に示した健全区間と修繕区間におけるIRIが4以上の割合を図-21に示す。維持修繕が必要と判断された路線区間は、IRI4以上のデータ割合が高い傾向にあることが確認された。

図-17 に示した区間における実際に舗装が損傷している箇所数とIRIの関係を図-22に示す。IRI値の高い箇所は何らかの損傷が生じている箇所である傾向にあることが確認された。

路面平坦性を加速度ビックデータから推定する手法についての整理結果を図-23 および図-24 に示す。図-23からは、閾値である0.1Gを超過する加速度データの割合(以下、加速度超過割合)と、IRI値との間に相関関係が確認できた。また、図-24からは、IRI値が高いところでは加速度の超過割合も高くなっており、加速度の超過割合が高い箇所の延長方向の位置を把握することで、IRI値が高い箇所の把握ができることが分かる。加速度ビックデータを本手法の手順で統計処理することで、任意の場所や時間における路面平坦性を把握できることが確認された。

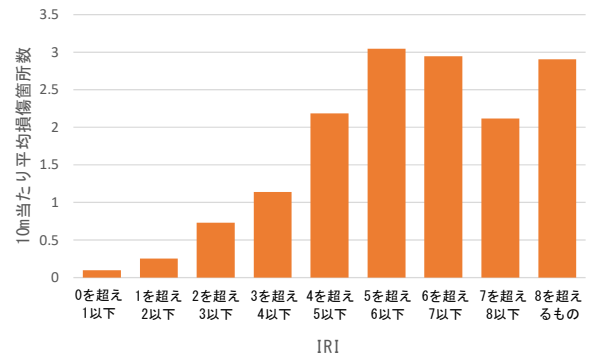


図-21 修繕判断とIRIの対応関係

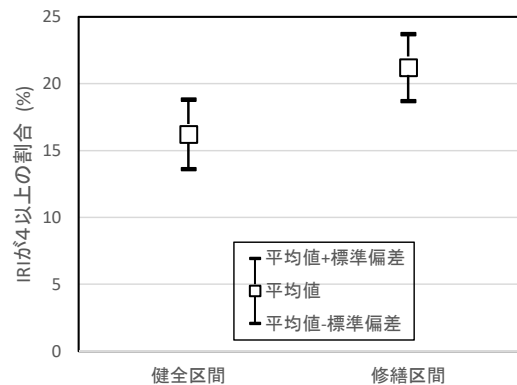


図-22 舗装損傷箇所数とIRIの関係



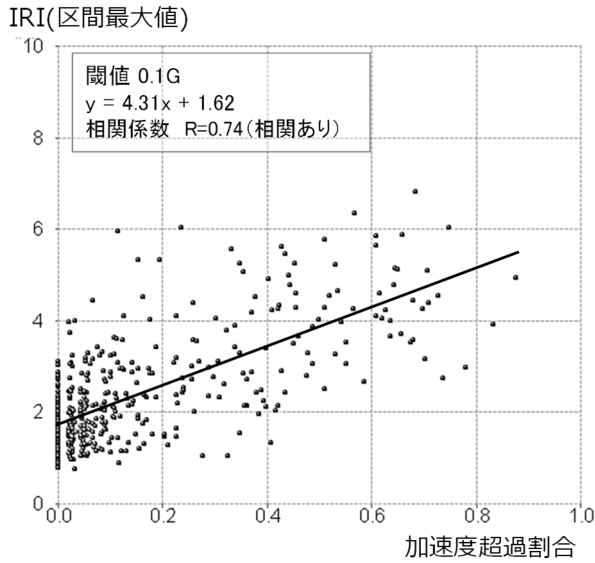


図-23 IRI 値と加速度超過割合の関係

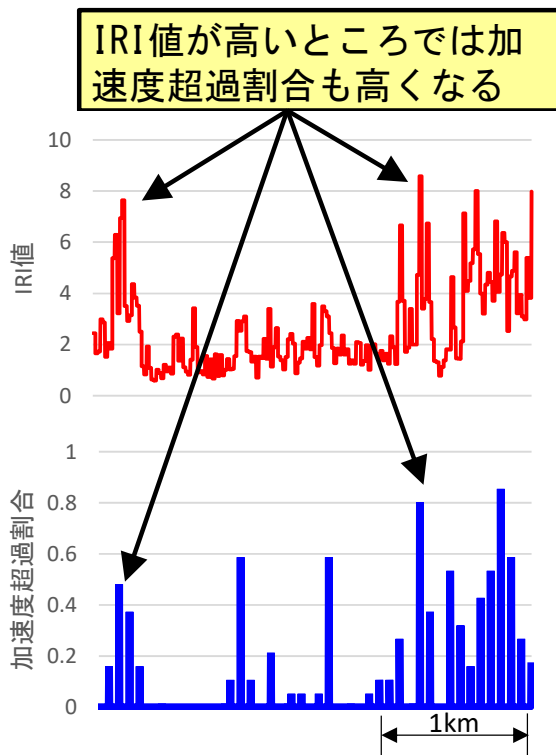


図-24 IRI 値と加速度超過割合の位置関係

## 6. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

### 6.1 背景

前述のとおり IRI 値による維持修繕が必要な区間の把握の可能性に加え、ボトムアップひび割れが発生している箇所における舗装体の健全性の把握および修繕工法の選定を効率的かつ適正に実施する必要がある。

このため、疲労ひび割れの発生している北海道内の一般国道で修繕工事を予定した箇所において、舗装体の健全性の確認および損傷に応じた修繕工法を選定することを目的とした現地調査を実施した。

### 6.2 調査方法

調査箇所は、国土交通省北海道開発局（以下、開発局）管内の一般国道（片側1車線）で、過去の資料による修繕工事前の舗装構成は、表層（細粒度ギャップアスコン）3cm、基層（粗粒度アスコン）4cm、上層路盤（アスファルト安定処理）5cm、下層路盤（切込砂利40mm級）35cm、凍上抑制層（砂）35cmで、交通量区分N<sub>4</sub>の舗装構成<sup>8)</sup>の路線である。調査内容は表-6のとおり、現地での計測調査、路盤材料の室内試験を実施した。

調査箇所の路面の状態は写真-6に示すとおり、OWPに網目状のひび割れが著しく、IWP（Inner Wheel Path：内側車輪通過位置）では網目状へ進行が予想されるひび割れが発生、BWP（Between Wheel Path：外側車輪通過位置と内側車輪通過位置の間）ではひび割れは殆ど発生していない状態であった。

表-6 調査内容

項目	機器等	測定範囲	測定位置
開削調査	—	L=2m×W=3.25m	
たわみ量測定	FWD	L=120m	OWP、BWP、IWP
簡易支持力測定	キャスポル	3点（1側線）	OWP、BWP、IWP
平板載荷試験	—	1点（1側線）	BWP
現場密度試験	—	3点（1側線）	OWP、BWP、IWP
ふるい分け試験	室内試験	1側線	
修正CBR試験	室内試験	1側線	



写真-6 調査時の路面状態

開削調査および原位置試験の実施、ならびに室内試験用の試料を採取する地点は、現地の目視確認によって OWP のひび割れ発生が特に顕著な箇所とした。

### 6.3 調査結果

#### (1) 開削調査

アスファルト混合物層（以下、アスコン層）の厚さは平均厚 3cm のオーバーレイを含む層厚 15cm であった。

アスコン層を L=2.0m×W=3.25m の範囲で撤去し、ひび割れ等の損傷状況を確認した。その結果、OWP ではアスコン層底面からひび割れが舗装表面まで貫通している箇所、アスコン層中間までひび割れが進行している箇所のほか、表層と基層の層間剥離が発生している箇所が確認された（写真-7）。また、開削調査箇所を含む L=40m 区間のひび割れ率は 46%で、舗装点検要領に示されるひび割れ率による診断区分はⅢ（修繕段階）に相当する。



写真-7 ボトムアップ疲労ひび割れ、層間剥離  
および下層路盤上面の状況 (OWP)

#### (2) 原位置試験

下層路盤層以下の性状を確認するために実施したキャスポルによる簡易支持力測定、平板載荷試験および現場密度試験の結果を表-7 に示す。

なお、キャスポルによる簡易支持力測定では、測定から得られた衝撃加速度 (Ia) から CBR および地盤反力係数 (K30) を式 1、式 2 により算出した<sup>9),10)</sup>。

$$CBR = -4.945 + 1.615 \times Ia \quad \dots \dots \dots \text{(式 1)}$$

$$K30 = -37.58 + 8.554 \times Ia \quad \dots \dots \dots \text{(式 2)}$$

表-7 原位置試験結果

位置	キャスポルによる 簡易支持力測定		平板載荷試験	現場密度 試験
	CBR (%)	地盤反力係数 K30 相当 (MPa/m)	地盤反力係数 K30 (MPa/m)	締め固め度 (%)
OWP	56	285	—	97
BWP	59	299	295	93
IWP	55	281	—	94

平板載荷試験による BWP の地盤反力係数は 295(MPa/m)で、キャスポルの測定値から算出した地盤反力係数は 299 (MPa/m) ほぼ同値であることから、キャスポルの測定値から算出した地盤反力係数は適正な値と考えられる。

キャスポルの測定値から算出した地盤反力係数は、OWP、BWP および IWP において 281~299 (MPa/m) で、同測定値から算出した CBR は 55~59 (%) と十分な耐荷力を有していた。

現場密度試験による締め固め度は、OWP、BWP および IWP において開発局の規格値である 93(%)以上であった。これらの結果から下層路盤層以下は健全であると考えられた。

#### (3) 室内試験

ふるい分け試験の結果（表-8）では、開発局が規定する下層路盤材料の粒度範囲内<sup>11)</sup>であることを確認した。また、修正 CBR は 79(%)で品質規格<sup>11)</sup>を満たしていることを確認した。

表-8 ふるい分け試験結果

ふるい目 (mm)	通過重量 百分率 (%)	規格値 (%)
53.0	100.0	100
37.5	94.3	70~100
31.5	92.4	—
26.5	89.1	—
19.0	80.9	—
13.2	70.4	45~80
9.5	61.9	—
4.75	47.2	—
2.36	35.7	20~45
1.18	27.8	—
0.600	20.1	10~30
0.300	12.3	—
0.150	8.1	—
0.075	5.9	—

#### (4) FWD によるたわみ量

供用時の FWD による D0 たわみ量と舗装計画交通量別のたわみ量の境界値<sup>12)</sup> (表-9) を比較することで路床を含む舗装全体の支持力を評価することができる。本調査区間の OWP の FWD による D0 たわみ量を図-25 に示す。

FWD による D0 たわみ量は、最も大きい地点で約 0.8 (mm) で、交通量区分 N4 の D0 許容たわみ量である 0.9 (mm) 以下を満足するため、舗装全体の支持力は確保されていると判断されることから、舗装点検要領に示される修繕対象とは判定されない結果となる。

しかし、前述の開削調査等の結果では、路面のひび割れ率が 46 (%) で、上層路盤を含むアスファルト混合物層 (以下、アスコン層) を貫通するボトムアップひび割れが多数確認されていること、および下層路盤層以下は十分な支持力を有しており材料性状にも問題が無いことから、本調査箇所において適用すべき修繕工法は上層路盤を含むアスコン層の打ち替えて、舗装点検要領に示される診断区分はⅢ-2 (路盤打換等) となり、FWD の D0 許容たわみ量による舗装体の診断結果と不整合が生じる結果となった。

このことから積雪寒冷地の軽交通道路においては、FWD たわみ量が小さく計測される可能性があり、FWD の D0 許容たわみ量から舗装の健全度を判定する際には留意が必要であることを確認した。なお、FWD たわみ量が小さく計測される可能性として、北海道では上層路盤にアスファルト安定処理を、凍上抑制層に粒状材を使用していることが考えられる。

表-9 供用時における D0 の許容たわみ量

交通量区分	舗装計画交通量 (台/日・方向)	D <sub>0</sub> 許容たわみ量 (mm)
N <sub>4</sub>	100以上 250未満	0.9mm以下
N <sub>5</sub>	250以上 1,000未満	0.6mm以下
N <sub>6</sub>	1,000以上 3,000未満	0.4mm以下
N <sub>7</sub>	3,000以上	0.3mm以下

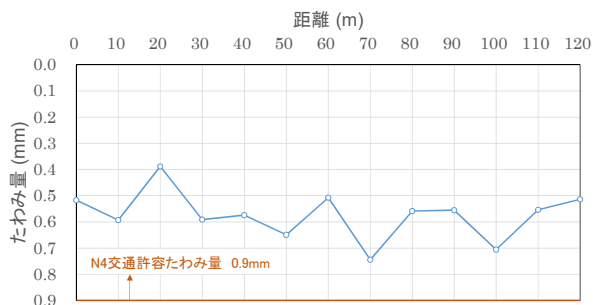


図-25 FWD による D0 たわみ量 (OWP)

## 7. 軽交通道路における赤外線カメラによる構造的な健全性評価方法の検討

### 7.1 背景と目的

軽交通道路と重交通道路では、舗装の損傷形態や損傷進行過程が異なる側面があり、点検診断時の着目点や適切な維持管理手法もそれに伴って異なる可能性がある。本研究では軽交通道路の損傷形態として近年課題となっているポットホールを対象に、ポットホールの発生を予測評価し、舗装体の構造的な健全性を評価する方法について、現道調査を実施して検討した。調査の目的は以下の2点である。

- 1) 秋期迄に計測した赤外線温度異常箇所の情報が、融雪期のポットホール発生予測として有用か検証する。
- 2) 赤外線温度異常区間の FWD D0 たわみ量を把握し、FWD により得られる情報 (D0 たわみ量など) と、融雪期のポットホール発生量の関係を把握する。

### 7.2 調査方法

亀甲状のひび割れなどの疲労損傷が発生し構造的に健全でない区間と、疲労損傷が見られない健全な区間を含む軽交通道路 (N<sub>5</sub>交通) の 1km 区間 (片側 1 車線で上り 1km、下り 1km) において、同一年度内に路面を赤外線カメラと可視光カメラによって適宜計測調査し、FWD 調査による支持力調査も併せて実施すると共に、現地目視調査によって融雪期のポットホール発生個数も調査し、それらの値を対応させて検討を行うこととした。各調査の具体的な方法を以下に述べる。

赤外線調査は、7月に赤外線画像を延長 5m 毎に撮影し、得られた赤外線画像に対して、図-26 に示すように路面の温度異常程度を良好：○、軽度：△、中度：□、重度：×で目視判別した。

可視光カメラによる画像撮影および現地目視調査は 10 月下旬と翌年の 3 月下旬に実施し、10 月下旬から 3 月下旬の間にポットホールが発生し補修されたと思われる部位を特定し、5m 区間ごとのポットホール発生個数として集計した。

FWD 調査は 11 月下旬に実施した。前述した赤外線画像判定と現地目視の結果から、下記の 4 種類の FWD 調査区間各約 100m を設定し、各区間の外側タイヤ通過位置 (Outer Wheel Path、以下、OWP 部と呼ぶ)、タイヤ通過中間位置 (Between Wheel Path、以下、BWP 部と呼ぶ) の各 5 点で FWD 計測を行った。FWD 調査後の一冬経過後までに各区間で発生したポットホール個数を目視調査で計測し、FWD D0 たわみ量との対応関係を検討した。

- ①パッチングなし軽度区間
- ②パッチングなし重度区間

③パッチングあり軽度区間

④パッチングあり重度区間

なお、4種類のFWD調査区間の名称において、パッチングありなしはFWD調査時に薄層パッチングがされていた区間か否かを表し、軽度、重度は赤外線画像判定での温度異常の程度を意味する。

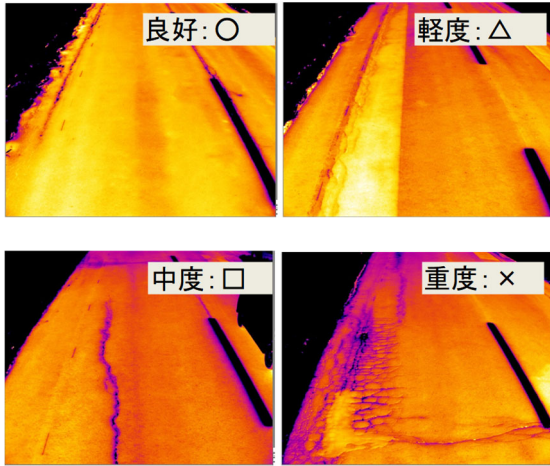


図-26 赤外線画像での重軽度判定の例

### 7.3 調査結果

#### (1) 赤外線画像での判定とポットホール発生状況の関係

赤外線画像での温度異常程度判定区分と5m区間内のポットホール発生確率の関係(左縦軸)および、5m区間内のポットホール発生個数の関係(右縦軸)を図-27に示す。

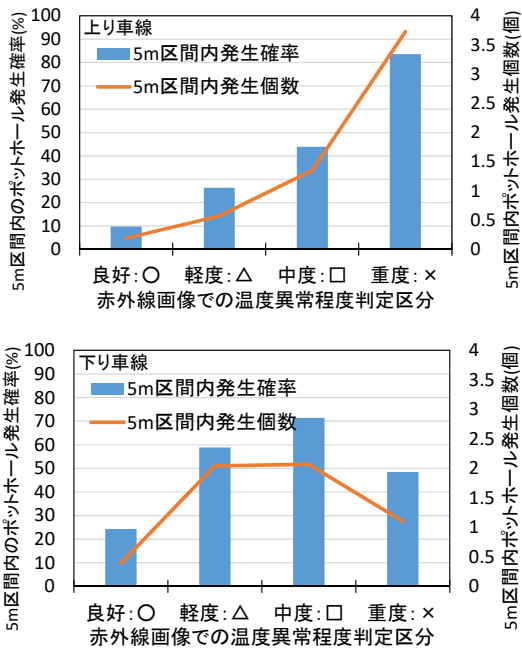


図-27 赤外線判定とポットホール発生確率の関係  
(上図: 上り車線、下図: 下り車線)

図-27 上図に示した上り車線の結果を見ると、赤外線画像での判定が悪いほど、ポットホールの発生確率が高くなり発生個数も多くなっている傾向が見られる。図-27 下図に示した下り車線の結果を見ると、上り車線に比べると重度判定区間の発生確率や発生個数が少ないものの、赤外線画像での判定が悪いとポットホールの発生確率が高くなり、発生個数が多くなる傾向は認められる。

以上のことから、赤外線画像での重軽度判定とポットホールの発生確率や発生個数の間には相関関係があり、赤外線カメラ画像でのポットホール発生予測評価の有効性が一定程度認められる。

#### (2) FWD たわみ量とポットホール発生状況の関係

OWP部でのD0たわみ量とポットホール発生個数の関係を図-28に示す。OWP部でのD0たわみ量が大きいと、ポットホール発生個数が多くなる傾向が見られる。特に、D0たわみ量が500~600 $\mu$ m以上の区間はポットホール発生個数や発生確率が高くなる傾向が認められる。

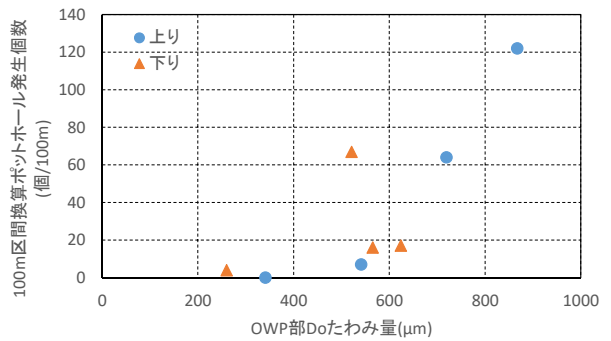


図-28 D0たわみ量とポットホール発生個数の関係

#### (3) 赤外線画像による重軽度判断とFWDたわみ量やポットホール発生状況の関係

OWP部でのD0たわみ量とポットホール発生個数の関係を示した図に、赤外線画像による重軽度判定とパッチの有無の情報も併せて示した図を図-29に示す。赤外線画像で重度: ×と判定された区間はD0たわみ量が大きく500 $\mu$ m以上であり、100m区間換算のポットホールの発生個数も多い傾向にある。一方、赤外線画像で良好: ○と判定された区間はD0たわみ量が比較的小さく、ポットホールの発生個数も少ない傾向にある。

パッチありの区間は、D0たわみ量が500 $\mu$ m以上と大きい傾向にあることもわかり、現場におけるパッチング施工の判断が妥当であることを示唆している。

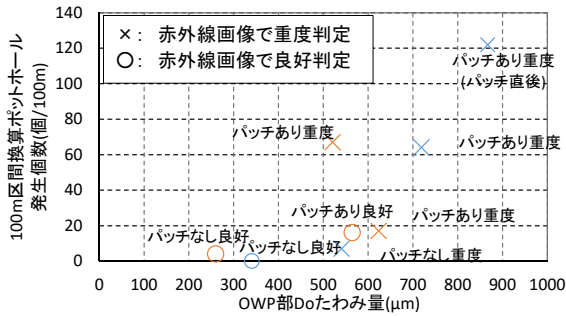


図-29 赤外線、FWD、ポットホール個数の関係

(4) FWD による補修工法判定

「FWD による舗装診断(舗装診断研究会編)<sup>12)</sup>」P42 に示されている、FWD の D0 たわみ量、D1500 値による路床 CBR、D0-D200 値による不足 T<sub>A</sub> と A<sub>s</sub> 混合物層の強度によって補修工法を選定する手法に則って、当該区間の補修工法判定を行った結果を表-10 に示す。

“①パッチなし軽度区間”は、構造的な補修が不要と判定されており、妥当な判定と言える。“②パッチなし重度区間”と“③パッチあり軽度区間”はオーバーレイと評価されており、ある程度妥当な判定と考えられる。“④パッチあり重度区間”は切削カバーと A<sub>s</sub> 混合物層打換と評価されており、ある程度妥当な判定と言える。

オーバーレイ、切削カバー、A<sub>s</sub> 混合物層打換と判断されている②③④区間は、赤外線判定で重度:×と判定されている区間でもあり、切削カバーやオーバーレイまたは A<sub>s</sub> 混合物層打換の評価は概ね妥当な判定と言える。

以上のように、FWDによる舗装の構造的な健全性判定結果と、赤外線による温度異常程度の判定結果に整合が見られ、赤外線カメラが構造的な健全性の評価にも有用であることが確認された。

表-10 FWDIによる判定と赤外線による判定の対応比較表

車線区分	区間の種類	FWDIによる判定および補修工法選定					赤外線の判定 (温度異常が 重度は×)	
		D0 (μm)	D0判定 (400以上 は×)	路床支持力 判定(CBR3 未満は×)	不足T <sub>A</sub> 判定 (不足は+)	A <sub>s</sub> 層強度判 定(6000MPa 以下は×)		補修工法選定
下り	①パッチなし軽度区間	280	○	○	-10.8	○	構造的な補修は不要	○
上り	①パッチなし軽度区間	341	○	○	-9	○	構造的な補修は不要	○
上り	②パッチなし重度区間	541	×	○	4.9	×	レベルIV-オーバーレイ	×
下り	②パッチなし重度区間	624	×	○	3.5	×	レベルIV-オーバーレイ	×
下り	③パッチあり軽度区間	565	×	○	2.3	×	レベルV-オーバーレイ	○
下り	④パッチあり重度区間	521	×	○	-0.3	○	レベルV-切削カバー	×
上り	②パッチなし重度区間	719	×	○	6.4	×	レベルIII-A <sub>s</sub> 混合物層打換	×
上り	④パッチあり重度区間	867	×	○	10	×	レベルIII-A <sub>s</sub> 混合物層打換	×

8. 路面評価指標としての燃費の導入に関する検討

8.1 背景

凹凸や段差や荒れなどがある状態が悪い路面は、平坦で良好な路面に比べて走行車両の走行抵抗や燃費を悪化させると考えられる。そこから類推すれば、状態の悪い路面を良好な路面に補修した場合、走行抵抗や燃費は改善する

傾向を示すと考えられ、舗装補修に伴う燃費等の改善効果が定量的に把握できれば有用である。また、砂利道をアスファルト舗装やコンクリート舗装などの高級舗装とする事に伴う走行抵抗や燃費の改善効果が算定できれば、これも舗装工事の効果を定量化する上で有用と考えられる。しかし現在は、舗装工事や舗装補修等によって路面状態を改善することによる走行抵抗や燃費面での効果を定量的に算定する手法が確立していない。そこで本研究では、路面の改善による燃費の改善効果を定量化する手法を検討し、路面の改善に伴う燃費の改善効果の定量把握を試みた。将来的には、燃費を路面評価指標の一つとして導入することを目的としている。

8.2 調査方法

(1) 燃費の計測方法の検討方法

燃費を計測するに際しては、燃料流量計によって直接的に計測する方法が最も信頼できる方法であり、本研究においても燃費計測の基本手法として位置づけられる。しかし、燃料流量計を車両の燃料配管上に設置し計測する手法は、当研究所の試験周回路など構内における燃費計測の場合には問題なく採用可能であるが、設置に手間がかかることや、公道において燃料流量計設置車両で計測を行うことは安全管理上好ましくないと考えられた。公道における燃費計測作業は今後必要である事から、公道上で実施可能な燃費計測方法として、OBD (On Board Diagnostics, 車載故障診断装置) に接続する機器にて簡易に燃費を計測する方法に関して、その妥当性を検証することにした。

燃料流量計によって直接的に計測する方法は、当所の所有する計測用車両 (タウンエース、トランスミッション:MT) の燃料タンクとエンジンを繋ぐ経路のパイプに燃料流量計を図-30 に示すように設置して、実際の燃料使用量をリアルタイムで計測し、燃料使用量と走行距離から燃費を算定した。ちなみに、燃料はエンジンに供給するための配管 (入り) と、エンジンで燃焼に用いられずに戻る配管 (戻り) があることから、両方に流量検出器を設置し、同時刻の入りと戻りの流量差を燃料の使用量として扱った。一方、OBD 接続機器にて簡易に燃費を計測する方法は、図-31 に示すような機器を OBD に接続し、機器内部で算定される燃費を取得する方法とした。当所の試験周回路である苫小牧寒地試験道路において、約 500m の直線区間をギア 4 速にて 20、30、40、50、60km/h で往復走行した際の燃料流量と OBD 接続器による燃費を同時に計測し、比較した。なお、OBD 接続機器は、所定の方法で燃費表示のキャリブレーションを予め行っている。



図-30 燃料流量計の設置状況



図-31 OBD 接続機器による計測状況

## (2) 路面の改善に伴う燃費改善効果の計測方法

非舗装の砂利道と舗装路面の燃費を計測、比較することで、舗装道路の優位性を検証した。砂利道と舗装道路における走行抵抗および燃費を計測した。

舗装路面における燃費計測試験は、当所の試験周回路である苫小牧寒地試験道路において、約 500m の As 舗装の直線区間をギア 4 速にて 20、30、40、50、60km/h で往復走行した際の燃料使用量を計測した。

砂利道における燃費計測試験は、苫小牧寒地試験道路へのアプローチ部の直線の砂利道において、約 200m の計測区間を設定し、ギア 4 速にて 20、30、40km/h で往復走行した際の燃料使用量を計測した。なお、計測速度が 40km/h 迄となっているのは、計測区間設定上の制約および路面の平坦性が悪くそれ以上の速度での走行試験が困難であったためである。

## 8.3 調査結果

### (1) 燃費の定量的計測方法に関する検討

燃料流量計と OBD 接続機器による燃費を比較した結果を図-32 に示す。燃料流量計による燃費と OBD 接続機器による燃費は概ね同程度の値となっている事が分かる。燃料流量計による正確な燃費計測方法に加え、OBD 接続機器による簡易で一定程度の精度を有する燃費計測手法の有効性が確認できたことから、今後の公道上での簡易燃費計測に適用可能と考えられる。

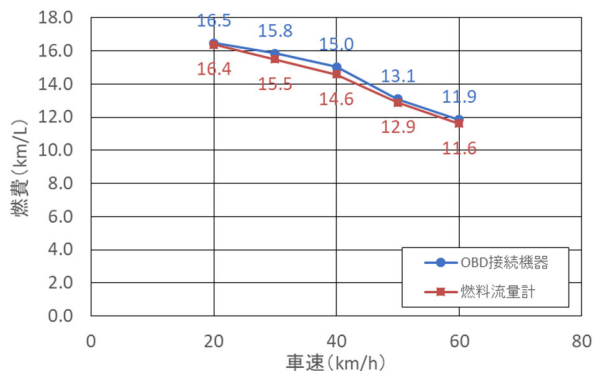


図-32 燃料流量計と OBD 接続機器による燃費値比較

### (2) 路面の改善に伴う燃費の改善効果の定量測定結果

砂利道と As 舗装路面の走行抵抗の比較を図-33 に、燃費の比較を図-34 に示す。図-33 より、As 舗装路面の走行抵抗は砂利道に比べて概ね 6 割程度に小さくなっていることが分かる。図-34 からは、As 舗装路面の燃費が砂利道の燃費より 1.6 倍程度改善していることが分かる。

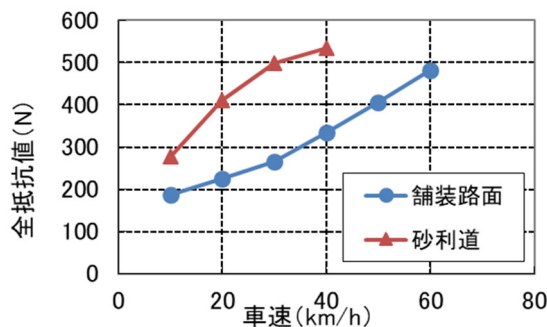


図-33 砂利道と As 舗装道路の走行抵抗の比較

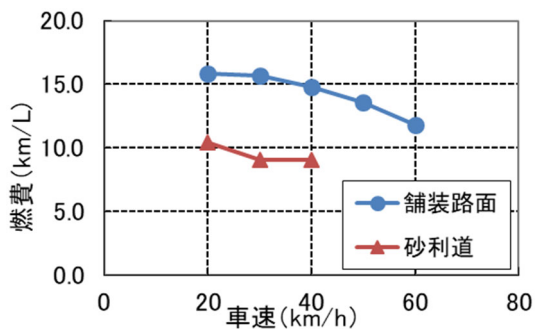


図-34 砂利道と As 舗装道路の燃費の比較

## 9. まとめ

平成 28 年度においては、重交通道路に該当する、関東地方整備局管内の直轄国道において、コア抜き調査結果をもとにした修繕工法を選定することが、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへと回復させることに寄与したこ

とを明らかにした。点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。

平成 29 年度においては、前年度で内部損傷の把握の重要性が明らかになったことより、アスコン層の内部損傷を模擬した様々な供試体を作成し、サーモグラフィを用いた評価試験を行った。その結果、アスファルト層の内部損傷が面的に広がっている箇所では、路面温度の日最高温度や日最高温度からの低下傾向が健全部と異なることを把握した。

平成 30 年度においては、軽交通舗装区間の路面性状を把握する手法として、自治体管理の幹線および生活道路の IRI 計測を行い、面的把握の有効性の確認、舗装の損傷と IRI の関係を把握した。

令和元年度においては、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。その結果、閾値を超過する加速度データの割合と IRI 値との間に相関関係があり、加速度ビッグデータから IRI 値が高い箇所の把握ができることを確認した。

令和 2 年度においては、ボトムアップひび割れが顕著な箇所における各種試験調査の結果から、舗装体の健全度および適用すべき修繕工法を検討した。その結果、積雪寒冷地の軽交通道路においては、上層路盤にアスファルト安定処理を、凍上抑制層に粒状材を使用していることから、FWD たわみ量が小さく計測される可能性があるため、FWD の D0 許容たわみ量から舗装の健全度を判定する際には留意が必要であることを確認した。

令和 3 年度においては、ポットホール発生を予測し、舗装体の構造的な健全性を評価する方法について、現道調査にて検討した。その結果、赤外線カメラ画像でのポットホール発生予測評価の有効性が確認され、赤外線カメラが構造的な健全性の評価にも有用であることを確認した。また、路面の改善による燃費の改善効果を定量化する手法を検討し、計測を実施した。その結果、OBD 接続機器による簡易な燃費計測手法の有効性が確認でき、As 舗装道路では砂利道に比べて燃費が 1.6 倍程度改善することを確認した。

また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割

れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理、軽交通舗装区間における簡易な路面性状把握手法がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。今後、引き続き舗装の損傷の実態調査を継続すると共に、非破壊調査による舗装の内部損傷の検出手法の検討等を行う予定である。

なお、重交通道路の損傷実態調査は、(公社)日本道路協会舗装委員会舗装設計施工小委員会の活動の一環で実施したものであり、また道路管理者および修繕工事施工業者の多大なるご協力の下実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 国土交通省道路局：平成 22 年度全国道路・街路交通情勢調査
- 3) (公社)日本道路協会：舗装性能評価法一必須および主要な性能指標編一、2013.4
- 4) 渡邊一弘、増戸洋幸、篠塚政則、上島壯：短い測定間隔による修繕前後の構造評価結果、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、No.3、pp.177-185、2016.12
- 5) 坪川将丈：空港舗装の設計・維持管理手法の高度化に関する研究、国土技術政策総合研究所研究報告、No.41、2010.3
- 6) 早野公敏、水上純一、鈴木哲雄：層間剥離を有するアスファルト混合物層の表面温度分布特性に関する実験的検討、地盤工学ジャーナル、Vol.2、No.1、pp.1-11、2007.3
- 7) 前川亮太、蘇凱・水上純一、坪川将丈：空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案、港湾空港技術研究所報告、Vol.48、No.4、pp.71-87、2009.12
- 8) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領第 1 集道路第 5 章舗装、2020.4
- 9) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所：測定器使用マニュアル作成委員会基準(案)「簡易支持力測定器による試験方法」(第 1 版)、1996.8
- 10) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所：簡易支持力測定器(キャスポル)利用手引き、2005.6
- 11) 国土交通省北海道開発局：道路・河川工事仕様書、2020.5
- 12) 特定非営利活動法人舗装診断研究会：FWD による舗装診断、2014.1

## 6.2 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価

### 6.2.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、藤木裕二、岩谷祐太

#### 【要旨】

近年、RC床版の土砂化という損傷が顕在化し、問題となっている。RC床版の土砂化は、床版上面に浸入した水が発生要因と考えられており、土砂化に対して予防保全を図るためには、床版上面に浸入した水を早期検知することが必要となる。本研究では、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを用いた床版上面の滞水検知手法の開発に取り組んでいる。令和3年度は、模型供試体を用いて令和2年度に構築した滞水推定アプリケーションの推定精度の検証を行った。また、他橋梁で整備した学習データを追加学習させることで、アプリケーションの推定精度向上を実現し、実橋においても従来の人間が判断する方法と同等の推定精度を有することを確認した。

キーワード：床版、土砂化、電磁波レーダ、床版上面水分量、AI、機械学習

#### 1. はじめに

道路橋定期点検要領では、橋長2.0m以上の道路橋において、5年に1回を基本とする近接目視点検が義務化されている。定期点検での既設床版の劣化・損傷状況の点検は、床版下面からの外観目視および舗装面のひび割れの点検によるもので実施されている<sup>1)</sup>。しかし、輪荷重による疲労、材料劣化等による土砂化の要因と定期点検における舗装のポットホールや床版下面のひび割れおよび漏水痕などの外観変状との相関が明確でなく、現状の目視点検では、床版の抜け落ちのリスクを見落とす可能性がある。

床版の設計基準では、建設省道路局長通達(S42)以降、最小床版厚および配力鉄筋量の見直しによる疲労損傷への対策が実施<sup>2)</sup>されているが、スパイクタイヤ規制(H5)以降、凍結防止剤の散布量が増加しており<sup>3)</sup>、塩分を含んだ水が床版へ浸入し、床版下面に変状が発生していなくても、床版上面が土砂化している事例が発生している。写真-1は、供用後10年経過後の舗装開削後の状況である。また、写真-2に5年前の定期点検時には損傷度判定が低く、対策不要と判定されていた箇所が、5年後に床版下面の抜け落ちが発生した事例を示す。このように床版の土砂化は、損傷の進行が速いことが特徴となっている。これらは、路面からの水が床版上面に浸入し、疲労を促進する<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>だけではなく、凍害、塩害等のコンクリートの劣化を誘発する<sup>6)</sup>ことが原因と推定される。床版上面の滞水は、舗装や床版の変状からその有無を推測することは可能だが、多くの場合には変状箇所の舗装を開削して初めて確認され、この時点で既に床版の性能が著しく低下していることがある。また、

変状箇所の舗装開削により局所的な滞水を確認することは可能であっても、滞水箇所を面的に把握することはできず、潜在的な劣化箇所を特定することは困難なのが現状である。

以上の課題に対し、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを用いた床版上面の滞水検知手法について研究を進めている<sup>7)</sup>が、膨大な量の道路橋を効率的に点検するためには、人工知能(以下、AI)等を活用し可能な限り省力化を図る必要がある。令和2年度までには、電磁波レーダ計測結果と床版上面水分量を学習データとしてAIに機械学習させ、床版上面の滞水を自動推定可能なアプリケーションを構築しており、令和3年度は、本アプリケーションの推定精度の検証及び別の学習データを追加学習させ

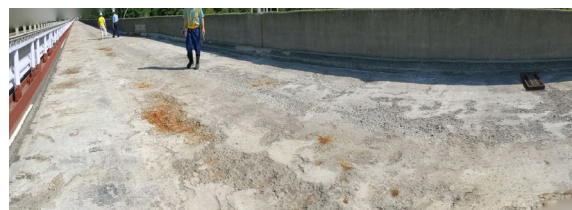
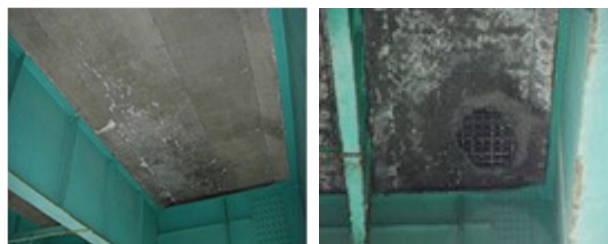


写真-1 床版の土砂化が進行した事例



(a) 5年前の定期点検時

(b) 床版下面の抜け落ち時

写真-2 床版下面の抜け落ち事例



ることによる推定精度の向上を図った。

## 2. 橋梁床版における電磁波レーダの適用と課題

### 2.1 電磁波レーダ法

電磁波レーダ法は、電磁波が金属以外の媒質を透過し、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する手法である<sup>8)</sup>。探査原理は、図-1に示すように電磁波を媒質中に送信器から放射し、反射した電磁波（以下、反射波）を受信アンテナで受信し、反射波が返ってくるまでの時間から深さ方向の位置を推定するものである。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることで、位置情報を得る。

電磁波が媒質の異なる境界面に達すると、その境界面で一部反射し残りは透過する。境界面に電磁波が垂直に入射する場合、この反射と透過の割合は境界面で接する二つの媒体の比誘電率によって決まり、式(1)により反射強度として表すことができる<sup>4)</sup>。電磁波レーダの計測結果を図化した場合、この反射強度の違いが白黒の濃淡となって表示される。

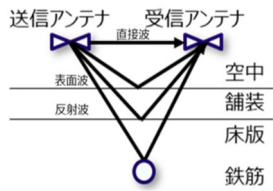


図-1 電磁波レーダ概要

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1)$$

ここで、 $R$ ：反射強度

$\epsilon_{r1}$ ：上層の比誘電率

$\epsilon_{r2}$ ：下層の比誘電率

電磁波レーダには、ハンディ式、カート式、車載式といくつかの種類があるが、本研究では交通規制を伴わず一度に広範囲を計測可能な車載式電磁波レーダを主に用いている。外観および仕様について、写真-3及び表-1に示す。



写真-3 車載式電磁波レーダ外観

表-1 車載式電磁波レーダ仕様

項目	仕様	性能
測定速度	推奨 40km/h	80km/h
距離測定	車速信号取得	精度±0.3%以内
電磁波	マルチステップ周波数方式	200MHz～3GHz
	アンテナ幅 1.8m	有効測定幅員 1.5m
	チャンネル数 21	走行方向 7.5cm 間隔 走行直角方向 7.5cm 間隔 深さ方向 1.0cm 間隔

### 2.2 床版上面の滞水検知への適用性と課題

車載式電磁波レーダを用いた RC 床版橋の計測結果を図-2に示す。図の下側が舗装と床版上面の境界位置での平面コンター図、上側が平面コンター図の赤線位置における縦断スライス図である。平面コンター図は、反射強度に差異がない、即ち比誘電率の異なる物質が介在しない場合は濃淡の変化の少ない一様な模様として表示されるが、図-2を見ると局所的に白いまだら模様が生じている。舗装とコンクリート間に比誘電率の異なる媒質、即ち滞水が生じている場合、このように白黒の濃淡となって表れる。

このように、電磁波レーダを用いることで滞水の有無を視覚的に判断可能であることが分かったが、判断のためには平面コンター図及び縦断スライス図を人間が1つずつ確認する必要があり、多大な労力を要する。また、判断基準が定性的であり、判断する人間により結果にばらつきが生じる可能性がある。以上のような課題への対応策として、AIによる機械学習を用いて、電磁波レーダの計測結果から床版上面の滞水を自動推定する手法について検討した。

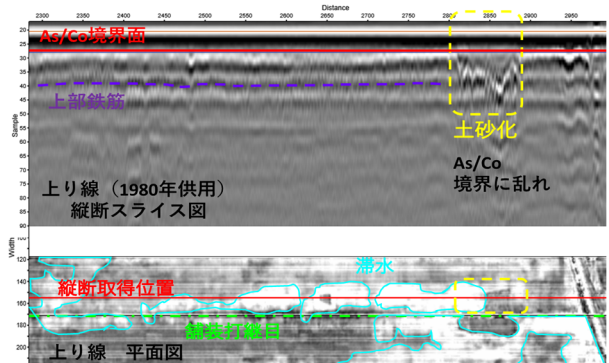


図-2 車載式電磁波レーダ計測結果

## 3. 機械学習による滞水自動推定手法の検討

### 3.1 機械学習の概要

機械学習とは、コンピュータにデータを学習させ、アル

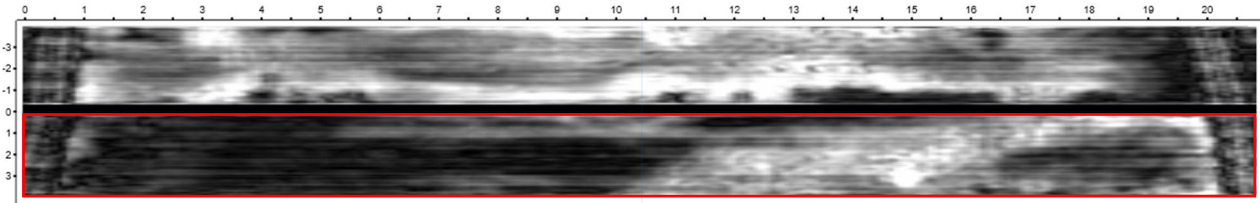


図-3 車載式電磁波レーダ計測結果

A1	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	A2	
0	170	160	833	282	265	213	212	360	140	484	536	521	251	462	520	555	521	298	276	532	578	600	579	887	841	598	723	521	535	708	628	877	688	860	298	820	317	571	530		
50	310	437	521	184	223	657	176	207	194	183	286	599	601	828	851	783	762	267	263	139	520	521	524	384	214	257	588	545	333	181	785	521	822	539	537	282	518	651	817		
100	325	325	192	184	220	235	430	131	156	297	333	242	308	398	875	186	107	198	164	244	269	150	122	264	213	900	475	206	536	218	639	838	868	302	101	238	141	155	157		
150	120	158	99	178	80	157	159	175	151	105	90	129	113	146	111	107	107	128	151	90	152	150	201	870	834	452	520	247	536	149	273	166	162	201	208	181	171	148	212		
200	167	196	124	45	138	135	104	123	125	123	139	108	108	62	84	152	104	158	105	88	136	180	189	176	726	586	532	698	904	183	187	178	170	156	185	166	129	145	198		
250	216	206	144	193	135	147	206	109	148	137	116	146	150	146	117	100	76	63	75	112	132	126	226	531	537	571	564	715	915	763	171	171	132	145	150	143	132	152	599		
300	226	184	133	162	208	222	234	135	198	193	194	177	135	223	250	197	141	158	187	231	74	205	171	438	915	753	301	665	600	202	110	163	231	72	145	132	240	210	169		
350	363	110	238	259	224	209	354	322	241	132	123	179	242	160	224	176	211	187	187	211	172	188	283	261	805	286	258	256	831	235	241	189	304	199	250	163	329	167	522		
400	147	245	256	217	247	219	184	240	174	247	135	180	192	123	189	207	201	209	103	158	165	132	140	175	278	266	202	142	160	143	181	231	165	225	67	138	229	113	149		
450	534	537	688	520	378	93	525	525	644	521	339	347	238	542	248	598	538	535	554	532	236	524	683	629	685	492	233	535	532	321	160	283	522	522	609	298	644	719	489		

図-4 床版上面水分量計測結果

ゴリズムに基づき分類や予測などのタスクを遂行する技術のことをいう。本検討では、特徴量として電磁波レーダの波形データ、正解データとして床版上面水分量データを用いた学習データを活用した教師あり学習を実施した。

3.2 学習データの整備

電磁波レーダによる計測データは、中部地方に位置する橋梁にて、写真-3 に示した車載式電磁波レーダを用いて計測することにより取得した。また、計測後に同橋の舗装開削を実施し、電気抵抗式水分計を用いて露出したコンクリート床版上面の水分量を計測した。電磁波レーダの計測結果及び床版上面水分量計測結果を図-3 及び図-4 に示す。なお、床版上面水分量を計測した範囲は図-3 の赤囲み部である。水分計測は橋軸・橋軸直角方向共に 50cm ピッチのメッシュ割毎に行い、最も水分量が高いとみられる箇所の計測結果を記載している。電気抵抗式水分計は、計測面の水分量をカウント値（電気抵抗換算値）として表示できるものであり、カウント値が大きければ水分量が多いことを意味する。水分計の外観・仕様を図-5 に、水分計のカウント値と水分状態との関係を図-6 に示す<sup>9)</sup>。

仕様	
(1) 測定方式	電気抵抗式
(2) 検量線	カウント（電気抵抗換算値）
(3) 測定範囲	10～990カウント



図-5 電気抵抗式水分計の外観・仕様

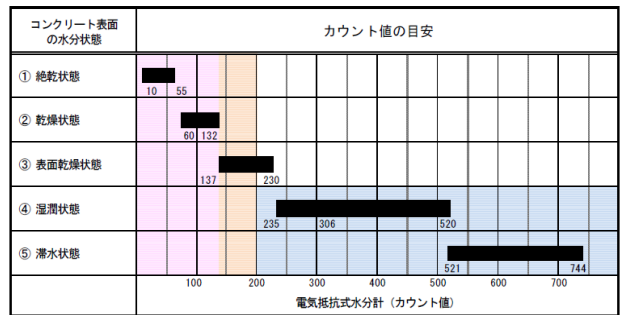


図-6 コンクリート水分状態とカウント値との関係

表-2 水分量による床版状態の分類基準

床版状態	分類基準
健全部	水分量 ≤ 230
湿潤部	230 < 水分量 ≤ 520
滞水部	520 < 水分量

3.3 分類モデル構築

電磁波レーダの波形データを特徴量、床版上面水分量データを正解データとして教師あり学習を行い、推定した水分量のカウント値により床版状態を健全部、湿潤部及び滞水部の3つのクラスに分類する分類モデルを構築する。水分量による床版状態の分類基準は、図-6 のコンクリート水分状態とカウント値との関係を参考に表-2 のとおりとした。表-2 の分類基準に従い分類した正解データの分布を図-7 に示す。白色が健全部、薄い水色が湿潤部、濃い青色が滞水部を示している。モデル構築に用いる電磁波

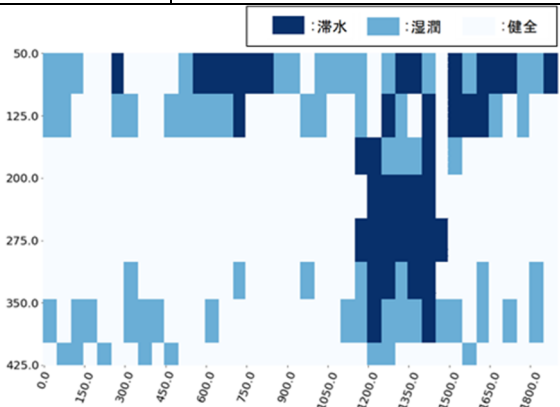


図-7 正解データの分布

レーダの波形データは、取得した深さ方向 71 サンプル全てを含むデータ（全波形データ）とし、以下に示す手順でモデル構築を実施した。

①アルゴリズム検討

分類精度、可読性、計算コスト等を考慮し複数のアルゴリズムを選択し、各アルゴリズムを用いたモデル構築を行う。機械学習前の前処理として、アルゴリズムに応じた特徴量の標準化又は正規化を実施する。検討アルゴリズム一覧を表-3 に示す。

表-3 検討アルゴリズム一覧

手法	アルゴリズム	前処理手法
回帰	ロジスティック回帰	標準化
	SVM	標準化
木	決定木	正規化
	ランダムフォレスト	正規化
ニューラルネットワーク	ニューラルネットワーク	標準化

②モデル構築・交差検証

前処理を実施したデータを用いて機械学習を実施、分類モデルを構築する。また、構築モデルの汎化性能評価のため、K 分割交差検証を用いた交差検証を実施する。これは、データを K 個のグループに分割し、1 つのグループを除いたデータを学習用データ、1 グループのデータを評価用データとし精度検証を行う手法である<sup>10)</sup>。評価に使用するデータを K 回入れ替えることで、K 回精度検証を行うことが可能である。本検証では 5 分割の交差検証を実施した。交差検証イメージを図-8 に示す。

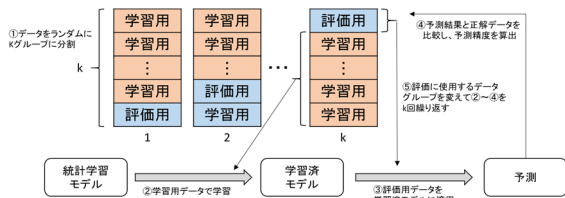


図-8 交差検証イメージ

③精度評価

構築した分類モデルによるクラス分類の精度評価を実施する。評価は、まずクラス（健全部・湿潤部・滞水部）毎に個別指標で評価し、その後全体指標で総合的に評価した。個別指標及び全体指標を表-4 及び表-5 に示す。適合率は間違いの少なさを、再現率は漏れの少なさを表す指標である。例えば適合率が高く再現率が低い場合は、正確に分類できているが分類できた数が少ないモデルであることを意味する。逆に再現率が高く適合率が低い場合は、漏れなく分類できているが誤判定が多いことを意味する。個別指標の概念図を図-9 に示す。F 値は 1 に近いほど精度が良いことを意味する。

表-4 個別指標

指標	特徴
適合率	A と予測したデータの内、実際に A であるものの割合。
再現率	実際に A であるもののうち、A であると予測されたものの割合。
F 値	適合率と再現率の双方を用いた評価尺度。総合的に各クラスに対する予測精度を表す指標。 $F - measure = \frac{2(適合率 * 再現率)}{適合率 + 再現率}$

表-5 全体指標

指標	特徴
正解率	予測した結果の内、予測が正解だったものの割合。予測に対して答えがどの程度当たっているかを示す指標。
マクロ平均F 値	各クラスのF 値の平均値。
平均F 値	各クラスの分類精度を総合的に評価する指標。

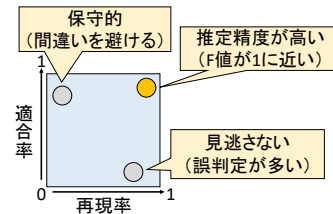


図-9 個別指標の概念図

3.4 精度評価結果

各アルゴリズムによる分類精度（全体指標）を表-6 に示す。ランダムフォレストが最も精度が高く、次いでSVMが高い精度を示した。次にランダムフォレストの分類精度（個別指標）を図-10、ランダムフォレストにより分類したデータの分布を図-11 に示す。健全部、湿潤部、滞水部とも高い分類精度を示し、データ分布も図-7 の正解データの分布と類似した結果を示した。

表-6 各アルゴリズムによる分類精度（全体指標）

手法	アルゴリズム	分類精度	
		マクロ平均F 値	正解率
回帰	ロジスティック回帰	0.70	0.70
	SVM	0.81	0.81
木	決定木	0.73	0.73
	ランダムフォレスト	0.88	0.88
ニューラルネットワーク	ニューラルネットワーク	0.66	0.67

	値		値		値
適合率	0.94	適合率	0.85	適合率	0.87
再現率	0.81	再現率	0.89	再現率	0.95
F値	0.87	F値	0.87	F値	0.91

健全部

湿潤部

滞水部

図-10 ランダムフォレストによる分類精度（個別指標）

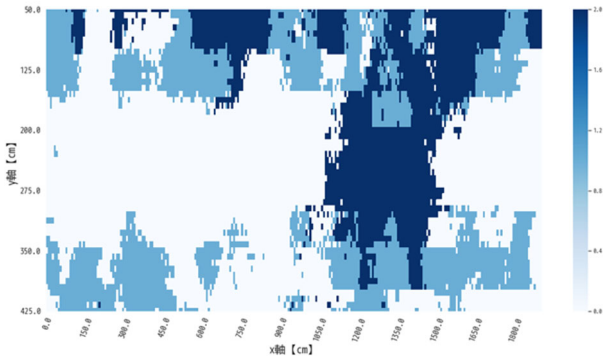


図-11 ランダムフォレストによる分類データ分布

#### 4. 滞水推定アプリケーション

##### 4.1 滞水推定アプリケーションの構築

以上の結果から、ランダムフォレストによる学習モデルを構築することで、高い精度で床版上面の滞水を推定可能であることを確認した。ここまで作成したのはUI(ユーザーインターフェース)がCUI(キャラクターユーザーインターフェース)のプログラムであり、今後実用化するためには、より視覚的に理解・操作しやすいものとする必要がある。そこで、本プログラムを用いたGUI(グラフィカルユーザーインターフェース)ベースのアプリケーションを構築した。アプリケーションの仕様を表-7に、構築したアプリケーションの動作イメージを図-12に示す。アプリケーションの動作手順は以下のとおりである。

###### ① 舗装厚の入力

床版上面の位置を設定するため、舗装厚を入力する。

###### ② 車載式電磁波レーダの計測データの入力

車載式電磁波レーダによる実橋の計測データを入力する。本アプリケーションでは、青線内にデータファイルをドラッグ&ドロップすることで簡易に入力できるようにした。

###### ③ 床版上面水分量推定結果出力

②の作業後、プログラムが推論を実行し、しばらく経過後図-12のとおり(3)水分量出力結果に推定結果が表示される。

##### 4.2 模型供試体を用いた推定精度の検証

令和2年度までに構築した上記の滞水推定アプリケーションの推定精度を検証するため、令和3年度には、舗装と床版の境界部に滞水を模擬できる模型供試体を用いて推定精度の検証を行った<sup>11)</sup>。

模型供試体の概要図を図-13に示す。左上及び右下に厚さ1mmのゴム板で50cm四方の滞水スペースを作り、滞水スペース内に注水孔と排水孔を設けることで供試体内

表-7 アプリケーションの仕様

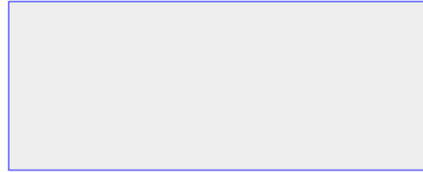
仕様	内容
アプリケーション種別	ウェブアプリケーション
想定最大同時アクセス数	10
想定ブラウザ及びバージョン	・Google Chrome ・Microsoft Edge

#### 床版点検AIアプリケーション

##### (1) 設定値を入力してください

・舗装厚

##### (2) 車載式データをドロップしてください



##### (3) 水分量出力結果

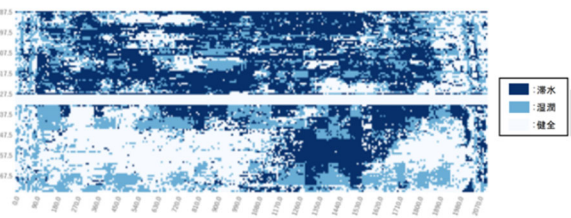


図-12 アプリケーションの動作イメージ

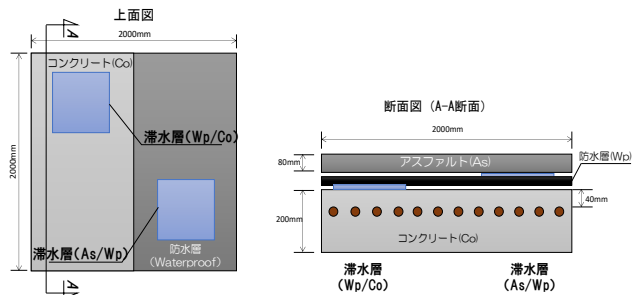


図-13 模型供試体の概要図

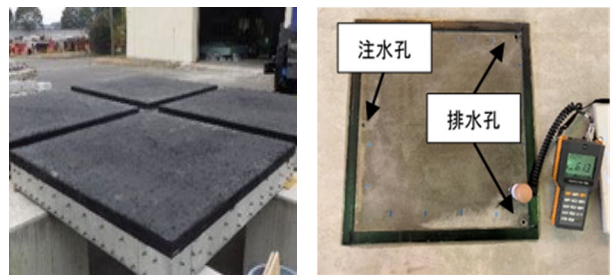


写真-4 模型供試体の外観と滞水スペース

部への水の出し入れを可能としている(写真-4)。滞水スペースに注水した供試体を電磁波レーダで計測し、その波形データを用いて滞水推定を行った。

### 4.3 滞水推定精度の検証結果

模型供試体の電磁波レーダ計測結果（平面コンター図）を図-14 に示す。図-14 の左上と右下の赤線部が滞水スペースを示しており、その範囲に白い模様を確認できる。これは模型供試体の滞水スペース内に水分が存在していることを示している。

次に、図-14 の電磁波レーダ計測結果を用いて出力した滞水推定結果を図-15 に示す。図-15 でも図-14 と同様に左上と右下の滞水スペースを正しく滞水部と推定する結果となった。一方、滞水スペース以外の非滞水箇所を全体的に湿潤部と判定しており、左下では滞水部と推定している箇所も確認された。

この結果より、滞水スペースに注水した部分については概ね正しく推定できるものの、健全部と湿潤部の区別は困難であることから、健全部と湿潤部を区別せずにどちらも健全部として表現し、健全部と滞水部の 2 種類で表現するよう変更することとした。また、非滞水箇所も滞水部と推定している範囲もあることから、別橋梁で整備した新たな学習データを構築済の分類モデルに追加学習させることで、推定精度の更なる向上を図ることとした。

### 4.4 学習データの追加学習による推定精度向上

追加学習に用いた学習データは、北陸地方に位置する橋梁において、3.2 と同様の車載式電磁波レーダ及び床版水分計を用いて取得した。水分計測の取得ピッチも、3.2 同様橋軸・橋軸直角方向共に 50cm ピッチとした。調査橋梁の全景写真を写真-5 に、調査状況を写真-6 及び写真-7 に示す。学習モデルの構築に用いるアルゴリズムには、前回同様ランダムフォレストを採用した。

図-14 の電磁波レーダ計測結果を用いて、追加学習前の分類モデルと追加学習後の分類モデルそれぞれで出力した滞水推定結果の比較を図-16 に示す。水色の湿潤部がないのは、4.3 で述べたとおり健全部と滞水部の 2 種類で表現するよう変更したためである。比較すると、追加学習前の分類モデルの推定結果では赤線で囲んだ非滞水箇所に滞水部が推定されていたが、追加学習後の分類モデルの推定結果では正しく健全部と推定されている。

この結果より、定性的ではあるものの学習モデルを追加学習させることで、分類モデルの滞水推定精度が向上したことが確認できた。

## 5. 滞水推定結果アプリケーションの実橋への適用

### 5.1 対象橋梁の概要

4.4 で滞水推定精度を向上させた滞水推定アプリケー

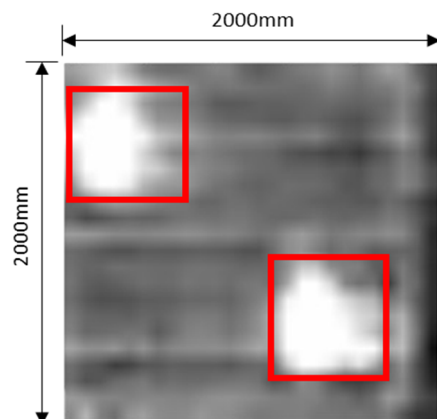


図-14 模型供試体の電磁波レーダ計測結果  
(平面コンター図)

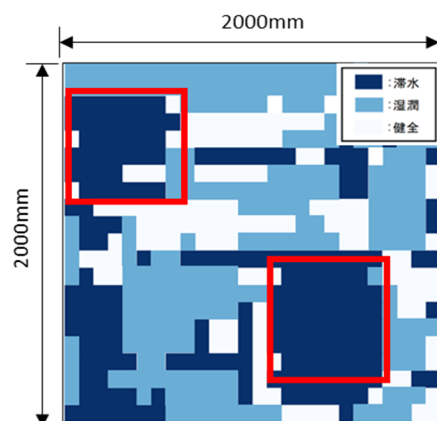


図-15 学習モデルによる滞水推定結果



写真-5 全景写真



写真-6 電磁波レーダ計測状況



写真-7 床版上面水分量計測状況

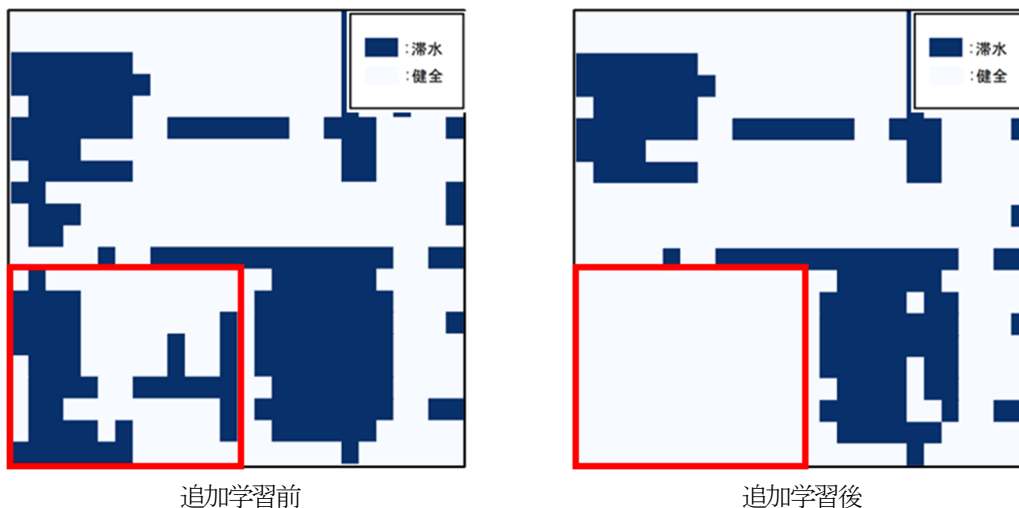


図-16 追加学習前後の滞水推定結果の比較

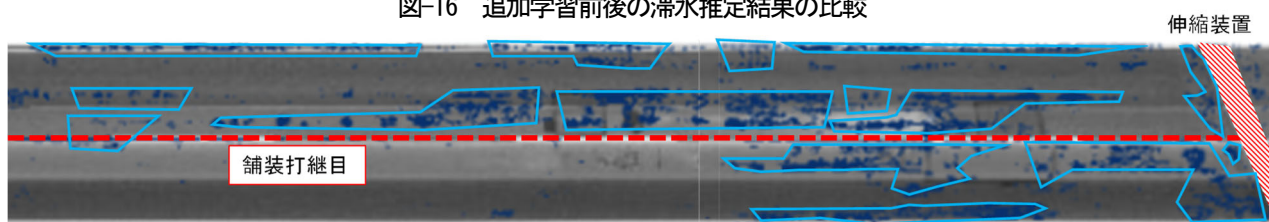


図-17 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ図

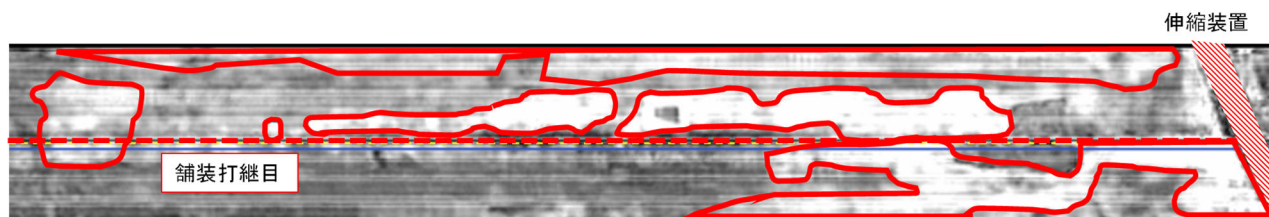


図-18 電磁波レーダ計測結果（平面コンター図）

ションを用いて、約 2 年前に取得した実橋の電磁波レーダ計測結果を適用した場合に、どのような推定結果が得られるのか確認を行った。データを取得した橋梁は、東北地方に位置する上下線分離型の橋梁である。今回の推定対象とする上り線は昭和 55 年に供用した 3 径間連続鋼鉄桁橋 × 2 連の橋梁で、データ取得時点で供用後約 40 年経過した橋梁である。平成 29 年度に土砂化が見つかり補修されているが、平成 30 年度には同箇所でも再び土砂化が見つかるなどの特徴を有している。

## 5.2 滞水推定結果

対象橋梁の滞水推定結果に路面画像を重ね合わせたものを図-17 に示す。赤破線が舗装打継目を示しており、右端の斜線が入っている所が伸縮装置を示している。青色で囲まれた部分が滞水部と推定された範囲である。対象橋梁は供用後約 40 年経過と古く、土砂化の履歴があるという特徴もあり、滞水が広い範囲で推定されている。それに対して図-18 が同じ範囲の平面コンター図であり、赤破線は

図-17 と同様で舗装打継目を、赤実線で囲まれた部分は、縦断スライス図を分析した上で推定した滞水範囲を表している。両者を比較すると、滞水推定アプリケーションによる滞水推定範囲は、電磁波レーダ計測結果を分析して推定した滞水範囲と大きく変わらない結果となっている。

この結果から、構築した滞水推定アプリケーションは実橋においても、従来の平面コンター図等を人間が 1 つずつ確認して判断する方法と同等の推定精度を有していることが確認できた。

また、図-17 の滞水推定範囲に着目すると、舗装の打継目周辺、路肩部、伸縮装置付近に滞水が推定された箇所がある程度集中していることがわかる。これは施工打継目、地覆、伸縮装置との境界の目地部から雨水などが舗装下に浸入し、床版上面に滞水したものと考えられる。このように滞水部が推定された箇所とその周辺の特徴を合わせて考えることで、適切な診断・措置につなげることが可能と考えられる。

## 6. 滞水推定結果の活用方法

滞水推定結果を活用することで、目視では確認できない床版上面の診断・措置につなげることが可能となる。例えば、図-17のように滞水推定結果とその周辺の特徴により、施工打継目、地覆、伸縮装置との境界の目地部から雨水が浸入したものと考えられる場合の措置としては、止水シールや目地充填材等による止水や、舗装の打換えによる排水がある。滞水推定結果に加えて、舗装面や床版下面の損傷状況を組み合わせることにより、優先順位を付けながら適切な対応を行うことで、床版の予防保全を図ることができる。

## 7. まとめ

本研究では、床版の土砂化の発生要因と考えられる床版上面の滞水を早期に検知するため、電磁波レーダを用いた滞水検知手法の適用性を確認した。また、滞水検知をより省力化・効率化することを目的に、AIによる機械学習を用いて滞水を自動推定可能な滞水推定アプリケーションを構築した。さらに、令和3年度においては、模型供試体を用いた本アプリケーションの滞水推定精度の検証や、追加学習による滞水推定精度の向上を実現し、実橋においても従来の平面コンター図等を人間が1つずつ確認して判断する方法と同等の推定精度を有することを確認した。

今後も試行を繰り返していくことで課題を抽出し、更なる改善を図っていきたい。

## 謝辞

本稿は、「官民研究開発投資拡大プログラム(PRISM)」及び、「AIを活用した道路橋メンテナンス効率化に関する共同研究」の成果の一部である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領 平成31年2月、pp.106、2019
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第472号、pp.5-6、2008
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：凍結防止剤散布と沿道環境、国土技術政策総合研究所資料、第412号、pp.6-32、2007
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.9、No.2、pp.627-632、1987
- 5) 阪神高速道路公団 阪神高速道路技術センター：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性、1991
- 6) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集、1999
- 7) 野田翼、松本直士、石田雅博：電磁波レーダによるRC床版の滞水の検知、土木技術資料、Vol162、No.4、pp.18-21、2020
- 8) 小林一輔、魚本健人、加藤潔、広野進：コンクリート構造物の非破壊検査、森木出版株式会社、pp.78-104、1990
- 9) 谷倉泉、榎園正義、後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究、構造工学論文集、Vol.59A、pp.1122、2012
- 10) 多田智史：あたらしい人工知能の教科書 プロダクト/サービス開発に必要な基礎知識床版防水工における水分計の適用性に関する研究、pp.184、2017
- 11) 岩谷祐太、石田雅博：電磁波レーダによるRC床版上面の滞水検出、検査技術、第27巻、第1号、pp.23-29、2022

## 6.2 機器活用による調査・監視の効率化・信頼性向上技術の開発・評価

### 6.2.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、  
地質・地盤研究グループ（特命、地質）、材料  
資源研究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西  
崎到、品川俊介、稲崎富士、寺田剛、丸山記美  
雄、渡邊一弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、  
大浦正樹、綾部孝之

#### 【要旨】

本研究は、移動式たわみ測定装置や地中レーダを用いた調査手法の改善等を通じ、より効率的な既設舗装の構造的特性の把握技術を提案することを目的としている。平成28・29年度は、移動式たわみ測定装置や多チャンネル高速牽引型地中レーダ探査システムの実用化に向け、それぞれ測定値に含まれる誤差の軽減策や測定装置の仕様について検討を行った。平成30・令和元年度は、MWDにおける新たなドップラセンサを開発するとともに、電磁波における舗装の境界深度の推定手法を発展させた。令和2・3年度は、MWDについて路面温度や測定位置の違いによる測定結果の影響把握および新たな解析手法を開発した。また、多重反射ノイズの抑制を図り舗装構造調査に適した地中レーダ探査装置を開発した。

キーワード：舗装、移動式たわみ測定装置、地中レーダ、MWD、GPR

#### 1. はじめに

舗装の維持修繕工法の選定等に当たっては、既設舗装の構造的特性を把握することが求められる。現在、非破壊での構造調査としては重錘落下式たわみ測定装置（FWD：Falling Weight Deflectometer）を用いたものがあるが、各測点での測定であること、交通規制が必要であること等の課題がある。そこで、本研究では、より効率的な既設舗装の構造的特性の把握技術を提案することを目的としている。

平成28年度は、移動式たわみ測定装置（MWD）および多チャンネル高速牽引型地中レーダ（GPR）探査システムの実用化に向け、それぞれ測定値に含まれる誤差の軽減策や測定装置の仕様について検討を行った。

平成29年度は、MWDのたわみ計測値の補正方法に関する検討として従来の板バネ車両からエアサスサスペンション車両に測定機器を移設し、車両のサスペンションの違いが取得データに与える影響の検証とドップラー振動計の角度変化による測定誤差を補正する方法を検討した。また、舗装用GPR探査装置の探査性能の安定化改良のための仕様設計および性能特性評価を行った。

平成30年度は、MWDの実道での検証を行うとともに、

測定値から舗装のたわみ量を算出するための解析プログラムを作成した。また、GPRにより路盤の水分率分布の傾向を捉えた。

令和元年度は、MWDについて、現道の交通状況に応じた測定が可能となるよう新たなドップラセンサを開発した。また、土研構内での検証の結果、FWDにより許容たわみ量の目安を超過した箇所約80%をMWDでも抽出できることを確認した。また、電磁波伝播速度の推定に舗装道路の特性を活かした点散乱点を利用した手法の応用を図り、0.01m/nsより高精度の推定速度で境界深度の推定が行えることを示した。

令和2年度は、路面温度の影響を把握するため、夏（55°C）、秋（30°C）、冬（10°C）の3季に分けて、MWDとFWDの測定を実施し、路面温度（季節）問わず、MWDたわみ量とFWDたわみ量に高い相関関係であることを確認した。また、測定位置の影響を把握するため、わだち部を0cmとして、わだち部から30cmおよび60cm離れた位置でMWDの測定を実施し、測定位置によるMWDたわみ量の影響を把握した。また、舗装用GPR探査装置についてアンテナ面を地上より離れた際に発生する多重反射



ノイズの抑制手法を示した。

令和3年度はMWDの新たな解析手法を開発し、MWDの更なる精度向上を実現した。また、一般道路で走行可能な舗装用のGPR探査装置を開発し、一般道路においても多重反射ノイズの抑制による舗装構造の識別精度の向上が見込まれることを確認した。

## 2. 移動式たわみ測定装置の実用化に向けた検討

### 2.1 サスペンションの異なる車両の検討

MWDに使用している車両は、サスペンションにリーフスプリング(板バネ)を使用しており、走行中の振動が非常に大きい。図-1に示すように、路面の凹凸が大きい箇所では車両が振動した際、測定値がセンサの許容レンジを越えてしまうと、測定値が飛んでしまう。現在使用しているドップラー振動計は、測定値に対して低周波の成分を捉えるような処理が行われており、一度値が飛んでしまうと前の値をホールドしたまま数秒間復帰しない。

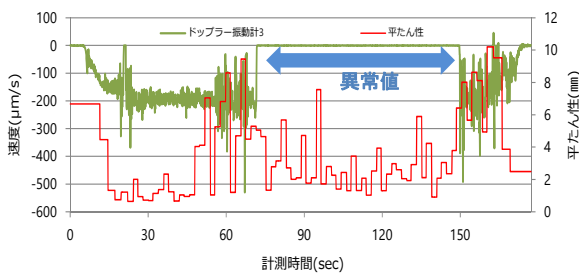


図-1 振動による測定値の飛び

この飛びを残した状態で解析を行うと、本来のたわみ量に対し誤差が大きい値が算出されてしまう。

センサの飛びを抑えるためには、センサ自体を改良するか、振動の少ない車両を使用する方法が効果的であると考えられる。そこで、現在のMWDとサスペンションの異なる車両を使用し研究所の外周路を走行し、上下方向加速度について比較を行った。

図-2および図-3に、時速40km/hで走行し車両の上下方向の加速度およびそのスペクトル解析結果を比較した結果を示す。上下方向の振動については、エアースプリングを用いることで、リーフスプリングを使用時に生じていた高周波の大きな加速度が低減されることが分かる。続いてスペクトル解析結果を見ると、リーフスプリングでは3.0Hzおよび35.0Hz、エアースプリングでは1.1Hzおよび17.5Hz程度の振動が卓越しており、エアースプリングの方が固有振動数は低いものと考えられる。

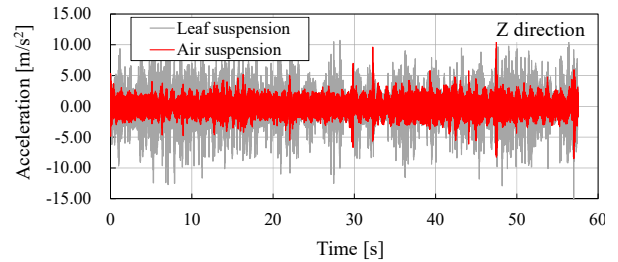


図-2 上下加速度の比較

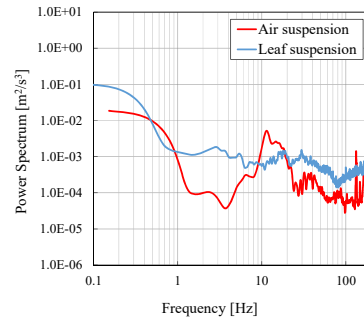


図-3 上下加速度のスペクトル解析結果の比較

振動の大きさ自体はエアースプリングを採用することで低減することができ、ドップラー振動計による測定時に測定値の飛びが発生する頻度は少なくすることが出来ると考えられる。

平成29年度は、MWDに使用している車両をエアースプリング車へと変更し、ドップラー振動計による測定値の飛びの発生が抑制できるか検証を実施した。

土研構内での計測の結果、エアースプリング車にすることで、車両の振動成分が小さくなり、ドップラー振動計の飛びが発生しないことを確認した。

### 2.2 レーザー変位計による車両姿勢の測定

ドップラー振動計の受信部は、厳密には真下を向いているわけではなく、垂直方向に対して2~3°程度の角度をつけた状態で取り付けられている。従って、図-4に示すように測定した値には車両の速度成分が含まれており、以下の式(1)に従い、車両の速度成分を取除く必要がある。

$$\frac{dw}{dt} \approx u - v \sin \theta \dots\dots\dots(1)$$

現在は走行中のセンサの角度は一定であるという仮定のもと、測定前にθを求め速度成分を除去しているが、車両は走行中に姿勢が変化するため、θは一定でない。そのため、特に姿勢の変化が大きくなる箇所については特に誤差が大きくなると考えられる。

ドップラー振動計の動的な角度変化を計測するためには、走行中の車両の姿勢を計測する必要がある。

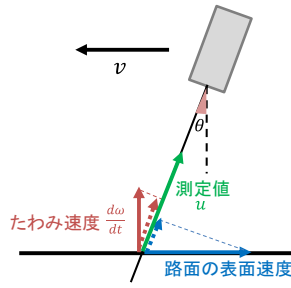


図-4 センサの角度とたわみ速度の関係

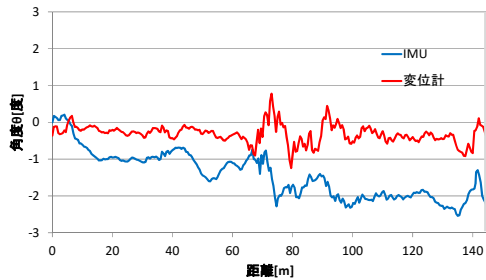


図-5 レーザー変位計とIMUの角度比較

計測手法としては、ジャイロセンサを使用する方法が一般的であるが、非常に高価であるため、将来的な実務での適用を考えると費用面での課題がある。そこで、たわみ測定用に設置しているレーザー変位計を用いて簡易に車両の姿勢を測定する方法について、検討を実施した。

検討においては、路面のプロファイルを取得するために3つのレーザー変位計を使用しており、更にIMUによる姿勢計測機能も有するタイプの路面性状測定車を使用した。

図-5に測定結果を示す。車両の傾きは0.5m間隔で算出した。単純に角度の値で比較するとレーザー変位計による角度とIMUによる角度に一致性は見られなかったが、大小関係の傾向については一定の類似性が見られた。

平成29年度は、MWD測定車の車体に設置したレーザー変位計にて得られる車両の傾きが正確に計測できるかを検証するため、土研構内にてMWD測定を実施した。

測定では、式(1)に示す $\theta$ の精度を確認する必要があるため、たわみが発生しない( $u=0$ )連続鉄筋コンクリート舗装を対象とした。式(1)で示す $u$ (たわみ速度)はゼロであるため、 $dw/dt=v\sin\theta$ となれば、レーザー変位計で計測した車両の傾きが正確であることを確認できるため、連続鉄筋コンクリート舗装上での計測とした。

計測結果を図-6に示す。ドップラー振動計にて得られ

た計測値( $dw/dt$ )と、走行速度成分( $v\sin\theta$ )がほぼ一致する結果となり、レーザー変位計にて車両の傾きをほぼ正確に計測できていることを確認した。

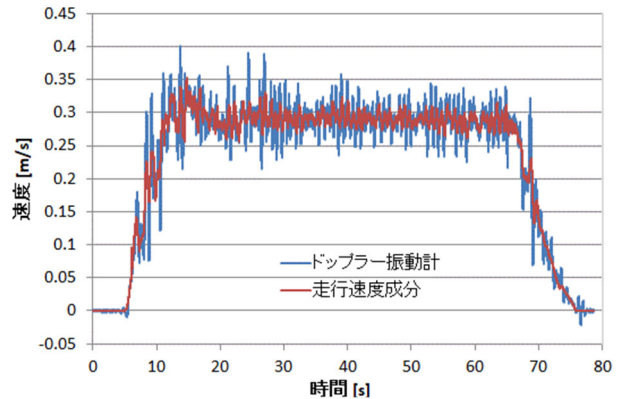


図-6 たわみ速度測定結果

### 2.3 実道での検証

平成30年度はこれまでの検討結果を踏まえ、土研外周路にてMWDによる測定を行い、FWDたわみ量との比較を行った。測定結果を図-7に示す。たわみ量の小さい箇所ではFWDたわみ量との差異が見られるが、たわみ量の大きい箇所ではFWDたわみ量との一致が確認できた。また、合計3回の測定を実施しているが、概ね再現性も良好であることが確認できた。

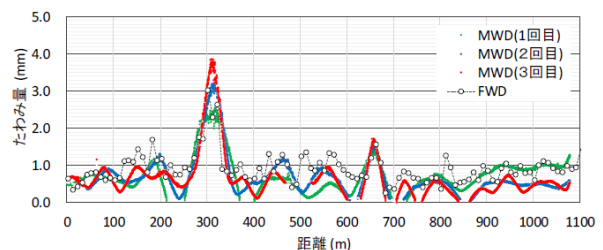


図-7 MWDたわみ量とFWDたわみ量の比較

### 2.4 解析プログラムの作成

平成30年度は、MWDで測定したたわみ速度からたわみ量を算出するための解析プログラムを作成した(図-8)。これまでたわみ量の算出にあたり、多くの処理が必要となるとともに高度な技術が必要であり膨大な時間を要していたが、プログラム化することにより高度な技術がなくても瞬時に解析することが可能となった。

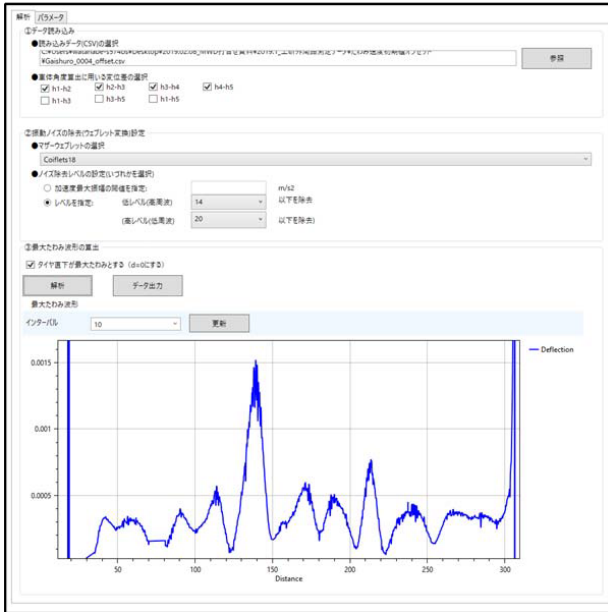


図-8 MWD たわみ量の解析プログラム

2.5 MWD を用いた舗装の健全度評価手法の検討

MWD により得られた舗装のたわみ量を用いて、舗装の健全度評価手法の検討を行った。

令和元年度は、既存知見である許容たわみ量の許容値の目安（以下、「許容値」という。）を参考として、FWD 測定結果のうち許容値を超過した箇所において、MWD を用いて抽出可能か検討を実施した。なお、測定は土研外周路で実施し、外周路の舗装断面は N<sub>7</sub> 交通相当で許容値は 0.9mm である。図-9 に舗装の健全度評価の検討結果を示す。検討の結果、FWD において許容値たわみ量を超過した箇所において、約 80%を MWD においても抽出できていることを確認した。

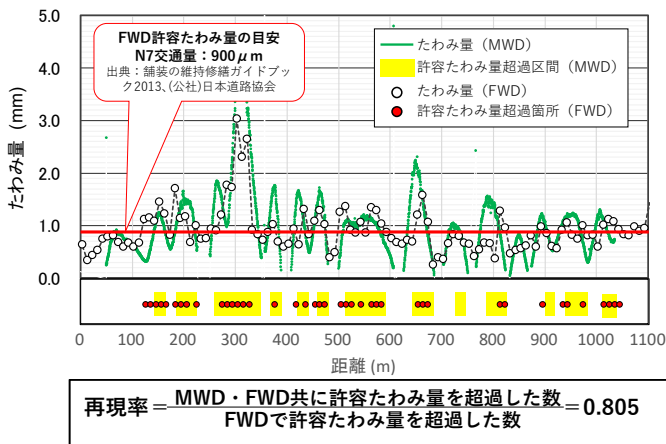


図-9 舗装の健全度評価の検討結果

2.6 MWD 測定に適したドップラセンサの開発

既設ドップラセンサは、車両に取り付けて測定した場合、車速 30km/h 程度以上になると振動の影響でデータ取得が不可能となる等、安定した測定が困難であったため、現道において交通状況に応じた測定を可能となるよう、様々な走行速度での測定が可能なドップラセンサの開発を進めている。

令和元年度は、ドップラセンサの試作機（以下、「開発センサ」という。）を制作し、様々な走行速度（20～100km/h）で良好にデータが取得できるか検証を行った。なお、測定は土研試験走路で実施した。図-10 に開発ドップラセンサの測定結果を示す。測定の結果、開発センサを用いることで、これまで測定が不可能であった 30km/h 以上の車速でも良好にデータを取得できることを確認した。

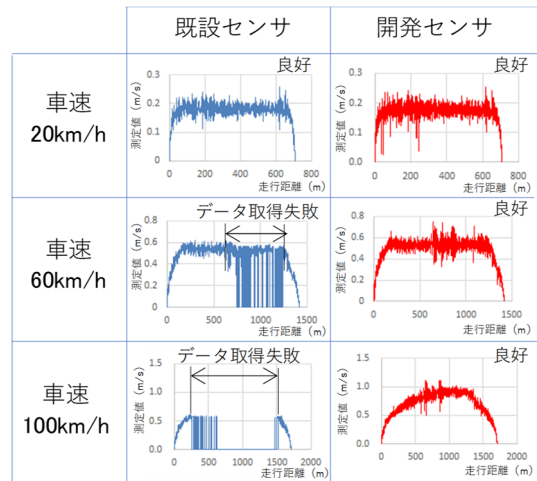


図-10 開発ドップラセンサの測定結果

2.7 MWD の測定条件に関する検討

令和 2 年度は、MWD の実用化に向けて、想定される MWD の測定条件に対する取得データの補正方法等を検討するため、計測データに影響を及ぼす可能性の高い路面温度および測定位置の条件について検討した。

路面温度の影響については、土研外周路にて夏（55℃）、秋（30℃）、冬（10℃）の 3 季に分けて、MWD と FWD の測定を実施した。測定結果を図-11 に示す。また、MWD と FWD の相関を図-12 に示す。路面温度が高くなるほど、たわみ量が大きくなっており、FWD たわみ量と同様の傾向が確認できる。また、路面温度によらず MWD と FWD の相関が高いことを確認した。これにより、通常 FWD で用いられる温度補正が MWD でも可能である可能性を見出した。

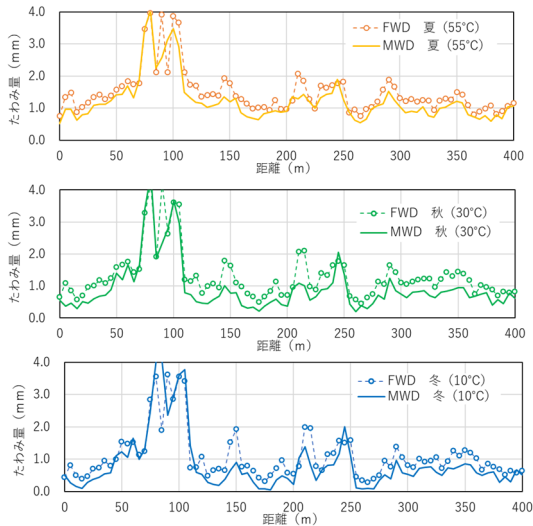


図-11 路面温度の影響

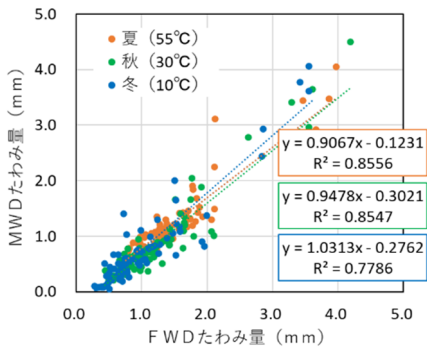


図-12 MWD と FWD の相関

測定位置の影響については、土研外周路にてわだち部を 0cm として、わだち部から 30cm および 60cm 離れた位置で MWD の測定を実施した。測定結果を図-13 に示す。たわみ量の大きい区間（健全度が著しく低い区間）で測定値が異なる結果となり、測定位置の影響が大きいことが確認できた。これにより、MWD の測定は複数回実施して最大値を採用する等の取扱いが必要であることが分かった。

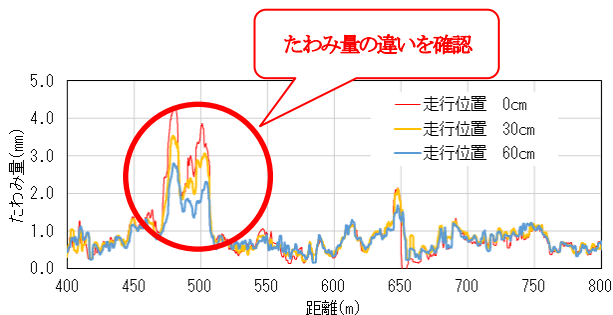


図-13 測定位置の影響

## 2. 8 MWD の新たな解析手法の提案

MWD により精度良くたわみ量を算出するためには、ドップラー振動計の測定値に含まれるノイズを効果的に除去する必要がある。令和 3 年度は、MWD の更なる精度向上のために新たな解析手法（ノイズ除去手法）を開発した。

図-13、図-14 に示すように各ドップラー振動計で測定される測定値 (U) には、解析に必要なたわみ速度 (Wv) のみでなく、車両の上下方向の動きに対するノイズ (N 上下) と、車両のピッチング方向の回転に対するノイズ (N 回転) が存在することに着目した。式 1~3 に各ドップラー振動計の測定値 (U) に含まれる速度成分のイメージを示す。

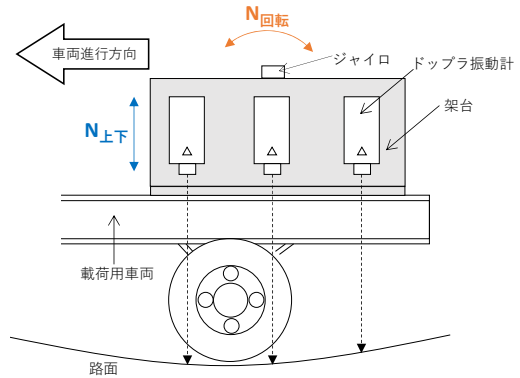


図-13 測定機器の構成

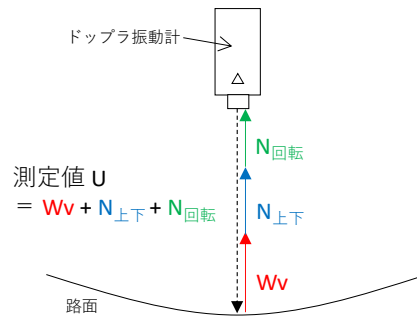


図-14 測定値に含まれるノイズ

$$U_1 = Wv_1 + N_{上下} + N_{回転1} \quad \dots \text{式 1}$$

$$U_2 = Wv_2 + N_{上下} + N_{回転2} \quad \dots \text{式 2}$$

$$U_3 = Wv_3 + N_{上下} + N_{回転3} \quad \dots \text{式 3}$$

N 回転については、図-15 に示すように、架台にジャイロを設置し、角速度 ( $\omega$ ) を測定することで、N 回転 ( $N_{回転} = R \cdot \omega$ ) を計算することができる。しかし、N 上下については、たわみ速度 (Wv) と同じ鉛直成分の速度で

あるため、ノイズのみを抽出するのは困難である。そこで、架台に剛結されている 3 台のドップラー振動計の測定値に含まれる N 上下が共通の値であることを利用して、ドップラー振動計間の測定値の差をとることで N 上下を除去することにした。式 1~3 を用いてドップラー振動計間の測定値の差をとって整理すると式 4~5 が得られる。

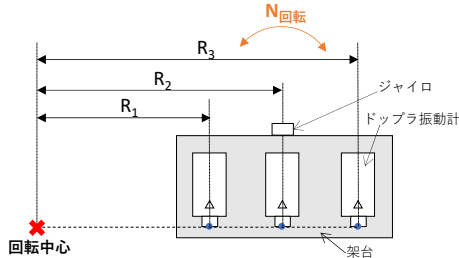


図-15 車両回転によるノイズ (N<sub>回転</sub>)

$$W_{V1} - W_{V2} = U_1 - U_2 - N_{\text{回転1}} + N_{\text{回転2}} \quad \dots \text{式 4}$$

$$W_{V1} - W_{V3} = U_1 - U_3 - N_{\text{回転1}} + N_{\text{回転3}} \quad \dots \text{式 5}$$

上記、式 4~5 により解析に必要なたわみ速度成分のみが抽出されることが分かる。抽出したたわみ速度成分から、図-16 に示す原理により、たわみ形状をガウス曲線で推定し、最大たわみ量を算出することが可能となる。

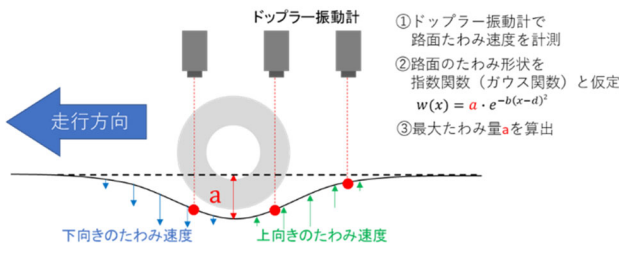


図-16 たわみ量算出原理

新たな手法の検証のため、実道で MWD の測定を実施した。なお、実道での測定は MWD による測定のみでなく比較対象として FWD の測定も実施した。FWD は 5m 毎に測定し MWD との比較を行った。図-17、図-18 に土木研究所の構内道路での測定結果を示す。MWD たわみ量は FWD たわみ量に対して概ね同様の傾向を示しており、相関も高い結果が得られている。また、たわみ量が大きい不健全区間についても確実に抽出できている。図-19 に茨城県つくば市道で測定した結果を示す。一部 FWD 走行位置の違いによる FWD たわみ量との差異見られるものの、全体としては FWD たわみ量と同様の傾向を示す結果となった。以上の結果から、新たな手法を用いることで MWD の更なる精度向上が期待できることを確認した。

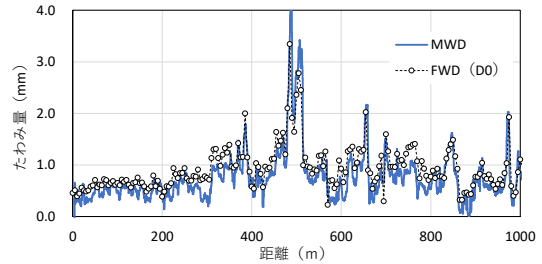


図-17 土木研究所構内道路での測定結果 (たわみ量)

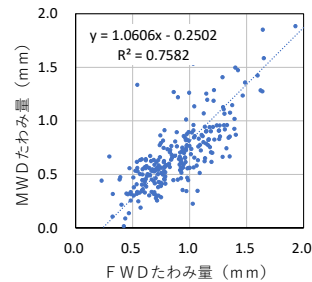


図-18 土木研究所構内道路での測定結果 (相関図)

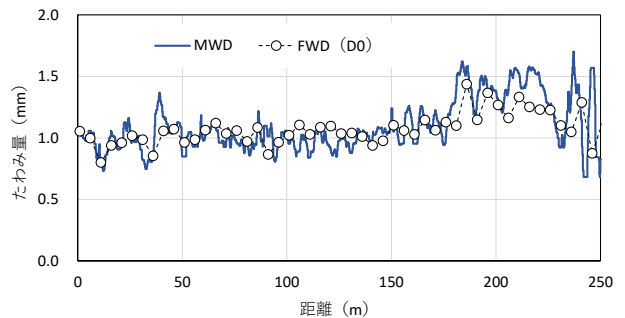


図-19 つくば市道での測定結果

### 3. 多チャンネル高速牽引型 GPR 探査システムの実用化に向けた検討

#### 3.1 多チャンネル GPR 実証試験装置

マルチチャンネル地中レーダ (多チャンネル GPR) の普及が進んでいる。1 回の高速度走査で同時に複数の地点における記録を取得できるため、一般交通速度による 1~2 回の走行で車両道路の 1 車線分相当を調査可能となる仕様性能を有する。GPR 探査の高分解能および高再現性を活かして路盤変状の検出が可能となれば、舗装のメンテナンスに有用な測定手法となることが見込まれる。

一般的に、空洞調査用にはボウタイ型のアンテナが用いられており、舗装道路の表層層厚の測定にはホーン型のアンテナが用いられている。高速走査を実現するために、GPR のアンテナ面と道路表面との間にはある程度の距離が存在する場合が多い。しかし、この隙間は強い多重反射を生じる。背景除去処理の適用により多重反射ノイズを抑制することが可能であるが、水平境界からの反射信号の振

幅も低下させてしまう。

地表接合型のボウタイ型アンテナによる GPR 装置を高速で走査させて道路の探査が行えれば、ホーン型アンテナよりも深い探査深度の多チャンネルの記録が取得でき、路床を含む舗装道路構造全体の状態の探査には適している。そこで、地表接合型で地上への漏洩電磁波が抑制された設計のボウタイ型アンテナを備えた GPR 装置による舗装道路探査の適用試験を行った。

ハンディ型 (図-20) と車両牽引型 (図-21) の 2 種類の性能評価を行った。どちらも送信器 4 ch、受振器 8 ch が配置された装置となっている。アンテナ面と路面との間の距離は、ハンディ型はほぼ接触した状態で、車両牽引型は 5~10mm に調整されている。

アンテナ配置を図-22 に示す。送受信の組み合わせは 32 組となり、これらから約 75mm 離れた異なる地点の送受



図-20 ハンディ型多チャンネル GPR



図-21 車両牽引型多チャンネル GPR

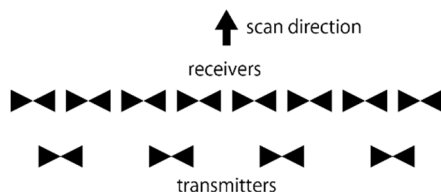


図-22 多チャンネル GPR のアンテナ配置

信記録が計 14 点同時に取得できる。送受信間隔の異なる記録の取得も可能で、伝播速度の推定が可能である<sup>2)</sup>。電磁波は直交性を有するコード搬送信号の送信方式<sup>1)</sup>であり、一般的なパルスやステップ周波数方式と異なる。現時点では、他の既存方式と大きな性能差は認められないが、今後の開発で同時送信による大幅な探査速度の向上が見込まれる。

多チャンネル記録は、土木研究所内の舗装走行実験場で試験記録を取得した。歩行移動速度と車両移動速度の 2 種類の探査を行い、どちらもサンプリング間隔は 0.1 ns で記録を取得した。走査位置は RTK-GNSS により 0.05~0.1 秒間隔で測位した。

### 3. 2 高速走行試験

試験で用いた多チャンネル GPR の特徴は、アンテナ面と道路路面間の距離が、5~10mm の大変小さな隙間に調整されている点である。このため、アンテナと道路路面との電磁波の伝搬接合が良好となり、空中への損失や多重反射による雑音が抑制される。一方、高速走行により路面の起伏の影響を強く受け、データ品質が変化することが懸念される。

走査速度を変更させて同一地点を探査した記録を図-23 に示す。それぞれ、時速 20km と 60km で走行して取得した記録断面である。記録品質として大きな相違は認められず、高速走査においても十分な記録品質で記録が取得できている。

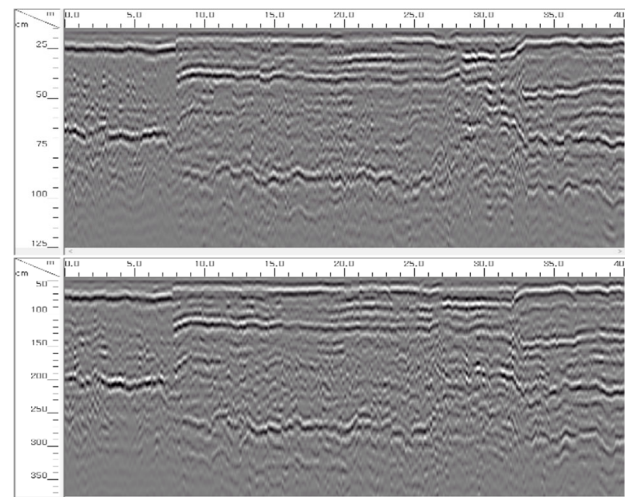


図-23 走行速度による記録の相違  
(上から 20km/h、60km/h で走行時に取得した記録)

### 3. 3 深度スライス断面による埋設物のイメージング

管状埋設物の検知性能を、深度スライス断面で評価する。多チャンネル GPR による記録を図-24 に示す。縦断方向

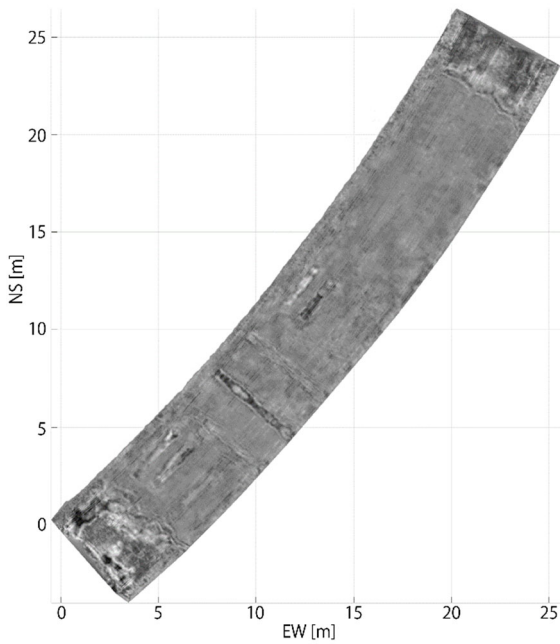


図-24 多チャンネルGPR記録の深度スライス断面による管状埋設物のイメージング

のみ7回の走査で得られた98測線を用いている。探査時間は準備撤収を除いて10分程度である。管状埋設物を明瞭にイメージングできている。

多チャンネルGPRでは、シングルチャンネルGPRに比べて少ない走査回数で高密度な測線記録が得られることから、縦断方向の記録のみで、横断方向だけでなく縦断方向の管状埋設物の検知に成功している。

### 3.4 路盤路床構造の検出

GPR記録にNMO補正（Normal Move Out、送受信点間距離に基づく走時補正）を適用し、ゼロオフセットプロファイル（送受信点が同一点にある垂直断面記録）を作成した。NMO補正には伝播速度分布が必要となる。多チャンネル地中レーダシステムには複数の送受信アンテナが配備されており、異なる送受信間隔の記録を解析することによりRMS（2乗平均）速度を推定することができる。図-25に試験地で推定した区間速度例を示す。

図-26は試験探査のゼロオフセットプロファイル例を示す。探査断面は舗装構造が変化する継ぎ目に相当し、明瞭にアスコン層と上部路盤層の浅部境界を捉えている。ゼロオフセット記録では空中を伝播する直接波の影響が抑制されている。浅部道路構造と比較的深部の路面下空洞を高速走査による記録を用いて同時に捉えることができる可能性がある。

図-26では、クラッシュヤーランと路床、または、アスファ

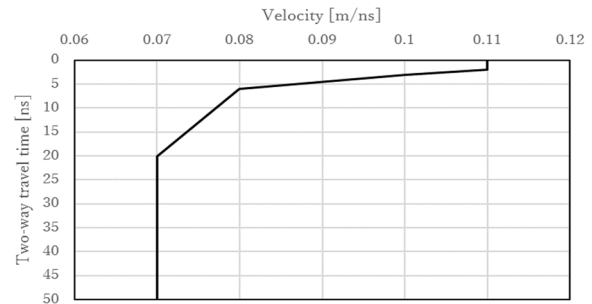


図-25 舗装道路のRMS速度分布例

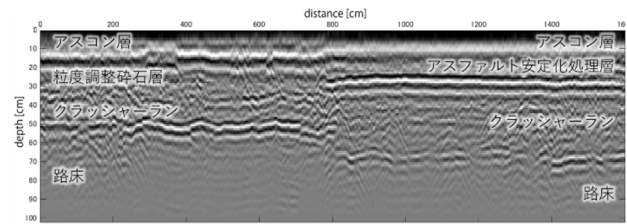


図-26 舗装道路の記録断面例

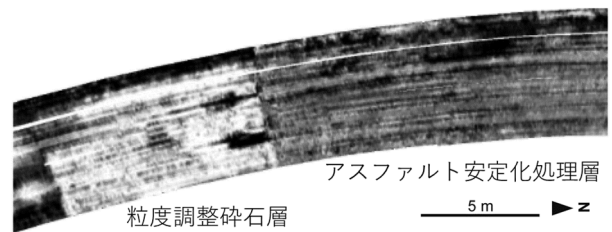


図-27 舗装道路の深度スライス断面例

ルト安定化処理層の間の境界が明瞭に確認できる。一方、クラッシュヤーランと粒度調整碎石層の境界は明瞭な境界を確認することができない。一方、アスコン層と粒度調整碎石層との間の境界は明瞭に確認できるが、アスコン層とアスファルト安定化処理路盤層の間の境界では明瞭な反射イベントを捉えられていない。

同じ道路区間で異なる場所を走査した複数の記録を取得し、地中レーダの3次元データセットを用意した。このデータから水平スライス断面が可能となる。図-27は表層からわずか12cmの浅部断面例であり、アスコン層下部の水平境界をイメージング可能であることを示している。図-26の右側は図-27の北部域（右側）に相当する。南部域の境界は明瞭であるが北部域の振幅は小さいことがわかる。

### 3.5 路盤の水分率分布の推定

舗装道路の損傷を促進させる要因に水分が関係していると考えられている。電磁波の伝播速度は水分率と高い相関を有するため、電磁波の伝播速度を求めれば、水分の分

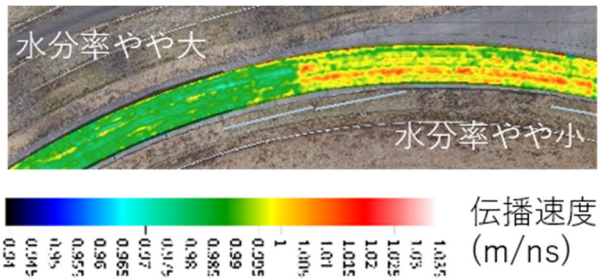


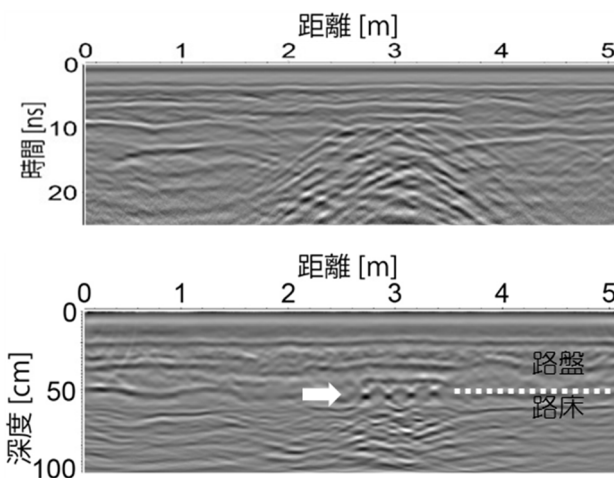
図-28 路盤の電磁波伝播速度の推定

布を推定することができる。電磁波の伝播速度は、伝播経路の異なる応答記録の解析により行える。点散乱体の場合は、アンテナの位置を変えて測定した記録を用いることができるが、舗装道路の場合は明瞭な点散乱体が少ないため、送受信点の中心位置は同じであるがアンテナの間隔が異なる記録を用いる必要がある。多チャンネル GPR では、送受信点位置の異なる記録を同時に得ることができ、これを解析に用いた。

図-26 や図-27 の記録と同じ場所の路盤の電磁波伝播速度の推定値を図-28 に示す。電磁波の伝播速度が速いと一般的に水分率が低い傾向があるため、水分率の大小を平面分布として捉えることができる。ただし、電磁波速度と水分率は線形関係ではないため、水分率の値の推定は室内試験による検証などが必要となる。

### 3.6 電磁波伝播速度の決定手法

舗装道路の構造深度の決定や水分率の推定には、正確な電磁波の伝播速度の決定が必要となる。速度決定手法として、舗装路盤に多数存在する回折波形の利用を提案する。図-29 に適切な電磁波伝播速度に基づく記録断面の補正結果を示す。回折波形はマイグレーション処理を適用する

図-29 適切な電磁波伝播速度による記録断面の補正  
(上：補正前，下：補正後)

ことにより散乱点に復元できる。図-29 の下図では3m 付近の4つの散乱点が明瞭に復元されている。回折波形を用いることにより 0.005~0.01m/ns の精度で伝播速度の決定が可能であることがわかり、深度決定精度の向上を図ることができる。ただし、適切な処理には専門技術が必要となるため、自動処理による速度決定手法の開発に取り組む。また、舗装構造は、アスコン層が 0.13~0.16m/ns、路盤が 0.10~0.11 m/ns、路床が 0.06~0.08m/ns と、伝播速度に明瞭な相違が存在することがわかり、速度の推定により構成媒質の判別も可能となる。

### 3.7 多重反射ノイズの抑制

道交法により、高速走行時にはアンテナ面を 9cm 以上路面より離す必要がある。この時、アンテナと路面間で多重反射が発生し、記録品質を低下させる。多重反射ノイズの抑制には背景除去処理が用いられる。しかし、水平構造の舗装構造は空洞と異なり、背景除去処理により信号品質が低下する。コード送信式の GPR を用いて、アンテナ面を地表より離して記録を取得し、品質低下を確認した。ただし、品質低下は限定的で、多重反射ノイズの抑制を図ったところ、十分な品質で路床と自然地盤の境界を含む舗装構造の調査が行えることを確認した (図-30)。

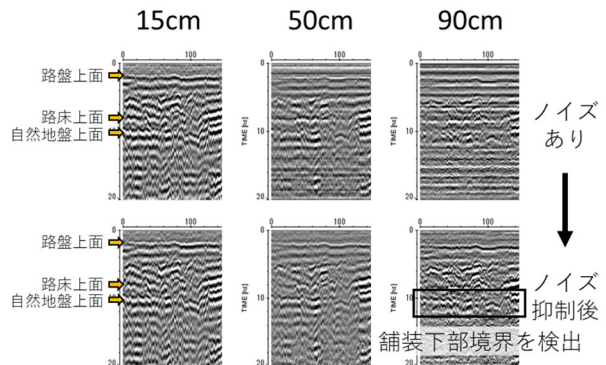


図-30 ノイズ抑制により路床下部境界を検出

### 3.8 開発装置による一般道路の調査

一般道路で道路使用許可なしに調査するには、道交法に適合すると共に、保安基準に適合し自動車検査登録された装置である必要がある。構内での一連の試験探査に基づき、特に多重反射を抑制した探査品質の低下を抑えた設計を行い、公道における調査が可能な装置を開発した (図-31)。探査装置は車両牽引型であり、特定の専用車両によらず調査を行うことができる。

一般道路は家屋などの地表反射物が多いにも関わらず、地表反射ノイズの抑制された良好な品質で記録の取得が



できることを確認した(図-32)。多重反射を抑制することにより、水平な舗装構造の識別精度を向上させることができた。ただし、道路上を覆う樹木によりGNSS測位精度が低下する場合があります、探査位置精度の安定した確保を課題とした。



図-31 一般道路における調査

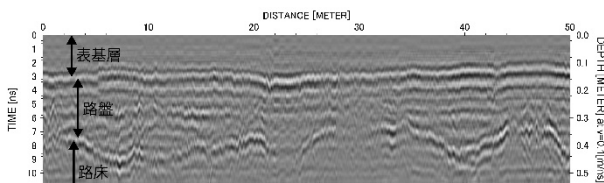


図-32 一般道路における探査記録例

#### 4. まとめ

MWDの精度向上に向けた検討として、平成28年度は車両のサスペンションによる振動比較とレーザー変位計による車両角度測定の実験を行った。平成29年度は移動式たわみ測定装置の実用化に向け、測定データから車両振動等のノイズの除去しより精度の高い路面のたわみ量を計測する方法について検討を行った。その結果、車両を従来の板バネ車をエアサスペンション車両とすることにより車両振動等のノイズをより効率よく除去できること、また、車両の傾斜を測定する機器を車両に取り付けて、この車両の傾斜をたわみ量の算定に反映させることにより、より精度の高いデータを取得できることがわかった。平成30年度は、実道での検証の結果、FWDたわみ量と概ね一致していることを確認するとともに、解析プログラムを作成し、高度な専門知識がなくても短時間でたわみ量を算出することを可能にした。令和元年度は、MWDにおける新たなドップラセンサを開発し、令和2年度にMWDにつ

いて路面温度や測定位置の違いによる測定結果の影響について把握した。令和3年度はMWDの新たな解析手法を開発し、MWDの更なる精度向上を実現した。

また、外部への漏洩電磁波が抑制された多チャンネルGPRの仕様設計および性能評価を行った。高速度走査においても低速度時と大きな差異のない良好な記録取得が行えることを確認した。地表接続型アンテナを備えた多チャンネル地中レーダは多重反射が抑制された地中記録を取得することができ、背景除去処理を適用せずに道路内部構造の水平境界を明瞭に捉えることができる。NMO補正はアスコン層下部の浅部境界の特定に有用である。舗装道路を高速度走査で探査可能な、地表接続型のボウタイ型アンテナを備えた地中レーダは、道路内部状態の状態把握に有用である。また、既往の記録に追加解析を適用するだけで、水分率を推定できる可能性が示された。電磁波伝播速度の推定に舗装道路の特性を活かした点散乱点を利用した手法の応用を図り、0.01m/nsより高精度の推定速度で境界深度の推定が行えることを示した。また、多重反射ノイズの抑制により路床調査も十分可能であることを確認した。さらに、多重反射を抑制した探査設計が、一般道路においても高い舗装識別性能を示すことを確認した。

#### 参考文献

- 1) 尾西恭亮、木佐貫寛、Reeves Bryan : 地中レーダーの稠密探査記録におけるCMP重合処理、第135回物理探査学会学術講演会講演論文集、pp.80-83、2016.1
- 2) Reeves, B. : Noise modulated GPR: Second generation technology, 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 6p., 2014.6

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (1)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：上仙靖、坂本佳也

#### 【要旨】

斜張橋やアーチ橋（ローゼ橋）などの吊構造形式橋梁に用いられるケーブルの腐食損傷は、橋全体系の安全性に極めて大きな影響を及ぼす可能性がある一方、ポリエチレン被覆や塗装などの防食被覆によって覆われることでケーブル内部の状態を把握するのが容易でなく、ケーブル内部の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、斜張橋やアーチ橋に用いられているポリエチレン被覆ケーブル内部の温湿度計測及び再現解析を実施し、計測した温湿度によりケーブル内部の腐食環境評価の可能性について検討した。さらに、措置として内部が腐食環境にあるポリエチレン被覆ケーブルの腐食環境改善方法の検討を行った。

キーワード：斜張橋、ポリエチレン被覆ケーブル、温湿度、計測、解析

#### 1. はじめに

吊構造形式橋梁の耐荷性能において重要な役割を担うケーブルについては、供用中に耐荷性能が損なわれることがないよう腐食に対する耐久性能を確保するための措置が施されている。その中で、工場で全長をポリエチレンで被覆したケーブル（以下、「PE 被覆ケーブル」という。）は、降雨などの外的な影響を排除できる環境において施工されることで良好な施工品質を得られやすく、さらに用いられる PE 被覆そのものが高い環境遮断性と化学的安定性を有することもあり、長期にわたる腐食に対する耐久性能の維持が期待されることから、斜張橋の斜ケーブルやニールセンローゼ橋の吊材など多数使用されている。

一方、PE 被覆そのものは架設中や供用中の飛来物との衝突や擦過、打撃等によって損傷する可能性があり、その場合には被覆の損傷部から雨水等が内部に浸入する可能性も否定できない。このような場合、ケーブル内部の素線の状態を確認する方法として、PE 被覆の一部を除去して直接目視する方法や被覆を除去することなくケーブル素線の腐食による断面減少量を推測する全磁束法による方法<sup>1) 2)</sup>がある。ただし、どちらの方法も既に発生している腐食の有無や進行程度を確認するものであり、予防保全の観点からは有効な方法とはいえない。さらに、ケーブルの腐食が広範囲に進行したとしても PE 被覆表面には異常が現れないため、PE 被覆の損傷の程度によっては調査の必要性を認識することも容易でない。

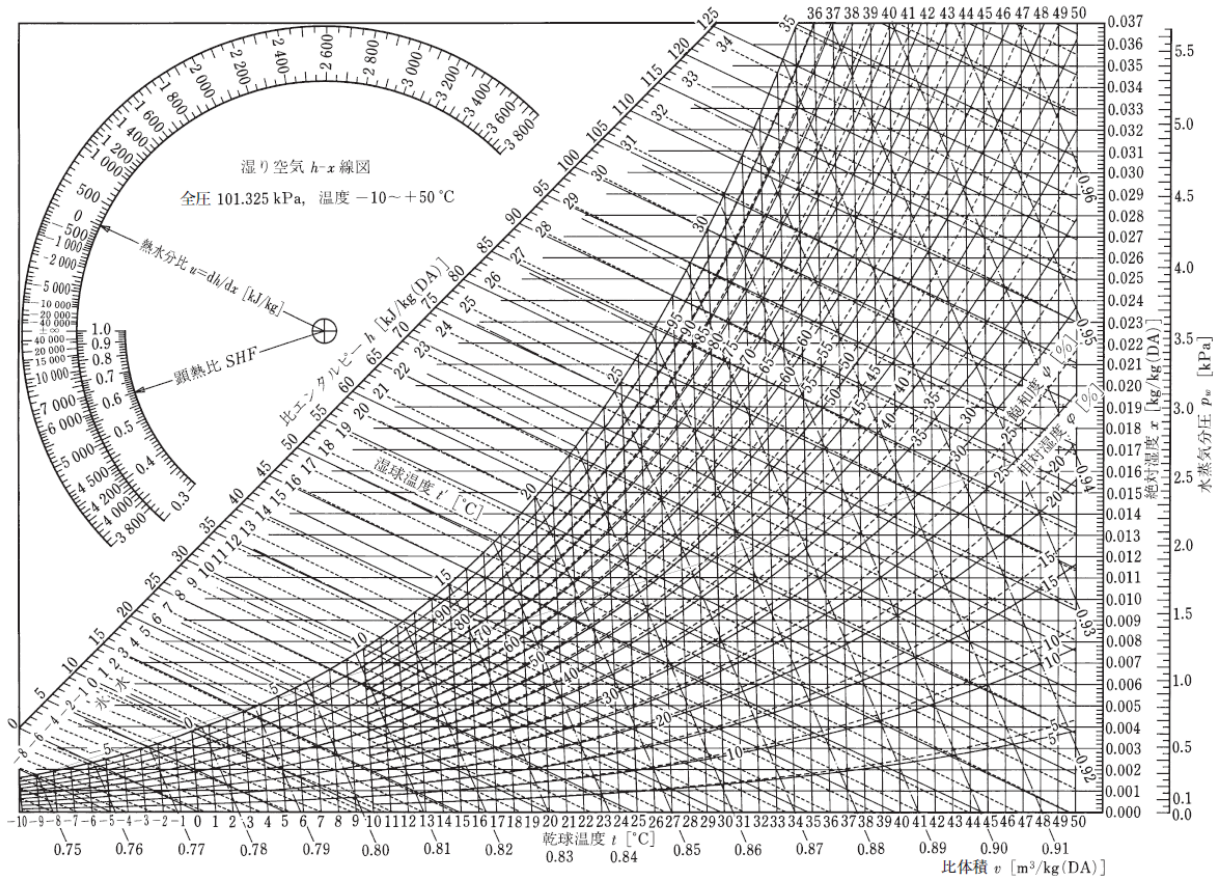
そのため、過去にはエクストラドーズド橋の PE 被覆ケーブルで、素線の腐食が顕著となった結果、外観に変状が確認されることなく供用中に突然ケーブルが破断する事故も報告されている<sup>3)</sup>。

このような背景を踏まえて、本研究は、道路橋に一般に使われている PE 被覆ケーブルを対象として、雨水の浸入等によって内部の腐食環境に変化が生じていないことを、PE 被覆に設けた小径の孔に設置した温湿度計によるケーブル内部の温湿度環境から推定する手法の検討を行った。具体的には、実際の PE 被覆ケーブルでの温湿度計測及び数値解析により検討とともに、温湿度計測の結果、PE 被覆ケーブル内部が腐食環境にある場合の環境改善方法について検討した。

#### 2. 温度と湿度の関係

橋梁で一般に用いられる PE 被覆ケーブルには亜鉛めっき鋼線が用いられていることが多く、めっきの消耗や鋼線本体の腐食に対する外的要因としてはその表面が曝される温湿度の条件が支配的なものと考えられる。

PE 被覆ケーブルは、工場建屋内部の通常の大気環境下で集束されたケーブル素線周囲に PE 被覆が両端部以外全長にわたりシームレスに形成される。集束されたケーブル素線は相互に密着しているものの通常 19～25%程度の空隙があり、最外層も素線の表面形状がそのまま外周を形成するため、凹凸があり PE 被覆と最外層のケーブル素線の間にも空隙が生じ、素線表面

図-1 湿り空気線図<sup>4)</sup>

は両端部が密閉されるまでケーブルの置かれた大気と同じ温湿度の空気が空隙を満たした状態となっている。

通常の空気のようにある程度（通常1～3%程度）の水蒸気を含む空気は湿り空気と呼ばれ、水蒸気と水蒸気を取り除いた乾き空気の和と捉えることができる。湿り空気の温湿度の状態は、圧力が一定であるとの条件を置くことで、図-1のような湿り空気線図（図は、圧力1013hPaの場合）で表されることが知られている。図-1中の乾球温度は一般的に温度、ある温度における飽和水蒸気分圧に対する水蒸気分圧の割合である相対湿度は一般的に湿度と呼ばれるものであり、縦軸の絶対湿度は水蒸気を取り除いた乾き空気1kgに対する水蒸気の質量である。例えば、25°Cで相対湿度50%の空気に含まれる絶対湿度は0.010kg/kgであり、最大で相対湿度100%となる0.020kg/kgまで水蒸気を含むことができる。また、絶対湿度の変動がない場合、25°Cで相対湿度50%の空気は14°Cまで低下すると相対湿度100%となり、さらに温度が低下すると結露が生じる条件となったと判断できる。すなわち十分な容積があり圧力は大きく変動しない条件で、水分の出入りがない外気と遮断された密閉空間であれば、その空間の

温度と相対湿度を計測できれば、結露が生じる可能性の程度や結露時間の推定ができる。

### 3. 撤去ケーブルを用いた温湿度計測

#### 3.1 計測概要

ケーブル内部の温湿度の把握については、極短いケーブルを架橋地点付近などに曝露してケーブル内外の温度を計測した事例<sup>5)</sup>はいくつかあるものの、主に素線の温度と表面温度の関係や気温、日射と表面温度の関係に着目しており、ケーブル内の空気の温湿度に着目したものは少ない。また、このような極短いケーブルで両端が切断された状態で開放されている場合、空気の温度や素線の温度は実際に架橋されている密閉された長いケーブルのものとは乖離があると考えられる。さらに、湿度についても外気と同じになると考えられ、実橋の温湿度を推測できる情報は得られていない可能性が高い。そこで、本研究では試験体に実際に供用している斜張橋で交換のために撤去したPE被覆ケーブル（以下、「撤去ケーブル」という。）を用いて温湿度計測を行った。

### 3. 2 計測方法

撤去ケーブルは、**図-2**に示すように $\phi 7\text{mm}$ の亜鉛めっき鋼線187本により構成されており、その表面に高密度ポリエチレン被覆による防食加工を施したものである。撤去ケーブルは、片側が工場でのケーブル製作時に施工された定着具のままで、他方は**写真-1**に示すように撤去にあたって切断した状態となっている。これを十分な内空を有する**写真-2**の倉庫内で約4か月保管し、密閉直前にケーブル内部の空隙が保管している屋内の空気とほぼ同じものとなるようにした(**写真-3**)。その後、PE被覆に損傷がないことを目視調査で確認したうえで、切断面側を**図-3**の仕様で閉塞した後、さらに全体を防水気密テープNo.8067及び配管保護テープで被覆して密閉した。

温湿度の計測にはケーブル型のワイヤレス温湿度計(TKR02WS)を使用した。温湿度計の諸元を表-1に示す。計測したデータは無線通信により携帯電話等の通信端末へ随時データを送信することが可能であるため、計測開始後から密閉状態を保ったまま連続してデータを取得することができる。計測期間中は10分毎に自動で温湿度の測定を行うよう設定し、試験開始から連続して計測を行った。

温湿度計の設置にあたり、PE被覆の側面に $\phi 10\text{mm}$ でケーブル素線を損傷させないように慎重にドリル削孔を行い、ケーブルの形状保持のために集束した素線の周囲に巻き付けたフィラメントテープも孔部分だけカットして取り出し素線表面が外観できる状態とした(**写真-4**)。その後、温湿度計をセンサー部ができるだけ素線に近い空气中に位置するように素線直近まで差し込むようにして設置し、削孔部は**図-4**及び**写真-5**に示すように密閉と止水の処理を施した。具体的には、削孔箇所をブチルゴムで覆った後、自己融着型防食テープ(ラプロテープM)でブチルゴム全体を覆うように巻き付けた。

### 3. 3 計測ケース

撤去ケーブルの計測箇所及び計測期間を表-2及び**写真-6**に示す。撤去ケーブル試験体は全長が7mであり、実橋を想定してほぼ全長が18~20度の傾斜となるように架台に固定した。温湿度計は、撤去ケーブル西側の側面を基本として、延長方向に複数配置し、下部のみ断面方向の傾向を把握するために東側の側面に設置した。

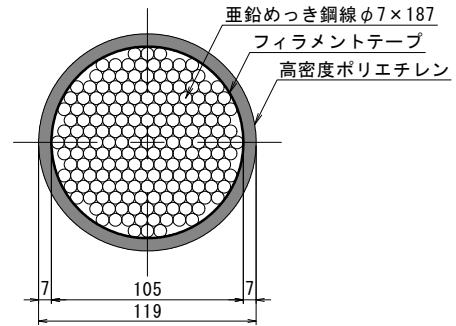


図-2 撤去ケーブル断面

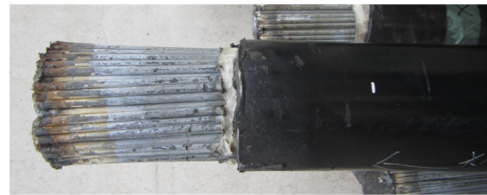


写真-1 撤去ケーブルの切断状態



写真-2 撤去ケーブルを保管した倉庫の内部



写真-3 撤去ケーブル保管状況

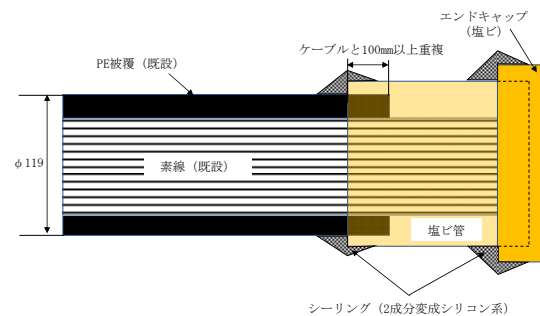


図-3 撤去ケーブルの端部処理の仕様

表-1 ケーブル型ワイヤレス温湿度計の諸元

測定範囲	温度	-40°C ~ +125°C
	相対湿度	0% ~ 95%
測定精度	温度	±0.3°C
	相対湿度	±3%
湿度センサー	高分子静電容量式	
寸法：B×L×t	43mm×72mm×6mm	



写真-4 削孔時の状況

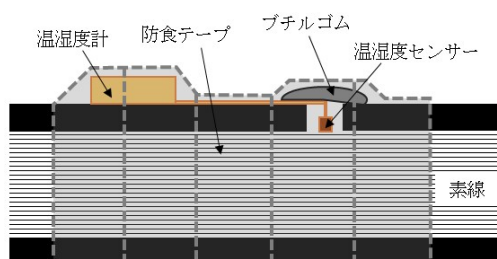


図-4 温湿度計設置概要図



写真-5 温湿度計設置状況 (撤去ケーブル)

### 3. 4 計測結果

#### (1) 延長方向の温湿度状況

図-5 に湿り空気線図にプロットした撤去ケーブルの延長方向の温湿度計測結果を示す。なお、比較として、撤去ケーブルと断面当たりの空隙面積が近い単管内部の温湿度計測結果を図-6 に示す。撤去ケーブルでの計測期間は2018/11/1～11/10である。図-5、6に示すように、いずれのデータでも、温度変化に伴って絶対湿度が変化するようなプロットとなっており、絶対湿度がほぼ一定の位置にプロットされた内部に水がない単管とは異なる結果が得られた。

表-2 撤去ケーブル計測箇所及び計測期間

計測対象	No.	計測箇所		計測期間
撤去ケーブル	下-W	下部	西向き	2018/7/20～
	上-W	上部	西向き	2019/3/31
	下-E	下部	東向き	2018/10/31～
	中-W	中部	西向き	2019/3/31
外気	—	—	—	2018/7/20～ 2019/2/6

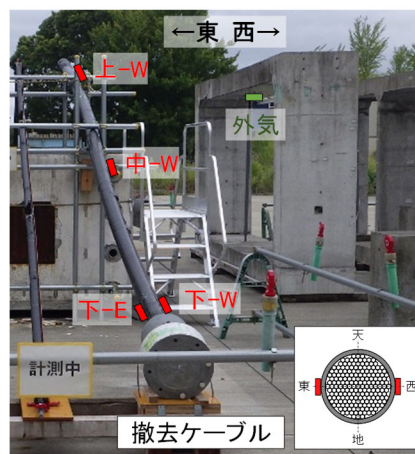


写真-6 撤去ケーブル計測箇所図

完全に密閉された閉鎖空間で、水分がすべて水蒸気として存在する場合に、水蒸気量が一定に保たれることから絶対湿度は一定と考えられ、単管のデータにおいてもこのような傾向が見られた。撤去ケーブル内の計測データがこのように絶対湿度が変化するような挙動となった原因としては、内部空間が単管のような単純な空洞ではなく密に素線があることにより、計測温度と素線間の空隙の温度に乖離が生じ、部分的に素線表面で結露が生じている可能性がある。その他にも、樹脂材である PE 被覆材の表面で水蒸気の吸収・放出が生じた可能性も考えられるが、これについては PE 被覆材である高密度 PE の吸水率は僅かであること<sup>8)</sup>や透湿度の値の根拠となる試験体の厚さ (=25 $\mu$ m)<sup>8)</sup>に対して実橋の PE 被覆材が 7mm と十分な厚さを有していることから、その影響は少ないと考えられる。

図-5 の結果からは、計測された相対湿度はいずれも 100%に至るには余裕があることから、結露により液体の水が生じていたとしてもその期間や量は限定的と考えられ、継続的に高い湿度環境になっていたり高い頻度で多くの結露水が内部に滞留しているかどうかの判断は亜鉛めっきの素線を集束した PE 被覆ケーブル

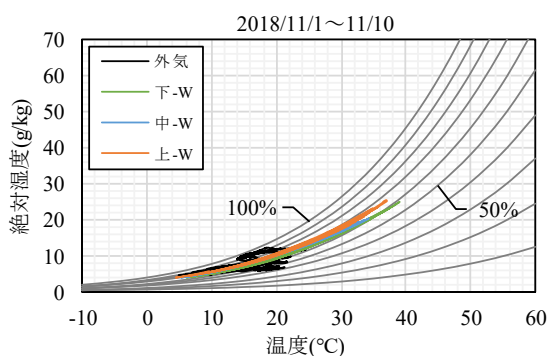


図-5 撤去ケーブルの延長方向の計測結果

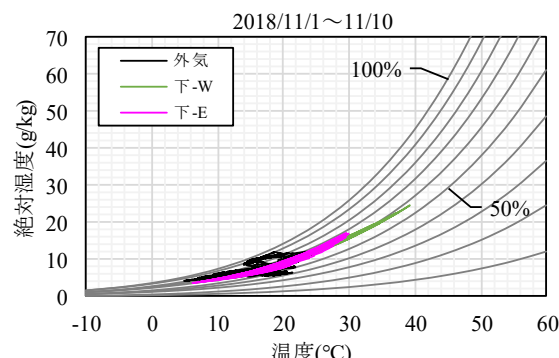
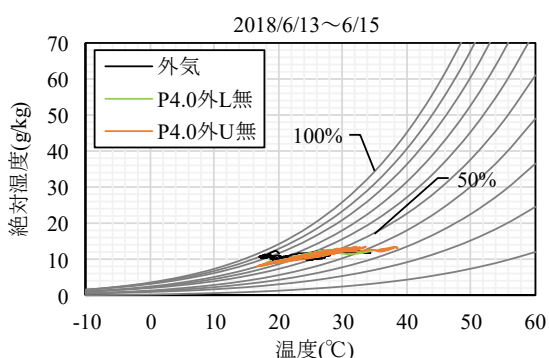


図-7 撤去ケーブルの断面方向の計測結果

図-6 単管の延長方向の計測結果  
(長さ 4m、屋外設置)

ルであっても、内部の温湿度データを空気線図上にプロットすることで、ある程度判断できる可能性があると考えられる。なお、本橋の仕様と類似した道路橋に用いられた亜鉛めっき鋼線の腐食については、北川らなどの研究<sup>9)</sup>により 100%に近い湿度環境が長期的に継続したり、極めて高い頻度で出現しない限り長期に耐久性が維持され、深刻な素線の腐食に至る可能性は少ないことが明らかにされている。

## (2)断面方向の温湿度状況

PE 被覆ケーブルは比熱の異なる材料で複雑に構成され、特に内部に集束された素線が密に存在する断面であることから、延長方向に同じ位置での断面方向の内部空気の温湿度が同じでない可能性が考えられる。そこで、同じ断面で左右対称に相対する位置から温湿度計を挿入して素線と PE 被覆の間の空気中の温湿度データを取得した。期間は 2018/11/1~11/10 で図-5 の計測と同時にやっている。

図-7 に延長方向下部の断面方向の温湿度計測結果を湿り空気線図にプロットしたものを示す。両者で日射の影響により温度変化の範囲は異なっているが、湿り空気線図上のプロットの履歴は重なるように推移し

ており、温湿度変化の傾向は断面内では概ね同じと考えられる。また、絶対湿度が変化したようなプロットが得られることも両者で同様である。

## 4. 実橋ケーブルでの温湿度計測

### 4.1 計測概要

撤去ケーブルを用いた温湿度計測結果から、実大の PE 被覆ケーブル内部の温湿度計測を行うことで、PE 被覆ケーブル内部が結露等によって常時あるいは高頻度で液体の水が存在している可能性が高いかどうかを推測できる可能性があることが明らかとなった。次に、供用中の実際の斜張橋のケーブル（以下、「実橋ケーブル」という。）で行ったケーブル内外の温湿度の長期連続計測の結果について考察する。

### 4.2 計測方法

対象とした実橋ケーブルは、図-8 に示す供用中の 2 径間の鋼斜張橋のケーブルである。本橋は地震による損傷を生じたが、ケーブルについても耐荷性能や耐久性に関して様々な観点から健全性等の評価が行われた結果、最終的に 16 本のうち、8 本 (CA3、4、7、8) が残置されたものの、8 本 (CA1、2、5、6) は交換されることとなった。写真-7 に地震後に異常が確認されたケーブルの外観の例を示す。

本研究では、図-8 に示す CA4-G1、CA8-G1 に着目し、計測期間を表-3 に示す。なお、写真-8 に示すように、本橋は路面位置付近にケーブルを桁に定着するための定着体から伸びた鞘管の先端がでており、そこにケーブルカバーが設置されている。そして鞘管の口元部分でシール材が充填されており、ケーブル表面にアクセスできるのはケーブルカバーより上の部分に限られる。計測では出来るだけ斜ケーブル全長の下で行うため、ケーブルカバー直近の位置で PE 被覆に削孔を行って温湿度計を設置した。削孔方法及び温湿度

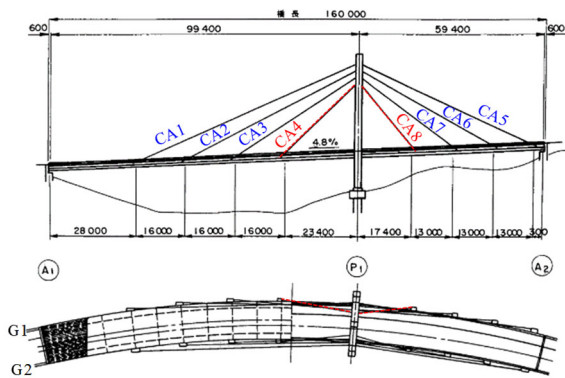


図-8 対象とする実橋ケーブルを有する斜張橋

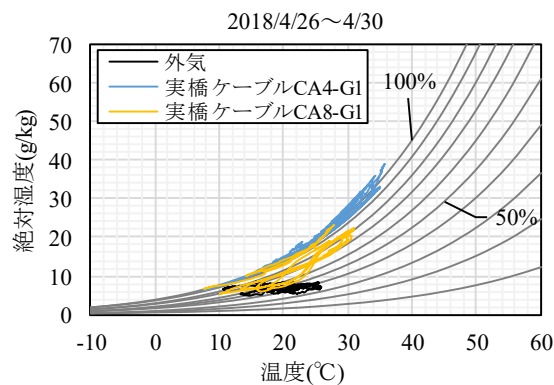


図-9 実橋ケーブルでの計測結果



写真-7 損傷したケーブルのよれ



写真-9 素線表面の外観性状の例

表-3 実橋ケーブル計測対象及び計測期間

計測対象	No.	計測期間
実橋 ケーブル	CA4-G1	2018/4/20~2019/3/5
	CA8-G1	

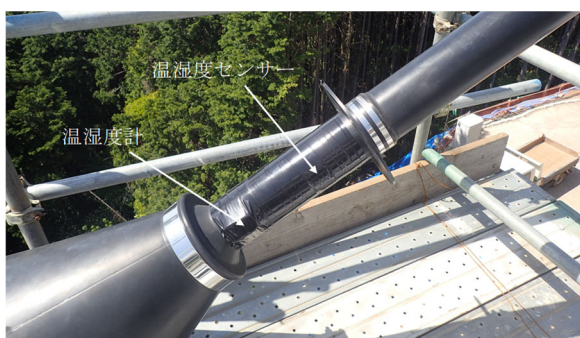


写真-8 温湿度計設置状況 (実橋ケーブル)

計の設置方法は、3章で示した撤去ケーブルの場合と同様であるが、計測中にセンサーを容易に確認できるよう図-4中のブチルゴムの代わりに、透明の気泡緩衝材を貼付したうえから防水テープを巻き付ける仕様とした(写真-8)。

#### 4.3 計測結果

図-9に湿り空気線図にプロットした実橋ケーブル

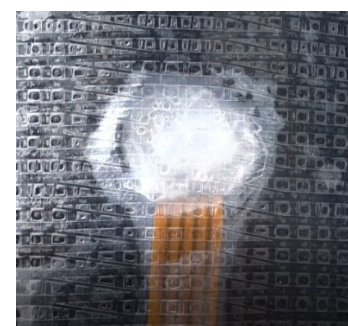


写真-10 計測孔に付着した水滴

CA4-G1及びCA8-G1の計測結果を示す。なお、計測地点近傍の気象庁のデータからは、計測期間中に降雨はなかったと考えられる。図-9に示すように、外気は温度変化に関係なく、絶対湿度一定の状態のプロットが推移するのに対して、ケーブル内部は温度変化につれて絶対湿度が変化するプロットとなっている。特に、CA4-G1では相対湿度が100%付近で推移しており、同時計測したCA8-G1との比較からも内部が高い湿度環境にあることが推測された。

CA4-G1の削孔部での素線表面の外観性状を写真-9に示す。写真-9に示すように、素線表面の腐食を疑わせるような変色や赤錆は全く見られず、亜鉛めっきの表面に軽微な変色(白錆)が見られる程度であった

が、軽微な変色すら確認されなかった他の削孔したケーブルよりもケーブル内部がより高湿度な環境にあることが疑われており、温湿度計測結果はこれらと矛盾しない。さらに、CA4-G1 で防水テープ下の計測孔の確認を行った際に、写真-10 に示すように削孔内部に結露水の付着も確認された。

CA4-G1 が CA8-G1 に比べ高湿度な環境であると推測された原因として、CA4-G1 では計測孔の上方にて照明柱との接触や補修の痕跡が見られたことから、内部に水が浸入した可能性が考えられる。なお、これに対しては被覆の補修を行ったうえで除湿対策を行い、別途検討を行った閉塞方法により閉塞を行っている。

以上のように、実橋においても、PE 被覆ケーブル内部の温湿度計測結果から、ケーブル内部に高い頻度での結露が生じていることを推測できる可能性があることが確認された。ただし、撤去ケーブルでも確認されたように長く斜め方向に張られたケーブル内部の空間の温湿度は部位によっても異なり、さらにケーブル周りの大気温度やケーブル表面の温度も日射の影響や風の影響によっても複雑に変化して均一でないと考えられる。さらに液体となった水が流下するなどにより最も厳しい湿度環境となるのは桁内にある定着部付近と考えられるが、実橋では本橋のようにケーブル最下端部の表面にはアクセスが困難な場合が多いと考えられる。

実橋のケーブル内部の温湿度計測による素線の腐食環境の評価を精度よく行うためには、様々なケーブル条件において限られた計測箇所のデータからケーブル各部の温湿度条件を推測する方法の確立が必要である。

## 5. ケーブル断面方向の温湿度解析

### 5.1 解析概要

3 章と 4 章の結果から、撤去ケーブル及び実橋ケーブルともに、ケーブル内部は密閉されているにも関わらず圧力一定の仮定における湿り空気線図上で、温度に応じて絶対湿度が変化するような挙動を示し、比較対象として実施した中空断面の単管内部での挙動と異なる傾向が見られた。また、実橋ケーブルのうち、内部の相対湿度が 100% になっているケーブルについては、他のケーブルでは見られない素線表面に軽微な白錆が発生していること、削孔部に結露水の付着を確認したことから、3 章と 4 章で用いた方法によってケーブル内部が耐久性上問題となるような腐食環境となっている可能性が高いかどうかについて推定できる可能性があることを確認した。一方、数百本以上の素線を

集束したうえで、PE 被覆されたケーブルにおいて、提案する方法により計測したケーブル内温湿度はケーブル表面付近の温湿度を計測していることとなり、それがケーブル断面を代表できているかどうかは明らかではない。

そこで、5 章ではケーブル内外の温湿度計測データを有する撤去ケーブルを対象にケーブル内部の温湿度解析を行い、ケーブル断面方向の温湿度の傾向を明らかにする。

### 5.2 解析モデル

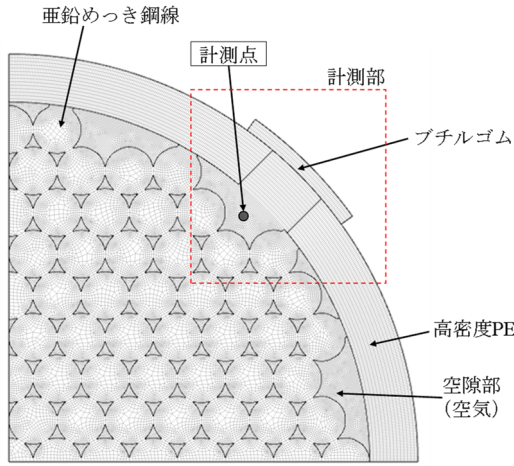
温湿度解析は、令和元年度までにケーブル内部の温湿度計測を行った図-2 の撤去ケーブル(長さ  $L=7.4\text{m}$ 、地表面からの設置角度  $\theta=20$  度)を対象とした。なお、温湿度計測は 2018/7/20~2019/5/31 の期間に 10 分毎に自動で行っている。温湿度解析にあたり、文献 10) で PE 被覆の表面温度とケーブル内部の温度の相関が明らかであったことから、まずケーブルのある点に着目すると、その点を含む短い区間の PE 被覆の熱影響がケーブル内部空間の温湿度に支配的と仮定し、解析モデルは鋼線表面及び PE 被覆表面での相変化(温度変化による空気中の水蒸気の凝縮及び蒸発)を考慮できる 2 次元軸対象モデルとした(図-10)。

解析モデルは、ケーブル素線である亜鉛めっき鋼線、PE 被覆である高密度 PE、空隙部(空気)及びケーブル内部の温湿度計測用の計測孔の閉塞材料であるブチルゴムを対象にモデル化している。この他、多数の素線を集束したケーブルの形状保持のためにフィラメントテープが巻かれているが、熱伝導による熱の移動のしやすさの物理量である熱伝導率が  $0.31\text{W/m}\cdot\text{K}$  と PE 被覆の熱伝導率( $=0.48\text{W/m}\cdot\text{K}$ )に比べて小さく、厚さも  $t=0.35\text{mm}$  と PE 被覆( $t=7\text{mm}$ )に比べて非常に薄いことからケーブル内部での伝熱特性に影響が少ないものと考え、モデル化の対象外とした。要素サイズは、狭小なケーブル内部空間での水蒸気の凝縮及び蒸発を考慮するため、空隙部が  $0.2\text{mm}$ 、それ以外は  $0.2\sim 0.5\text{mm}$  とした。また、ケーブルは数百本以上の素線を束ねたうえで、断面がほぼ円形となるよう素線を平行によりながら集束することから、素線は隙間なく配置されるものと考え、亜鉛めっき鋼線間は面接触と仮定した。

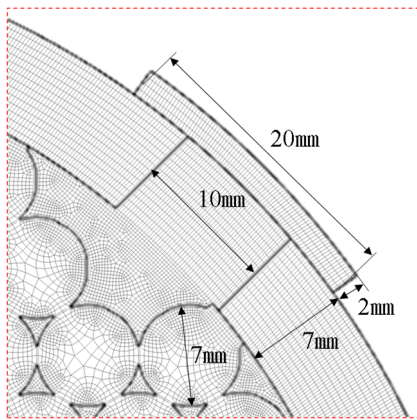
### 5.3 解析条件

解析には、汎用熱流体解析ソフトである ANSYS FLUENT を使用した。解析に用いた物性値を表-4 に





(a) モデル全体



(b) 計測部モデル詳細

図-10 対象ケーブルの解析モデル

表-4 物性値

項目	単位	値
(1) 亜鉛めっき鋼線		
密度	kg/m <sup>3</sup>	7,830
比熱	J/kg/K	489.9
熱伝導率	W/m/K	45
(2) 高密度ポリエチレン		
密度	kg/m <sup>3</sup>	950
比熱	J/kg/K	2,300
熱伝導率	W/m/K	0.48
(3) 空気		
密度	kg/m <sup>3</sup>	式(1)
比熱	J/kg/K	1006.43
熱伝導率	W/m/K	0.0242
粘性係数	Pa・s	1.7894×10 <sup>-5</sup>
(4) 水蒸気		
密度	kg/m <sup>3</sup>	式(1)
比熱	J/kg/K	式(2)
熱伝導率	W/m/K	0.0261
粘性係数	Pa・s	1.34×10 <sup>-5</sup>
(5) ブチルゴム		
密度	kg/m <sup>3</sup>	910
比熱	J/kg/K	1,800
熱伝導率	W/m/K	0.13

示す。表-4 中に乾き空気（水蒸気を含まない空気）及び水蒸気の密度 $\rho$ は理想気体の状態方程式である式(1)により算出する。

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_i \frac{C_i}{M_i}} \quad (1)$$

ここで、 $p$ は圧力、 $R$ はモル気体定数、 $T$ は温度、 $C_i$ は水蒸気と乾き空気の和である湿り空気に対する水蒸気 ( $i = 1$ ) と乾き空気 ( $i = 2$ ) の質量分率、 $M_i$ は水蒸気と乾き空気の分子量である。なお、以降は湿り空気のことを空気として示すこととする。

また、表-4 中の水蒸気の比熱 $c$ は温度  $T$  の多項式として文献 11) に示されている式(2)により算出する。

$$c = -1.156827 \times 10^{-9} T^4 + 3.216101 \times 10^{-6} T^3 - 0.002932784 T^2 + 1.603755 T + 1563.077 \quad (2)$$

なお、亜鉛めっき鋼線は熱影響によりそれ自体で伸

縮が生じるため、PE 被覆内部の体積が一定である場合、熱影響による亜鉛めっき鋼線の伸縮に伴う断面積の変化によって、ケーブル内部の空隙部の体積も変化し、それによりケーブル内部の温湿度に影響を及ぼす可能性がある。ただし、亜鉛めっき鋼線の線膨張係数は文献 12) から  $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  であり、仮に図-2 のケーブル（亜鉛めっき鋼線  $\phi 7\text{mm}$ /本 $\times 187$  本、 $L=7.4\text{m}$ ）で  $30^\circ\text{C}$  の温度上昇があった場合のケーブルの伸びに伴う亜鉛めっき鋼線 1 本当たりの断面減少量は約  $0.002\text{mm}$  で、ケーブル全体でも約  $0.374\text{mm}$  であることから、ケーブル内部の温湿度への影響は僅かと考え、物性値として考慮しないものとした。

解析は、初期データとしてケーブル下部で計測した特定時刻のケーブル内部の温湿度の実測値を与え、入力データとして解析期間の計測点付近でのケーブルの西面 1 点で計測したケーブル表面温度の実測値を与えた。

## 5. 4 解析結果

### (1) ケーブル内温湿度計測の再現解析

ケーブル内部の温湿度に影響を与える要因として、(a)ケーブル外部の水蒸気の浸透、(b)ケーブル外部の熱影響によるケーブル内部の水蒸気の相変化が考えられる。ここで、(a)については、PE 被覆の透湿性を過去に計測したデータは見当たらないが、文献 13)に示されている一般的な高密度 PE のプラスチックフィルム ( $t=25\mu\text{m}$ ) のガス透過性が  $5\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$  であり、対象とするケーブルに用いられる PE 被覆が  $t=7\text{mm}$  であることから、ガス透過性を被覆厚で補正した場合、PE 被覆では  $0.018\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$  程度の水蒸気が透過する可能性はあるが、その値は非常に小さくケーブル内部の湿度への影響も小さいと判断し、無視することとした。したがって、ここでは(b)のケーブル外部からの熱影響によるケーブル内部の水蒸気の相変化に着目する。解析では、ケーブル内部の水蒸気の相変化による物質移動量  $m$  として考慮するものとし、式(3)により求める。なお、 $m$  が正の場合は蒸発、負の場合は凝結を意味している。

$$m = \alpha\rho \left( \frac{C_{sat} - C}{C_{sat}} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ は相変化係数 ( $=0.0137$ )、 $\rho$ は空気密度、 $C_{sat}$ は飽和状態の水蒸気質量分率、 $C$ は水蒸気質量分率である。このうち $\alpha$ は水蒸気の蒸発及び凝結の速度を表すパラメータで、 $\alpha$ が大きいくほど相変化の速度が速いことを意味しており、 $\alpha$ は温湿度計測の結果とフィッティングするように設定した。なお、式(3)中の $C_{sat}$ は以下の式(4)~(6)により蒸気圧に関する実験式である Antoine 式<sup>14)</sup>により求めた飽和分圧 $p_{sat}$ から算出する。式(4)中の $A$ 、 $B$ 、 $C$ は Antoine 式より $A=8.02754$ 、 $B=1705.616$ 、 $C=231.405$ である。

$$p_{sat} = 133.322 \times 10^4 \frac{B}{T+C} \quad (4)$$

$$X_{sat} = p_{sat}/p \quad (5)$$

$$C_{sat} = \frac{X_{sat}M_{vap}}{X_{sat}M_{vap} + (1 - X_{sat})M_{air}} \quad (6)$$

ここで、 $p$ は空気圧、 $T$ は空気温度、 $M_{vap}$ は水蒸気分子量、 $M_{air}$ は空気分子量である。

図-10 中の計測点での温湿度計測結果のうち、春季 (2019/4/6) のケーブル内温度と湿度の実測値から求められる絶対湿度、ケーブル内温度及び計測点近傍で計測したケーブル表面温度の経時変化を図-11 に示す。図-11 より、7:00 から 15:00 頃にかけて絶対湿度は増加しており、これは日射の影響による PE 被覆の

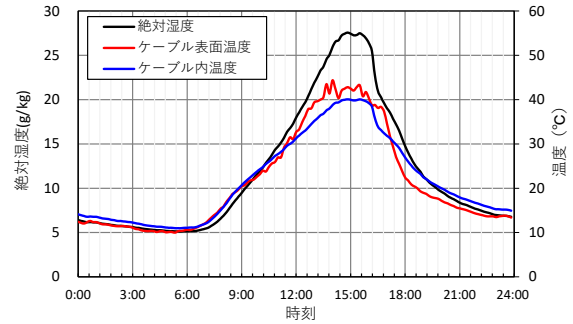


図-11 春季 (2019/4/6) の絶対湿度、ケーブル内温度及びケーブル表面温度の経時変化

表面温度の上昇に伴いケーブル内温度も上昇し、ケーブル内部の水が水蒸気に相変化したことによるものと考えられる。一方で、日射の影響が少ない 0:00 から 6:00 頃にかけてはケーブル表面温度及びケーブル内温度の低下に伴い絶対湿度も低下しているものの、その変化量はごく僅かであることが分かる。ここで、0:00 の空気中の水蒸気量と 0:00 時点の相対湿度 ( $=64.6\%$ ) から絶対湿度は  $6.40\text{g}/\text{kg}$  であり、仮に飽和状態 (相対湿度  $=100\%$ ) を仮定した場合の絶対湿度 ( $=9.91\text{g}/\text{kg}$ ) に比べて小さいことから、式(3)より計測点付近では水蒸気の濃度勾配で蒸発が生じ、ケーブル内部の絶対湿度が増加すると考えられるが、実際には絶対湿度に変化はあまりみられない。この原因として、集束された素線と PE 被覆、空気形成される複雑な空間構成によって、素線表面付近の局部での相変化が生じるタイミングにはばらつきがあり、ケーブルの断面構成の特徴に応じて、相変化の速度の実測値は単純な空間のように一様に相変化する場合のものとは乖離が生じていることが考えられる。ただし、これを検証するためには狭小な空間での複雑な水蒸気の挙動をマイクロレベルで再現する必要があるが、本研究ではケーブル内部の局所的な結露や蒸発の影響を考慮したみかけの相変化速度を評価することで、計測されたような相変化の遅れが再現されるかどうかを確認することとし、ここでは式(3)に液膜表面係数 $\varepsilon$ を考慮した式(7)により解析を行うこととした。

$$m' = \alpha\rho \left( \frac{\varepsilon C_{sat} - C}{C_{sat}} \right) \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon$ については参考となる知見がないため、仮に 0:00~6:00 で最少となる 6:00 時点での絶対湿度  $5.13\text{g}/\text{kg}$  と同等となるよう  $0.51$  と設定した場合に、式(7)から 6:00 では相変化が生じない一方で 0:00 では凝結が生じることとなり、実際の温度変化と相変化の関

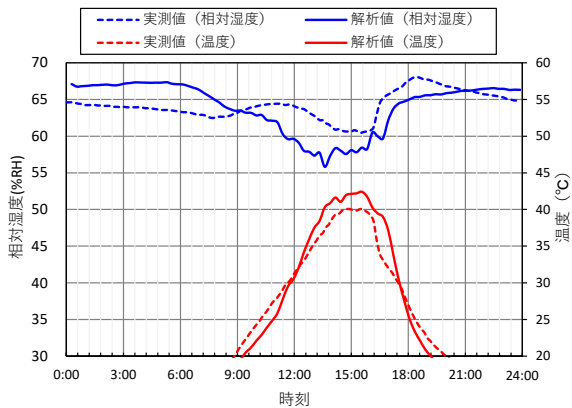


図-12 春季 (2019/4/6) のケーブル内温湿度の実測値と解析値の比較

係で矛盾が生じる。したがって、本研究では 0:00~6:00 にかけての相変化が僅かであり、また実際の温度変化と相変化の関係を考慮し、0:00 時点での絶対湿度 6.40g/kg とほぼ同等となるよう、0.65 に設定した。

図-12 に春季 (2019/4/6) のケーブル内温湿度の解析結果を実測値と合わせて示す。なお、図-12 は温度変化に伴う相対湿度への影響を確認するため、温度変化の大きい昼間に着目して表示している。図-12 より、式(7)を用いた解析によって、温度については解析値が実測値に比べ上昇・下降速度が若干早くなっており、これは温湿度計測の結果とのフィッティングにより求めた $\alpha$ のばらつきや表-4 中の高密度 PE の密度や比熱のばらつきなどによる影響を受けていると考えられる。ただし、温度の実測値の最大付近である 15:00 時点での実測値と解析値の差は約 2°C であり、温度の実測値の最大が 40°C であることを考えると誤差としては約 5% であった。さらに、相対湿度についても、温度の解析値と実測値の誤差により、相対湿度の実測値と解析値では最大で約 10% の誤差が生じているものの、文献 10) で示す絶対湿度は一定で温度に応じて相対湿度が変化する単管のような十分な内空を有する密閉空間内部の相対湿度の状況と異なり、温度に応じて絶対湿度が変化することで相対湿度が凡そ一定となる PE 被覆ケーブル内部の相対湿度の状況がある程度再現できている。したがって、液膜表面係数 $\epsilon$ を考慮することで、ケーブル内部の各部で相変化のタイミングが同じでないことをみかけの相変化として補正することで表現できることが分かった。

## (2) ケーブル断面方向の温湿度

次に、日射の影響程度が異なる場合でのケーブル内

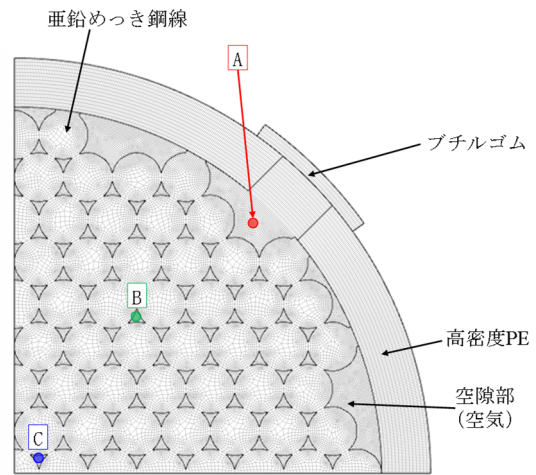
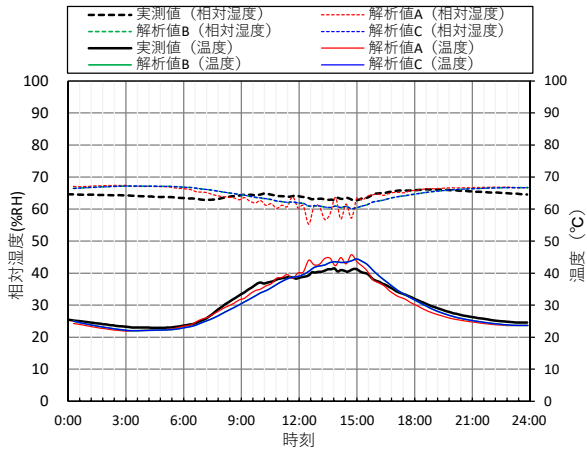


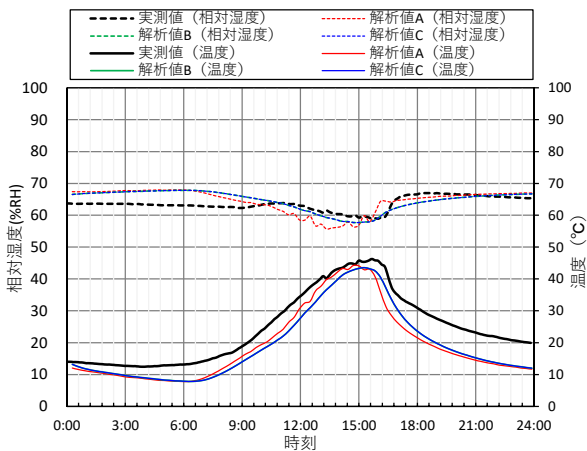
図-13 ケーブル断面方向の解析出力点

部の温湿度への影響を把握するため、異なる時季でのケーブル内外の温湿度条件において式(7)の適用性を検討するとともに、ケーブル断面方向の相対湿度の傾向を把握する。

異なる時季として、夏季 (2018/7/27) 及び秋季 (2018/9/28) を対象に、図-13 に示すケーブル内部 3 点 (A~C) の温湿度の解析結果を図-14 に示す。なお、図-14 中の実測値は図-13 中の A 点と凡そ同位置の値である。ここで、解析では初期データとして各対象日の 0:00 のケーブル内部の温湿度の実測値として与え、入力データは各対象日のケーブル表面温度の実測値を与えた。また、春季を含めた対象日のケーブル内温度とケーブル表面温度の実測値の経時変化を図-15 に示す。図-15 に示すように、時季毎の日射の影響の違いに伴うケーブル表面温度の挙動の違いによってケーブル内温度の挙動も異なっている。したがって、外気と遮断された密閉空間であれば、絶対湿度は一定のうえで、ケーブル内温度の上下によって飽和水蒸気量が変化するため、相対湿度は変化することになる。しかし、図-14 より、実際の PE 被覆ケーブル内部の相対湿度の実測値は図-12 と同様に夏季・秋季ともに凡そ一定となっており、式(7)を用いた解析ではその傾向を再現できている。なお、図-13 中の B、C 点に対応したケーブル内部での温湿度の実測値はケーブルの構造上計測が困難であるため、図-14 に示す B、C 点の解析値は実際の値と絶対値として乖離が生じているものと考えられる。ただし、解析の前提となるケーブルが密閉され、PE 被覆の熱影響がケーブル内部空間の温湿度に支配的な状況であれば、図-14 の結果から、少なくともケーブルの腐食が生じうるような熱影響に伴う極端な結露や蒸発は生じていないものと考えられ



(a) 夏季 (2018/7/27)



(b) 秋季 (2018/9/28)

図-14 夏季及び秋季のケーブル内温湿度の実測値と解析値の比較

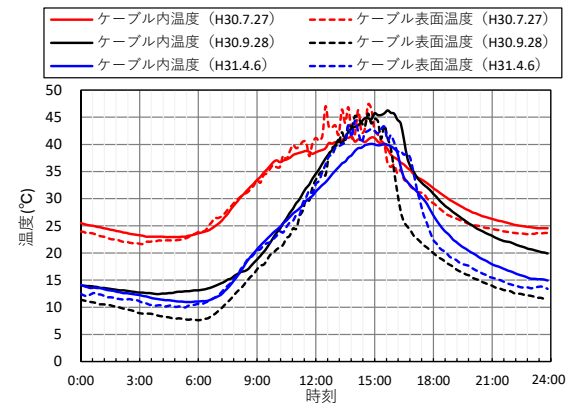


図-15 季節毎の対象日のケーブル内温度及びケーブル表面温度の経時変化

る。なお、今回の解析ではケーブル断面内は鋼線間を面接触させることで、鋼線を介した熱影響に伴う相変化のみを考慮した結果、断面内では明らかな相対湿度の変化は生じていない。ただし、実際のケーブルは図-10に示す解析モデルのように鋼線が接触した状態

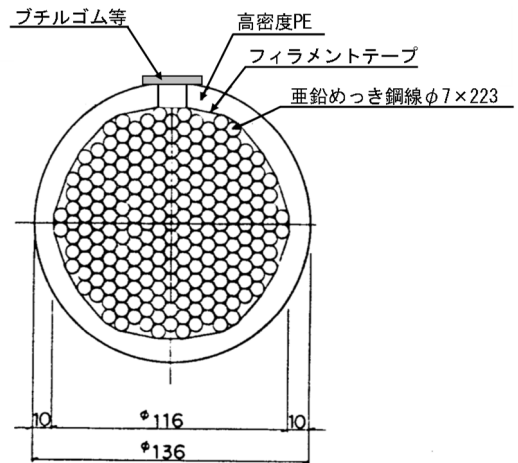


図-16 対象ケーブルの断面

でも水蒸気の移動の可能性を否定できないため、鋼線間の水蒸気の移動の実態把握と水蒸気の移動の制限条件がケーブル内部の温湿度に及ぼす影響の把握が今後の課題である。

(3)異なるケーブル断面方向の温湿度

(1)、(2)から、式(7)を用いた温湿度解析によって PE 被覆ケーブル内部の温湿度を再現可能であること、ケーブル内部の相対湿度は断面方向に差異がないことが明らかとなった。ただし、(1)、(2)の結果は図-2に示すケーブルでの温湿度の実測値に対して、 $\varepsilon$ によりフィッティングさせたものであり、他のケーブルにおいても適用可能かどうか明らかでない。そこで、図-2とは別にケーブル下部においてケーブル内の温湿度計測を行ったケーブルを対象とした温湿度解析を行う。

検討対象は、図-16に示す鋼線数、PE被覆厚の異なるケーブルである。なお、鋼線数とPE被覆厚はケーブル内部への熱影響の速度や範囲に影響を与えるが、ここではケーブル内部での局所的な結露や蒸発の影響による相変化の時間遅れが他のケーブルでも生じているかどうかを検証することを目的としているため、これらの影響は無視することとした。

解析モデルは、ケーブル内の温湿度の計測方法が図-2と同じであることから、図-10と同じ条件とするが、計測孔の設置位置が上面中央であるため、モデルを2次元全断面モデルとし(図-17)、解析条件は5.3と同じとした。入力データとして与えるケーブル表面温度は図-18に示すケーブルの上下面及び東西面の4点で計測した実測値を用い、各点間は両側の計測点での実測値を内挿して与えた。ここで、図-16でのケーブル内相対湿度の実測値は、図-2のケーブルと相対

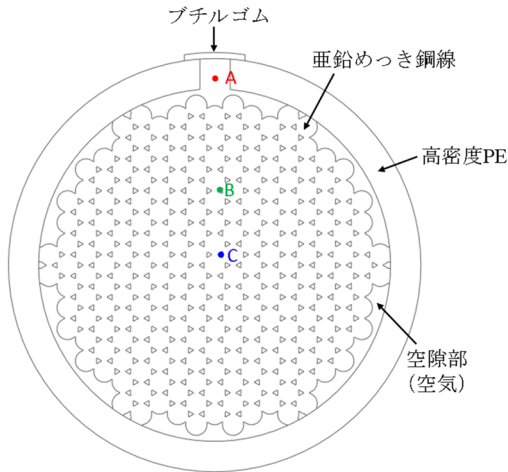


図-17 解析モデル

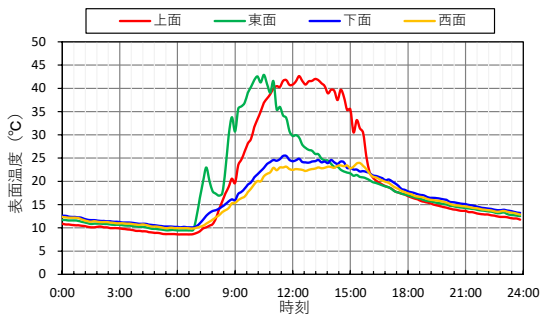


図-18 ケーブル表面温度の経時変化 (2020/11/17)

湿度の絶対値は異なるものの、時季にかかわらず相対湿度一定の傾向は同じであることを確認している。

図-19 に、2020/11/17 のケーブル内温湿度の実測値と解析値の結果を示す。なお、解析値は実測値と凡そ同じ位置である図-17 中の A 点での値で、相対湿度の算出に用いる式(7)の係数 $\alpha$ 、 $\epsilon$ はそれぞれ(1)と同様に 0.0137、0.65 とした。図-19 より、ケーブル内温度は実測値と解析値で概ね一致している一方で、相対湿度については温度に関わらず一定の傾向は同じであるが、その値には乖離がある。この原因として、初期データとして与える特定時刻の相対湿度に違いがあることが考えられる。

そこで、初期データとして与える相対湿度の実測値 (=45%) をもとに、 $\epsilon=0.45$  とした場合の結果を図-20 に示す。図-20 より、ケーブル内温度については図-19 と同様に実測値と解析値は概ね一致しており、相対湿度についても実測値と解析値が一致する結果が得られた。この結果から、図-12 において相対湿度の実測値から $\epsilon=0.65$  に設定して求めた解析結果も妥当であるといえる。

図-17 に示すケーブル断面方向 3 点 (A~C) の温

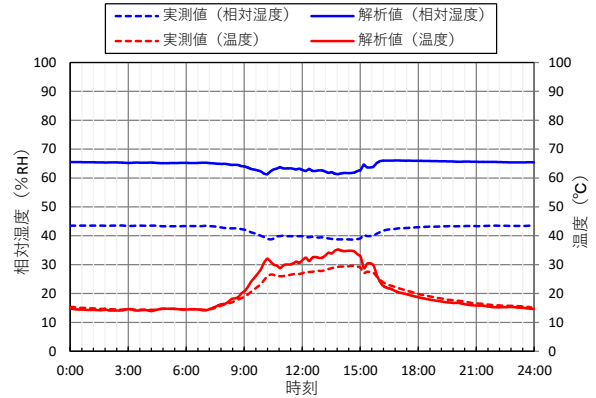


図-19 2020/11/17 のケーブル内温湿度の実測値と解析値の比較 ( $\alpha=0.0137$ 、 $\epsilon=0.65$ )

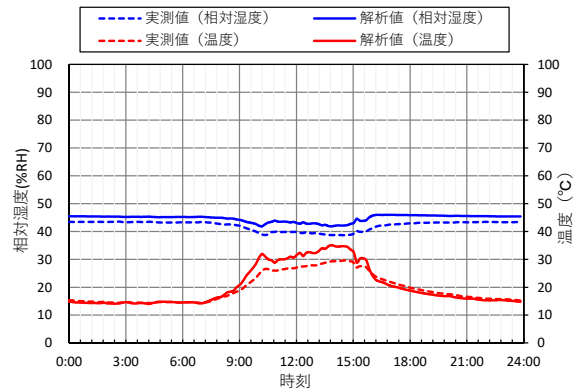


図-20 2020/11/17 のケーブル内温湿度の実測値と解析値の比較 ( $\alpha=0.0137$ 、 $\epsilon=0.45$ )

湿度の解析結果を図-21 に示す。図-21 より、A 点はケーブルの表面付近であることで日射の影響を受けやすく、その結果日中の温度が B、C 点に比べて高くなっている。そのため、A 点での飽和水蒸気量が増加し、他点に比べて日中は相対湿度が数%低くなっている。一方、ケーブル内部の B、C 点については、鋼線と PE 被覆の間の空隙部にある空気の熱伝導率が表-4 から  $0.0242\text{W/m}\cdot\text{K}$  と同じ表-4 に示す PE 被覆の熱伝導率 ( $=0.48\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) 及び重鉛めつき鋼線の熱伝導率 ( $=45\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) に比べて小さいため、日射の影響が小さいことから、相対湿度については明確な差が見られず、図-14 と同様に断面方向の相対湿度はほぼ同程度であることが明らかとなった。ただし、今回の解析ではケーブル内部が密閉され、滞水などケーブルの各位置での極端な条件の違いがなければ、対象としたケーブルの局部での温湿度に対し、局部の周囲からの影響は少ないと仮定しており、その仮定の妥当性については今後の課題である。一方、(1)~(3)の結果、ケーブル下

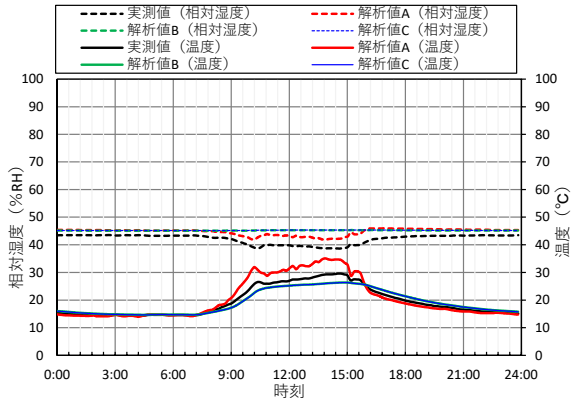


図-21 2020/11/17 のケーブル断面方向の温湿度の実測値と解析値の比較 ( $\alpha=0.0137$ 、 $\varepsilon=0.45$ )

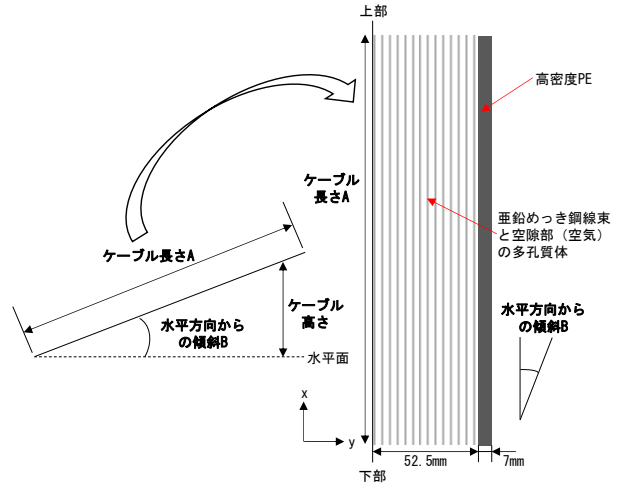


図-22 解析モデル

部という局部での温湿度の実測値と解析値の比較から概ね整合していることから、局部の温湿度は少なくとも短期的には局部のごく近傍にしか左右されていない時間帯が多い可能性が高いと考えられる。また、今回は実測値との比較においてその再現性は確認できたものの、みかけの相変化に対して主たる影響要因を把握するために、素線数、ケーブル内部の空隙面積、PE 被覆厚を変えた場合のケーブル内の相対湿度の感度解析を実施するなど、 $\varepsilon$ の工学的な意味を明らかにすることは今後の課題である。

表-5 解析ケース

ケース	ケーブル長さ A (m)	水平方向からの傾斜 B (°)	ケーブル高さ (m)	初期データ (ケーブル内温湿度)		入力データ (ケーブル表面温度)
				温度	湿度	
1	80	25	34	12.1	90	図-16
2	80	50	61			

## 6. ケーブル延長方向の温湿度解析

### 6.1 解析モデル

5章では、ケーブル内部のある点に着目すると、その点を含む短い区間の PE 被覆の熱影響がケーブル内部空間の温湿度に支配的という前提での検討であったが、実際のケーブルは、断面方向に比べて延長方向に十分な長さを有する部材を斜め方向又は鉛直方向に張り渡されているため、それらの条件がケーブル内部の温湿度にどう影響するのかを検討する。

実際のケーブルとの違いで着目すべき点としては、(a)ケーブル周囲に遮蔽物がある場合や風の影響がある場合などケーブル全長で熱影響が不均一であることの影響、(b)ケーブル内部での空気の動きによりその周囲の熱影響との相関が低くなる可能性があることが考えられる。なお、(b)のケーブル内部で空気が動く理由としては、(a)で示した熱影響が不均一であることの影響や標高の影響等が考えられるが、実際はそれらの組合せによって影響することとなる。ここでは、まず斜張橋のケーブルを念頭に、斜め方向にケーブルが配置されていることの影響に着目することとし、ケーブル

延長方向の熱影響は均一で、標高の影響のみを考慮するため、高さ方向に長さのあるケーブルとした。

解析は、実際の橋に用いられている図-2のケーブルを対象とし、モデル化にあたってはケーブル素線である亜鉛めっき鋼線、PE 被覆である高密度 PE、空隙部 (空気) を考慮し、フィラメントテープ及び計測孔は考慮しないものとした。また、ここではケーブル延長方向の温湿度に着目するため、モデル化にあたって、ケーブル断面は鋼線束に空隙部 (空気) が混在する多孔質体で模擬したケーブル延長方向の 2 次元モデル (図-22) とし、要素サイズは断面方向 1mm、延長方向 5mm とした。なお、多孔質体で模擬するにあたって必要な、鋼線束が存在することによる流路抵抗や熱伝導率は、5.3 に示す鋼線束の形状を再現したモデルを用いた応答値と一致するように設定した。

### 6.2 解析条件

解析条件は 5.3 と同様とし、解析ケースはケーブル高さをパラメータとするため、図-22 中のケーブル長さ A を 80m に固定し、水平方向からの傾斜 B を変えた表-5 に示す 2 ケースとした。なお、解析に用いる初期データのうち、温度は 5.4(3)の対象ケーブルの上面で計測した 2020/11/15 の実測値とした (図-23)。さらに、式(7)中の  $\varepsilon$  は、表-5 に示すケーブル内部の相対湿度の初期データから 0.9 とした。

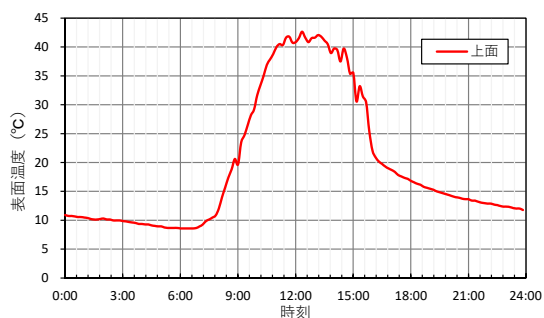


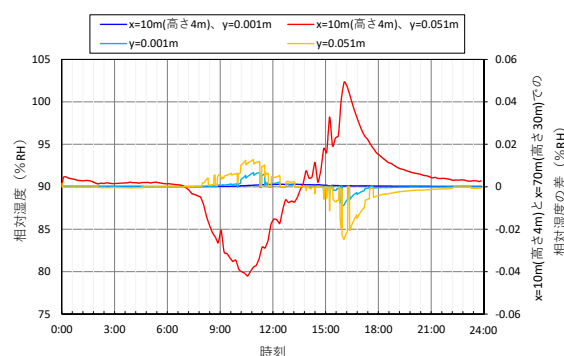
図-23 ケーブル表面温度の経時変化 (2020/11/15)

### 6.3 解析結果

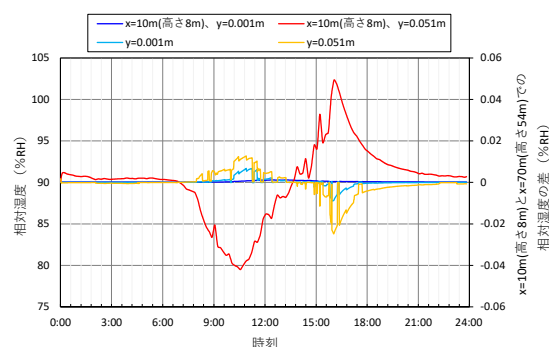
解析ケース毎のケーブル上下端部での温湿度の解析結果を図-24に示す。なお、図中凡例の  $x$ 、 $y$  は図-22に対応しており、 $y=0.001\text{m}$  はケーブル断面中心付近、 $y=0.051\text{m}$  はPE被覆と鋼線束の境界付近を指している。また、ここでは標高差による相対湿度への影響に着目しているため、図-24にはケーブル下端部である  $x=10\text{m}$  の位置での  $y=0.001$ 、 $0.051\text{m}$  の相対湿度に加え、ケーブル上端部である  $x=70\text{m}$  の位置での相対湿度との差を示しており、相対湿度の差が+側の場合には  $x=10\text{m}$  での相対湿度が  $x=70\text{m}$  での相対湿度よりも大きいことを意味している。図-24から、(a)、(b)ともにPE被覆からの熱影響を受けやすい  $y=0.051\text{m}$  ではケーブル表面温度によって相対湿度が変化していることが分かる。ただし、 $x=10\text{m}$  と  $70\text{m}$  の位置での相対湿度の差は最大でも約  $0.025\%$  であり、同じケーブルでの標高差による相対湿度の明らかな差異は見られない。このことからケーブル延長方向の熱影響が均一であれば、標高差だけによるケーブル内部の空気の動きによって、ケーブル内部の温湿度が複雑に変化する可能性は低いか、変化したとしてもその影響は支配的でないと考えられる。今後は、種々の要因によりケーブル全長で熱影響が不均一であることの影響を考慮し、ケーブル位置毎で熱影響の条件が異なる場合の検証、さらには標高との組合せについて検証を進める予定である。

### 7. ケーブル内部の腐食環境改善方法の検討

6章までの検討から、小径の削孔部でのケーブル被覆内部の温湿度計測によって、ケーブルを損傷させることなく内部のケーブル素線が腐食する可能性がある環境（以下、「腐食環境」という。）にあるかどうかを評価できる結果が得られた。一方、ケーブルの腐食状態の診断結果を踏まえた措置については、文献15)に示しているようなケーブル交換のほか、これ以上の腐食進展を防止して延命措置を図ることが考えられる。



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-24 ケース毎のケーブル上下端部での温湿度状況

そこで、延命措置としてPE被覆内部の環境を改善することで新たに腐食が生じたり、腐食が進展する可能性を低減する方法の実現可能性について、実際のPE被覆ケーブルを対象に、ケーブル内部の環境改善方法の検討を行い、その効果を明らかにすることを試みた。

#### 7.1 検討方法

検討は、図-2のケーブルが使用されていた斜張橋の別のPE被覆ケーブル ( $L=7.5\text{m}$ ) を対象に、腐食環境改善方法の実施前後のケーブル内部の温湿度を比較することにより行った。なお、対象ケーブルは3.1のケーブルと同様に、地震により被災した後、ケーブル交換のための片側が工場でのケーブル製作時に施工された定着具が取り付けられた状態で、他方はケーブルを切断したうえで撤去し現地で保管していたものを、写真-2に示す倉庫内に運搬し、約2年半保管していたものである。

検討に際しては、3.1と同様の端部処理を施し、実橋を想定して全長が  $17\sim 20$  度の傾斜となるようにケーブルを屋外に設置した (写真-11)。

温湿度計測は3.1と同様の方法により行い、図-25に示すケーブル延長方向及び断面方向の温湿度のほか、



写真-11 ケーブル設置状況

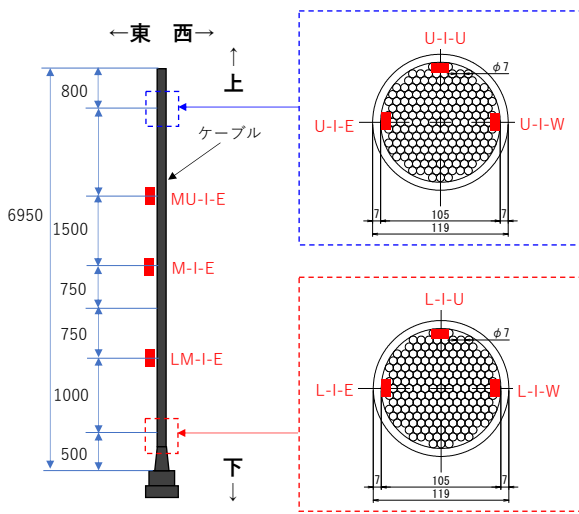


図-25 温湿度計設置位置図

ケーブル近傍での外気の温湿度を対象に、2020/9/4～2021/11/30の期間連続して実施した。

7.2 環境改善方法前のケーブル内部の湿度状況

計測開始後1か月の2020/10/1～10/30のケーブル延長方向及び断面方向の温湿度状況を図-26、27に示す。なお、ここでは3.4と同様に湿り空気線図により整理した。延長方向については、図-26に示すように、外気は気温の変動に応じて相対湿度が変化している一方で、ケーブル内部の相対湿度は延長方向のどの位置でも3.4の結果と同様に外気温の挙動に関係なく一定の挙動を示している。なお、ケーブル下部から中部であるL-I-E、LM-I-E及びM-I-Eの相対湿度がほぼ100%で推移している一方で、中部から上部にかけてのMU-I-E及びU-I-Eでは相対湿度が低くなっており、上部では85%付近で推移している。断面方向については、図-27に示すように、延長方向の上部と下部それぞれの

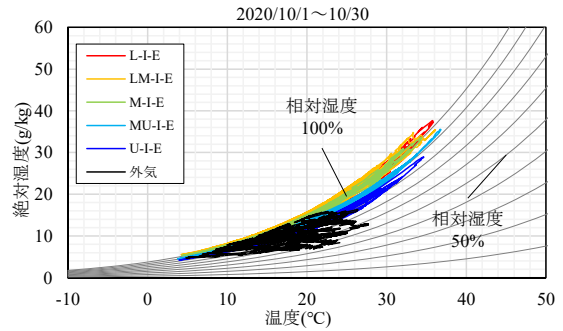
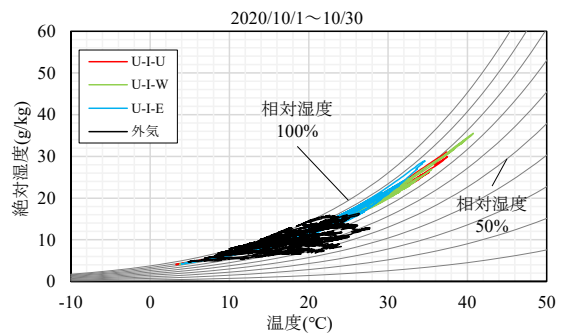
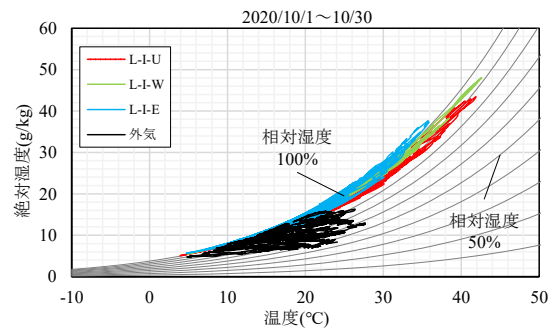


図-26 ケーブル延長方向の温湿度状況 (2020/10/1～10/30)



(a) ケーブル上部



(b) ケーブル下部

図-27 ケーブル断面方向の温湿度状況 (2020/10/1～10/30)

断面内ではほぼ一定の相対湿度となっている。ここで、対象ケーブルは7.1で示したように片側は製作時に設置された定着具が取り付けられたままで、他方は撤去時の切断によりケーブル素線が露出した状態となっているが、雨などの影響のない倉庫内で約2年半保管されていたことから、ケーブル内部が湿り空気の状態であれば、ケーブル内外の温湿度はケーブル全長に渡って平均化した状態になっていると想定していたが、計測データからはケーブルの位置によって相対湿度に差異がある。原因としては、対象ケーブルでは温湿度



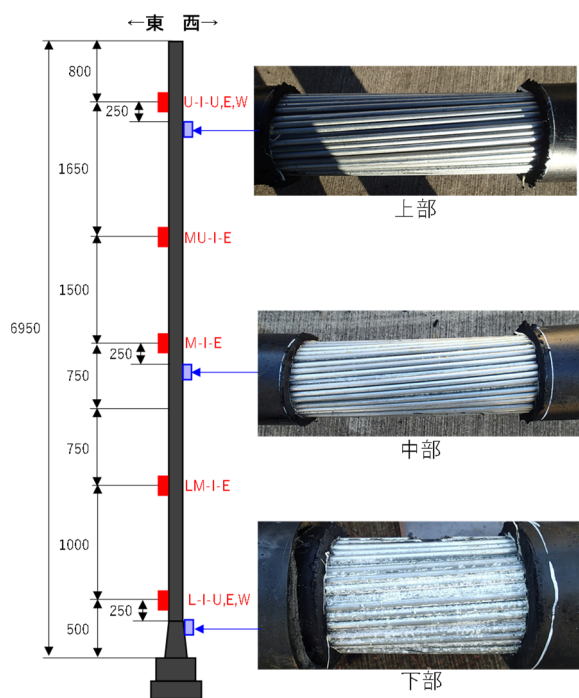


写真-12 ケーブル素線の状態 (2021/12/20)

計測以前からケーブル内部に液体としての水の影響があった可能性があるが、計測開始後約1年3か月経過した2021/12/20にPE被覆を除去し内部の素線状態を確認した結果、写真-12に示すように中部及び上部では亜鉛めっきが健全である一方で、下部では明らかな白錆が発生していたことから伺える。このように、3の方法によって計測した温湿度によって、ケーブル内部の腐食環境を評価できる。

### 7.3 環境改善実施前後のケーブル内部の湿度状況

#### (1) 腐食環境改善方法

7.2で示したケーブル下部が明らかに腐食する可能性の高い環境下にあるPE被覆ケーブルを対象に、ケーブル内部の湿度低減による腐食環境改善方法について検討する。ここで、ケーブル内部の湿度低減を行うには、内部の水蒸気量を減少させる必要がある。ケーブル内部の水蒸気量を減少させる方法として、乾燥剤などを用いて水蒸気を吸湿させる方法や何らかの方法によりケーブル内部の空気を水蒸気量の低い空気に置換させる方法がある。PE被覆ケーブルは多数の素線を束ねた上からPEで被覆したものであり、通常被覆内全体で平均して19~25%程度の空隙があるが、後者はこの空隙を使って湿度の低い空気を送り込み、ケーブル内部の湿度の高い空気を外部に排出させるもので、吊橋主ケーブルに用いられている送気乾燥がこの方法

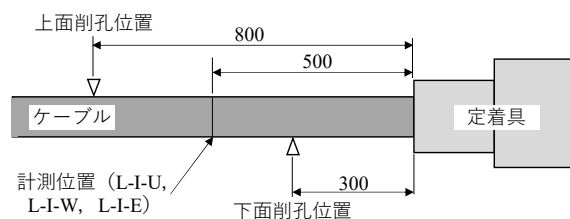


図-28 自然換気用削孔位置図

に該当する<sup>16), 17)</sup>。吊橋主ケーブルの送気乾燥は、外気を乾燥させて生成した乾燥空気を強制的に送気孔から内部の空気をケーブル外部に排出させる方法が一般的であり、主ケーブルの気密性が確保されている場合、その効果は実橋でも確認されている。ただし、乾燥空気を生成する設備、主ケーブル内に乾燥空気を送り込む設備など初期費用に加え、維持管理費用も必要となる。

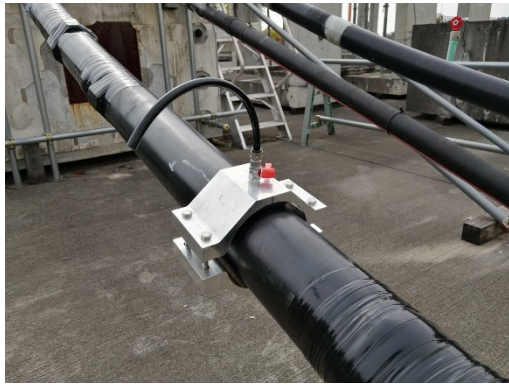
ここでは、より安価で簡便な方法としてケーブル内外の環境の差を利用して、ケーブル内に取り込まれた空気によりケーブル内部の空気を排出させる自然換気による方法と乾燥剤にケーブル内部の水蒸気を吸湿させる方法について検討する。

#### (2) 自然換気による湿度改善

自然換気は、機械等によって強制的に空気の流れを生み出すのではなく、自然風によって生じる圧力差、空間内外の温度差によって生じる空気密度の差を利用して行う換気のことを指し、建築分野ではこれまでに様々な検討が行われており<sup>例えは18), 19)</sup>、実際の建築物においても適用されている。土木分野では、トンネル内の換気方法の一部として自然換気が利用されているものの<sup>20)</sup>、道路橋での利用は筆者が知りうる限りはない。

対象ケーブルでの自然換気にあたっては、図-28に示すようにケーブル下部の2箇所(上面・下面)で素線が露出するまでPE被覆を削孔し、そのうち上面については外気の給排気を制御するために開閉可能な弁を設置し、下面については常時開放状態とした(写真-13)。なお、小径の削孔しかできない中で自然換気を確実にを行うには条件の異なる複数孔を設けるのがよく、ケーブル延長方向に十分離隔を確保したうえでケーブルの上面と下面に削孔する方が効果的と考えられるが、本研究では吊橋主ケーブルと異なりアクセスが容易でない実際の斜張橋での適用を考慮し、ケーブル下部のみ設けることとした。

自然換気はケーブル内外の温度差及び湿度差が大きいほど効果があると考えられるため、本研究ではケー



(a) 上面



(b) 下面

写真-13 自然換気用削孔部の状況

表-6 自然換気実施状況

年月日	自然換気実施時間	
	上面	下面
2021/1/8	—	11:00~
	—	
2021/2/8	1 回目	9:00~15:00
2021/2/9	2 回目	9:00~15:00
2021/2/10	3 回目	9:00~15:00
2021/2/12	4 回目	9:00~15:00
2021/2/17	5 回目	9:00~15:00
2021/2/18	6 回目	9:00~15:00
2021/2/19	7 回目	9:00~15:00
2021/2/22	8 回目	9:00~15:00
2021/2/24	9 回目	9:00~15:00
2021/2/25	10 回目	9:00~15:00
2021/3/1	11 回目	9:00~15:00
2021/3/10	12 回目	9:00~15:00
2021/3/11	13 回目	9:00~15:00
2021/3/15	—	~11:00
	—	—
2021/3/26	—	10:00~
2021/3/31	14 回目	9:00~15:00
2021/4/8	15 回目	9:00~15:00
2021/4/9	16 回目	9:00~15:00
2021/4/12	17 回目	9:00~15:00
2021/4/20	18 回目	9:00~15:00

ブル内部に取り込む外気の相対湿度が低く、さらにケーブル内外の温度差が大きくなる日中を想定して、前日に降雨のない晴天日で、2020/9~10のケーブル内外の温湿度計測結果を参考に、ケーブル内部温度-外気温>5℃かつ外気の相対湿度が60%未満となる時間帯を基本に実施した。自然換気は図-28に示す下面を解放した状態で、上面の開閉弁を開放することで行い、自然換気の実施状況を表-6に示す。なお、表中の2021/3/15 11:00~3/26 10:00の期間は下面の削孔部をブチルゴム及び自己融着型防食テープにより密閉している。

自然換気実施前後のケーブル下部の断面方向及び延長方向の温湿度状況を図-29、30に示す。なお、図中には比較として外気の温湿度状況も示している。図-29に示すように、自然換気前にはケーブル下部の断面方向いずれの計測点でも相対湿度は100%付近で推移しており、自然換気（下面常時）後1か月及び自然換気（下面常時・上面10回目）直後にも同様の挙動を示している。一方、自然換気（下面常時・上面18回目）後では、上面削孔部近傍の計測点であるL-I-Uの相対湿度が凡そ70~100%で推移しており、僅かながら除湿効果が見られる。ここで、図-31に上面の自然換気実施時のケーブル内外の温度差と外気の相対湿度の関

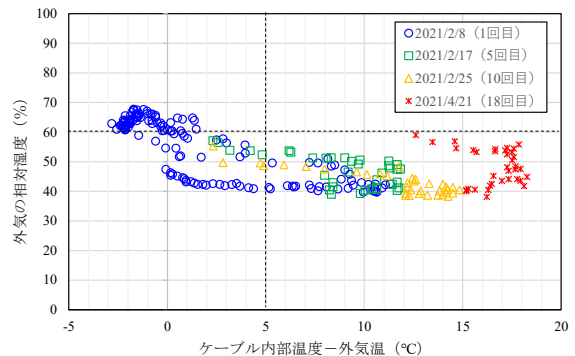
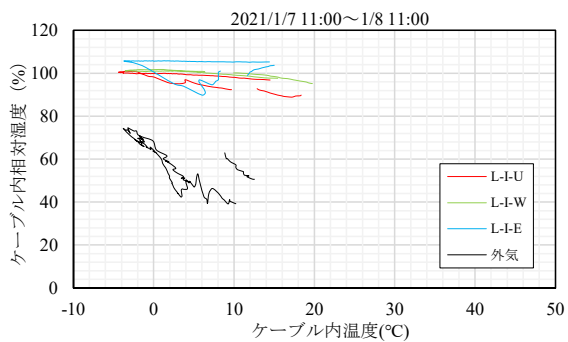
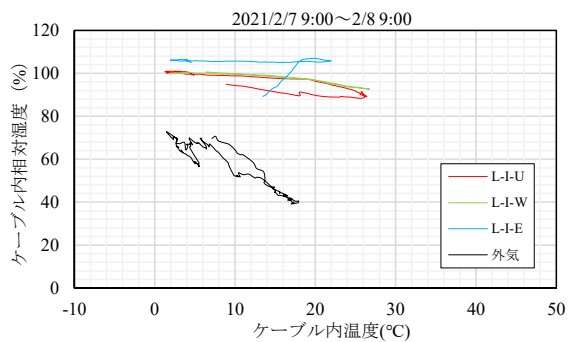


図-31 自然換気実施時のケーブル内部温度と外気温の差と外気の相対湿度の関係

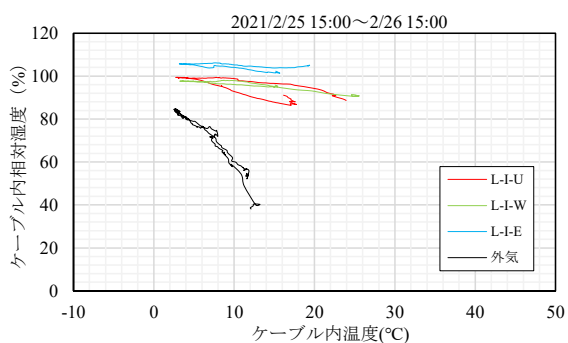
係を示す。なお、図-31で用いたケーブル内部温度はL-I-Uでの計測値である。図-31に示すように、自然換気1回目は先述した自然換気の実施条件に合致しない場合が多いため自然換気による除湿効果が低かったと考えられる。一方で、自然換気の回数を重ねるごとに自然換気の実施条件を満足するケースが多く、18回目では設定した自然換気の実施条件を満足していたことから、限定的であるものの除湿効果が得られたと考えられる。ただし、図-29、30に示すように、L-I-E、L-I-W及びケーブル延長方向の計測点(LM-I-E、MI-E、MU-I-E、U-I-E)では自然換気回数に関わらず、相対



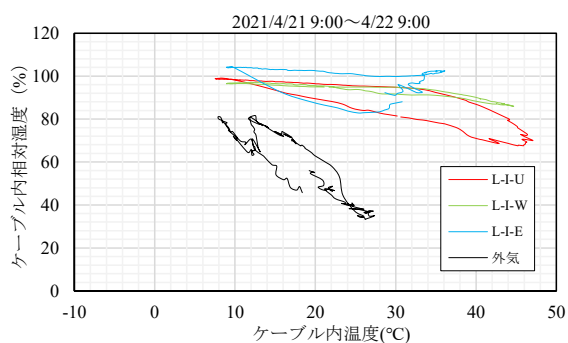
(a) 自然換気前



(b) 自然換気（下面常時）後1か月後

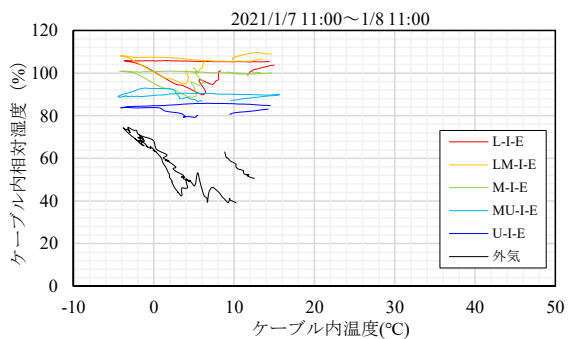


(c) 自然換気（下面常時・上面10回目）直後

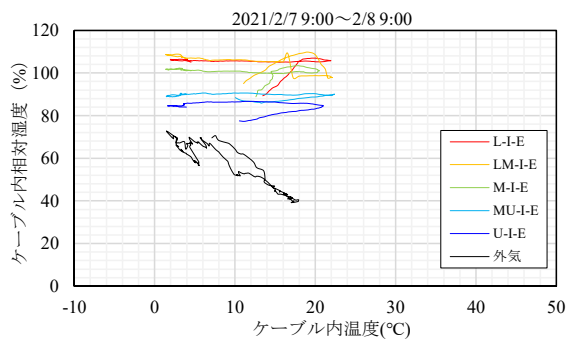


(d) 自然換気（下面常時・上面18回目）後

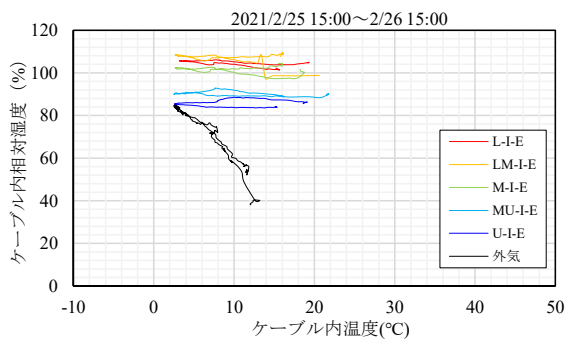
図-29 自然換気実施前後のケーブル下部の断面方向の温湿度状況



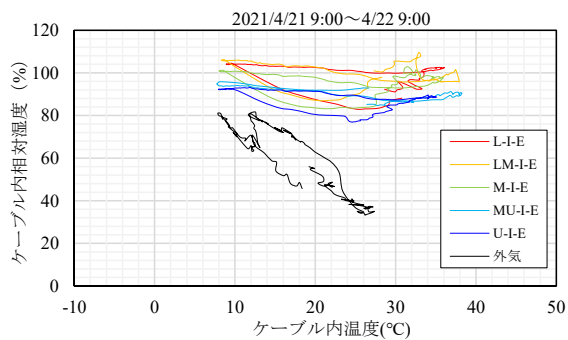
(a) 自然換気前



(b) 自然換気（下面常時）後1か月後



(c) 自然換気（下面常時・上面10回目）直後



(d) 自然換気（下面常時・上面18回目）後

図-30 自然換気実施前後のケーブル延長方向の温湿度状況



写真-14 乾燥剤の外観



写真-15 乾燥剤による除湿状況

表-7 乾燥剤による除湿状況

年月日	時間	乾燥剤数量
2021/6/30	9:40~	100g (50g/個×2 個)
2021/7/14	16:30~	200g (50g/個×4 個)
2021/8/3	~15:20	

湿度の低下は見られないことから、設定した自然換気条件ではケーブル内部全体の除湿はできていないと考えられる。

### (3)乾燥剤による湿度改善

次に、ケーブル内部の水蒸気を減少させる方法として、乾燥剤による除湿を検討する。

乾燥剤には、多孔質な物質表面に水分を吸湿させる物理的乾燥剤と水分と化学反応させることで吸湿する化学的乾燥剤の2つがあるが、化学的乾燥剤は化学反応時に発熱を伴うことから、本研究では実橋への適用を考慮し、物理的乾燥剤を用いることとした。ここで、**図-27**に示すように、腐食環境改善前では、ケーブル下部で相対湿度がほぼ100%で推移していることから、物理的乾燥剤として JIS Z 0701 (包装用シリカゲル乾燥剤)のうち、高湿度において多量の湿気を吸着し、吸着容量が大きいB形に適合するシリカゲルを不織布で包装した乾燥剤(100×130mm)を用いた(**写真-14**)。

乾燥剤による除湿は、**表-7**に示すように2021/6/30~8/3の期間で所定の量の乾燥剤を瓶に封入した後、**表-13**に示した開閉弁と接続させ、下面の削孔部は外気の影響がないよう、ブチルゴム及び自己融着型防食テープで閉塞して実施した(**写真-15**)。

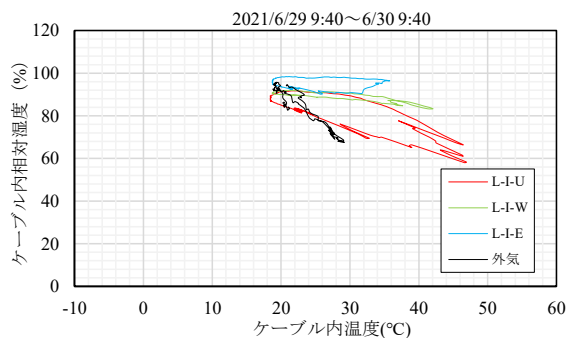
乾燥剤による除湿前後のケーブル下部の断面方向及び延長方向の温湿度状況を**図-32、33**に示す。**図-32、33**に示すように、断面方向及び延長方向とも外気温の挙動によって各計測点の温度変化及び絶対湿度の変化に幅はあるものの、相対湿度の明確な低下は見られず、

乾燥剤による除湿効果は低いことが分かった。一方、乾燥剤の吸湿性そのものには疑いがないため、吸湿できなかった理由としてケーブル内部の空気が動いていないことが考えられ、このことから自然換気の実現についても開放・閉塞の条件設定以外にも空気が動かないことも可能性として考えられる。

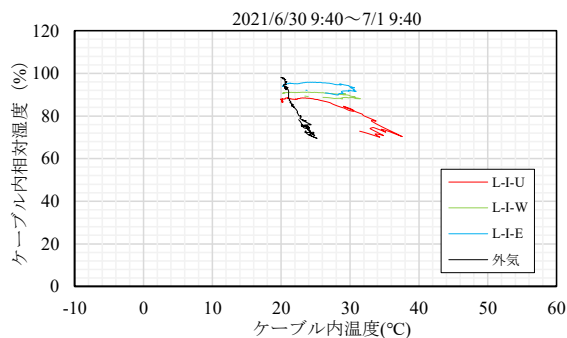
### (4)送気乾燥による湿度改善

(2)及び(3)より、自然換気による方法及び乾燥剤による方法のいずれも、素線が密に配置されるケーブル内部の構造的特徴に加え、断面方向に比べ延長方向に十分に長いケーブルでのケーブル内部の空間形状、外部からの熱影響などによる局所的なケーブル内温湿度の違いにより、自然体ではケーブル内部の空気が十分に移動できない可能性がある。そこで、ケーブル内部全長に渡って空気の移動が可能かどうかを確認するため、吊橋の主ケーブルの除湿方法として用いられている送気乾燥による方法を検討する。

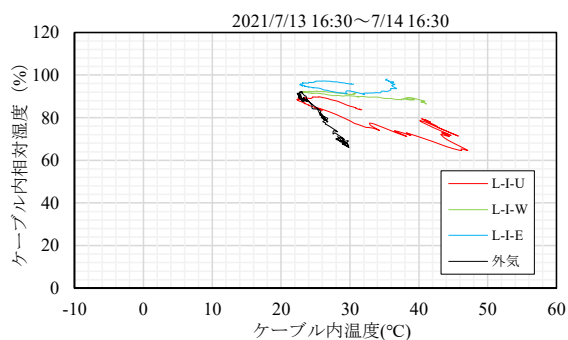
送気乾燥を行うにあたっては、送気孔と排気孔の両方が必要となり、吊橋主ケーブルの場合にはケーブル延長方向で離隔をとって孔が設けられるが、今回の対象である PE 被覆ケーブルが使用されている斜張橋では、塔からケーブルを斜めに張ることで桁を直接支持していることから、ケーブルの延長方向に離隔をとって孔を設ける場合、ケーブル下部だけではなく、路面上で高所となるケーブル上部にも設ける必要があり、設置に加えて維持管理を考えると実橋での適用が容易ではない。一方、PE 被覆ケーブルは現場施工となることで防食に対する被覆の信頼性に欠ける吊橋主ケーブルに比べ、雨の影響など外的要因を受けにくい工場で製作されることで被覆の信頼性が高いことから、外観上明らかな損傷がない限りはケーブル内部の密閉性は確保されやすい。したがって、吊橋主ケーブルのように、ケーブル延長方向に離隔をとって送気孔と排気孔を設けるのではなく、ケーブル下部で断面方向に送気



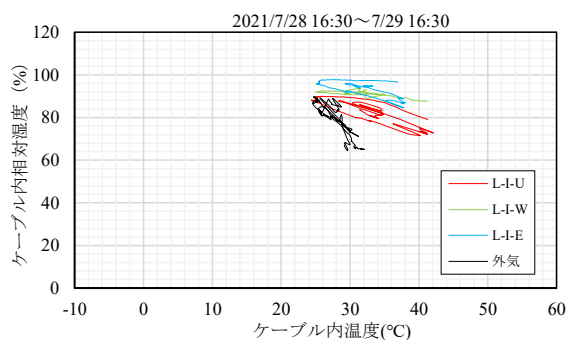
(a) 乾燥剤による除湿前



(b) 乾燥剤(100g)による除湿直後

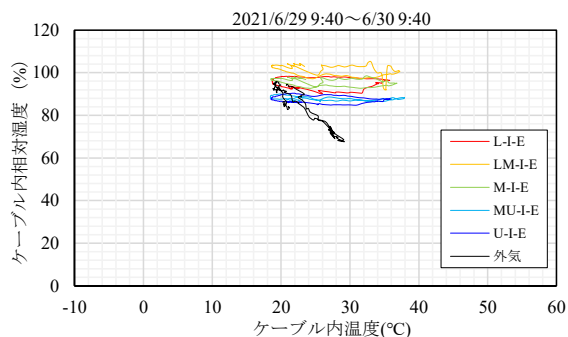


(c) 乾燥剤(100g)による除湿後13日後

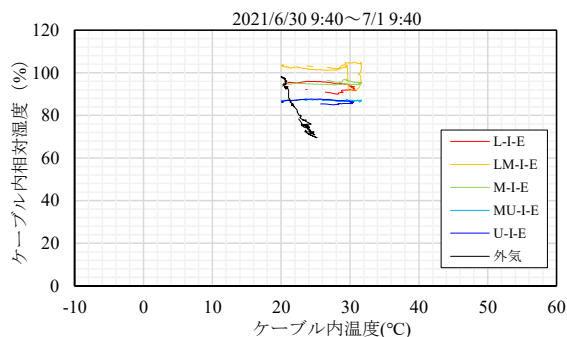


(d) 乾燥剤(200g)による除湿後2週間後

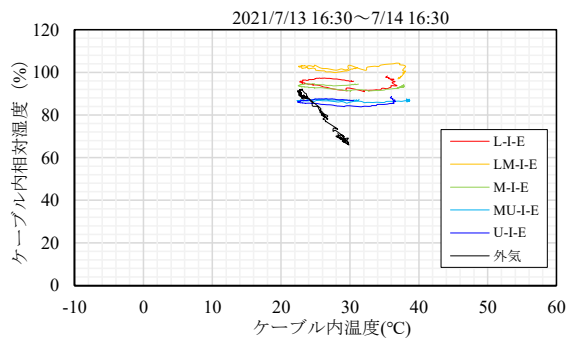
図-32 乾燥剤による除湿前後のケーブル下部の断面方向の温湿度状況



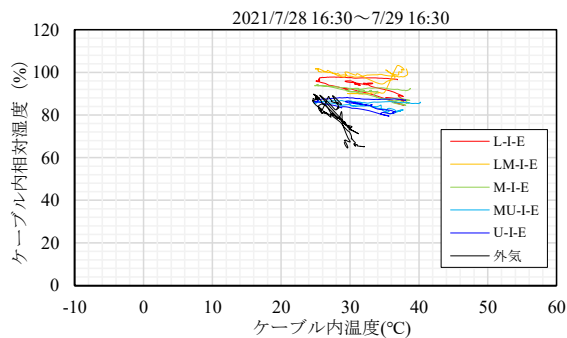
(a) 乾燥剤による除湿前



(b) 乾燥剤(100g)による除湿直後



(c) 乾燥剤(100g)による除湿後13日後



(d) 乾燥剤(200g)による除湿後2週間後

図-33 乾燥剤による除湿前後のケーブル延長方向の温湿度状況

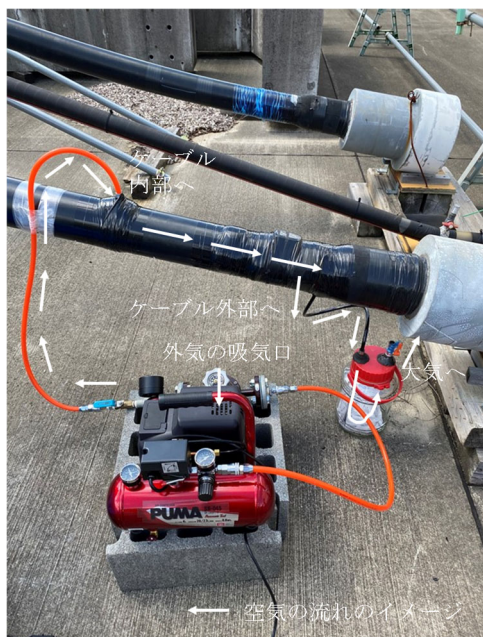


写真-16 空気圧縮機による送気乾燥状況

孔と排気孔を設けることでケーブル内部全長に渡って空気の移動が可能と考えられる。そこで、本研究では、ケーブル下部の上面と下面に送気孔と排気孔を設けて、空気圧縮機により圧縮空気を送ることでの送気乾燥を検討した（写真-16）。

送気乾燥に用いる空気圧縮機の仕様を表-8に示す。なお、今回は外気をそのままケーブル内部に送気することとし、送気圧力については本研究では便宜的に15kPaとし、表-9に示す時間に送気を行った。

送気乾燥前後のケーブル断面方向及び延長方向の温湿度状況を図-32、33に示す。なお、図-32、33中の青丸は送気乾燥開始時の計測点、赤丸は送気乾燥終了時の計測点である。図-32に示すように、送気乾燥（1回目）前の相対湿度は、ケーブル下部では60～100%の範囲で挙動しており、それが上部にかけて徐々に低下し、ケーブル上部では凡そ80%前後で挙動している。一方、送気乾燥（1回目）直後の相対湿度は、送気孔近傍のL-I-Uでは送気乾燥後直ちに30%程度まで低下し、その他の計測点も低下速度にばらつきはあるものの送気乾燥終了時には約30～50%まで低下している。また、送気乾燥（2回目）前の相対湿度は、図-33に示すように、送気乾燥（1回目）終了後、送気孔及び排気孔の弁が閉じられた状態であるため、多少ばらつきはあるものの、凡そ60～80%の範囲でほぼ一定であり、送気乾燥（2回目）直後の相対湿度の部全体の相対湿度は低下し、送気乾燥終了時点では20～40%まで低下している。このことから、被覆の密閉性が保持さ

表-8 空気圧縮機の諸元

本体寸法	375×335×310mm
本体乾燥質量	10.8kg
空気圧縮方式	レシプロ式（往復動ピストン方式）
定格電圧	AC100V
吐出空気量	41L/min（0MPa時）
	22L/min（0.45MPa時）
	17L/min（最高圧力時）
最高圧力	0.8MPa
タンク容量	4L

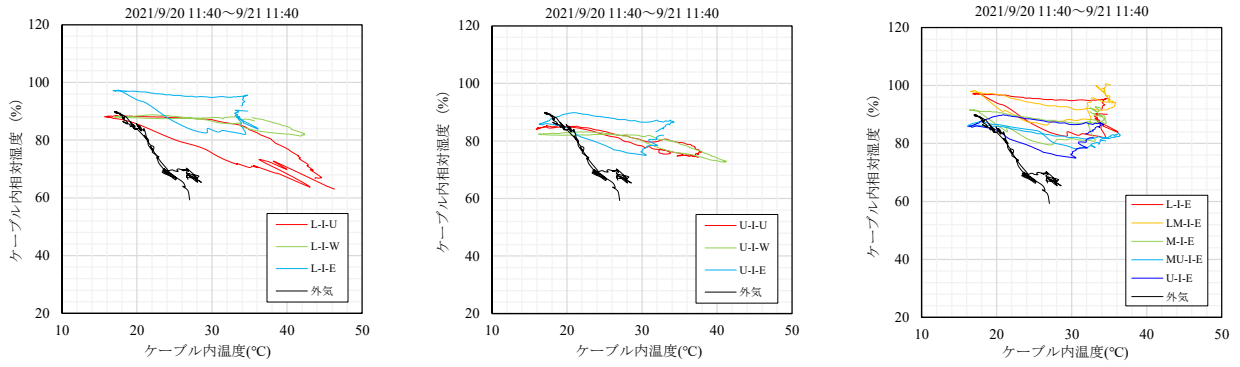
表-9 送気乾燥実施時間

送気乾燥	送気時間
1回目	2021/9/21 11:40～16:00
2回目	2021/9/28 10:00～16:00

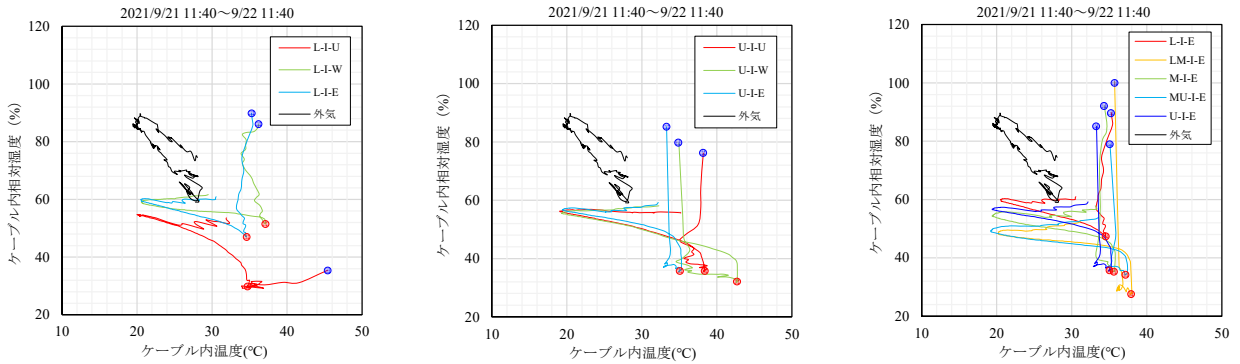
れていれば、ケーブルの一部から一定量以上の空気を流すことで、明らかに自然換気や乾燥剤を入れた場合と比べて、ケーブル全体に空気が流れることが確認できたといえる。

また、図-32、33に示すように、送気乾燥終了後いずれの計測箇所でも徐々に相対湿度が上昇し、送気乾燥（1回目）後では約60%、送気乾燥（2回目）後では約50%で一定となり、送気乾燥前よりも低い相対湿度において一定の挙動を示している。これは、送気乾燥を行うことでケーブル内部の高湿度の空気が排気孔を介してケーブル外部に排気されるものの、送気乾燥に用いた空気は除湿することなく外気そのものを送り込んでいるため、送気乾燥終了後の密閉条件下において、外気の湿度の影響を受けたことが考えられる。そのため、より低い相対湿度で管理する場合には、送気乾燥に用いる空気を乾燥した空気とすることで可能となると考えられる。ただし、被覆の信頼性の高いPE被覆ケーブル内部において、相対湿度を含めたケーブル内部の温湿度環境と腐食の関係は明らかでなく、今後はそれらの関係を把握したうえで、相対湿度の管理水準をどの程度に設定するかは今後の課題である。

各環境改善方法の実施期間のうち、送気乾燥（2回目）時の外気条件と類似の条件（日当たりの外気温の差が約10℃、外気の相対湿度が約60～90%）下での延長方向の温湿度状況を図-34に示す。図-34に示すように、同程度の外気条件にも関わらず、自然換気や乾燥剤による除湿に比べ、送気乾燥ではケーブル内部を空気が流れることで明らかな湿度改善が見られた。したがって、自然換気や乾燥剤による除湿についても、

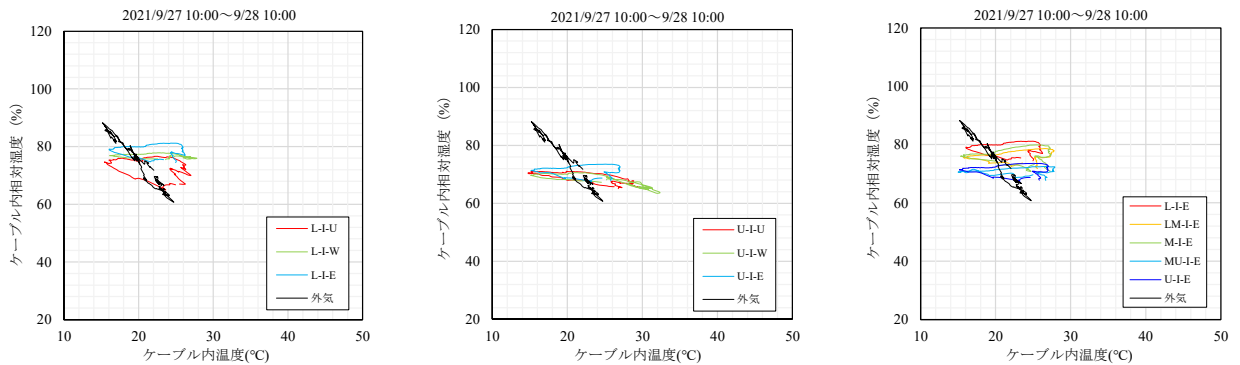


(a)送気乾燥前 (左：下部断面方向、中央：上部断面方向、右：延長方向)

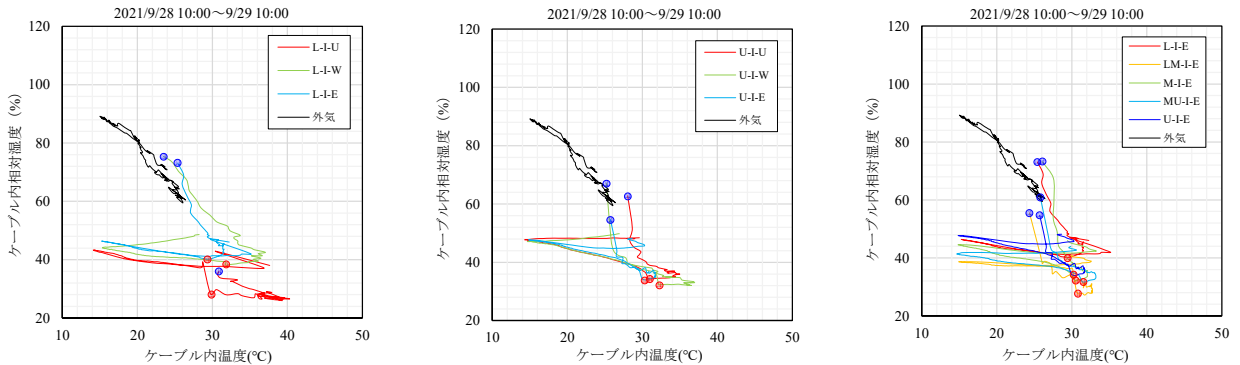


(b)送気乾燥直後 (左：下部断面方向、中央：上部断面方向、右：延長方向)

図-32 送気乾燥 (1回目) 前後のケーブル内温湿度状況



(a)送気乾燥前 (左：下部断面方向、中央：上部断面方向、右：延長方向)



(b)送気乾燥直後 (左：下部断面方向、中央：上部断面方向、右：延長方向)

図-33 送気乾燥 (2回目) 前後のケーブル内温湿度状況

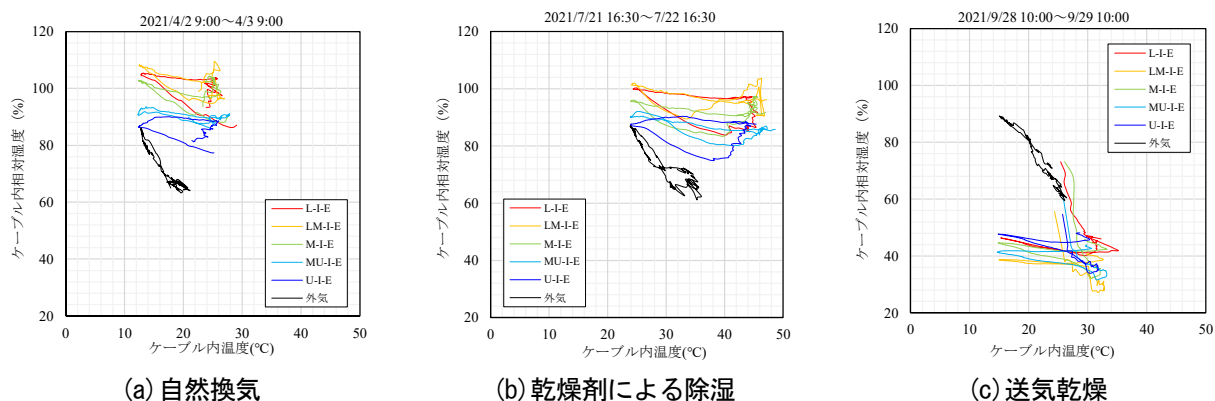


図-34 類似の外気条件下でのケーブル延長方向の温湿度状況

ケーブル内部の空気の流れを生み出せるような工夫を行うことで、除湿効果が得られる可能性がある。

## 8. まとめ

内部の素線の状態を直接確認することができない PE 被覆ケーブルを対象に、ケーブル内部の温湿度計測によって内部の腐食環境を評価する方法の構築及び内部が腐食環境にあるケーブルに対する環境改善方法の提案に向けて、種々の検討を行った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) PE 被覆の一部に小径の削孔を施して行う内部空隙の温湿度計測とケーブル素線表面の直接目視確認を行うことで、PE 被覆ケーブル内部がケーブルの耐久性上問題となるような腐食環境となっている可能性が高いかどうかについて推定できる可能性がある。
- (2) ケーブル内部が密閉され、ケーブル延長方向で外部からの熱影響が均一な PE 被覆ケーブル内部の温湿度は、汎用的な熱流体解析によって把握できる。ただし、熱影響が不均一である場合での温湿度挙動への影響や熱影響が不均一であることでの液膜表面係数 $\epsilon$ への影響程度の把握などは今後の課題である。
- (3) PE 被覆に損傷がなく密閉性が確保されている前提であれば、ケーブル下部に設けた送排気孔を用いた送気乾燥により、ケーブル下部だけでなく、ケーブル全体の湿度改善が可能である。
- (4) 狭小な空間に多数の素線が密に配置され、断面方向に比べ延長方向が十分に長い PE 被覆ケーブル内部の環境改善には、ケーブル内部の空気の流れを生み出すことを前提に自然換気による方法及び乾燥剤と自然換気の併用による方法が適用できる可能性がある。

なお、本研究の検討結果の一部は道路橋ケーブル構造便覧<sup>21)</sup>に反映している。

## 参考文献

- 1) 小川和也、前田泰男、明石良男、守谷敏之：吊橋ハンガーローブの全磁束法による腐食度評価、土木学会第 56 回 年次学術講演会、pp.186-187、2001
- 2) 小川和也、前田喜宏、明石良男、守谷敏之：吊橋ハンガーローブの非破壊検査、土木学会第 57 回 年次学術講演会、2002
- 3) 神田隆仁、船木孝仁、高橋昌平、高野優、越前谷宏昭：雪沢大橋ケーブル破断への対応と今後の維持管理について、平成 26 年度東北地方整備局管内業務発表会、2014
- 4) 空気調和衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 第 14 版 1 基礎編、p.46、2010
- 5) 新家徹、頭井洋、大谷修、湊理宙：架設途中における吊橋ケーブルの温度応答に関する研究、土木学会論文報告書、第 302 号、pp.15-30、1980
- 6) 長谷川鐸一、原田康夫、清田錬次、押尾祐三、遠藤秀雄：吊橋ケーブルの温度測定実験、橋梁と基礎、Vol.9、No.10、pp.42-48、1975
- 7) 古家和彦、北川信、中村俊一、鈴木恵太、聖生守雄：吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究、土木学会論文集、No.637/IV-45、pp.103-114、1999
- 8) 大阪市立工業研究所、プラスチック技術協会：プラスチック読本 第 21 版、pp.45-46、2015
- 9) 北川信、古家和彦、中村俊一、鈴木恵太：吊橋ケーブル送気乾燥システムの防食性能に関する研究、土木学会論文集、No.672/IV-50、pp.145-154、2001
- 10) 坂本佳也、玉越隆史、上仙靖、山本健太郎、峰徳高：PE 被覆ケーブルの内部環境の把握に関する研究、構造工学論文集、Vol.66A、pp.413-430、2020



- 11) S.Gordon and B.J.McBride : Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonations, NASA Report SP-273, 1976
- 12) 本州四国連絡橋公団: 上部構造設計基準・同解説、p.30、1989
- 13) 石谷孝佑: 機能的食品包装材料、(株)シーエムシー出版、p.73、2005
- 14) (社)化学工学協会: 化学工学便覧改訂三版、丸善、p.26、1968
- 15) 宮原史、今村隆浩、西田秀明、星隈順一: 熊本地震で被災した斜張橋の復旧対策と復旧後の状態変化の把握方法の提案、土木学会論文集 A1、Vol.76、No.4、pp.I\_461-I\_471、2020
- 16) 下村稔、杉山剛史、花井拓: 明石海峡大橋のケーブル防食システム、本四技報、Vol.22、No.86、pp.63-71、1998
- 17) 平野信一: ケーブル一般部の新防食工法、橋梁と基礎、Vol.33、No.5、pp.35-36、1995
- 18) 山本佳嗣、村上周三、石野久彌、郡公子: 温度差を利用した自然換気及びハイブリッド空調の省エネ効果に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.233、pp.1-10、2016
- 19) 山本佳嗣、田辺新一: 自然換気システムの換気口開放条件に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 81 巻、第 722 号、pp.375-384、2016
- 20) (公社)日本道路協会: 道路トンネル技術基準(換気編)・同解説、2007.10
- 21) (公社)日本道路協会: 道路橋ケーブル構造便覧、2021.11

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.2 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (2)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：上仙靖、高橋 実

#### 【要旨】

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中で、トラス橋およびアーチ橋における主構部材の腐食損傷については、橋全体系の安全性に影響を及ぼす可能性があり、構造物の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、鋼トラス橋の格点部を対象として、高強度鋼を使用する際のフィレット部の応力集中の影響について検討を行うとともに、ガセットの長さ・板厚・自由辺部の突出幅・斜材と弦材の離れに関する耐荷力の関係について検討した。その結果、高強度鋼の鋼トラス橋の格点部への適用可能性を確認するとともに、ガセットの耐荷力評価に資する知見が得られた。

キーワード：鋼トラス橋、腐食、耐荷性能、応力集中、維持管理

#### 1. はじめに

平成 19 年 8 月に発生した米国ミネソタ州の I-35W 橋の崩落事故以降、鋼トラス橋のリダンダンシーが注目され、主構部材およびトラス格点部の耐荷力評価に関わる研究<sup>1)4)</sup>が行われている。トラス橋やアーチ橋の骨組系構造では、主構部材の腐食の進行による耐荷力喪失が橋全体の安全性に影響を及ぼす可能性が高く、構造特性に応じた適切な維持管理手法が求められている。

また、鋼トラス橋では、ガセットを介して弦材と腹材を連結するため、ピン結合と仮定した計算モデルと実構挙動の乖離から二次応力が生じる。格点部における二次応力の影響を抑制するため、ガセットは作用力に抵抗する板厚を確保しつつ、フィレット形状などの構造細目について配慮する必要がある。道路橋示方書（以下「道示」という。）では、部材の軸力と部材幅よりガセットの必要板厚を鋼材強度によらず算出する設計式が規定されている。また、実橋のガセットの応力状態は複雑であることから、フィレット部の応力集中の影響も適切に考慮する必要がある。道示ではフィレット半径等の構造細目が規定されている。

このような背景から、本研究では以下の内容について検討を行った。

- ① ガセットのフィレット部の応力集中に関する検討  
現行の設計式では、鋼材強度の影響が考慮されていない。今後、鋼材強度に応じた耐荷力評価式を提示するにあたっては、高強度鋼を使用してガセット

の板厚を低減した場合の影響を把握する必要がある。ここで、トラス格点部を模擬した基本モデルにおいて、ガセットおよび弦材の板厚と応力集中の影響が懸念されるフィレット部の関係に着目して数値解析による検討を行った。

- ② ガセットの長さ、板厚、自由辺部の突出幅と耐荷力に関する検討

ガセットの耐荷力に対してガセットの長さ、板厚、自由辺部の突出幅が及ぼす影響を把握するため、これら諸元に着目したパラメトリック解析による検討を行った。

- ③ 弦材と斜材の取付けボルトの離れとガセットの耐荷力に関する検討

格点部の破壊が生じる部位の制御と、格点部の耐荷力評価式の検討のため、弦材と斜材の取付けボルトの離れに着目した鋼トラス格点部の耐荷力試験を行った。

## 2. ガセットのフィレット部の応力集中に関する検討

### 2.1 解析モデル

図-1 に検討対象の格点部の諸元を示す。載荷荷重は、ガセットに対して吊材からの引張力が鉛直上向きに作用させることとした。類似条件での弦材の板厚構成とガセット板厚の関係については、文献 7) の研究があるが、弦材に引張力や曲げ応力をそれぞれ作用させた場合に注目しており、本検討とは条件が必ずしも同じでない。また、このような作用力に対するガセット板の破壊性状にも不明な点が残されている。これら

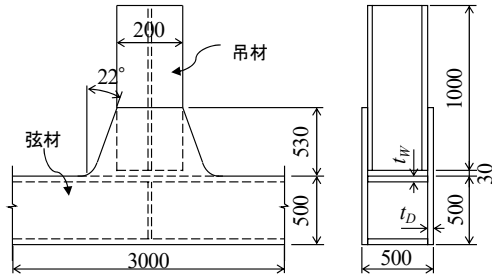


図-1 格点部の解析モデル

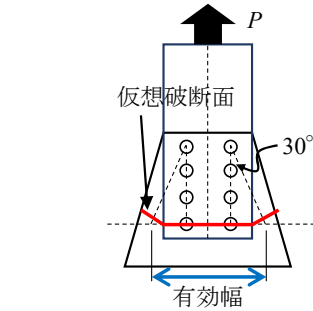


図-2 ガセットの仮想破断面<sup>8)</sup>

表-1 解析パラメータ

モデル	ガセット板厚 $t_D$ (mm)	30	9	12	18	9
	弦材フランジ厚 $t_w$ (mm)	9	9	12	18	18
	$t_w/t_D$	0.30	1.00	1.00	1.00	2.00
	載荷面積(mm <sup>2</sup> )	2136	2231	2217	2190	2231
	載荷応力(N/mm <sup>2</sup> )	1.03	0.98	0.99	1.00	0.98

を踏まえ、ここでは、図-1の格点についてソリッド要素でモデル化した弾性FEMによる解析を行った。なお、対称性を考慮して1/4モデルとした。弦材ウェブと一体となっているガセットと吊材のボルト接合範囲の節点は共有させ剛結の条件でモデル化した。また、板厚方向は4分割を基本とした。モデル化の妥当性確認のために文献1)と同載荷状態での解析を行い、結果の相違が5%以内であることを確認した。

境界条件は、弦材端部を完全拘束として、板厚算定式に用いる部材力を想定し、各モデルで同一部材力となるように引張応力を調整した。板厚のパラメータを表-1に示す。基準とするモデルは、ガセット板厚と弦材フランジ板厚が共に18mmのモデルとした。解析にはFemap With NX Nastran 10.3.1を用いた。

## 2.2 解析結果

今回対象とした単純なガセットの場合、既往の研究<sup>8)</sup>から図-2に示す仮想破断面に沿って応力が大きくなることがわかっている。米国では文献9)に示されているように、仮想的な有効幅(Whitmoreの有効幅)によってガセットプレートの応力状態を評価している。今回の検討においても上記の傾向は確認できたが、図-3のコンター図に示すようにフィレット部にも大きな応力集中が見られた。道示では、フィレット部の形状の規定を設けることで応力集中の影響を軽減している。

図-3にフィレットに沿った応力分布と板厚比 $t_w/t_D=9/9$ の応力コンターを示す。板厚比が同じであるため傾向は似ており40度で最大応力となっている。一方でガセット板厚および弦材フランジ板厚の減少に

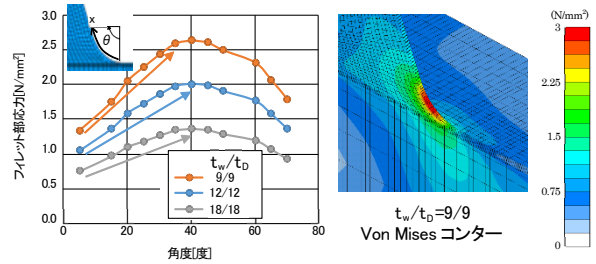


図-3 板厚を均等に減少させた場合の応力状態

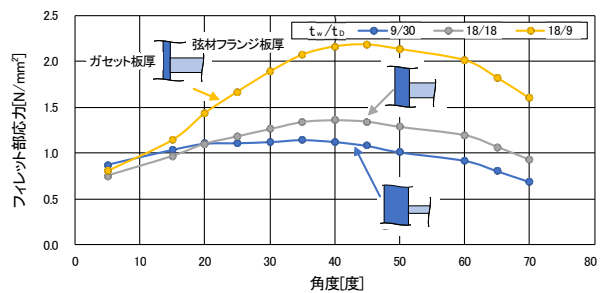


図-4 弦材の剛性変化による応力状態の影響

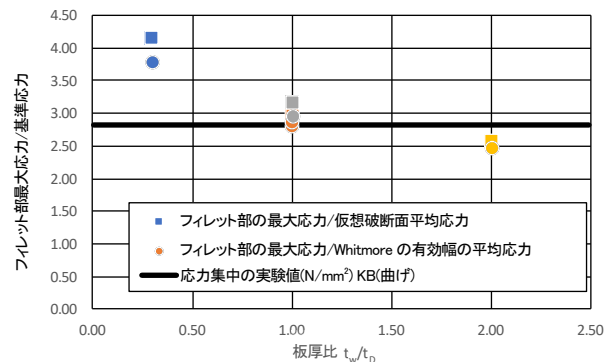


図-5 応力集中係数と板厚比の関係

伴って、応力の集中度合いが大きくなる傾向になっている。

図-4に弦材の剛性の変化に伴う応力状態の影響を示す。ガセットの板厚を極端に増加させた板厚比 $t_w/t_D=9/30$ のモデルでは、フィレット部で多少の応力集中が見られたものの板厚比 $t_w/t_D=18/18$ と比較してほとんど見られなかった。また、弦材フランジの方を

厚くさせた板厚比  $t_w/t_D=18/9$  のモデルでは、顕著な応力集中が見られた。

図-5 にフィレット部の最大応力を図-2 に示す仮想破断面および Whitmore の有効幅の平均応力で除した応力集中係数と板厚比の関係を示す。板厚比については、板厚比が小さいほど応力集中係数が大きくなる傾向となった。

以上のようにガセットに高強度鋼を用いて板厚を小さくすることを想定しパラメトリック解析を行った結果、板厚が小さくなることによりフィレット部の応力集中の度合いが大きくなるなどの板厚変化の影響があることがわかった。

**3. ガセットの長さ、板厚、自由辺部の突出幅と耐力に関する検討**

**3.1 ガセットの長さ、板厚に着目した解析モデル**

道示におけるガセットの局部座屈に対する規定は、鋼種ごとに腹材下端のガセットの長さ  $L$  とガセットの板厚  $t$  との比  $L/t$  で整理されている。この規定は、本四連絡橋における鋼トラス橋格点部の実験結果<sup>10)</sup>にもとづくものであるが、本四連絡橋における検討以降は特に見直しが行われていない。図-6 に示す腹材とガセットからなる単純な解析モデルを用いて、 $L/t$  と耐力の関係調べ、道示におけるガセットの局部座屈に対する規定の確認を行った。

表-2 に解析パラメータを示す。ガセットの拡幅角度  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=15^\circ$ 、 $\theta=30^\circ$  および  $\theta=45^\circ$  とした 4 つの解析モデルに対して、腹材直下のガセットの長さ  $L$  を 80mm から 380mm まで 75mm 間隔で変化させて解析を行った。また、ガセットの拡幅角度  $\theta=0^\circ$  および  $\theta=30^\circ$  の解析モデルに対しては、SM400 材と SM490 材の 2 種類の鋼種について解析を行い鋼種の影響を確認した。

モデル化にあたっては、腹材およびガセットの鋼板はシェル要素、高力ボルトは線形ばね要素を用いた。鋼板の特性値については、SM400 材の降伏応力を 235N/mm<sup>2</sup>、SM490材の降伏応力を 315N/mm<sup>2</sup> とし、両鋼種とも二次勾配が  $E/100$  のバイリニア型の構成則を適用した。荷重および境界条件については、腹材の上端を載荷点、ガセット下端を固定とし、載荷点の変位を腹材の軸方向に増加させる変位制御により解析を行った。なお、解析モデルの腹材の断面構成、ガセットの板厚、および高力ボルトの本数は、2 径間連続下路ワーレントラス橋の試設計をもとに決定した。

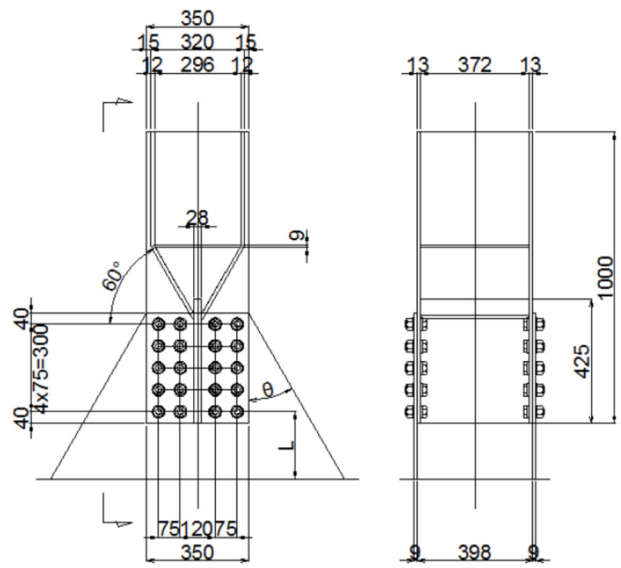


図-6 トラス格点部の解析モデル

表-2 解析パラメータ

$\theta$	( $^\circ$ )	0	15	30	45	0	30
降伏応力	(N/mm <sup>2</sup> )	235 (SM400)				315 (SM490)	
t	(mm)	9					
$L$ (L/t)	(mm)	80(8.9)					
		155(17.2)					
		230(25.6)					
		380(42.2)					

**3.2 ガセットの長さ、板厚に着目した解析結果**

ガセットの拡幅角度  $\theta=30^\circ$  で、鋼種に SM400 材を用いた解析ケースの荷重と鉛直変位の関係を図-7 に示す。鉛直変位は腹材上端の載荷点の値である。 $L/t$  が荷重と鉛直変位の関係に及ぼす影響を以下に示す。

$L/t=8.9$  では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性が生じた後も荷重はほぼ一定の勾配で増加し、解析モデルに与えた強制変位の範囲では荷重の低下はみられなかった。

$L/t=17.2$  では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性が生じた後は緩やかに荷重が増加し、最大荷重に到達後は緩やかに荷重が低下した。

$L/t=25.6$  では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性が生じた後に最大荷重に到達した。前述の  $L/t=17.2$  の場合と比較して、最大荷重に到達後の荷重の低下が大きくなった。

$L/t=33.9$  では、荷重と鉛直変位の関係で明瞭な非形性を示さずに最大荷重となり、その後は急激に荷重が低下した。

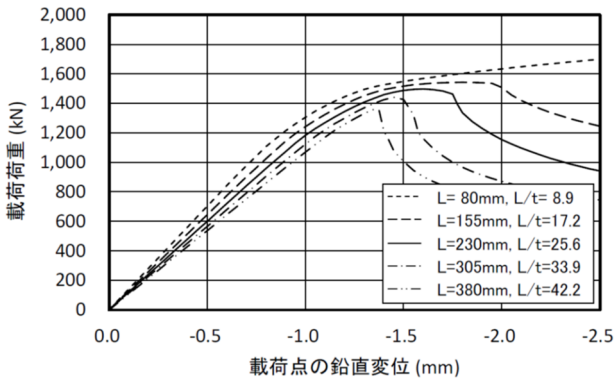


図-7 荷重と腹材上端の鉛直変位の関係 (θ=30°, SM400 材)

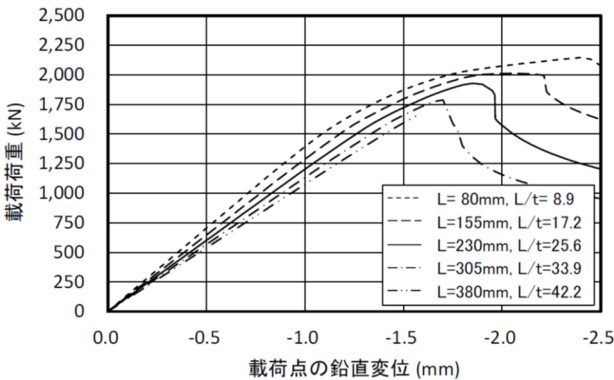


図-8 荷重と腹材上端の鉛直変位の関係 (θ=30°, SM490 材)

L/t=42.2 では、最大荷重到達と同時に急激に荷重が低下した。

この荷重と鉛直変位の関係から、SM400 材の場合、基準耐荷力曲線において座屈応力  $\sigma_{cr}$  と降伏応力  $\sigma_y$  との比  $\sigma_{cr}/\sigma_y$  が 1.0 となる座屈限界長さは L/t=25.6 付近に存在すると考えられる。他の解析ケース  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=15^\circ$  および  $\theta=45^\circ$  においても同様の傾向であった。ガセットの局部座屈に対する道示の規定は、 $L/t \leq 26$  (SM400) であり、概ね解析結果と一致した。

次に、ガセットの拡幅角度  $\theta=30^\circ$  で、鋼種に SM490 材を用いた解析ケースの荷重と鉛直変位の関係を図-8 に示す。SM490 材の場合、L/t が荷重と鉛直変位の関係に及ぼす影響を以下に示す。

L/t=8.9 では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性が生じた後も荷重はほぼ一定の勾配で増加し、最大荷重に到達後に荷重は低下した。

L/t=17.2 では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性が生じた後は緩やかに荷重が増加する。最大荷重に到達後は変位のみが増加し、その後は急激に荷重が低下した。

L/t=25.6 では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性が生じた後に最大荷重に到達し、その後は急激に荷重

表-3 解析パラメータ

$\theta$	(°)	0	10	15	20	25	30	35	40	45
降伏応力	(N/mm <sup>2</sup> )	235 SM400								
t	(mm)	9								
L (L/t)	(mm)	230(25.6)								

が低下した。

L/t=33.9 では、荷重と鉛直変位の関係で明瞭な非線形性を示さずに最大荷重となり、その後は急激に荷重が低下した。

L/t=42.2 では、荷重と鉛直変位の関係に非線形性を示さず最大荷重に到達し、その後は不安定となり計算が停止した。

この荷重と鉛直変位の関係から、SM490 材の場合の座屈限界長さは、L/t=25.6 よりやや小さい位置に存在すると考えられる。ガセットの局部座屈に対する道示の規定は、 $L/t \leq 22$  (SM490) であり、SM490 材の場合においても概ね解析結果と一致する。

したがって、道示におけるガセットの局部座屈に対する規定が安全側に設定されていることが分かった。

### 3.3 ガセットの自由辺部の突出幅に着目した解析モデル

鋼トラス橋格点部の既往の研究<sup>11)12)</sup>では、腹材端部のガセットのほか、ガセットの自由辺部も抵抗断面として考慮し、ガセットの圧縮耐荷力評価式の検討が行われている。鋼トラス橋格点部におけるガセットの形状は、腹材と弦材の交差角度などによって異なるため、ガセットの自由辺部の突出幅と耐荷力の関係を図-6 に示す格点部の単純な解析モデルを用いて調べた。表-3 に解析パラメータを示す。ガセットの拡幅角度  $\theta$  を  $10^\circ$  から  $45^\circ$  まで  $5^\circ$  刻みに変化させた 8 ケースと、 $\theta=0^\circ$  の 1 ケースを加えた計 9 ケースで比較を行った。この比較においては、鋼種を SM400 材とし、腹材下端のガセットの長さ L とガセットの板厚 t との比 L/t を、道示におけるガセットの局部座屈に対する規定のほぼ制限値  $L/t \leq 26$  (SM400) となる L/t=25.6 とした。この制限値は、軸方向圧縮力を受ける柱部材の限界細長比に相当するものである。

### 3.4 ガセットの自由辺部の突出幅に着目した解析結果

図-9 にガセットの拡幅角度  $\theta=15^\circ$  および  $\theta=30^\circ$  の解析ケースにおけるミーゼス応力の分布図を示す。いずれの分布図も最大荷重作用時のものである。ガセットの拡幅角度  $\theta=15^\circ$  の解析ケースでは、腹材直下のガ

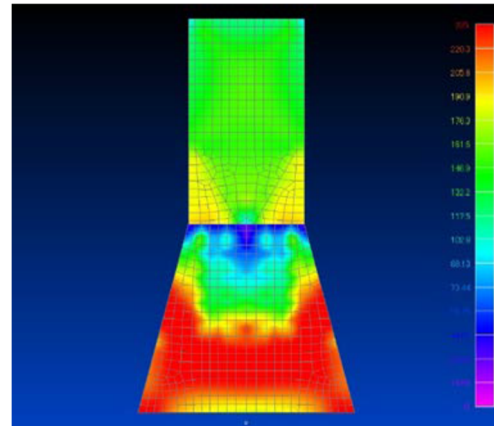
セットから降伏が始まり、荷重の増加とともに腹材下端のボルトゲージ線方向に降伏域が広がる。最大荷重に到達するとガセットの全幅が降伏に至る。

一方、ガセットの拡幅角度  $\theta=30^\circ$  の解析ケースでは、 $\theta=15^\circ$  と同様に腹材直下のガセットから降伏が始まるが、荷重の増加とともに腹材下端のボルトのゲージ線方向とボルト群の側方に降伏域が広がる。最大荷重に到達すると、ガセットの全幅は降伏には至らないが、ボルト群の側方のほぼ全高が降伏に至っている。この状況から、腹材からの圧縮力をせん断抵抗によりガセットの自由辺部に伝達されていることが分かった。したがって、腹材からの圧縮力に対するガセットの抵抗断面は、自由辺部の突出幅によって変化するため、ガセットの耐力算定にあたっては、自由辺部の突出幅を考慮することにより、より合理的に評価できることがわかった。

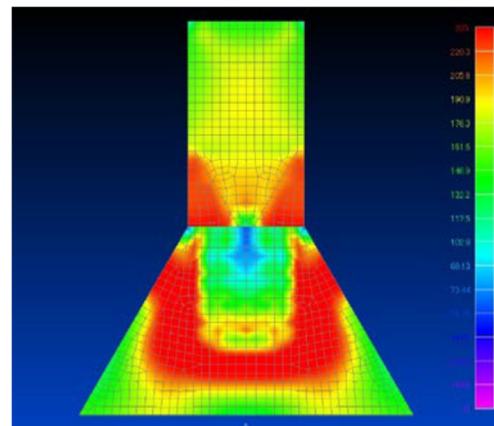
### 3.5 ガセットの耐力式の検討

図-9の最大荷重作用時の応力コンターより、ガセットの抵抗断面を図-10(a)、(b)に示す線  $b_1$ - $d$ - $b_2$  と考えた。図-10(a)は、ガセットの拡幅角度  $\theta$  が  $30^\circ$  より小さい場合で、 $\alpha_1=\alpha_2=45^\circ$  として自由辺部の断面を抵抗断面に考慮したものである。一方、図-10(b)は、ガセットの拡幅角度  $\theta$  が  $30^\circ$  より大きい場合で、文献 12) の評価方法を適用してガセットの自由辺部のせん断抵抗を考慮したものである。これらの抵抗断面に鋼材の降伏強度を乗じて各解析ケースの降伏荷重  $P_y$  を算出し、最大荷重  $P_u$  と降伏荷重  $P_y$  の比  $P_u/P_y$  と、ガセットの拡幅角度  $\theta$  との関係を図-11に整理した。なお、最大荷重  $P_u$  については解析値の最大を用いており、腹材下端のガセットの長さ  $L$  とガセットの板厚  $t$  との比  $L/t$  は 25.6 である。また、同図では、ガセットの拡幅角度  $\theta=0^\circ$  の解析ケースの  $P_u/P_y$  の値 (=1.038) を破線で示し、結果の比較基準としている。 $\theta=0^\circ$  の解析ケースを基準とした理由として、ガセットが腹材と同幅で自由辺部の影響がないため、一様な圧縮力を受ける板としてみなせることによる。

図-11より、提案してきた耐力の算定方法<sup>11)</sup>は、全ての解析ケースにおいて比較基準線から $\pm 5\%$ の範囲内にあり、自由辺部の突出幅の影響を概ね捉えていることが確認できた。同図には、文献 11) の評価方法で算出した各解析ケースの  $P_u/P_y$  についても示した。こちらの結果についても、全ての解析ケースにおいて比較基準線の $\pm 5\%$ の範囲内にあるが、自由辺部の突出幅の影響を耐力の評価方法に考慮することが課題であることが分かった。

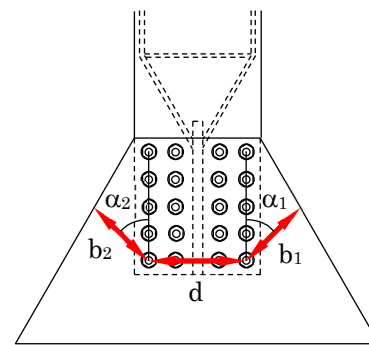


(a)  $\theta=15^\circ$

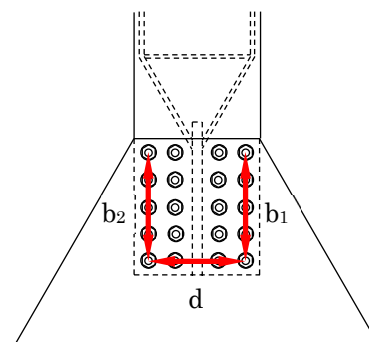


(b)  $\theta=30^\circ$

図-9 ミーゼス応力分布図



(a)  $\theta < 30^\circ$



(b)  $\theta \geq 30^\circ$

図-10 ガセットの抵抗断面

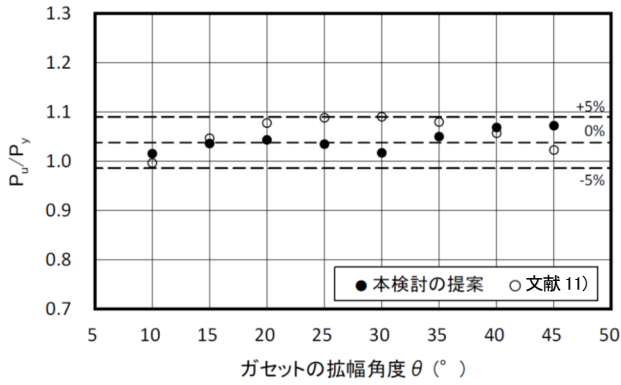


図-11 ガセットの拡幅角度と耐力算定値の関係

#### 4. 弦材と斜材の取付けボルトの離れとガセットの耐力に関する検討

##### 4.1 対象とする格点部構造の概略設計

格点部ガセット板厚が弦材ウェブと同厚となるのではなく斜材軸力により決定されるようなトラス橋諸元と格点部位置を検討するために、表-4 に示す条件下でトラス橋全体の概略設計を行った。

なお、トラス形式の条件のうち、弦材と斜材のなす角については、これまで実験検討を実施してきた撤去橋梁のトラス格点部3種類のうちいずれかと同じとなる条件とした。これは格点部用の載荷治具を既に3種類保有しており、これらを有効利用した載荷試験の実施を前提としたためである。

##### 4.2 トラス橋概略設計結果

表-4 の条件を満足するトラス橋として、図-12、表-5 に示す7つのケースについて概略設計を実施した。

表-5 に示す単純トラス橋のケース 1,2,3,4 では、いずれのケースにおいても、弦材は支間中央に近づくほど軸力が大きくなり断面板厚が厚くなるが、斜材は支間中央に近づくほど軸力が小さくなった。このため、弦材ウェブ板厚より斜材ウェブ板厚が厚くならなかった。

連続トラス橋のケース 5,6,7 では、ケース 5 のみ全格点部において弦材ウェブ板厚より斜材ウェブ板厚が厚くならなかった。一方、ケース 6,7 においては中間支点付近の格点部において弦材ウェブ板厚より斜材ウェブ板厚の方が厚くなった (図-12 中の該当格点部に丸印を記載)。ケース 6,7 を比較した結果、格点部の板厚が約 10mm と比較的薄くなるケース 7 を対象橋梁として選定した。

表-4 対象橋梁の主な設計条件

橋梁形式:	下路式鋼トラス橋 単純支持、連続形式(2 径間)の順で検討
トラス形式:	ワーレントラス(鉛直材なし) 弦材と斜材のなす角が旧銚子大橋のトラス 格点 P25d と同じとする
床版形式:	鉄筋コンクリート床版 厚さ 230(mm)
舗装:	アスファルト舗装 厚さ 80(mm)
活荷重:	B活荷重-L
添架物:	なし
道路等条件:	中央分離帯なし、歩道なし
使用鋼種:	SM490Y-H, SM400-H
適用基準:	道路橋示方書 平成 24 年

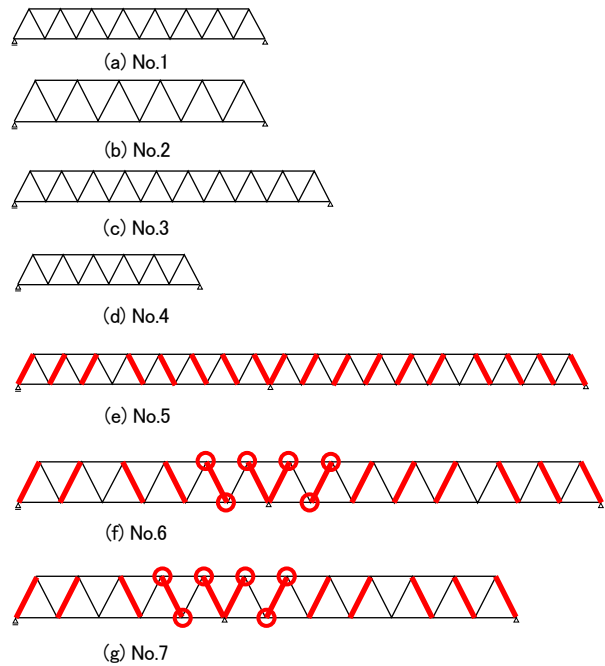


図-12 概略設計したトラス橋の一般図

表-5 概略設計した橋梁諸元

No.	形式	支間長(m)	主構高さ(m)	支間の格間分割数
1	単純トラス	68.6	8.3	8分割
2		68.6	11.4	6分割
3		85.75	8.3	10分割
4		51.45	8.3	6分割
5	連続トラス	68.6+85.75	8.3	8分割+10分割
6		68.6+91.2	11.4	6分割+8分割
7		57+79.8	11.4	5分割+7分割

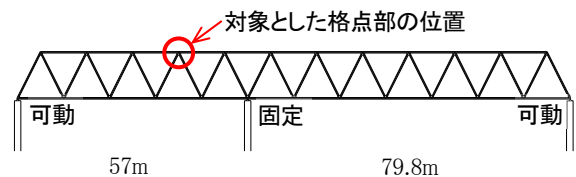


図-13 対象橋梁

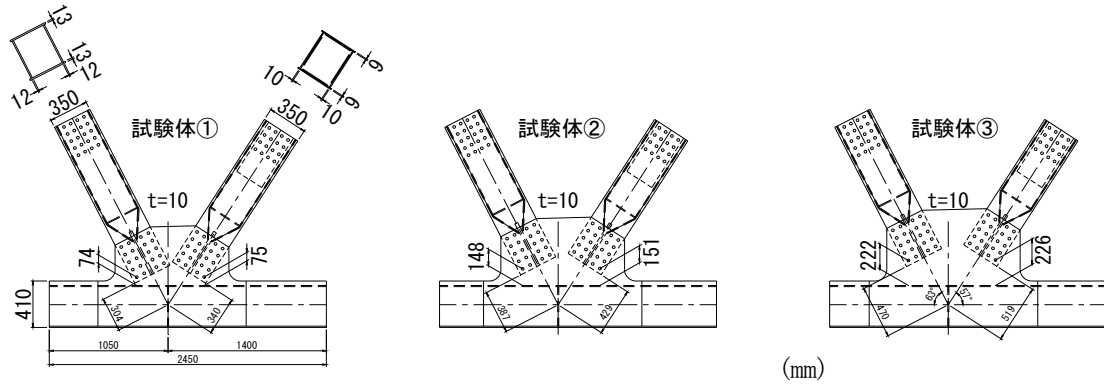


図-14 格点部の試験体の形状寸法

### 4.3 対象格点部の試験体の設計

対象橋梁は、図-13 に示す橋長 136.8m の鋼 2 径間連続下路トラス橋とし、概略設計により主構部材断面やボルト継手部を決定した。荷重試験の対象とした格点部は、既設橋に多く採用されている斜材とガセットが 2 面添接となる構造とし、ガセット板厚が斜材軸力により決定される条件（弦材ウェブ板厚より厚くなる条件）を満足する位置（図-13 の赤丸位置）とした。図-14 に格点部試験体の寸法形状を示す。斜材はいずれも箱断面であり、鋼種は SM400 である。図-15 にガセットの材料試験結果（ロール方向）を示す。ロール直角方向は省略するが同様の結果であった。腐食欠損のない健全な状態の試験体を新たに製作した。試験体数は、弦材とボルトの離れを変化させた 3 体とし、いずれも H24 道示を満足する諸元である。

製作は基本的に実橋と同様の施工としたが、斜材や弦材の箱断面部材の製作方法では次の点に配慮した。断面を構成する 4 枚の鋼板のうち 3 枚を先に組立溶接及び本溶接した後に、最後に残り 1 枚の鋼板を落とし込んで箱断面（閉断面）を溶接して完成させるのが一般的であるが、この方法では箱断面内のダイアフラムは最初の 3 枚の鋼板とは溶接されるものの、最後に落とし込む鋼板との溶接が不可能となり、構造的に荷重軸に対して対称とならない。今回の試験では、構造的な対称性を優先して、ダイアフラムはフランジのみ 2 面溶接し、ウェブとは溶接せず、荷重軸に対して構造的に対称となるよう配慮した。

### 4.4 荷重試験

図-16 に荷重試験の概要を示す。荷重試験は、まず、それぞれの斜材に圧縮荷重および引張荷重を交互に同値になるよう 2 軸荷重し、引張荷重が設計断面力とほぼ同じ 1,500kN に達するまでそれぞれ漸増させる。次に、引張力は斜材の設計断面力とほぼ同じ 1,500 kN に一定保持させたまま、圧縮力のみ圧縮破壊に至るま

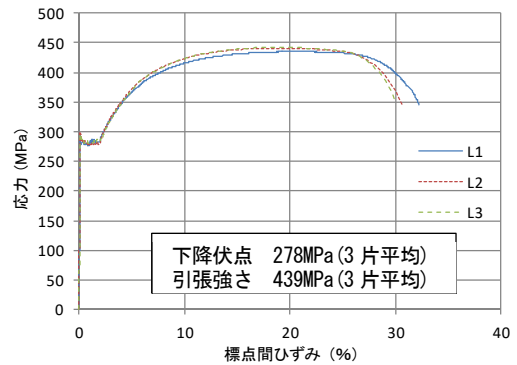


図-15 材料試験結果（ロール方向）

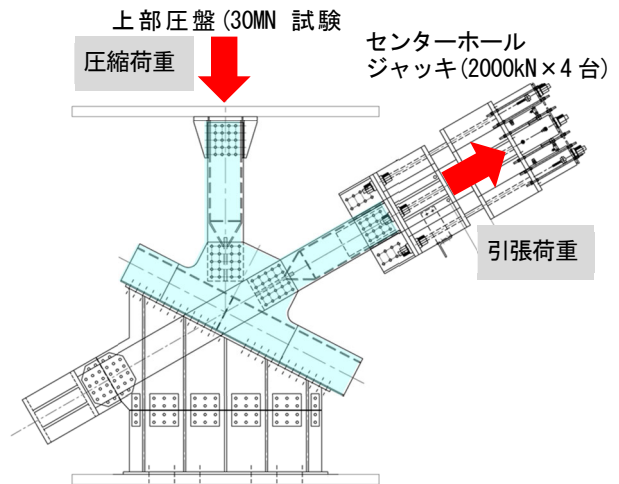


図-16 圧縮と引張の 2 軸荷重

表-6 荷重条件

試験体	圧縮着目荷重	引張着目荷重
①～③	2 軸荷重 圧縮・引張=1:1 引張側最大 1500kN	1 軸荷重



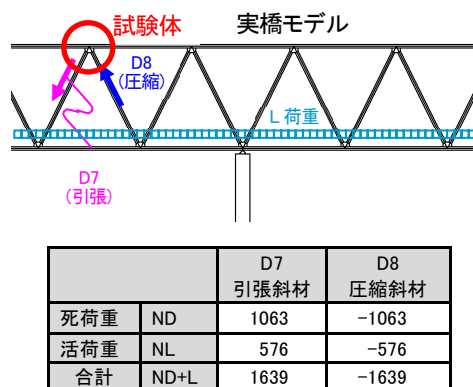


図-17 L 荷重載荷時の設計軸力(単位: kN)

で増加させた。載荷条件を表-6に示す。圧縮斜材および引張斜材のそれぞれの設計断面力を図-17に示す。

圧縮荷重は、土木研究所所有の30MN大型構造部材万能試験機(写真-1参照)により載荷し、引張荷重は載荷治具に設けた2,000kNセンタホールジャッキ4台を取付けた自作式フレームにより載荷した。

#### 4.5 載荷試験結果

##### (1) 圧縮斜材の荷重変位関係と変形状況

図-18に圧縮斜材の荷重と圧縮斜材の軸方向変位の関係を示し、写真-2に除荷後の試験体の変形状況を示す。載荷試験における圧縮最大荷重は、試験体①②③の順にそれぞれ約3,900kN、約3,600kN、約3,180kNであった。破壊形態は、試験体①が圧縮斜材の局部座屈、試験体②③がガセットの局部座屈であり、これらの発生に伴い耐力が失われたものと考えられる。図より最大荷重以降の挙動は、試験体②③と比べて試験体①が最も緩い耐力低下挙動を示した。よって圧縮斜材の局部座屈の方がガセットの局部座屈と比べて変形性能が高い傾向となった。圧縮斜材の降伏荷重は、ガセットに差込んでいるH断面部より箱断面部の方が小さく材料試験結果に基づく約5,010kNである。



写真-1 30MN大型構造部材万能試験機の全景

試験体①では圧縮最大荷重は降伏荷重に至らなかった。試験体①は圧縮斜材の箱断面からH断面に変化する遷移区間を含めて局部座屈変形しており、その部分には2面溶接したダイアフラムが含まれているため、この構造的な要因が最大荷重の大きさに影響を及ぼしている可能性がある。

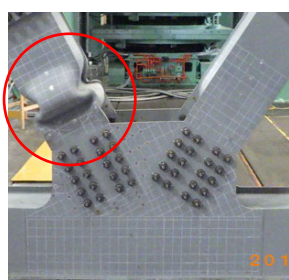
##### (2) ボルト継手部の滑りとガセットの主ひずみ

図-19に格点部試験体の圧縮斜材とガセットのボルト継手部の滑り挙動について、試験体①を代表として示す。図は、最大荷重時までをプロットした。

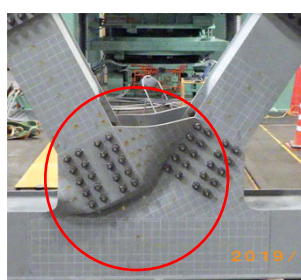
図-20に格点部試験体のガセットの主ひずみについて示す。図には、ガセットおよび圧縮斜材の降伏時と最大荷重時の分布を示している。

図-19、図-20より、ガセットおよび斜材の降伏時を超えて、3000kNくらいまでは、ボルト継手部の滑り変位は顕著に増えていないが、3000kNを超えたあたりから、急増しており、滑りが発生した可能性が高い。

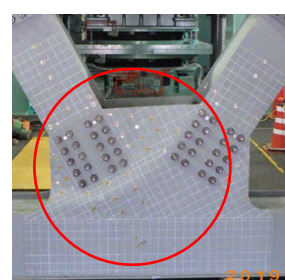
図-20より、最大荷重時には、ガセットはほぼ全域が降伏している様子が確認できる。



(a) 試験体①



(b) 試験体②



(c) 試験体③

写真-2 試験後の変形状況

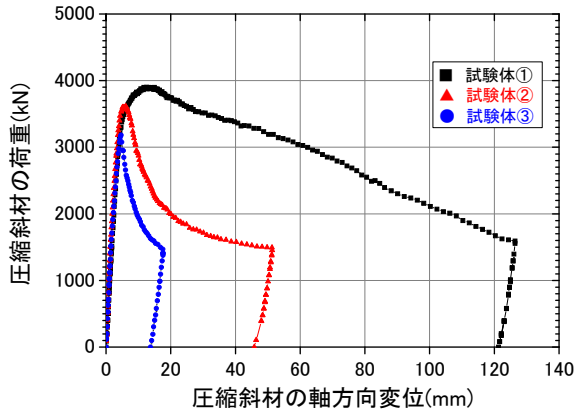
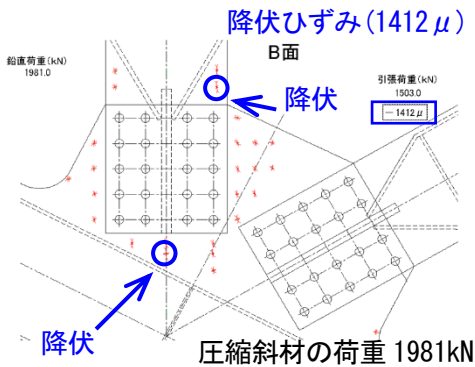
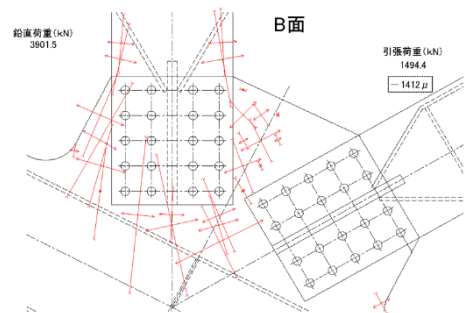


図-18 載荷試験結果



(a) ガセットおよび圧縮斜材の降伏時



(b) 最大荷重時

図-20 ガセットの主ひずみ (試験体①)

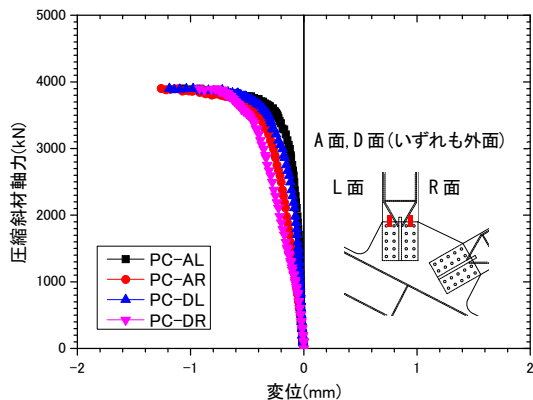


図-19 斜材とガセット間の $\pi$ ゲージ (試験体①)

### 5. まとめ

鋼トラス橋の格点部を対象として、耐荷力を評価するために、種々の検討を行った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) ガセットのフィレット部の応力集中に関する検討

高強度鋼を使用する際のフィレット部の応力集中の影響について検討を行うとともに、ガセットの長さ・板厚・自由辺部の突出幅・斜材と弦材との離れと耐荷力の関係について検討した。

その結果、高強度鋼の適用性、各種諸元とガセットの耐荷性能を明らかにした。また、ガセット板厚を薄くするほど、弦材フランジ板厚を厚くするほど、応力集中の度合いが大きくなる傾向が明らかになった。鋼材強度により単純に板厚を減少させると、応力集中が大きくなり、この影響を適切に考慮する必要があることがわかった。

(2) ガセットの長さ、板厚、自由辺部の突出幅と耐荷力に関する検討

圧縮力を受ける腹材を連結するガセットを対象に、ガセットの長さ、板厚、自由辺部の突出幅と耐荷力の関係について単純な解析モデルを用いて調べた。

その結果、腹材からの圧縮力に対するガセットの抵抗断面は、自由辺部の突出幅によって変化することが確認された。

(3) 弦材と斜材の取付けボルトの離れとガセットの耐荷力に関する検討

斜材と弦材の離れに着目した実大試験体を用いた2軸載荷試験を行い、格点部の耐荷力について検討した。その結果、以下について把握した。

a) 今回実施した試験体の諸元は、弦材と斜材の離れ量を含め、いずれも道示を満足しているものであるが、ガセットの座屈による破壊と斜材の座屈による破壊の2パターンがみられた。

b) 弦材とボルトの離れに着目した鋼トラス格点部の耐荷力については、離れ量によって次の項目が異なることがわかった。①座屈耐荷力、②座屈発生部位、③座屈モード、④座屈に伴い変形エネルギー吸収量、⑤じん性。

c) ガセットの局部座屈と比較して斜材の局部座屈の方が、耐荷力およびじん性が高く、従って、座屈に伴う変形エネルギー吸収量も高かった。

d) 今回の結果から、斜材およびガセットの耐荷力算定式を提案するために必要となる実験的基礎データが得られた。

**参考文献**

- 1) 笠野英行, 依田照彦: 米国ミネアポリス I35W 橋の崩壊メカニズムと格点部の損傷評価, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.312-323, 2010.6
- 2) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, 410-425, 2009.5
- 3) 村越潤, 遠山直樹, 澤田守, 有村健太郎, 郭路, 依田照彦, 笠野英行, 野上邦栄: 腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐荷力に着目した載荷試験, 構造工学論文集 Vol.59A, 2013.3
- 4) 山口隆司, 吉田晋侑, 橋本国太郎, 杉浦邦征: 高力ボルト摩擦接合された 2 面添接形式鋼トラス橋格点部の力学的挙動とその有効幅算定法に関する 2, 3 の考察, 鋼構造論文集 第 18 巻第 71 号, 2011.9
- 5) (独)土木研究所, 首都大学東京, 早稲田大学: 共同研究報告書第 456 号 腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する共同研究報告書—腐食劣化の生じた鋼トラス橋を活用した臨床研究報告書—, 2013.6
- 6) (独)土木研究所, 首都大学東京, 早稲田大学: 共同研究報告書第 429 号 腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する共同研究報告書—腐食の生じた鋼トラス橋格点部の FEM 解析—, 2012.1
- 7) 山本一之: トラス格点部の力学的挙動に関する研究, 東京大学学位請求論文, 1975
- 8) 小西一郎: 鋼橋 設計編 I, 丸善, 1975.3
- 9) Whitmore, R.E.: Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates, Bulletin No.16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, 1952.5
- 10) 本州四国連絡橋公団: トラス格点構造設計指針(案), 1976.3
- 11) (独)土木研究所, 首都大学東京, 早稲田大学: 腐食劣化の生じた実橋梁部材を活用した鋼トラス橋の耐荷性能評価手法に関する研究, 国土交通省 建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書, 2013.3
- 12) 川口ら: 鋼トラス橋格点部におけるガセットプレートの圧縮耐荷力評価式の適用性の検討に関する解析的研究, 鋼構造論文集, 第 22 巻第 87 号, 2015.8

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.3 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (3)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、山本将、藤木裕二、吉田英二

#### 【要旨】

PC 構造物では、厳しい塩害環境や想定外の水分浸入などによる PC 鋼材の腐食・破断などの劣化・損傷が生じると、耐荷性能が低下して重大な事象に至ることもある。本研究では、損傷を有する PC 橋について、荷重載荷される桁の耐力を実態に近いレベルで評価できる手法を開発するための検討を行った。平成 29 年度から令和 2 年度の間に、実橋載荷試験等により、耐荷性能に与える要因は PC 鋼材破断本数による他、載荷桁以外の荷重分配の影響が大きいことを確認し、損傷した PC 橋の上部工全体系格子解析モデルを用いて解析を行い、応答値の発生状況等について検討した。

キーワード：PC 橋、耐荷性能、荷重分配、上部工全体系、損傷、格子モデル

#### 1. はじめに

PC構造物では、厳しい塩害環境や想定外の水分浸入などによるPC鋼材の腐食・破断などの劣化・損傷が生じると、耐荷性能が低下して重大な事象に至ることもある。一方、既設PC橋の格子モデルを用いた耐荷性能評価において、主桁が損傷を有する場合に横桁を介して他の主桁にその影響が波及していく荷重分配の影響を評価する方法は確立されていないため、損傷を有するPC橋の上部工全体系に発生する断面力の変化の程度が明確ではない。本研究では、損傷を有するPC橋について、桁の耐力を実態に近いレベルで評価できる手法を開発するための検討を行った。平成29年度から令和元年度にかけ、実橋載荷試験やパラメータスタディのためのモデル構築・解析により、桁全体の残存耐力は推定耐力を十分に確保されており主桁単体の破壊後も

荷重分配により落橋に至らないこと、耐荷性能に与える要因はPC鋼材破断本数による他、荷重分配の影響が大きいことを確認した。令和2年度は損傷したPC橋の上部工全体系格子解析モデルを用いて解析を行い、応答値の発生状況等について検討した。

#### 2. 対象橋梁

対象橋梁（以下、本橋）は昭和35年に竣工された5連のPC単純ポステンT桁橋である。本橋の架橋位置は河口に近い海岸線から約150mの位置にあるため、現行の道示の考え方では対策区分Ⅰに該当する。架設位置環境の影響により塩害劣化が生じたため、これまで補修・補強工事が実施されたが、供用後43年を経た平成25年に架け替え工事が実施された。新設橋は平成28年に供用されたため、本橋の上部工A1～P1の1径間全体を用

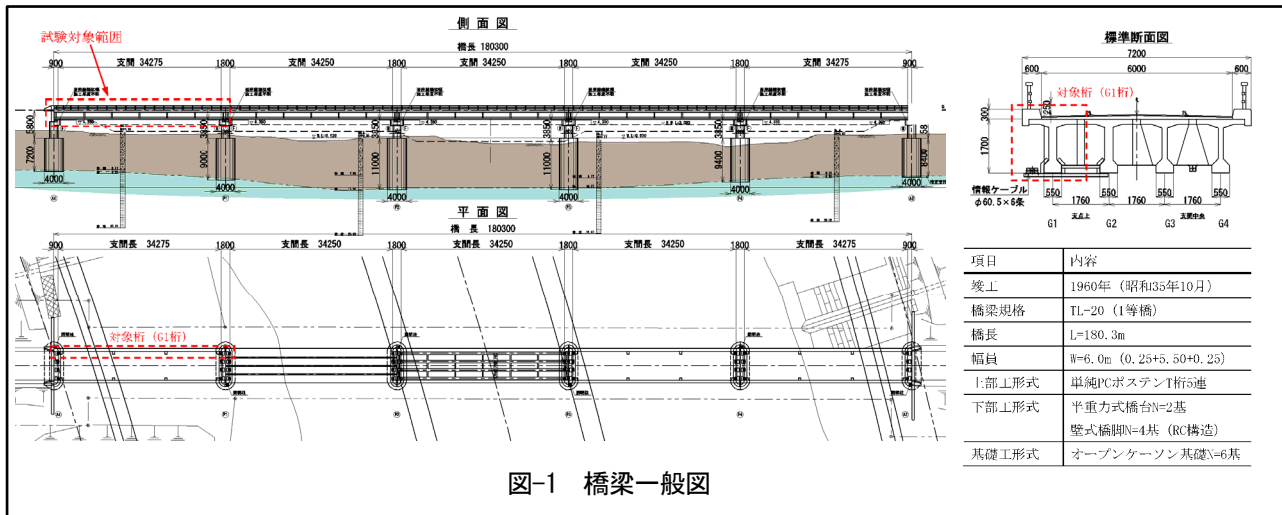


図-1 橋梁一般図

いて平成27年に載荷試験が実施され、前述した残存耐力や荷重分配等の効果を確認した<sup>1)</sup>。本橋の橋梁一般図を図-1、実橋載荷試験実施時の本橋全景を写真-1に示す。



写真-1 本橋全景（実橋載荷試験実施時）

### 3. 格子モデルの構築

#### 3. 1 部材のモデル化

本橋を対象に、竣工図・補修工事図、竣工時設計基準、載荷試験結果等をもとに、梁要素を用いた簡易的な格子解析モデル（損傷格子モデル）を作成した。損傷格子モデルの要素・部材特性および概要図を表-1、概

表-1 損傷格子モデルの要素・部材特性

部位	要素	部材特性	
		曲げ	せん断
主桁	梁要素	非線形 (M-φ)	線形
横桁	梁要素	線形/非線形	線形
支点	鉛直	パネ	線形
	水平(軸)	パネ	線形
	水平(直)	パネ	線形

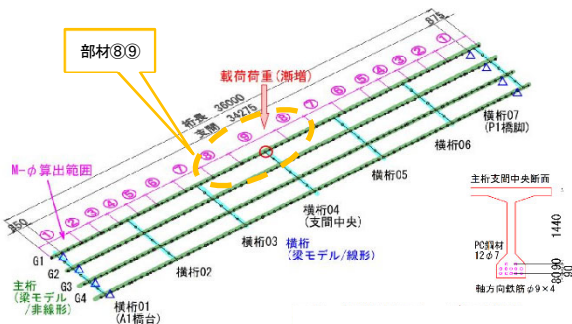


図-2 損傷格子モデル概要図

表-2 各材料の物性値

コンクリート	主桁 (ブレイスト部) 設計基準強度: 40N/mm <sup>2</sup>
	横桁 (場所打ち部) 設計基準強度: 30N/mm <sup>2</sup>
主鉄筋	降伏点強度: 235N/mm <sup>2</sup> (SS41に相当するSR235を参照)
PC鋼材	主桁 (φ7) 引張強度: 1510N/mm <sup>2</sup> (SWPR1相当)
	横桁 (φ5) 引張強度: 1620N/mm <sup>2</sup> (SWPR1相当)

要図を図-2に示す。また、曲げ耐荷性能を簡易に評価するために、主桁、横桁は梁要素とした。なお、横桁の曲げ部材特性は、載荷試験時の横桁の損傷を考慮し、かつ、荷重分配の影響を検証するため、線形モデルと非線形モデルの両方を検討した。

#### 3. 2 材料のモデル化

材料特性について、物性値は表-2によるものとし、材料構成則等は道路橋示方書<sup>2)</sup>に基づき設定した。物性値の設定にあたり、鋼材配置を竣工図より設定した(図-3)。

また、竣工時の必要プレストレス量については、竣工時の設計計算書等をもとに算出した(4200kN)。

#### 3. 3 損傷のモデル化

損傷について、実橋載荷試験時において解体調査等の詳細情報が得られないことから、プレストレスの低減量を、コア応力解放法<sup>3)</sup>による残存プレストレス算出結果に基づき桁ごとに低減率を設定<sup>1)</sup>し(表-3)、PC鋼材断面積を低減率に応じ低減することでモデル化した。

なお、断面積の低減は桁全域にわたってPC鋼材の断

表-3 PC鋼材断面積の低減(文献<sup>1)</sup>をもとに作成)

桁番号	残存プレストレス				PC鋼材1本あたり断面積 (mm <sup>2</sup> ) ※
	設計値 N/mm <sup>2</sup>	推定値 N/mm <sup>2</sup>	階差 N/mm <sup>2</sup>	低減率	
G1	22.0	19.1	-2.9	87%	401.766
G2	22.0	19.6	-2.5	89%	411.002
G3	22.0	19.2	-2.8	87%	401.766
G4	22.0	21.3	-0.8	96%	443.328

※: 低減無しの12φ7断面積は461.760mm<sup>2</sup>

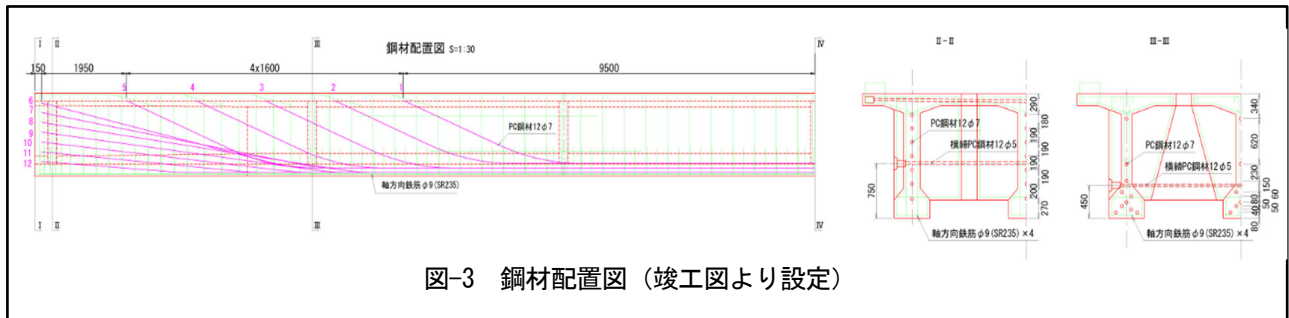


図-3 鋼材配置図 (竣工図より設定)

表-4 損傷格子モデルと載荷試験結果の乖離に伴う見直し内容と妥当性検証結果

乖離内容	鉛直方向変位 (隣接桁への荷重分担)		荷重-変位曲線の初期勾配				各イベント*時の 載荷荷重
見直し内容	主桁のねじり剛性		弾性係数	曲げ剛性			ひび割れ発生条件
	横桁プレキャスト部を適用した ねじり剛性の設定		材料試験値 相当に見直し	地覆の剛性を 考慮	舗装の剛性を 考慮	実寸法の 有効幅	コンクリートの 引張応力を考慮
横桁接続部のみ	主桁全体						
検証の影響	小	大	小	大	中	小	大
	×	○	×	○	×	×	○
損傷格子 モデルへの 反映	実構造の横桁は、主桁と一体に なっているため、主桁全体のね じり剛性に考慮する。		試験は、限定 的な範囲であ る	主桁と鉄筋 で接合され 主桁剛性に 影響ある。	主桁と材料 が異なり、主 桁剛性に影 響は少ない。	変位量は弾性 係数の影響が ある。解析と の整合を考 慮。	載荷試験時の目視 確認によるひび割 れ発生の状態と同 じと判断できる。

\*：曲げモーメント-曲率関係の傾きを変更する点（コンクリートひび割れ時、鉄筋降伏時、PC鋼材弾性限界時、PC鋼材降伏時、コンクリート終局時）を指す。

面積を一律に低減することで行った。これは、損傷格子モデルの試算時に、G1桁が終局を迎えたときにPC鋼材が降伏している部材は、支間中央の2部材（図-2の⑧⑨）のみであり、一律で断面積を低減しても解析結果に影響がないことを確認したためである。

### 3. 4 モデルの妥当性検証

3. 1から3. 3にて構築した損傷格子モデルに、載荷試験時の荷重載荷位置と同じ位置（G1 桁支間中央）に漸増荷重を作用させ、コンクリート終局時である上縁圧縮ひずみが終局ひずみ3500 $\mu$ に達した時点<sup>4)</sup>まで

の挙動を解析しモデルの妥当性を確認した。解析プログラムはDIANA10.4を使用した。解析結果と載荷試験結果の乖離は大きく3点〔鉛直方向変位（隣接桁への荷重分担）、荷重-変位曲線の初期勾配、各イベント時の載荷荷重〕に大別された（表-4）。それぞれの乖離の要因から想定される設計条件を見直し（表-5）、その妥当性を検証したうえで損傷格子モデルに反映した。（解析結果は4章参照）

### 4. 再現性の確認

3章にて妥当性を検証した損傷格子モデルにて解析を行った結果を図-4に示す。なお、横桁の曲げ部材特性は、載荷試験時の横桁の損傷を考慮し、かつ、荷重分配の影響を検証するため線形モデルと非線形モデルの両方を検討した。

損傷格子モデルの解析結果について、設計荷重程度（ひび割れ発生荷重：本研究では主桁下縁の圧縮応力

表-5 妥当性検証結果を反映したモデルの設定

項目		主桁	横桁
材料	コンクリート強度	設計値 (40N/mm <sup>2</sup> )	設計値 (30N/mm <sup>2</sup> )
	ヤング係数	設計値 (3.1×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	設計値 (2.8×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
剛性	曲げ剛性	主桁+地覆から算出 場所打ち部はヤング 係数比考慮	横桁形状から算出
	ねじり剛性	横桁プレキャスト部 を含む主桁から算出	横桁形状から算出
損傷		PC鋼材断面積低減	—
モデル要素		梁モデル	梁モデル
支点条件	鉛直方向	下向き：ばね定数 〔載荷試験データより計 算 (7.8×10 <sup>6</sup> N/m) 〕 上向き：極小ばね値	—
	水平方向	可動(G1桁は固定)	—
部材特性	曲げ	非線形(M- $\phi$ )	線形/非線形(M- $\phi$ )
	せん断	線形	線形
	ねじり	線形	線形
	主桁下縁 合成応力	コンクリート引張強 度を考慮する	—

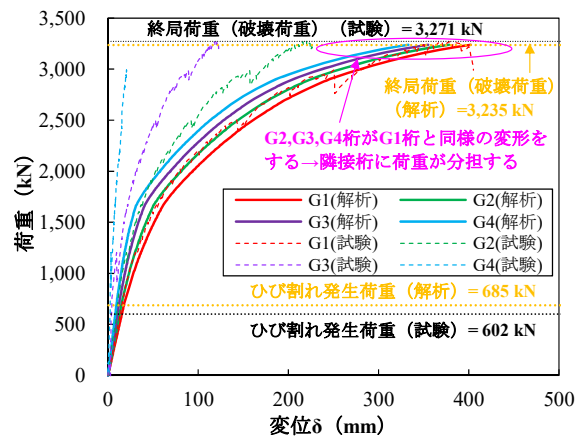


図-4 横桁の曲げ部材特性を線形とした場合の支間中央の荷重 - 鉛直変位関係

が0となった時点と定義)の荷重レベルでは載荷試験結果に近い結果を得ることができた。しかし、設計荷重程度以上の荷重レベルにおいては、載荷試験では主桁や横桁の損傷に伴い載荷桁のみが荷重を分担し、隣接桁に載荷荷重が分担されない傾向であった。その理由としては、載荷試験では載荷試験中に横桁が損傷し、それにより途中からG1桁載荷荷重が隣接桁に荷重が分配されなくなったためと考えられる。また、載荷試験結果に対して解析結果は、載荷荷重が隣接桁に分担されたことより乖離が生じる結果となった。これは、解析では横桁は損傷を考慮しない線形部材としてモデル化したため、隣接桁に荷重が分配されたことが理由として考えられた。

次に、荷重分配の影響を検証するために横桁の曲げ部材特性を非線形モデルとして解析した結果を図-5に示す。図-4と比較して、G1桁載荷荷重の隣接桁への分担がわずかに減る結果となったが、G1桁はむしろ変形が大きくなる結果となった。このことから、横桁に対して非線形モデルを設定するのみでは、載荷試験と同様の荷重分配にならないことを確認した。したがって、横桁の損傷に対するモデル化の設定については、今後の課題である。

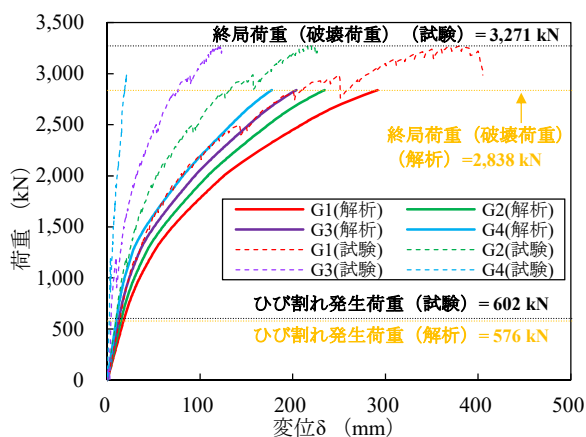


図-5 横桁の曲げ部材特性を非線形 (M- $\phi$ ) とした場合の支間中央の荷重 - 鉛直変位関係

## 5. まとめ

解析結果と載荷試験結果の乖離は大きく3点〔鉛直方向変位 (隣接桁への荷重分担)、荷重-変位曲線の初期勾配、各イベント時の載荷荷重〕に大別された。それぞれの乖離の要因から想定される設計条件を見直し、その妥当性を検証したうえで損傷格子モデルに反映したところ、設計荷重程度の荷重レベルでは乖離が

改善する結果となった。しかし、設計荷重程度以上の荷重レベルにおいては、載荷試験では主桁や横桁の損傷に伴い載荷桁のみが荷重を分担し、隣接桁に載荷荷重が分担されない結果であったが、解析結果は載荷荷重が隣接桁に分担される結果となったため、設計荷重程度の荷重レベルでは隣接桁に載荷荷重を分担でき、それ以上の荷重レベルとなる場合には荷重が伝わらないモデルの設定が課題となる。

従来の橋梁診断においては、大きな損傷が発生した場合に通行止め等の交通規制を行うケースが見受けられるが、損傷格子モデルを既設PC桁における耐力評価に用いることで、損傷桁に荷重が載荷されても、荷重分配効果により十分な残存耐荷性能を有することを診断できる可能性があるため、既設PC橋の耐荷性能診断を合理的に実施できることが期待される。

## 謝辞

本研究は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究の一環として行われた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター、プレストレスト・コンクリート建設業協会：撤去橋梁を用いた既設PC橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究報告書—既設PC橋の性能評価法および外ケーブル補強技術に関する研究—、共同研究報告書第520号、pp. 74-87、2020. 12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 149-157、2017. 11
- 3) 二井谷教治、渡瀬博、阪田憲次、綾野克紀：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol. 20、No. 2、pp. 27-37、2009. 5
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 150-151、2017. 11

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.4 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (4)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、澤田守、藤木裕二、  
小野健太

#### 【要旨】

道路橋は5年に1回を基本とした定期点検が義務化されているものの措置の実施率は低く、予防保全型の修繕は必ずしも進んではいない。持続的に橋の機能を保持していくためには、適切な診断を行い、予防保全対策を行いながら円滑なメンテナンスサイクルを実現していく必要がある。そこで、信頼性の高い診断や予防保全の推進を目的として、AIを活用した橋の診断に関する研究を実施している。令和3年度は、令和2年度までに開発した橋梁診断支援AIシステムに新たに「桁橋」「トラス橋」を対象として追加し、橋梁診断支援AIシステム Ver.1.0を開発するとともに、本システムの実証を行い、今後の課題や改良方針を明らかにした。

キーワード：道路橋、維持管理、定期点検、エキスパートシステム

#### 1. はじめに

道路橋の老朽化が進みメンテナンスの重要性が高まる中、平成26年に橋長2.0m以上の道路橋は地方公共団体が管理するものも含めて5年に1度の定期点検が義務化された。道路メンテナンス年報<sup>1)</sup>で公表されている定期点検1巡目における修繕実施状況を図-1に示す。損傷が進行したものである健全性Ⅲ又はⅣと区分された橋の修繕が優先されて進められており、予防保全段階とみなされる健全Ⅱの措置の実施率は低いことがわかる。

しかし、今後、維持管理・更新コストを可能な限り抑制し、持続的にインフラの機能を確保していくためには、予防保全型メンテナンスへの移行は不可欠である。また、国内の人口減少に伴うメンテナンスの担い手不足や、特に地方公共団体では既に技術者不足の問題が生じている。国土交通省地方整備局では道路メンテナンス会議の開催など、地方公共団体の人不足・技術力不足への対策に取り組んでいるが、引き続き、メンテナンスの質を確保しつつ、合理化を図っていく必要がある。

そのため、予防保全に重点を置きつつも、予防保全段階及びそれよりも更に損傷が進んだ段階を含めて、信頼性の高い診断が行われるよう、診断の信頼性向上に向けて課題を抽出した上で、必要となる考え方や情報を整理し、AIを活用した診断業務を支援するシステムを開発することを目的に、本研究に取り組んだ。

令和3年度には、令和2年度までに開発した「RC床版」と「床版橋」を対象とした橋梁診断支援AIシステムに新たに「桁橋」「トラス橋」を対象として追加し、橋梁診断支援AIシステムVer.1.0を開発するとともに、本システムの実証を行い、今後の課題や改良方針を明らかにした。

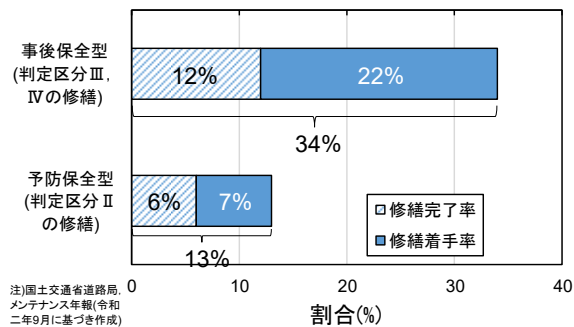


図-1 定期点検1 順目における修繕実施状況<sup>1)</sup>

#### 2. 診断システムのコアとなる診断セットの拡張

メンテナンスサイクルを確実に円滑に実施していくためには、橋に生じる損傷のメカニズムを明らかにし、そのメカニズムに応じて、点検で何をどの精度で検知し、何を根拠に健全性等の診断を行い、どのような措置の方針とするべきかなど、一連で整理することが重要となる。橋に生じる損傷のメカニズムと点検で取得すべき情報・診断の決め手となる情報・工法例の一連のセット情報を「診断セット」と称して、この



体系的な整理を行った。

令和3年度は、これまでに作成したRC床版、床版橋（上部構造）、支承、橋脚・橋台、基礎、伸縮装置、排水装置に加え、桁橋とトラス橋を追加で作成した。表-1に鋼トラスの診断セットの項目を示す。ここでは、腐食、疲労、その他に分類し、その他では、衝突による弦材の損傷や地震による弦材・横構の損傷を整理した。

図-2に鋼トラス橋の格点部の腐食のメカニズムを、表-2にそのメカニズムに対応した診断の着目点と措置方針を例示する。説明性を確保する観点からも、損傷のメカニズムを分かりやすく図示し、その状態の段階的な進行を整理した。

表-1 鋼トラス橋の診断セットの項目

1. 腐食
1. 0. 共通
1. 1. 格点部
1. 2. コンクリート埋込部材
1. 3. 弦材
1. 4. 床組み
2. 疲労
2. 0. 共通
2. 1. 横桁と縦桁の接合部
2. 2. 主構と横桁との接合部
2. 3. 斜材とガセットプレートの連結部
3. その他
3. 1. 衝突による弦材の損傷
3. 2. 地震による弦材・横構の損傷

また、それぞれの状態に対して、予防保全が可能な段階など措置方針を区分し（表-3）、さらにその状態を特定するために必要となる情報を整理した。なお、作成にあたっては、実務に携わる熟練診断技術者を含むメンバーで検討会を行った。

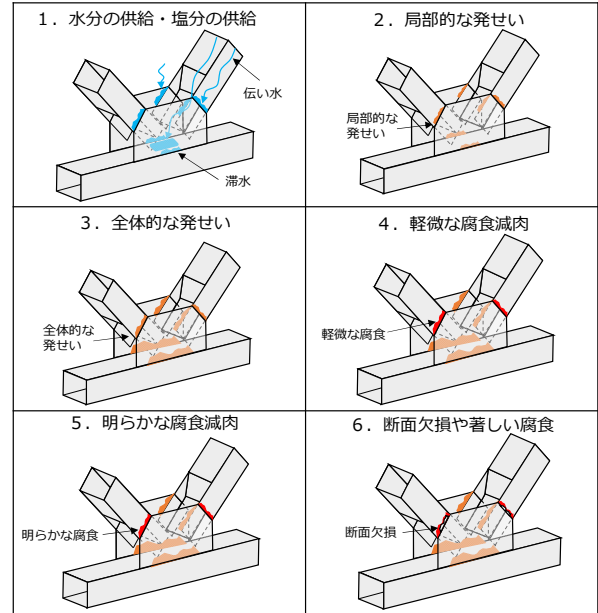


図-2 鋼トラス橋の格点部の腐食のメカニズムの例

表-2 鋼トラス橋の格点部の腐食の診断の着目点と措置方針

メカニズム		点検における着目点 (定期点検)	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報 (+評価区分)	追加情報	措置の方針	工法例
外観変状なし	1 水分の供給	・ 床版打継目等からの漏水 ・ 土砂の滞積	-	・ 漏水の発生 ・ 土砂の堆積		長寿命化 (原因除去)	・ 伸縮装置の改良、橋面防水、排水管の補修・延長等 ・ 水洗、清掃
	塩分の供給	・ 地形条件 ・ 橋梁形式や架設位置 ・ 凍結防止剤の散布	付着塩分量調査	付着塩分量が50mg/m <sup>2</sup> 以上である		長寿命化 (原因除去)	・ 同上（漏水に伴う塩分供給の除去）
外観変状あり	2 局所的な発せい	・ 発錆範囲	付着塩分量調査	局所的に防食塗膜が劣化し、点錆が発生している		長寿命化 (推奨)  早急な措置は不要	局部補修 (目あらし+防錆塗装)  -
	3 全体的な発せい	・ 発錆範囲	付着塩分量調査	防食塗膜の劣化範囲が広く、点錆が発生している		長寿命化 (推奨)  早急な措置は不要	部分塗替え (Rc-1塗装系)  -
	4 軽微な腐食減肉	・ 腐食範囲・程度	付着塩分量調査 板厚計測	軽微な板厚減少が生じている	前回からの進展はない	長寿命化 (推奨)  早急な措置は不要	部分塗替え (Rc-1塗装系)  -
					前回から明らかに進展	長寿命化	部分塗替え (Rc-1塗装系)
	5 明らかな腐食減肉	・ 腐食範囲・程度	付着塩分量調査 板厚計測	明らかな板厚減少が生じている	前回からの進展はない	延命	個別判断により補修方法を検討
					前回から明らかに進展	延命	腐食原因を除去の上、個別判断により補修方法を検討
6 断面欠損や著しい腐食	・ 断面欠損の有無 ・ 著しい腐食の有無	-	・ 断面欠損が生じている ・ 著しい腐食が生じている		危機管理	モニタリング、バント、交通規制	

表-3 本システムにおける措置の方針の定義

措置の方針	定義
長寿命化	損傷の原因除去や、完全な処置により元の状態に復帰させる。なお、損傷が生じていない段階で将来的に損傷となることが予想される場合に原因を除去することも含む
延命	損傷の原因の完全な除去は難しく、補修などを行うことで損傷の進行をコントロールする
危機管理	損傷進行の確実なコントロールができない状態で、モニタリング等を行いながら供用し、早期に対策する
緊急措置	通行規制や緊急的な補修等を直ちに行う

### 3. 橋梁診断支援AIシステムの開発

#### 3.1 橋梁診断支援AIシステムの概要

橋梁診断支援AIシステムは、診断結果の理由を第三者に説明可能なものとするために、診断セットをもとに診断のフローチャートを作成し、処理フローに沿って入力情報を処理するエキスパートシステムである。システム処理の流れを図-3に示す。台帳データ（橋梁形式、供用年、設計基準、交通量等）、今回の点検データ（所見、損傷が疑われる部材、部位、変状等）、カルテデータ（前回までの所見、補修履歴等）などの情報からデータを入力し、舗装の剥落ち等直ちに措置が必要な変状の有無などから緊急対策の必要性を判断した後、疑いのある損傷候補を複数抽出する。そして、システムが損傷を特定するために必要な追加情報を提案し、必要に応じて管理者が詳細調査を実施する。ここまでに得られた情報をもとに損傷及び原因を特定するとともに、損傷の進行度（状態）の推定及び損傷の進展可能性の推定を行った後、措置方針を含めた診断結果を出力し、措置の実施内容等をカルテに保存する。

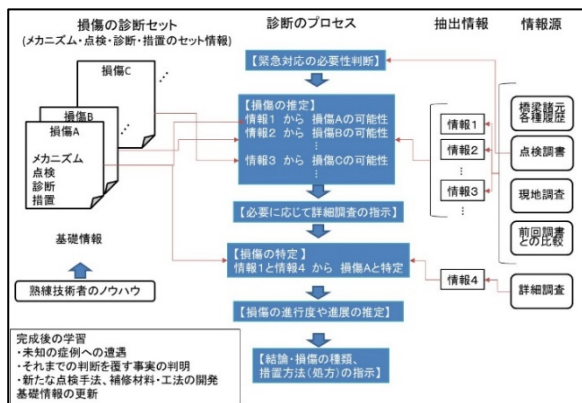


図-3 本システムの処理の流れ

このシステムが提案する診断・措置方針は、診断セットに基づいているため、診断に至った過程の確認が可能である。そのため、経験の少ない作業者が点検・診断を行う場合にも根拠に基づいた信頼性の高い診断が可能となる。令和3年度に作成した桁橋とトラス橋の診断セットをフローチャート化し、システムに追加実装することで、橋梁診断支援AIシステムVer.1.0を開発した（写真-1）。

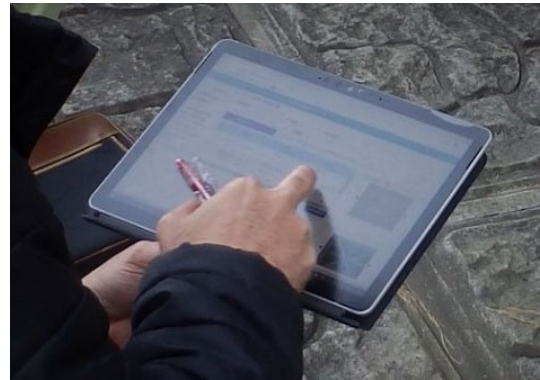


写真-1 橋梁診断支援AIシステムVer. 1.0

#### 3.2 橋梁診断支援AIシステムの実証

##### 3.2.1 実証の概要

システムの出力結果（アルゴリズム）の妥当性を確認すること、入力項目の表現等を確認すること、及びシステムの使いやすさを確認することを目的として、システムの実証を行った。実証は、実際に現場に行きシステムに情報を入力する現場実証（写真-2）と、点検調査書とあらかじめ用意した現地の動画や360度画像（写真-3）などから情報を入力する机上実証の2通りで行った。対象橋梁は共同研究に参加している茨城県、富山市から提供して頂いた。対象橋梁、実証の対象とする損傷種類、実証方法は表-4に示す。



写真-2 現場実証の状況



写真-3 360度画像

表-4 実証対象橋梁一覧

橋梁	種類	対象損傷	実証方法
SA橋	鋼桁	腐食	現場実証及び
	鋼トラス桁	疲労亀裂	机上実証
H橋	RCT桁	塩害	机上実証
G橋	鋼桁	腐食	机上実証
		疲労亀裂	
SI橋	ポステン桁	塩害	机上実証

### 3.2.2 実証結果

出力結果の妥当性の確認方法として、システムの出力結果と対象橋梁の直近の点検調書や補修設計業務の報告書と比較して整理した。その結果を表-5、表-6に示す。

SA橋（鋼トラス）に関しては、過去の補修設計業務での判定と本システムの出力結果は概ね一致した。ただし、格点部については、過去の補修設計業務では防食機能の劣化のみで経過観察という措置方針だったのに対し、本システムでは軽微な板厚減少が確認され、措置としては長寿命化のための部分塗替えが示された。SA橋（鋼桁）に関しては、どちらも変状程度（腐食）は軽微と判断された。システムでは連結部について局部補修が必要と判断された。SA橋（支承）に関しては、どちらも措置方針が支承交換となり、補修設計業務の報告書とシステムの診断結果は一致した。H橋（RCT桁）に関しては、どちらも飛来塩分による変状と判断された。しかし、点検調書では詳細調査に基づく早急な対策が必要と判断されたが、システムでは延命のための電気防食が示されており、より具体的な措置が示されていることがわかる。G橋（鋼桁）に関しては、どちらも早期の対策（桁端部の再塗装）が必要と判断され、点検調書とシステムの診断結果は一致した。SI橋（PCT桁）に関しては、点検調書では損傷原因をASRとしているが、システムでは凍結防止剤による塩害としており、診断結果に差異が生じた。最後に、

SI橋（下部工）に関しては、どちらもアルカリ骨材反応となり、診断結果は一致したが、措置の方針は点検調書では経過観察となっているが、システムでは延命または危機管理となり、結果に差異が見られた。

表-5 出力結果の妥当性の比較（1）

SA橋 (鋼トラス)	<p>R2年度補修設計業務委託報告書</p> <p><b>【弦材・斜材・格点部】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・防食機能の劣化による腐食が見られる。</li> <li>・斜材下端は下弦材との交点部滞水による腐食が見られる。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・変状が軽微なため、経過観察</li> </ul> <p><b>【縦桁・横桁・下横溝】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・防食機能の劣化による腐食が見られる。</li> <li>・雨水等の滞水による腐食が見られる。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷の進行を抑制するため、予防保全の観点から塗装塗替えを行う。</li> </ul> <p>システムの出力結果</p> <p><b>【格点部】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・格点部に軽微な板厚減少が確認される。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長寿命化【部分塗替え（Re-1塗装系）】</li> </ul> <p><b>【弦材・斜材】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・弦材に局所的な発せいが確認される。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長寿命化または経過観察【局部補修（目あらし+防錆塗装）】</li> </ul> <p><b>【床組み部材】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・腐食が発生。板厚減少は軽微な段階。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・延命【部分塗替え（Re-1塗装系）】</li> </ul>
SA橋 (鋼I桁)	<p>R2年度補修設計業務委託報告書</p> <p><b>【主桁】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・主桁全体に防食機能劣化が見られる。</li> <li>・下フランジの上面等の滞水しやすい箇所には腐食が見られる。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷の進行を抑制するため、予防保全の観点から塗装塗替えを行う。</li> </ul> <p>システムの出力結果</p> <p><b>【鋼I桁 端部】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼桁端部に腐食。その程度は軽微。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長寿命化【部分塗替え（Re-1塗装系）】</li> </ul> <p><b>【鋼I桁 連結部】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・連結部に腐食。断面欠損は軽微。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・延命【局部補修（目あらし+防錆塗装）】</li> </ul> <p><b>【鋼I桁 一般部】腐食</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼桁一般部に腐食が発生。防食下地が露出し発せいしている段階。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長寿命化【部分塗替え（Re-1塗装系）】</li> </ul>
SA橋 (支承)	<p>R2年度補修設計業務委託報告書</p> <p><b>【支承】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・支承本体に防食機能劣化が見られた。</li> <li>・ピンチプレートが変形し機能障害となっている。</li> <li>・畜塵モルタルは、ひびわれや欠損が生じていた。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・損傷の進行を抑制するため、予防保全の観点から支承本体を取り替える。</li> </ul> <p>システムの出力結果</p> <p><b>【支承本体・アンカーボルト】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・支承本体に全体的な腐食が発生</li> <li>・アンカーボルト頭部またはナットに腐食が発生</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・軽微な補修【錆除去+再塗装、ナット交換+再塗装】【土砂の撤去、漏水原因の解消】</li> </ul> <p><b>【遊間不良・下部移動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・線支承の移動制限装置に亀裂または破断し、遊間異常が発生</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・支承交換または支承の監視【支承交換】</li> </ul>
H橋 (RCT桁)	<p>H30年度点検調書</p> <p><b>【RCT桁】飛来塩分による塩害</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート部材に塩害の影響によるものと推定される損傷が多数見られる。</li> <li>・剥離、鉄筋露出、補修・補強材の損傷、コンクリートの浮き</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・詳細調査を行い、早急な対策が必要。【再塗装】</li> </ul> <p>システムの出力結果</p> <p><b>【RCT桁】飛来塩分による塩害</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・飛来塩分が付着する環境であり、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が発錆限界以上であるため「飛来塩分による塩害」の損傷であると考えられる。</li> <li>・鉄筋の腐食が進行し、鉄筋の断面減少が発生している。</li> </ul> <p>&lt;措置方針&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・延命（鉄筋の防食）【電気防食】【桁の板受け】</li> </ul>

表-6 出力結果の妥当性の比較 (2)

G橋 (鋼桁)	H29年度点検調書 【主桁】腐食 ・主桁端部に腐食、孔食が見られる。 ・伸縮装置からの漏水が見られる。 <措置方針> ・早期の措置が必要。【再塗装】 システムの出力結果
	【鋼桁 端部】腐食 ・橋座面に滞水跡が見られる。 ・重防食塗装系の鋼桁端部に腐食が発生。 <措置方針> ・延命【部分塗替え (Re-1 塗装系)】
SI橋 (PCT桁)	H29年度点検調書 【ボスティング】ASR ・コンクリート部材に1方向ひびわれ、白色の析出物が見られるため、ASRの可能性がある。 ・遊離石灰が見られ、雨水浸透によるものと推定される。 <措置方針> ・ASRの可能性があるため、経過観察 ・漏水・遊離石灰は軽微な損傷のため、経過観察 システムの出力結果
	【ボスティング】凍結防止剤による塩害 (①伸縮装置からの漏水、②グラウト充填不足、③横締めPC鋼材の抜出し) ・(共通)凍結防止剤の散布地域 ①伸縮装置からの漏水により端部の鋼材の腐食や、かぶりコンクリート浮き。 ②シーズに沿ったひびわれや鋼材腐食。 ③間詰部からの漏水 <措置方針> ①延命 (遮塩、鉄筋の防食) 【部分打替え】 ②延命 (遮塩) 【橋面防水、シーズ内の水抜き、グラウト再充填】 ③延命 (遮水) 【橋面防水】
SI橋 (下部工)	H29年度点検調書 【橋台】アルカリ骨材反応 ・隅角部にひびわれが見られ、ASRIによるものと推定 <措置方針> ・漏水・遊離石灰は、軽微な損傷のため、経過観察 システムの出力結果
	【橋台】アルカリ骨材反応 ・隅角部にひびわれが見られ、ASRIによるものと推定 <措置方針> ・延命または危機管理【補強】

表-7 入力項目の表現の修正

選択肢の表現が不明確なものの修正	
修正前	修正後
塗膜割れ (疲労を想定)	溶接線に沿った塗膜割れ
橋座面の滞水	橋座面の滞水または滞水跡
橋座面の土砂堆積	鋼桁への土砂堆積
部位・部材の表現の修正	
修正前	修正後
鋼桁高力ボルト連結部	鋼桁連結部 (高力ボルトに限定しない)

表-8 システムの使いやすさに関する主な意見

<ul style="list-style-type: none"> <li>上部構造形式等の諸元に応じて入力項目を絞るのが良い。</li> <li>不必要な項目は表示されないようにできれば良い。 例) 質問を階層化する等</li> <li>関係のない質問につける選択肢 (「該当しない」など) があると良い。</li> <li>入力項目の順番は、確認する場所の順番になっている方が入力しやすい。</li> </ul>
---

机上実証において、入力項目の表現等の適正化やシステムの使いやすさという観点から、共同研究者からの意見を集約した。

その意見をもとに入力項目の表現を修正したものを表-7に示す。また、システムの使いやすさに関する主な意見を表-8に示す。「上部構造形式等の諸元に応じて設問を絞るのが良い」や「不必要な項目は表示されないようにできれば良い」などの課題を把握した。入力項目をシステム側で判断して如何にシステムに情報を入力する労力を簡略化していくかがシステムの使いやすさという観点での今後の課題であることが分かった。

#### 4. まとめ

本研究では、橋の診断における信頼性向上を目的として、熟練診断技術者の診断ロジックや、適切な診断のために重要な損傷のメカニズムに応じた点検・診断・措置のセット情報に基づき、説明性が確保された橋梁診断支援AIシステムを開発した。令和3年度には、システムの対象に桁橋やトラス橋を追加することで、対応可能な症例は限定されているものの、橋種の約9割を対象とした橋梁診断支援AIシステムVer.1.0にバージョンアップさせた。また、開発したシステムの実証を行うことで、出力結果の妥当性の確認や、使いやすさという観点での改善点の抽出を行った。

今後は、引き続き、対象部材・損傷の拡張を行うとともに、点検調書を活用したシステムのロジックの妥当性の実証や、実際の橋梁を対象としたシステムの使用性の検証などを行い、実運用に向けた課題を見つけてシステムの改良を進めることで、令和6年度からの全国的な展開を目指す。

#### 謝辞

本研究は、「AIを活用した道路橋メンテナンス効率化に関する共同研究」の成果の一部である。

#### 参考文献

- 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報、pp.44-45、2020.9

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.5 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、  
地質・地盤研究グループ（特命、地質）、材料  
資源研究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西  
崎到、品川俊介、稲崎富士、寺田剛、丸山記美  
雄、前川亮太、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、  
大浦正樹

#### 【要旨】

本研究は、既設舗装を対象に維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法を提案することおよび非接触表面波探査手法を用いた舗装の局所的な構造評価を提案することを目的としている。平成 28～29 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。また、非接触高周波表面波探査システムの開発に向け、S 波速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法を提案した。平成 30 年～令和 2 年度は、舗装路面のひび割れが FWD たわみに及ぼす影響を分析するとともに、地中レーダを用いた舗装構造の特定手法の開発を進めた。また令和 2 年度に舗装の構造的損傷に対する診断と措置に関して、個々の技術を体系的に整理し、令和 3 年度は、表基層厚の連続分布を高周波の地中レーダにより高精度で行う処理手法を示した。

キーワード：舗装、構造破損、路面破損、実態調査、表面波探査、S 波

#### 1. はじめに

舗装の維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、路面特性および構造特性の面から、既設舗装を適切に評価することが求められる。本研究では、措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法および局所的な構造評価手法を提案することを目的としている。

平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。また、局所的な構造評価手法に関しては、非接触表面波探査手法を用いた、S 波速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法を提案した。

平成 29 年度は、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かったため、日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。また、舗装路盤に適した表面波解析手法として、非接触高周波表面

波探査の効率を向上させる改良技術を検討し、高周波の表面波を探査可能な装置を作製した。

平成 30 年度は路盤の健全性が損なわれた場合の詳細調査のあり方を検討するため、詳細調査のうち路盤の状況を直接的に把握できる開削調査について分析を行った。また非接触高周波表面波探査装置の実用性を向上させた。

令和元年度はひび割れの程度や位置が、FWD たわみ量に及ぼす影響を解析に基づいて把握するとともに、舗装の構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係を体系的に整理した。さらに、高周波表面波探査の問題点を解消するために、地中レーダにより事前に舗装構造の深度分布を特定する手法の開発を進めた。

令和 2 年度は、ひび割れと FWD たわみ量の関係について、解析に加えて実験により傾向を把握した。さらに舗装の構造的損傷に対する診断と措置に関して、個々の技術を体系的に整理するとともに技術の選択の基本的な考え方を整理した。

令和 3 年度は、表基層厚の連続分布を高周波の地中レーダにより高精度で行う処理手法を示した。本手法の

応用により舗装構造の変形範囲を把握することが可能で、補修範囲の適切な判定に利用することができる。

## 2. 重交通道路における舗装の損傷実態調査

### 2.1 背景

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」(以下、「点検要領」という。)においては、損傷の進行が早い道路等に分類されたアスファルト舗装について、表層の供用年数に対する使用目標年数の設定を通じ、早期に劣化した区間に対しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。詳細調査の手法としては、FWD たわみ量調査、コア抜き調査および開削調査が点検要領の付録に例示されているが、開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においては FWD たわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく工法選定が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかはあまり明らかになっていない。

本研究では、損傷の範囲が表層・基層である場合を対象に、コア抜き調査をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場にて、FWD たわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。

次に損傷範囲が路盤に至っている場合を対象に、開削調査に至る前の、路面性状調査や FWD たわみ量調査の結果から、どのような調査結果の場合に開削調査を実施するかが重要であるか、実大の走行実験を通じて分析した。

### 2.2 調査箇所

調査箇所は、コア抜き調査結果をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場とした。場所は、関東地方整備局管内

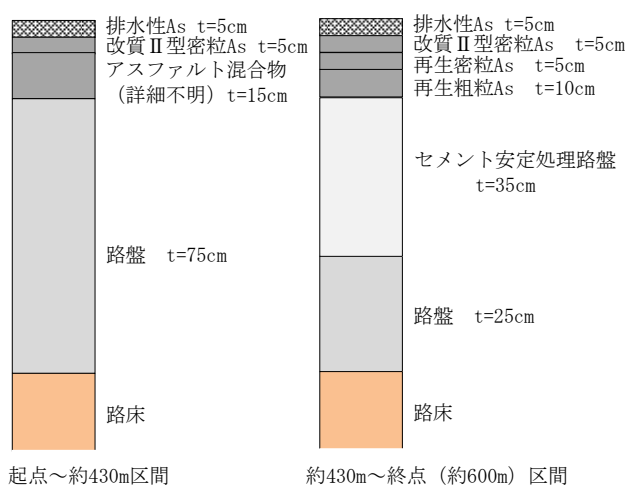


図-1 舗装構成

の直轄国道(往復2車線)であり、平成22年道路交通センサス<sup>2)</sup>では、大型車交通量は舗装計画交通量N6区分に該当する道路である。線形はほぼ直線であり、工事延長はL=約600m(上下線とも)である。

修繕工事前の舗装構成は、過去の修繕工事の設計図書の情報をもとにすると、起点側から約430mを境に変化しているものとなっており、その舗装構成を図-1に示す。いずれもアスファルト混合物層(以下、「アスコン層」という。)厚は25cmであり、また図中の路盤は舗装構成より粒状路盤と考えられる。なお、前回修繕工事は今回修繕工事の16年前に実施しており、起点側から約430mまでは2層(t=10cm)の切削オーバーレイ、約430m以降は舗装打換え(図-1中のセメント安定処理路盤層より上の施工)である。

### 2.3 現場内のコア抜き本数

当該工事現場では、工事着手前に区間内のコア抜き調査が行われている。コア抜き調査は、道路管理者の指示の下、修繕工事受注業者が修繕前の路面の損傷状況を元に調査箇所を選定して実施し、その結果コア本数は下り車線が11本、上り車線が13本であった。

### 2.4 コア抜き調査結果を踏まえた修繕工法の選定

前節に示したコア抜き調査により、アスコン層内の損傷は様でないことが明らかとなった。具体的には、表層の路面側を起点としたひび割れ(トップダウンひび割れ)が中間層までにとどまっているもの、ひび割れからの雨水の浸入に起因すると想定される層間剥離を引き起こしているもの、さらに進行して中間層、基層やアスファルト安定処理層部の混合物自体が剥離を引き起こしているもの、およびアスコン層(t=25cm)を貫通しているものと様々であった。当該修繕現場では、これらの状況を踏まえ、ひび割れ深さが15cm以上入っている区間をアスファルト混合物層の全層(t=25cm)打換え、それ以外の区間を2層(t=10cm)の切削オーバーレイと修繕工法が選定された。

このように、同一現場内でもアスファルト混合物層内部の損傷は様々となりうることを認識しておく必要がある。当該現場のコアの状況を図-2に示す。なお、図中のうち、「アスコン層内部の混合物自体の剥離が進行/ひび割れがアスコン層を貫通」の写真の一部は、コア側面のひび割れ部分のチョークによるトレースができていない。

### 2.5 修繕工事前の路面性状調査

当該修繕工事区間において、修繕前に路面性状調査を行った。その結果を表-1に示す。これより、上下車線共に損傷は進行しており、また、どちらかと言えばひび割れによる損傷が卓越した区間であることが分かる。実際の

現場では、ひび割れが発生している多車輪通過部にわだち部オーバーレイ工（レーンパッチング）の実施箇所が点在しており、日常的な維持管理に苦慮していた様子が観

察される路面状況であった。修繕前の路面の代表写真を写真-1に示す。



図-2 コア抜き調査結果

表-1 修繕工事前の路面性状調査結果

路面性状		下り車線	上り車線	
ひび割れ率 (%)	区間平均	24	31	
	最大値 (10m 単位)	69	72	
わだち掘れ量 (mm)		区間平均	17	17
		最大値 (10m 単位)	32	46
平たん性 (mm)		区間平均	2.8	3.1



写真-1 修繕工事現場の路面状況

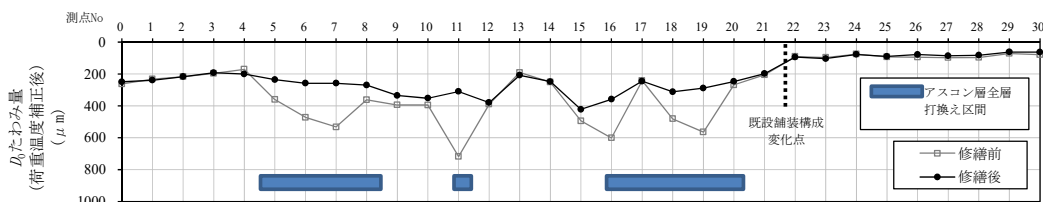


図-3 修繕工事施工前後のD0たわみ量の比較（下り車線）

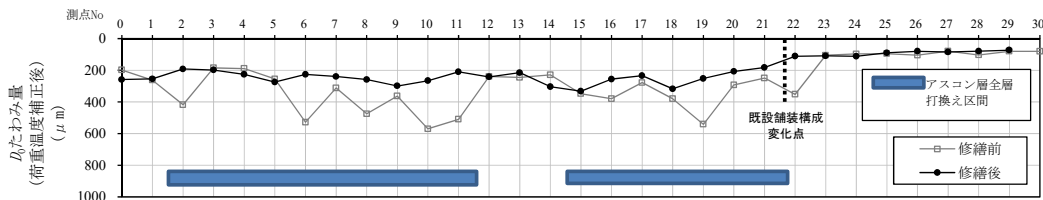


図-4 修繕工事施工前後のD0たわみ量の比較（上り車線）

### 2. 6 修繕工事前後のFWDたわみ量調査

修繕工事前後において、OWP上で起点から20m間隔でFWDたわみ量調査を実施した。上下車線とも、路線の起点側を測点No.0とし、順に20m間隔で測点を振り、終点側を測点No.30とした。また、FWDたわみ量については、「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—」<sup>3)</sup>に従い20°C換算で補正している。

舗装の構造的健全度として、路床を含めた舗装全体の支持力を示す載荷点直下のD0たわみ量に着目し、それをグラフ化したものを図-3、4に示す。また、同図中には、アスコン層全層 (t=25cm) 打換えの区間を表示している。この表示以外の区間は、t=10cmの切削オーバーレイの区間である。これより、当該現場では、2.4に示したコア抜き調査によるひび割れ深さに着目した修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に大きく寄与したことが分かる。渡邊らは、別の現場にて一律の一層切削オーバーレイを実施した場合の修繕前後の構造評価を行った結果、当該区間内の構造的健全度のバラツキは概ねそのままであったことを報告している<sup>4)</sup>。この報告と照らし合わせると、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かる。この結果については、平成29年度の日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。なお、実際の修繕工事は、構造面のみならず路面機能面など様々な理由を勘案し道路管理者が総合的な判断のもとその区間・内容を決定するものであり、本報はその是非を議論するものではないことを申し添える。

当該現場では、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現

場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的にアスコン層内部の損傷状況を把握する手法の検討が必要と考えられる。

### 2. 7 路盤損傷時の開削調査に関する実験

舗装走行実験場において試験舗装を構築し、実大載荷実験を実施した。路盤における損傷を早期に発現させるために、疲労破壊輪数が10万輪程度になる構造の試験舗装を軟弱路床上に構築した。試験舗装の断面図を図-5に示す。試験舗装はアスファルト混合物層および粒状路盤層からなる2層とした。既設路床のCBRは2.0であり、試験舗装の等値換算厚さTAが19cmであることから、算出される疲労破壊輪数は約8万輪となる。当該実験では25万輪まで促進載荷を実施し、所定の走行輪数ごとに調査を実施した。

開削調査に先立って、路面性状調査並びにFWD調査を実施した。路面性状測定結果として図-6に走行輪数に対するひび割れ率の推移を、図-7に路面横断形状の変化

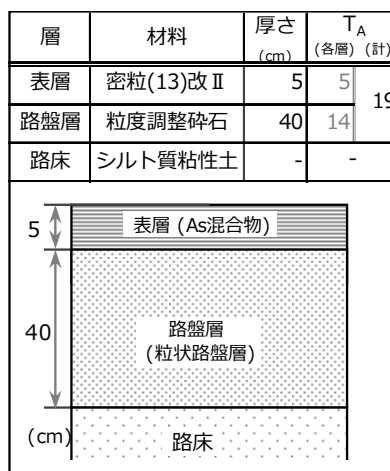


図-5 実大載荷実験の試験断面



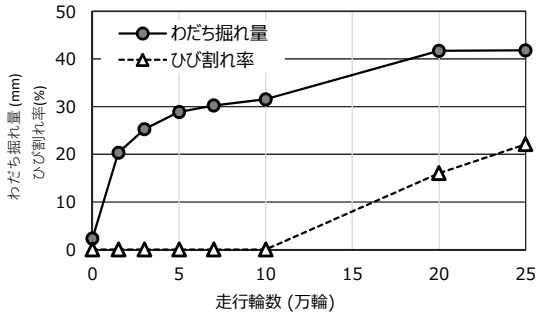


図-6 走行輪数に対するひび割れ率の推移

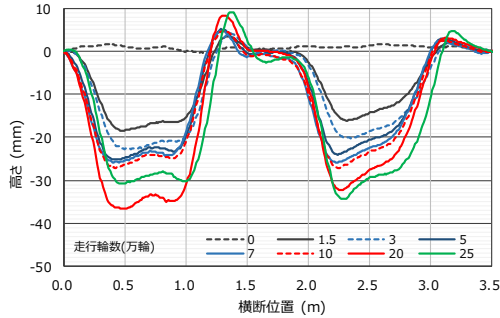


図-7 路面横断形状の変化

を示す。ひび割れについては10万輪走行までは発現せず、その後20万輪および25万輪走行の時点にかけて増加傾向となった。わだち掘れ深さについては、1.5万輪走行時に約20mmまで急増した後、10万輪で約30mm、40万輪で40mmと漸増した。20万輪時点以降はわだち掘れの進展がみられなかった。

次にFWDによる載荷部直下のたわみ量D0の測定結果を示す。図-8より、10万輪走行まではたわみ量が減少し支持力が増加する傾向がみられた。その後、ひび割れの生じた20万輪走行以降において、たわみ量の微増傾向がみられた。

25万回の載荷終了後に、開削調査を実施した。写真-2に舗装の状況を、図-9に各層上面位置を示す。表層の厚さはわだち掘れの箇所においても、載荷前後で変化が小さく、わだち掘れの深さは路盤層の変形に起因するところが大きいことが把握できた。

以上のとおり、わだち掘れの進展に対してひび割れの発生が遅れていた間に、FWD たわみ値が減少する傾向がみられた。このことから推察すると、アスコン層が薄いため路盤に塑性変形が発生するとともに、剛性が高まったものと考えられる。また20万輪走行時にひび割れが確認されて以降は、表層および路盤層においてFWD たわみ値の増加傾向がみられた。このことから、ひび割れの進展が舗装の構造的損傷に影響を与えていることが示唆される。

## 2. 8 路面のひび割れがFWD たわみに及ぼす影響

一定以上の損傷が進行した舗装の構造状態を把握する

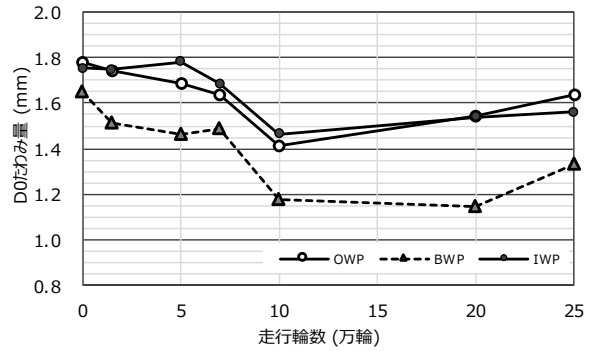


図-8 FWD たわみ量



写真-2 開削調査時の舗装状況

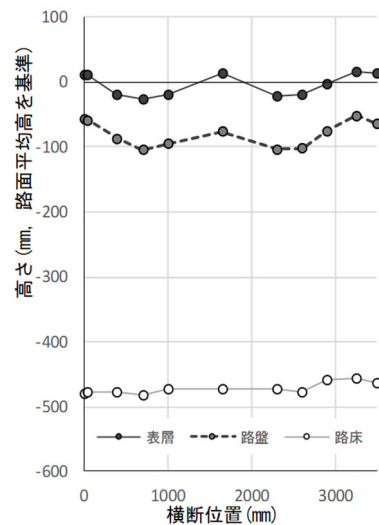


図-9 開削調査時の舗装の各層厚

ために、路面に生じるひび割れがFWD たわみ量に及ぼす影響の把握が重要である。そこで、ひび割れの程度や、ひび割れとFWD 載荷版との間隔によって、たわみ量がどのように変化するか、FEM解析を用いて分析した。解析モデルの一例を図-10に示す。

図-11のように、固定されたひび割れ位置に対してFWD 載荷版の位置を変化させ、発生するFWD たわみ量を計算した。その結果、直径30cmの載荷版に関して、載

荷版中心をひび割れから 20cm 程度離せば、ひび割れによる FWD たわみ量への影響は小さいと考えられる。

次に、ひび割れの程度が FWD たわみ量に及ぼす影響を把握するため、実験と解析を実施した。具体的には図-10と同様の構造の実大の試験体舗装を土木研究所の構内に構築し、実際の FWD たわみ量試験を行い、ひび割れの数を 1 本、2 本、4 本と、図-12 のように変化させて、実験と解析の結果を比較した。

その結果図-13 のとおり、実験と解析それぞれについて、ひび割れの本数に応じた FWD たわみ量の違いを把握できた。実験と解析それぞれ、ひび無しに対してひび割れが 1 本、2 本と増えるごとにたわみ量が大きくなる。しかし 2 本に対して 4 本の場合のたわみ量は、実験と解析ともに 1% 程度の増加にとどまった。ひび割れに対する FWD たわみ量の変化の傾向は実験値と解析値とで同様の傾向が得られたが、たわみ値についてはいずれのひび割れ本数においても、実験値に対して解析値が小さくなった。この点の改善は今後の課題である。

2. 9 舗装の損傷の体系化に関する検討

舗装の損傷に関するこれまでの調査・実験を踏まえ、舗装の構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係について、過去 40 年程度の主要文献や新たな開削調査での知見を統合し、体系的に整理した。その結果を図-14 に示す。

アスファルト舗装の損傷パターンは舗装構成や地域特性によって多種多様であり、材料に関するひとつの劣化現象が複数の損傷の原因になることや、ある損傷が別の損傷の原因になる等の場合がある。しかし、既往の知見では、損傷同士の因果関係や経時的進展を体系的に俯瞰できるように示したものがなく、道路管理における点検・診断・措置を合理的に判断する際の課題のひとつとなっていた。

今回の成果によって、損傷同士の原因や進展の関係が整理された。今後は様々な現場条件に応じて、重視すべき診断と措置の要点を示すことが可能となる。

次に、図-14 に基づいて、診断と措置の個々の手法の系化を図るとともに、手法選択の基本的考え方についての図示を試みた。ここで、前述の図-12 の左側で示した終末段階の損傷が、路面の損傷と路盤以下の構造的損傷に大別できたことに着目し、診断手法と対象とする損傷を対応させた。

診断手法と措置手法の体系について図-15 に示す。重要な点のひとつとして、FWD やコア抜きといった具体的な診断を実施する前に、目視調査によって構造的損傷の有無を推測し、それに応じた診断手法の選択を明示してい

る点が挙げられる。このほか、路面目視のチェックポイントの該当項目に応じた、詳細調査手法 (FWD 調査、コア目視調査等) の選択の考え方を示すとともに、コアや開削での目視のチェックポイントを示している。さらには、選択した診断手法に応じて、措置としての修繕設計に用いることができる値を明示し、診断結果を修繕設計へ反映することが容易にできるよう配慮している。

この図-14 の損傷体系図と図-15 の診断・措置体系図により、舗装の構造的損傷に対して道路管理者による適切な対応を促すことができる。

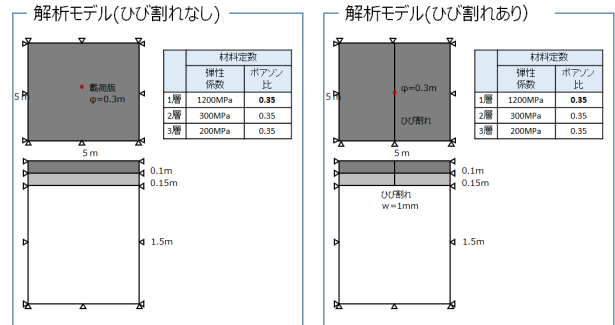


図-10 ひび割れと FWD たわみに関する解析モデル例

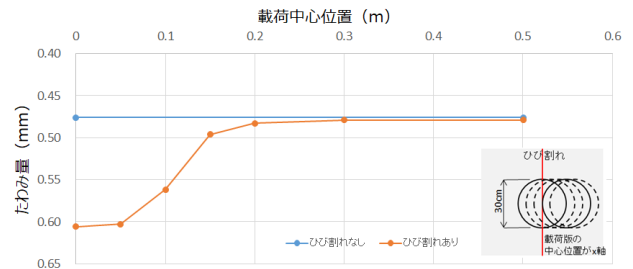


図-11 載荷版の位置とたわみ量に関する解析結果



図-12 実験および解析で設定したひび割れ本数と配置

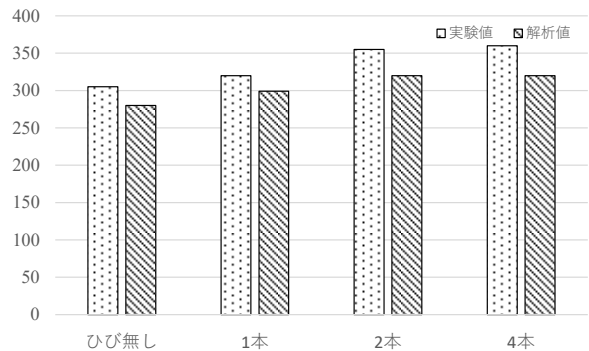


図-13 ひび割れ本数と FWD たわみの関係

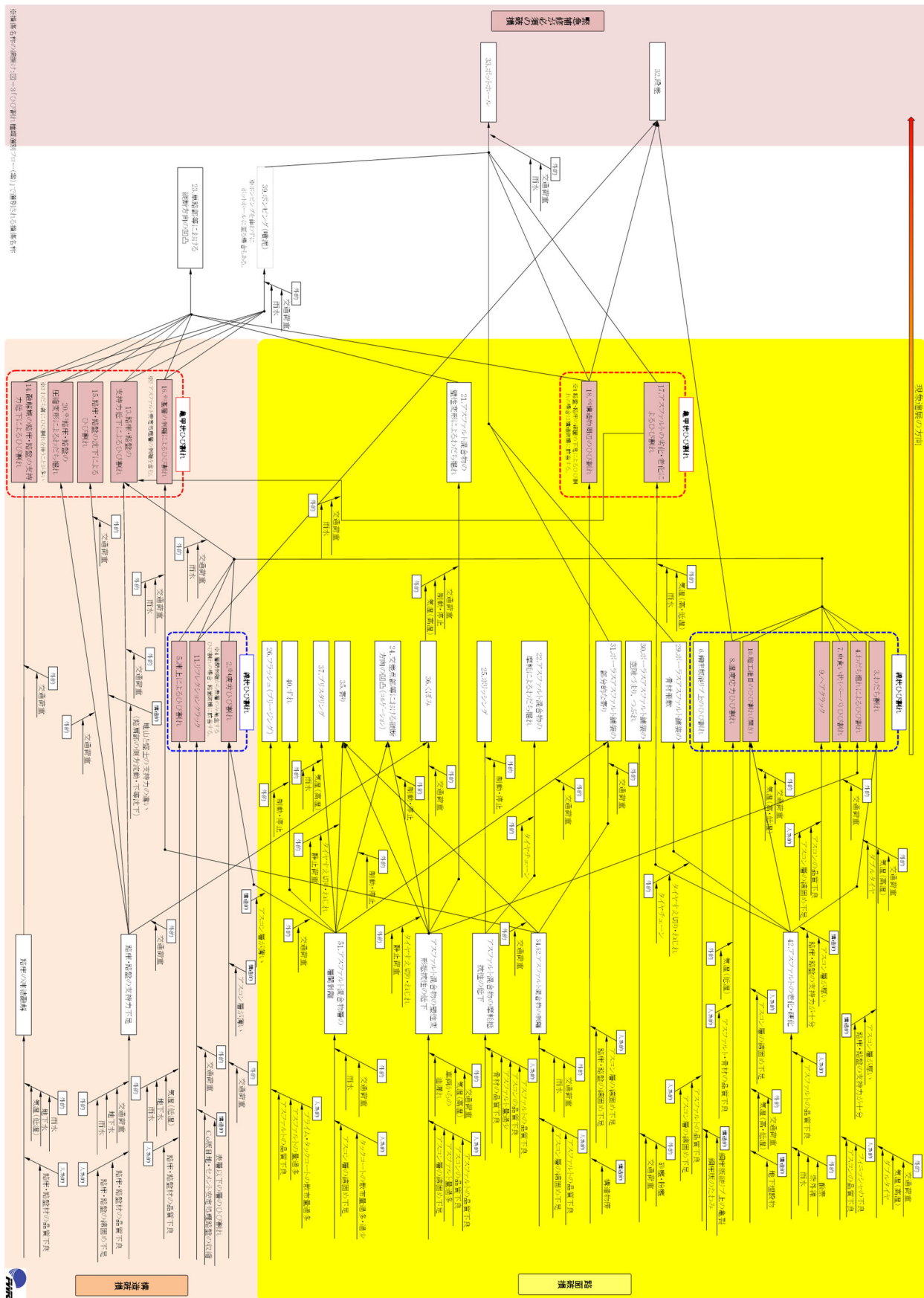


図-14 舗装の損傷の体系

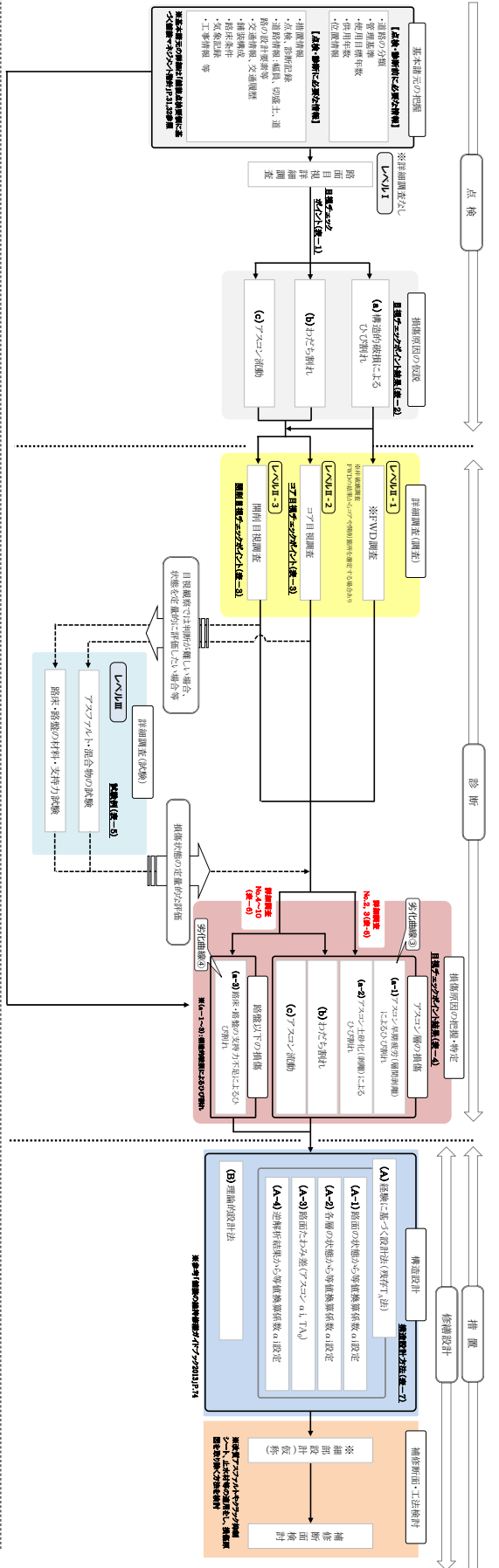


図-15 舗装の診断と措置の体系

表-1 路面の目視チェックポイント

項目	目視チェックポイント	判定
①	右下左下斜め方向にひび割れが生じている(後継路側側方)	○
②	ひび割れが縦方向に発生している(後継路側側方)	○
③	路面に凹凸が生じている(後継路側側方)	○
④	アスファルトの剥離が生じている(後継路側側方)	○
⑤	アスファルトの剥離が生じている(前継路側側方)	○
⑥	アスファルトの剥離が生じている(側方)	○
⑦	アスファルトの剥離が生じている(側方)	○
⑧	アスファルトの剥離が生じている(側方)	○
⑨	アスファルトの剥離が生じている(側方)	○
⑩	アスファルトの剥離が生じている(側方)	○

表-2 路面の目視チェックポイント結果

目視チェックポイント	判定	措置
①, ②, ③, ④	(A) 剥離修補	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑤, ⑥, ⑦, ⑧	(B) 剥離修補	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑨, ⑩	(C) アスファルトの剥離	アスファルトの初期修補(初期修補)

表-3 コブ・開閉検査の目視チェックポイント

項目	目視チェックポイント	判定
①	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
②	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
③	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
④	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
⑤	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
⑥	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
⑦	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
⑧	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
⑨	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○
⑩	コブ・開閉検査の目視チェックポイント	○

表-4 コブ・開閉検査の目視チェックポイント結果

目視チェックポイント	判定	措置
①	(A-1) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
②	(A-2) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
③	(A-3) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
④	(A-4) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑤	(A-5) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑥	(A-6) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑦	(A-7) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑧	(A-8) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑨	(A-9) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)
⑩	(A-10) アスファルトの初期修補(初期修補)	アスファルトの初期修補(初期修補)

表-5 レンタビルの検査例

分類	主な検査内容	検査結果
アスファルト・混合物の検査	密度・単位・硬化反応・入量試験・W/T試験(水浸し・単位試験・スウェーデン試験(体積)・レバシメントモジュール試験等)	○
密度・単位・硬化反応・入量試験	密度・単位・硬化反応・入量試験	○
W/T試験(水浸し・単位試験)	W/T試験(水浸し・単位試験)	○
スウェーデン試験(体積)	スウェーデン試験(体積)	○
レバシメントモジュール試験	レバシメントモジュール試験	○

表-6 検査結果を基に判定する方法の組み合わせ

No.	検査項目	検査結果を基に判定する方法				
		目視検査	目視検査	目視検査	目視検査	目視検査
1	目視検査	○	○	○	○	○
2	目視検査	○	○	○	○	○
3	目視検査	○	○	○	○	○
4	目視検査	○	○	○	○	○
5	目視検査	○	○	○	○	○
6	目視検査	○	○	○	○	○
7	目視検査	○	○	○	○	○
8	目視検査	○	○	○	○	○
9	目視検査	○	○	○	○	○
10	目視検査	○	○	○	○	○

表-7 検査結果を基に判定する方法の組み合わせ

No.	検査項目	検査結果を基に判定する方法				
		目視検査	目視検査	目視検査	目視検査	目視検査
1	目視検査	○	○	○	○	○
2	目視検査	○	○	○	○	○
3	目視検査	○	○	○	○	○
4	目視検査	○	○	○	○	○
5	目視検査	○	○	○	○	○
6	目視検査	○	○	○	○	○
7	目視検査	○	○	○	○	○
8	目視検査	○	○	○	○	○
9	目視検査	○	○	○	○	○
10	目視検査	○	○	○	○	○

上述の成果は舗装の損傷とそれに対応すべき診断・措置の網羅的な体系整理であり、これに基づいてさらに、全国に広く普及すべき、適切な診断・措置手法を図-16と図-17のとおり整理した。道路管理業務の担当者のうち、必

ずしも熟練した技術者でなくても要点を遺漏なく理解できるように配慮している。路面のみならず、必要に応じて路盤以下に着目することと、それに対応した具体的な診断・措置手法を示している。

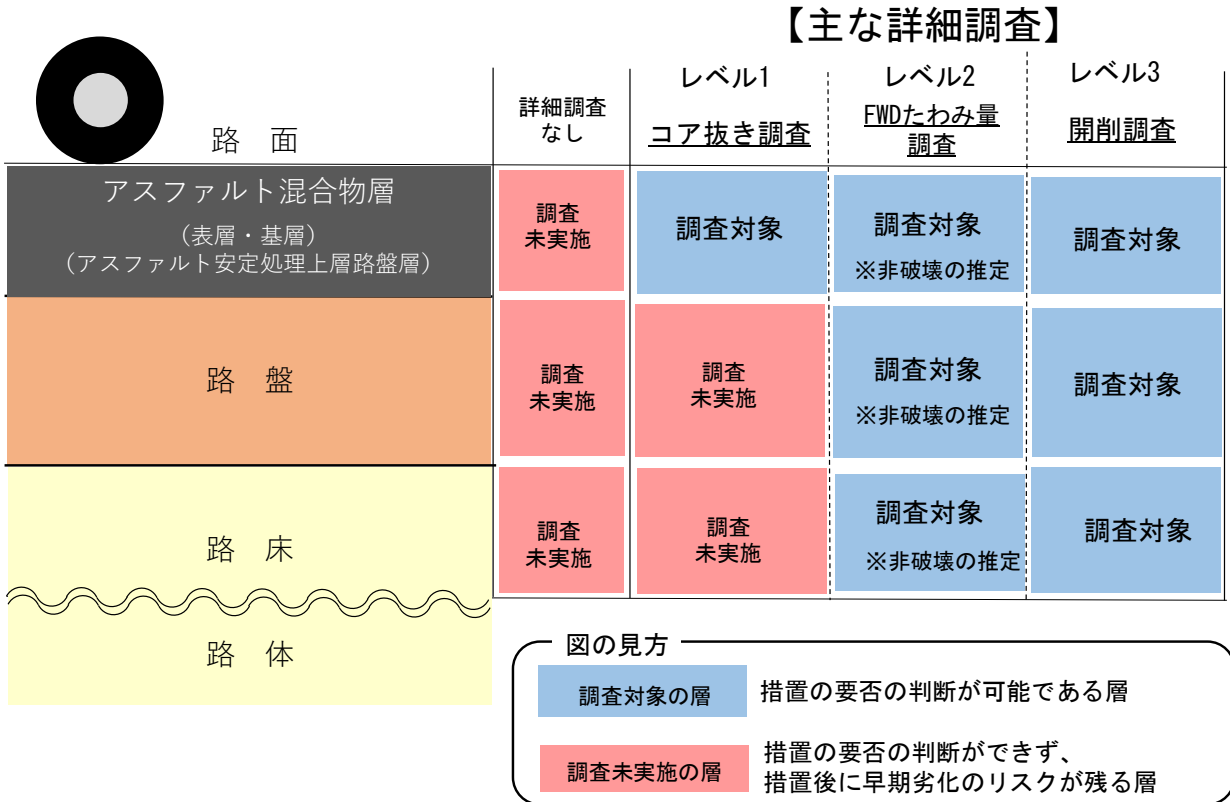


図-16 詳細調査の種類と対象深さの関係

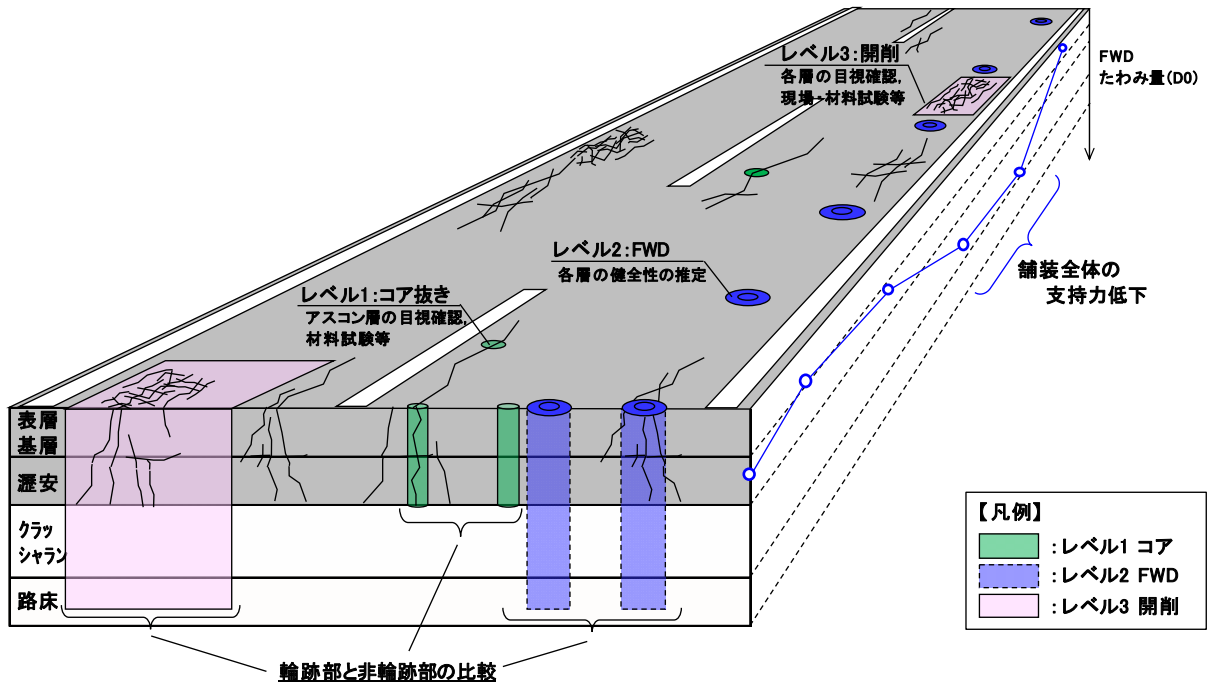


図-17 詳細調査の実施位置の典型例

### 3. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

#### 3.1 背景

重交通道路と軽交通道路では、舗装の損傷形態に応じて点検診断時の着目点や維持管理手法が異なる可能性があるため、本研究では重交通道路と軽交通道路の損傷状況の特徴を把握する調査を行った。

#### 3.2 調査方法

北海道内の国道約 6,500km を対象にアスファルト舗装の損傷実態を把握した。具体的には、現道の目視調査を行って、舗装管理支援システムに記録されているデータの区間毎（約 100m 単位）のひび割れ種類を判別し、どのような種類のひび割れがどのような条件の路線に多いかを調べた。判別したひび割れの種類は以下の 4 種類である。通過車両の繰返し载荷によって発生し舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ（以下、ボトムアップひび割れ）、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ（以下、トップダウンひび割れ）、路床内の水分が凍結して形成されるアイスレンズが成長することで生じる凍上ひび割れ、気温の上昇・下降によるアスファルト混合物の温度応力によって生じる低温ひび割れである。一つの区間に複数種類のひび割れが発生している場合には、複数種類のひび割れが発生している区間として扱った。目視調査のデータを基に、ボトムアップひび割れ、トップダウンひび割れおよび凍上ひび割れに関しては、ひび割れ率が 5.0%以上の区間数を 10km 毎にカウントして地図上に表示した。低温ひび割れに関しては、1km 当たりの低温ひび割れ発生本数をカウントして地図上に表示した。さらに、各々のひび割れが N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>、N<sub>6</sub>、N<sub>7</sub> 交通断面のうちどのような区間に多いのかを整理した。ちなみに本研究では、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通を軽交通道路区間として扱っているので留意されたい。

なお、調査は自動車専用道路を除く下り車線を対象とし、構造物区間やコンクリート舗装区間など表-2 に該当するデータの区間長を除外した上で集計した。これらのデータを除外した理由は、一般的なアスファルト舗装区間に比べて舗装構成や基盤条件が特殊であり、除外するのが妥当と考えたためである。

表-2 除外区間一覧（単位：m）

項目	延長(m)
舗装延長	6,584,198
除外区間	
① 構造物	177,348
② 最新ひび割れ率が空欄	109,396
③ 最新調査後に工事	1,331,079
④ 上り及び自専道	152,190
⑤ 最新調査時からルート変更・通行止め	16,702
⑥ Co舗装区間	135,109
⑦ 累積大型車交通量が空欄、舗装厚不明	127,112
舗装延長－除外区間	4,535,262

#### 3.3 調査結果

図-18 にボトムアップひび割れの発生分布図を、図-19 にトップダウンひび割れの発生分布図を、図-20 に凍上ひび割れの発生分布図を、図-21 に低温ひび割れの発生分布図を示す。図-18 より、ボトムアップひび割れは、道内の広い範囲に発生しており、主に郊外部において多く発生していることがわかる。図-19 より、トップダウンひび割れは札幌近郊と札幌函館間や札幌旭川間などの幹線道路での発生が多い。図-20 と図-21 より、凍上ひび割れと低温ひび割れは道北地域や道東地域の内陸部に多く発生していることが分かる。

表-3 には各ひび割れの発生延長および調査集計区間の延長に対する発生比率を示す。赤枠で囲んだ部分に着目すると、ボトムアップひび割れ、凍上ひび割れ、低温ひび割れは N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通断面などの舗装厚の薄い軽交通路線に多く発生していることが分かる。一方、トップダウンひび

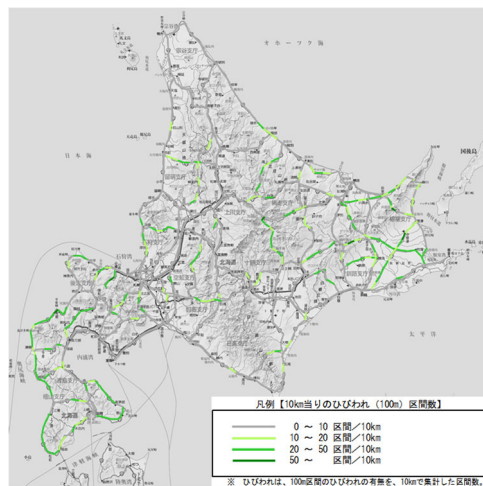


図-18 ボトムアップひび割れの発生分

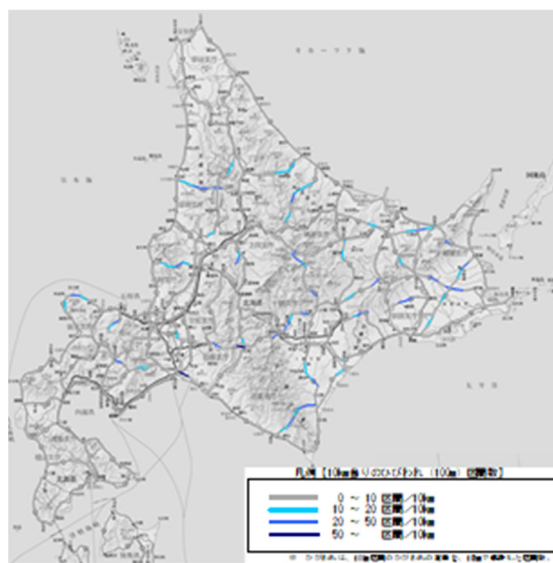


図-19 トップダウンひび割れの発生分布図

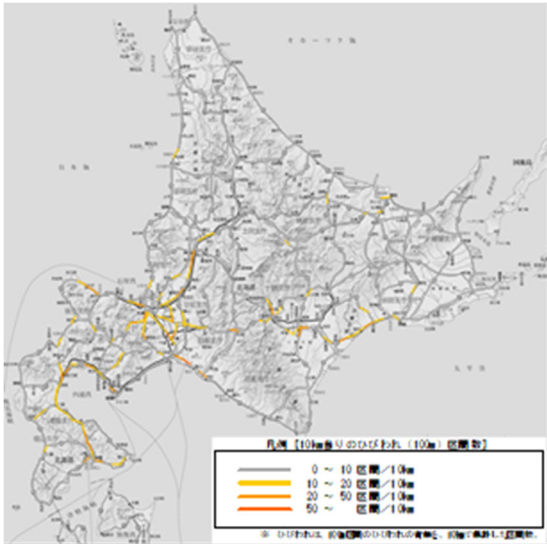


図-20 凍上ひび割れの発生分布図

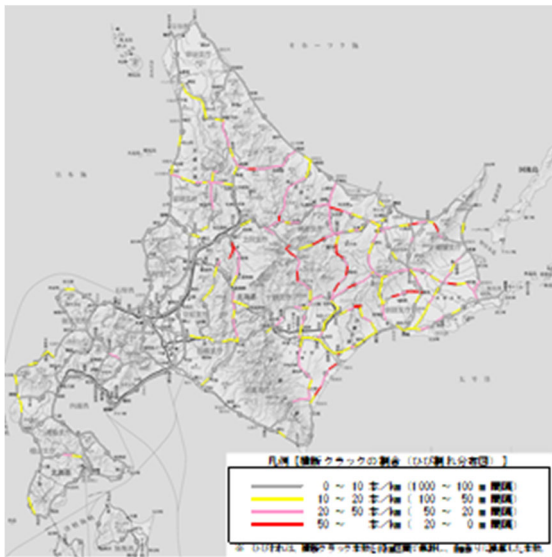


図-21 低温ひび割れの発生分布図

割れはN<sub>6</sub>、N<sub>7</sub>交通断面などの混合物層厚が厚い重交通路線に発生している傾向が見られる。軽交通路線は混合物層厚が薄いため、作用する力に対する抵抗性が小さく、様々なひび割れが発生し易いと推察される。軽交通区間では、特にボトムアップひび割れの発生区間延長が最も長く、次いで低温ひび割れ、凍上ひび割れの順であることが着目される。つまり、軽交通区間ではボトムアップひび割れに対する対処が最も多くなると理解できる。以上のように、交通断面によってひび割れ損傷の形態は異なっている。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの混合物層厚の薄い軽交通路線区間に着目すると、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの軽交通路線区間の舗装マネジメントならびに舗装維持修繕計画を考える場合には、これら

表-3 各ひび割れの発生延長および調査集計区間の延長に対する比率

交通量区分	As混合物層厚 (cm)	14cm未満	14cm以上 20cm未満	20cm以上 30cm未満	30cm以上	合計
	旧	A	B	C	D	
ひび割れ種別	現	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	
	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	4,535,262
ボトムアップひび割れ	ひび割れ発生区間の延長 (m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率 (%)	13.1%	11.1%	2.0%	0.8%	11.0%
トップダウンひび割れ	ひび割れ発生区間の延長 (m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率 (%)	5.1%	4.6%	9.1%	6.8%	5.5%
凍上ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長 (m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率 (%)	4.4%	4.4%	2.2%	0.1%	4.0%
低温ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長 (m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率 (%)	9.0%	7.8%	2.7%	0.9%	7.7%

の損傷形態への対処方法を検討することが大切である。特に、ボトムアップひび割れは広い範囲で発生している実態にあり、今後舗装の老朽化が進行するにつれて増加する性質のひび割れであると考えられるため、要点であるといえる。

#### 4. S波速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法

##### 4.1 高周波表面波探査による舗装S波速度構造把握

舗装の表面に打撃振動を与えると、舗装構成部材中を弾性波動が伝播する。伝播する弾性波動のうち、表層部を選択的に伝播する表面波を測定して舗装の物性構造を2次元断面として可視画像化する方法が表面波探査である。舗装構造調査に利用されてきているFWDも、同様に打撃時の弾性波振動を測定し、その測定データから静荷重負荷時のたわみ量を推定しているの、表面波探査法の一つであるという点では類似した手法である。ただしFWDが測定する振動の周波数帯域が数100Hz程度以下であるのに対し、開発対象とする手法は数10Hz~数kHzの高周波数帯域の表面波を測定する。そこで本手法を高周波表面波探査と称している<sup>5)</sup>。舗装は最表層部にせん断剛性が最も大きいアスファルト混合物層(アスコン層)が存在し、通常は輪荷重を分散させるため下方ほどせん断剛性が小さくなるという特徴的な構造を有しているが、高周波表面波探査はこのような最表層の剛性の高い層が存在する一般的な舗装構造でも適用可能である。またアスコン層や上下層路盤を伝播する表面波は、数100Hz~数kHzの周波数帯域が卓越する。逆にこの周

波数帯域の表面波を測定することで舗装の物性構造を推定する。

図-22 に高周波表面波探査記録からの舗装構造解析手順を例示する<sup>5)</sup>。同図左上が測定記録である。2.4m のアレイ区間に 10cm 間隔で加速度センサを並べ、舗装表面を小型ハンマーで打撃したときの振動を計測する。このアレイ内を 3ms 程度で伝播する優勢な表面波が捉えられている。この時間-距離領域の記録を、周波数-位相速度領域に変換することで表面波分散曲線(同図左下)が求められる。この分散曲線には、100Hz から 5kHz 程度の周波数帯域において、表面波の位相速度が周波数によって変化する現象、すなわち表面波分散が鮮明に捉えられている。この分散特性に着目し、逆解析によって 1 次元 S 波速度構造を求める(同図右)。この逆解析を測線に沿って逐次繰り返すことによって 2 次元の S 波速度構造断面を構築する。この図には、厚さ 8cm 程度のアスコン層に対応した高速度層が再現されていること、下位には S 波速度が 800m/s から 300m/s 程度の上下部路盤層が分布する。路床・地盤部の S 波速度は 200m/s 程度であり、N 値に換算すると 6-8 程度の柔らかい盛土材料・地盤が分布していると推定することができる。

#### 4.2 非接触型高周波表面波計測システムの開発

高周波数帯域の振動を測定できる加速度センサアレイを路面に稠密に展開し、舗装を伝播する高周波表面波を観測することによって舗装の物性構造を推定できることがわかった。しかし加速度センサを用いる場合、舗装路面へセンサを固着することが必須条件となり、路上での作業区間の設定と安全性確保のために通行規制を必要とするという欠点があった。そこで、非接触で移動が容易な表面波測定システムを試作し<sup>6), 7)</sup>、その機能を検証する比較検証実験を実施した。

測定方法の概念図を図-23 に示す<sup>7)</sup>。舗装路の表面をハンマー等で打撃すると、実体波とともに表面波が励起

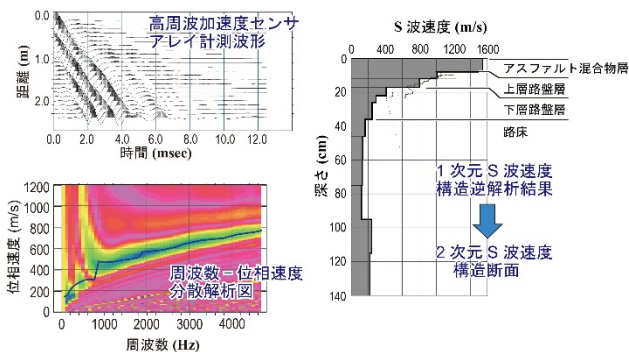


図-22 高周波表面波探査による舗装構造の解析手順  
(参考文献<sup>5)</sup>に加筆)

され、舗装表面を伝播する。この表面波によって舗装表面が振動すると、その一部が空气中に漏洩する。これは漏えい表面波と称される波動で、超音波工学分野では広く計測産業に利用されている。舗装伝播表面波は、舗装構造によって速度分散性を有しているため、漏洩表面波にもそれが反映される。そこでマイクロフォンを舗装面と平行に多数並べるアレイ配置で漏洩表面波を計測するように工夫した。図-24 に試作した非接触型高周波表面波測定装置試作システムの構成を示す<sup>6)</sup>。本システムはホイール付きのフレームに懸架されており、路上を容易に牽引し、移動計測が可能である。非接触型のマイクロフォンアレイは遮音函体に収納されており、振源から直接空中を伝播する打撃音を極力低減させるよう設計されている。なお、移動時には遮音函体を上昇させ、測定時には下降させて路面と密着させる昇降装置が取り付けられている。測定地点における作業時間は、遮音函体の昇降、振源の操作およびデータ取得を含め、検証実験段階では 5 秒程度であった。

#### 4.3 非接触型高周波表面波計測システムの改良

非接触型高周波表面波計測システムは、微弱な漏洩表面波を信号として扱うことから、環境音響雑音の抑制が技術開発上の重要点となる。このため、遮音函体と吸音材およびその寸法や形状の検討試験を進め、平成 29~30 年度に改良を図った。チャンネル数を増大し実用性を高めた。一般に、遮音材が高密度で厚みがあるほど雑音低減性が高まるが、高品質かつ高い効率で記録取得を可能とす

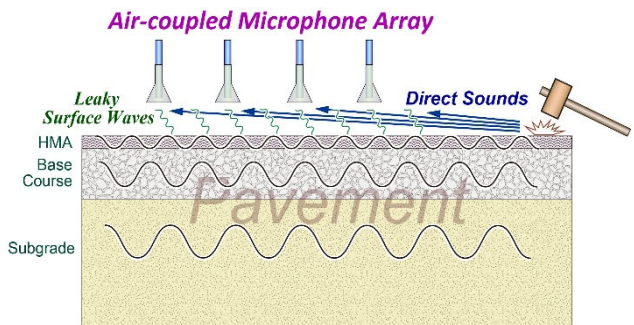


図-23 非接触型高周波表面波計測の概念図<sup>7)</sup>

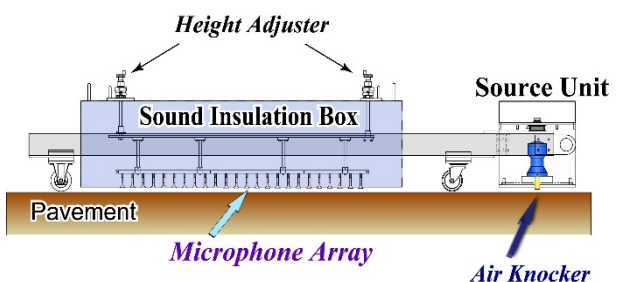


図-24 非接触舗装路物性計測システムの構成図<sup>6)</sup>



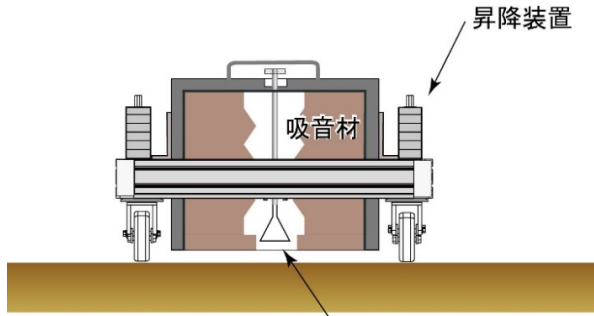


図-25 遮音箱体とマイクロフォンの配置例<sup>8)</sup>

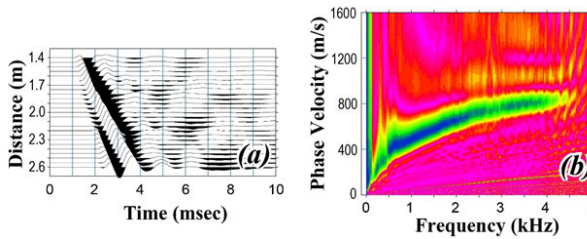


図-26 非接触型高周波表面波計測の (a) 取得記録と (b) 分散曲線<sup>8)</sup>

るには探査作業装置としての可搬性も重要となる。図-25に良好と考えられる遮音箱体とマイクロフォンの配置設計例を示す。試験遮音箱体を用いて取得された記録例を図-26に示す。図-26の(b)は記録波形を位相速度と周波数の領域に変換し位相速度の分散曲線を示している。周波数4.5Hzまでの分散特性を取得できている。

#### 4.4 高周波表面波探査の実舗装路での適用検証

熊本地震で120gal程度の強震動を受け、その後の豪雨によって高盛土の一部が崩壊した自動車専用道路において、残存部の舗装の内部物性を把握することを目的として高周波表面波探査を実施した。路面には滑落崖と平行に長さ25m程度の東側落ちのクラックが発生していた。このクラックを挟むように5本の測線を設定し、2次元のS波速度構造を再構成した。

測線配置および各測線のS波速度構造断面を図-27に示す。調査区間の舗装は、15cmのアスコン層と合計23cmの路盤層で構成され、その下位は客土材で盛り立てられていることがわかっていた。S波断面においても、表層のアスコン層および路盤層が高速度層として明瞭に捉えられている。層厚はほぼ一定であり、同時に実施した地中レーダ(GPR)探査の結果と整合的であった。またクラックを横断するT\_02測線断面には、交差点部で路床部のS波速度が周囲より小さくなっており、クラックの下方進展を捉えていると推定できる。なお当該区間はこの路盤面での調査後に一部開削され、当該クラックがほぼ鉛直に1.3m下方まで進展していることが

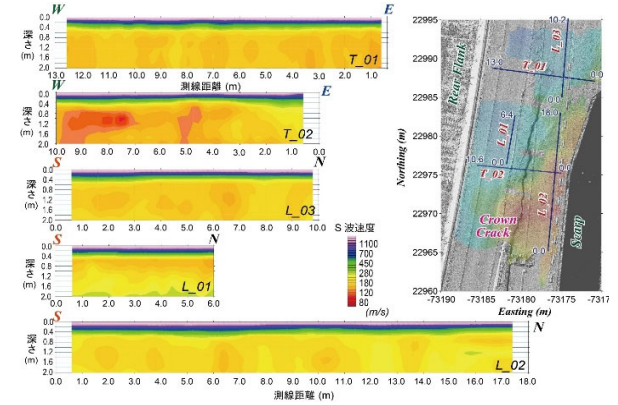


図-27 測線配置(右図)および各測線のS波速度構造断面(左図)

確認されている。また、盛土崩壊とは反対側の路線下の路床層が、相対的に低いS波速度を呈していた。盛土施工時の不均一性の影響が示唆される。

#### 4.5 舗装路盤に適した表面波解析手法の検討

標準的な地盤のS波速度分布は、深部になるほど速くなる。一般的に行われている表面波の解析では、最下層に高速の工学的基盤層を仮定し、最下層を最速度層として最下層速度よりも小さい範囲でノーマルモードの分散曲線を計算する。しかし、舗装道路のように、表層に高速度層が存在すると厚い低速度層が出現し、多数の高次モードが現れ、解析が複雑となる場合がある。最下層速度の設定により浅部の推定速度分布が大きく影響を受ける場合には、地表震源の振動が最下層に到達しているか注意が必要となる。地表起震による表面波のうち、震源位置から遠くない範囲の地震波動の高速度成分は、高速度層からのリーケージ(漏洩)モードとして解析し、最下層の速度条件に影響を受けない計算手法が適している。そこで、平成29年度に表層に高速度層が存在する条件におけるリーケージモードの解析を進めた(図-28)。リーケージ

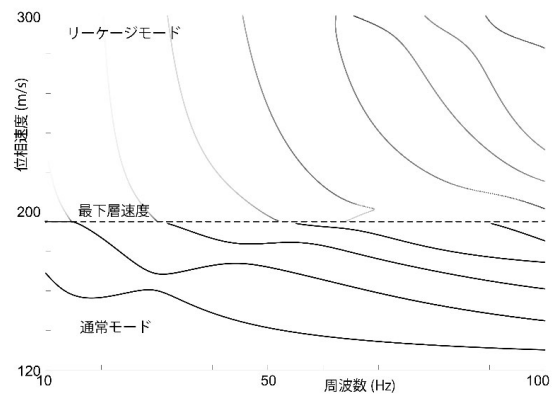


図-28 リークージモードの特性分析

モードは舗装等の高速度層が表層域に存在する際に、最下層の速度より高速の分散曲線として現れる。

最下層のS波速度は195m/sで、これより速い位相速度はリーケーモードである。リーケーモードでは表面波の水平方向への伝播とともに振幅が減衰しており、濃淡で減衰を表している。現在普及している表面波の解析手法では、最下層よりも高速な層の解析は難しく、舗装構造の解析を安定して行うために、今後は、リーケーモードを用いたS波速度分布の解析手法の開発が課題となる。

4. 6 表面波解析のための地盤構造特定手法

通常の表面波解析手法と異なり、表層が高速度の舗装道路においては、速度構造の深度の確定精度が低い点が問題となっている。そこで、地中レーダにより事前に深度構造を把握しておくことにより、解析精度の向上を図ることができる。図-29に地中レーダを用いた舗装分類例を示す。一部の舗装と路盤の境界、および、路盤と路床の境界の連続分布を明瞭に特定することができる。地中レーダ断面には路盤内や路床下の境界も検知されており、境界の特定は掘削による検証情報を参照して決定している。舗装構造境界の深度分布が特定できることにより、表面波探査の未知パラメータがS波速度だけとなり、推定精度の向上を図ることができる。掘削情報と地中レーダ断面により、数cmの精度で舗装構造境界の分布がわかり、FWDやMWDの解析入力パラメータの適正化を図ることができ、補修施工時の参照情報として用いることもできる。

舗装の表面波探査の解析において、S波速度の高い表基層の層厚が最も影響する。最も普及している空洞調査用の地中レーダでは、周波数が適合せず、薄い表基層の下面反射を識別できない場合が多い。そこで、高周波の地中レーダを用いた表基層層厚の測定を行った。このとき、アンテナ近傍の反射波を扱うため、送受信アンテナ間の距離が層厚測定に影響する。アンテナ間距離の影響を推定伝播速度で幾何補正する手順を含む解析手順を考案し、1cm以下の高精度で表基層層厚の連続分布がわかることを示した(図-30)。

図-31に、舗装の横断方向の調査例を示す。舗装面の起伏は、RTK-GNSS 測量を組み合わせた写真測量解析による。写真測量には RICOH の GR-III と Metashape を用いた。地中レーダ探査記録から検出した各舗装深度に標高補正を適用してプロットした。これにより、表層上面の凹みは、ほぼ同じ変形量で基層下面に及んでいること、路盤路床境界へはより小さく影響がおよび変形していること、路床下部境界にはほとんど影響が及んでいないことがわ

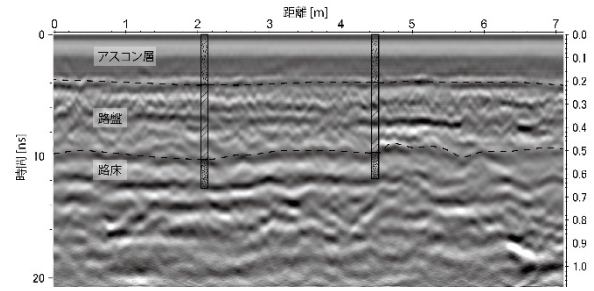


図-29 舗装構造の識別例

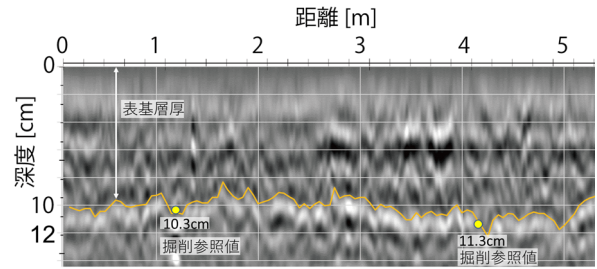


図-30 表基層厚の連続分布

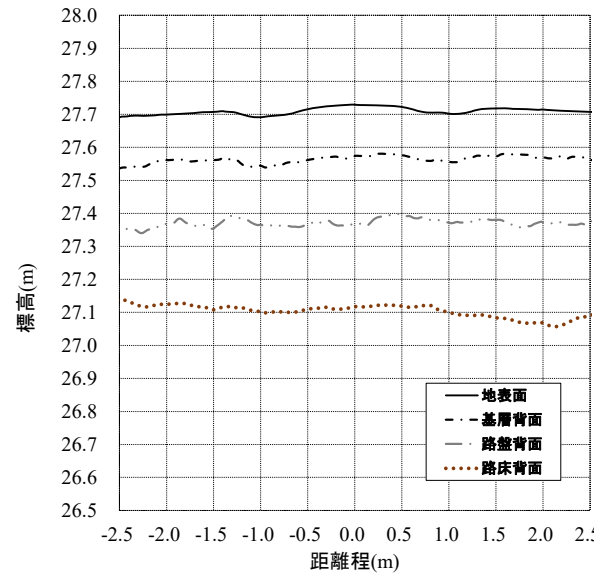


図-31 舗装構造の変形分布

かる。舗装構造の調査記録の活用により路盤や路床の構造の変形範囲を把握することができ、補修範囲の適切な判断が行える可能性が示された。

4. 7 S波速度を示標とした優先度の評価手順の検討

現位置で、舗装内部の物性構造を2次元あるいは3次元的に把握することが可能な原位置調査手法としては、地中レーダのほか、MWDを含めた振動計測手法が最も有効であり、かつ技術的ハードルも低い。一方、舗装を伝播する振動のうち、S波速度は地盤強度の調査にも広く用いられており、液状化等の危険がある地盤にも対応

した速度を示すことが知られている<sup>3)</sup>。ただし現時点ではS波速度分布を利用した舗装の健全度示標は構築されていない。

## 5. まとめ

平成28年度においては、重交通道路に該当する関東地方整備局管内の直轄国道において、コア抜き調査結果をもとにした修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に寄与したことを明らかにした。点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。

また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。

平成29年度においては、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かったため、日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。

平成30年度においては、舗装の損傷が路盤に至っている場合を想定し、詳細調査のうち開削調査をどのように実施すべきか検討した。実大走行実験の結果によると、路面にわだち掘れが進行しておりかつひび割れの進行が小さい場合は、路盤の圧縮に起因することがわかった。また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理、軽交通舗装区間における簡易な路面性状把握手法がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。

さらに、高周波数成分に着目した表面波探査によっ

て、舗装内部の物性構造を詳細に把握できること、S波速度構造から舗装内部の不均質構造や変形範囲を推定することが可能であることを実証した。また、高周波の表面波を探査可能な実用性を有する装置を作製した。

令和元年度はひび割れの位置とFWDたわみ量の関係について解析にて分析した。これにより、ひび割れの程度や位置が、FWDたわみ量に及ぼす影響が把握できた。加えて、構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係について、過去の主要な文献の記載事項を網羅するとともに、実道で新たに開削調査を実施した知見を統合し、体系的に整理した。さらに、高周波表面波探査の問題点を解消するために、地中レーダにより事前に舗装構造の深度分布を特定する手法の開発を進めた。

令和2年度は、ひび割れとFWDたわみ量の関係について、解析に加えて実験により傾向を把握した。さらに舗装の構造的損傷に対する診断と措置に関して、個々の技術を体系的に整理するとともに技術の選択の基本的な考え方を整理した。

令和3年度は、高周波型の地中レーダを用い、高精度で表基層厚の連続分布を測定できることがわかった。地中レーダにより路盤厚や路床深度および境界分布の把握が行えることにより、S波速度の特定精度を向上することができる。また、舗装構造の変形範囲を把握する技術は、補修範囲の適切な判定に利用することができる。

## 参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 国土交通省道路局：平成22年度全国道路・街路交通情勢調査 茨城県、65p.、2010
- 3) (公社)日本道路協会：舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編一、pp.15-22、2013.4
- 4) 渡邊一弘、増戸洋幸、篠塚政則、上島壯：短い測定間隔による修繕前後の構造評価結果、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、No.3、pp.177-185、2016.12
- 5) 稲崎富士、青池邦夫、今村杉夫、林 宏一：高周波表面波分散特性を利用した舗装の物性構造調査、第50回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.195-196、2015
- 6) Inazaki, T., Aoike, K., Kita, T., and Hayashi, K., (2014): High-frequency surface wave measurement for the pavement structural analysis, *Proceedings of the 27th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2014)*, 7p., 2014

- 7) 稲崎富士：2011 年東北地方太平洋沖地震による河川堤防・表層地盤の S 波速度構造の変化、高周波表面波分散特性を利用した舗装の物性構造調査、日本地震学会 2016 年秋季大会予稿集、155p.、2016
- 8) 稲崎富士、木佐貫寛、今村杉夫、林 宏一：非接触舗装路物性計測システムの開発（その 4）：函体の遮音性の改良と実用化、第 138 回学術講演会講演論文集、物理探査学会、pp.13-16、2018

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.6 先端的維持管理技術による管理用施設（機械設備）マネジメントに関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）

研究担当者：藤野健一、梶田洋規、新田恭士、  
森川博邦、伊藤 圭、上野仁士、  
吉田 潔、黒田浩章、須山友貴

#### 【要旨】

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、河川・道路において非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。しかしながら近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要とされていた部品や機器の故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、機能回復時間等を考慮した信頼性評価と機器や部品レベルでの重要度判断や保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立する必要がある。本研究では、国民の生命、財産を守る上で不可欠な土木機械設備の確実な機能発揮を目指し、土木機械設備の効率的・効果的な維持管理に関する手法について提案するものである。

キーワード：土木機械設備、維持管理、ストックマネジメント、リスク回避

#### 1. はじめに

土木研究所においては、これまで土木機械設備の効率的・効果的な維持管理の実現を目的として、信頼性評価手法及び関連する複数の施設における社会的な影響度と設備の健全度の総合評価手法、また「非」常用設備への状態監視技術に係る研究を実施し、効果的な更新や整備の計画立案に寄与してきたところである。

土木機械設備の信頼性評価において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速も有力な要素となるが、これまでこれらを盛り込んだ評価手法が確立されていない。そのため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定にあたり現実と乖離した結果となることから、これらを含めた総合的な信頼性評価手法の確立とマネジメントについて検討する必要がある。

本報告書は、平成28年度から令和3年度まで検討を進めてきた、機械設備の故障時からの機能回復能力の定量化方法とその活用方法、災害時の弱点となる設備構造の抽出ならびに信頼性評価手法を活用した弱点克服の検討、故障情報の収集と活用についての課題についてとりまとめたものである。

#### 2. 研究実施内容

本研究では、土木機械設備についてより効果的・効率的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資する、以下の研究に取り組んでいる。

- ・故障リスク等を考慮した設備ストックマネジメント手法の検討

#### 3. 研究の基本方針

##### 3.1 研究の基本方針

これまで土木機械設備の信頼性評価に関する研究において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速を盛り込んだ評価手法の確立は行われていない。このため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定において、管理実態と乖離することがある。

したがって、故障等のリスクや機能回復の遅速を考慮した信頼性評価とマネジメント手法の確立と、各設備に最適な保全方法の選定手法の検討を行い、基準化に向けての技術資料を策定し提案する必要がある。

これらを実現するにあたって、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 機械設備の運用、機能回復期間、整備体制等によるリスク回避の定量化方法検討
  - ・故障等のリスク、機能回復の遅速に関するデータ収集及び機能回復難易度、機能補完性の検討



す努力は必要ではあるが) 事実上不可能であり、機能停止時等からの「機能回復時間」を考慮したマネジメント手法についても検討する必要があると考える。

そこで本研究では、故障時からの機能回復の遅速等の定量的評価とそれを取り入れたマネジメント手法について主体に検討を進めることとした。

また、同時に、設備仕様変更による機能停止発生頻度低下に関する評価や、これらの評価の基となる故障情報のさらなる活用方法等についても検討を行った。

#### 4. 機械設備の運用、機能回復期間、整備体制等によるリスク回避の定量化方法検討

##### 4.1 機能回復難易度評価手法の検討

これまで土木機械設備の信頼性評価に関する研究において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速を盛り込んだ評価手法の確立は行われていない。このため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定において、管理実態と乖離することがある。

したがって、故障等のリスクや機能回復の遅速を考慮した評価・マネジメント手法を確立すべく、「機能回復難易度の定量的評価(以降、「機能回復難易度評価」と表現)について検討を行った。

この評価の活用場面の当初想定は、「維持管理計画への活用」である。維持管理計画策定はマニュアルに則って行われており、設備構成機器を予防保全とするか事後保全とするかの判断は現在、FMEAを基にした故障等級の算定と、故障等級をしきい値により致命(=予防保全)／非致命(=事後保全)に仕分けすることが基本となっているが、少ない維持管理予算で故障リス

クを考慮してより効率的な計画立案のためにはさらなる差別化と、その際にはメーカーの違いや地域性などにより管理水準の差が発生することも念頭にいて検討を進めた。

また、その他の活用場面についても検討を行った。

機能回復難易度評価手法のとりまとめに至る検討経緯については後述するが、最終的に定めた評価項目、機能回復指標算出のための点数配分調整、算出式を表-2に示す。なお、表中で赤字となっている「復旧までの所要時間A」「修繕費用ランクC」の配点は、評価者が実情に合わせて設定することとしている。点数配分については、4.2.4で後述する。

その設定の考え方を含めた実際の評価手順については、「算定の手引き(素案)」としてとりまとめた。

##### 4.2 機能回復難易度評価手法の評価項目等の検討過程

機能回復難易度評価手法のとりまとめ検討過程であるが、概略を以下に示す。

###### 4.2.1 平成28年度

評価手法については、リスク回避の定量化方法の検討を行い、既存の信頼性評価手法であるFMEAを基本ベースとしたリスク評価方法の検討を進めることとした。

現在土木機械設備で実施しているFMEAの手法は以下の通りである。

設備の構成機器に対し、下記の評価項目に対し点数をつける。

評価項目：システムへの影響度、発見の容易性、故

表-2 機能回復難易度評価 評価項目ならびに配点

大項目	小項目	評価	4点	3点	2点	1点	合計点	機能回復指標算定のための点数配分の調整	
								元の合計点	機能回復指標算定点数
機能回復難易度	復旧までの所要時間	4段階	〇ヶ月以上	〇ヶ月～〇ヶ月	〇週間～〇ヶ月	〇週間未満	A:左記3項目の合計 3～8点	7～8点	4点
	設備復旧者の違い	2段階			メーカー	点検業者		6点	3点
	設備復旧場所	2段階			工場	現場		5点	2点
機能補完性	予備品・二重化によるもの	4段階	なし	対応可(重)	対応可(軽)	二重化可能	B:左記2項目の計 2～7点	6～7点	4点
	近隣他機場等による機能補完	3段階		不可能	能力不足だが可能	可能		5点	3点
修繕費用ランク		4段階	〇〇万円超	〇〇万円以下	〇〇万円以下	〇〇万円以下	C:1～4点	4点	4点
								3点	3点
								2点	2点
								1点	1点
故障検知難易度		4段階	分解が必要			目視で特定可能	D:1～4点	4点	4点
			分解しても特定困難	メーカーが分解	点検業者で分解可能			3点	3点
								2点	2点
								1点	1点

機能回復指標は  $\sqrt{A \times B \times C \times D}$  で算出

(注) 機能回復難易度Aは、「設備復旧者の違い」が操作員の場合は、他の点数に関わらず1点とする。

機能回復指標を算定

障発生頻度

評価の配点：各項目 1～4 点

配点結果を基に下式で「故障等級」を算定し、これ  
がしきい値以上の構成機器を予防保全とする。

$3\sqrt{\text{システムへの影響度} \times \text{発見の容易性} \times \text{故障発生頻度}}$

FMEA による機械設備の評価例を表-3 に、各評価  
の配点例を表-4 に示す。

なお、本書において、故障等級を評価する従来の  
FMEAについては、今回の取り組みと明確に区別する  
ために、以降「故障等級FMEA」と記載する場合があ  
る。

機能回復難易度評価について、評価項目は当初、「復  
旧までの所要時間」「機能補完性」の 2 項目とした。

評価シミュレーションとして、過去に FMEA を実  
施した中規模排水機場(以降「K 排水機場」と記載)を  
モデルに評価を試みた。K 排水機場の諸元を表-5 に、  
評価項目ならびに評価結果を表-6 に示す。

その結果、評価自体は可能だが、下記の課題が確認  
された。

表-5 K 排水機場 諸元

項目	中規模排水機場 (K排水機場)
ポンプ台数	2 台
ポンプ形式	立軸斜流ポンプ
吐出量(1 台あたり)	7.5m <sup>3</sup> /s
ポンプ口径	1,800mm
主原動機形式	ディーゼル機関
主原動機出力	530kW(720ps)

- ① 復旧までの所要時間はモデルとしたポンプ設備  
メーカーへのヒアリングによるものであるが、調達  
状況やメーカーの違い、故障状況により復旧時間が  
異なることもあり得る。また故障データ(約300  
件)に基づく分析によるものであるが、故障情報  
が少ないため分類が困難なものもあり、故障情報  
の積み重ねが重要である。
- ② 今回の分析では「早期回復困難」となった機器部  
品数が多い結果となったが、機能回復の遅速を考  
慮した評価により保全手法のさらなる仕分けを  
行う、という観点からは難があることから、新た  
な評価項目の追加や評価の細分化(4段階以上)

表-3 FMEA の例

部品名	故障	故障 モード	原因	a システムへ の影響度	b 発見 難易度	c 発生 頻度	故障等級
ベンド (ケーシング)	漏水(横軸)	劣化	経年劣化	4	1	1	1.6
	排水能力低下	腐食	水質				
掘付部	支持力低下	躯体変形	キャビテーションの発生	3	1	1	1.4
	ポンプ位置のずれ	クラック	不適切な管理				
組立用 ボルト・ナット	固定能力の低下	破断	経年劣化	3	2	1	1.8
	漏水	腐食	キャビテーションの発生				

故障等級は右式で算出  $3\sqrt{a \times b \times c}$

表-4 FMEA の評価配点例(4 段階の場合)

評価点	システムに対する影響	発見難易度	発生頻度
4	重故障 (運転停止を要する)	検出困難	0.099E-6 (1/h)以上
3	軽故障 (短時間の運転可能)	整備レベル	0.066～0.099E-6 (1/h)
2	軽微 (継続運転可能(運転後要点検))	年点検レベル	0.033～0.066E-6 (1/h)
1	冗長性あり (運転に支障なし)	月点検レベル	0～0.033E-6 (1/h)



表-6 機能回復難易度評価例（最初期）

機器区分	部品名	故障等級FMEA				機能回復難易度評価					
		システムへの影響度	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級(致命度)	復旧までの実際の所要時間	修繕内容	復旧までの所要時間評価	補完方法	機能補完性評価	機能回復指標
本体	バンド(ケーシング)	4	1	1	1.6	約10ヶ月	取替	4	なし	4	4.0
インペラ	羽根車	4	3	4	3.6	約10ヶ月	取替	4	なし	4	4.0
	羽根車ナット	4	3	1	2.3	約5ヶ月	取替	3	なし	4	3.5
主軸及び軸受	軸継手	4	3	4	3.6	約7ヶ月	取替	4	なし	4	4.0
	グランドパッキン	4	2	4	3.2	約5ヶ月	取替	3	予備品	2	2.4

表-7 機能回復難易度評価表（平成29年時点）

大項目	小項目	評価	4点	3点	2点	1点	
機能回復難易度	復旧までの所要時間	4段階	7ヶ月以上	4～7ヶ月	3～4ヶ月	3ヶ月未満	A:左記3項目の合計 3～9点
	設備復旧者の違い	3段階		メーカー	点検業者	操作員	
	設備復旧場所	2段階			工場	現場	
機能補完性	予備品・二重化によるもの	4段階	なし	対応可(重)	対応可(軽)	二重化可能	B:左記2項目の計 2～7点
	近隣他機場等による機能補完	3段階		不可能	能力不足だが可能	可能	
修繕費用ランク		4段階	1000万円超	1000万円以下	100万円以下	30万円以下	C:1～4点
故障検知難易度	4段階	分解が必要				目視で特定可能	D:1～4点
		分解しても特定困難	メーカーが分解	点検業者で分解可能			

機能回復指標は  $\sqrt[4]{A \times B \times C \times D}$  で算出

により、さらなる絞り込みの検討が必要となった。

#### 4.2.2 平成29年度

平成28年度に抽出された課題をのうち、①の故障情報の積み重ねについては、8. の故障情報の収集と有効活用で後述する。ここでは②の評価項目の追加について述べる。

追加した評価項目を追記した配点表を表-7に示す。追加項目は表中の赤字である。なお、表内の評価点の基準は、研究中の暫定値である。

合わせて、マニュアルに掲載されている構成機器の致命度との比較を行い、評価の妥当性や、保全方法のさらなる仕分けが可能かの確認を行った。

致命度(早期機能回復困難/容易)の判断については、機能回復指標のしきい値を設けてその境をもとに判断することとした。しきい値の考え方は複数あるが、ここでは機能回復指標の各評価が中央値(あるいはその直上)にある場合の指標値(表-8の黄色部)である4.56とした

評価シミュレーションは、先述のK排水機場と、K排水機場と同一管理者が管理する大規模排水機場(以降「M排水機場」と記載)を対象とした。K排水機場については再掲となるが、両機場の諸元を表-9に示す。

マニュアルに掲載されている構成機器の致命度は故障等級FMEAによる評価を基本としているので、機能

表-8 機能回復指標のしきい値の配点

機能回復難易度						機能補完性				修繕費用		故障検知難易度 (故障箇所特定の難易度)	
復旧までの所要時間		設備復旧者の違い		設備復旧場所		機能補完性 (予備品の有無)		機能補完性(近隣の他機場による機能補完)		修繕費用		故障検知難易度 (故障箇所特定の難易度)	
評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点	評点基準	評点
7ヶ月以上	4					なし	4			次年度向け予算要求が必要なしレベル(目安:1,000万円超)	4	故障時に分解しても即時に特定困難	4
4~7ヶ月	3	製造メーカーが対応	3			予備品対応(重故障)	3	不可能	3	地盤等の単位での調整の後に当該年度の維持管理費で修理できるレベル(目安:1,000万円以下)	3	故障時に分解したら即時特定可能(メーカーでなければ分解不可)	3
3~4ヶ月	2	点検業者で対応可能	2	工場修理	2	予備品対応(軽故障)	2	不完全(能力不足)だが可能	2	事務所等での当該年度の維持管理費で修理できるレベル(目安:100万円以下)	2	故障時に分解したら即時特定可能(直営または地場点検業者で分解可能)	2
0~3ヶ月未満	1	職員・操作員で可能	1	現場修理	1	二重化可能	1	完全に可能	1	経験豊富な注または点検の付帯作業で修理できるレベル(目安:30万円以下)	1	故障時に目視または発生現象から即時特定可能	1
A:上記3項目の合計 3~9点						B:上記2項目の計 2~7点				C:1~4点		D:1~4点	

表-9 K排水機場 M排水機場 諸元

項目	中規模排水機場 (K排水機場)		大規模排水機場 (M排水機場)	
	2台	2台	1台	1台
ポンプ台数	2台	2台	1台	1台
ポンプ形式	立軸斜流	立軸渦巻斜流	立軸渦巻斜流	立軸渦巻斜流
吐出量(1台あたり)	7.5m <sup>3</sup> /s	25m <sup>3</sup> /s	50m <sup>3</sup> /s	50m <sup>3</sup> /s
ポンプ口径	1800mm	3300mm	4600mm	4600mm
主原動機形式	ディーゼル機関	ディーゼル機関	ディーゼル機関	ディーゼル機関
主原動機出力	530kW(720ps)	1987kW(2700ps)	4122kW(5600ps)	4122kW(5600ps)

回復難易度評価を維持管理計画に取り入れる際は、故障等級FMEAとの組み合わせ評価の仕方を検討する必要があります。

組み合わせ評価の仕方の検討については4.3で後述するが、シミュレーション結果から、下記①~③の3点が次の検討課題となった。

- ① 本検討は大規模機場 1 施設と中規模機場 1 施設との比較であり、サンプルが少ないため、必ずではないが現状の評価項目では、大規模機場の機能回復指標は中規模排水機場に比べ全体的に高い結果になる事が推測される。よって、「機能回復難易度」「修繕費用ランク」は、設備毎に評価の設定の必要があると考えられる。
- ② 機能回復指標を算出するにあたり、評価のためにメーカーへのヒアリングを行い、その結果を基に評価を実施しているが、その際にどの評価項目も想

定する事象が多いために評価に個人差が出てしまう問題が確認された。また、評価の配点は設備ごとに設定すべきものと、評価者によらず不変とするべきものがあることが確認された。復旧時間や、復旧方法、復旧費用等は、故障箇所や故障の程度により変化するものであるが、この時点の評価では、各設備について「どの様な故障であるか」「どの程度の故障であるか」を具体的には設定していない為、故障・修繕方法は評価者の個人の想定である。評価者個人の想定の場合、様々な想定が考えられ、故障箇所や故障程度等想定が発散してしまう為に評価が難しいこととなった。そのため、具体的な故障、代表的な故障を想定することで、修繕・整備・更新方法(機能回復方法)が限定され、各評価の個人差を減らせると考えられる。ただし、具体的な故障を想定すると具体的すぎるがために、一般的な評価とならない可能性もある事を注意したい。

- ③ 『機能回復難易度』は、『修繕費用ランク』と『故障検知難易度』が 1~4 点であるのに対し、「復旧までの所要時間」「設備復旧者の違い」「設備復旧場所」の合計点であるために 3~9 点の 7 段階評価となっており、最低評価点の 3 点であっても、『修繕費用ランク』『故障検知難易度』と比較

して高い点数であるためバランスが悪い。(『機能補完性』についても同様である)

このように評価項目により評価点異なる為、機能回復指標の評価点のレンジが、最大値が約 5.63、最小値が約 1.57 となり、評価がわかりにくい。また、「故障した場合のシステムへの影響度」「発見の容易性」「故障発生頻度」を評点とした故障等級 FMEA で算出される故障等級 (1~4 点) による致命度評価との組み合わせが困難になることが想定された。

#### 4.2.3 平成 30 年度

平成 29 年度で抽出された課題のうち、②の「故障・修繕方法の想定は個人により異なるので評価も変わる」という点については、評価の際には標準的な故障を想定して行うことと整理した。

③の「評価項目により配点が異なりバランスが悪い」に対して、考え得る機能回復指標算定式15パターンに対して評価の試行を行い、算定式の最適化を行った。平成29年度に考案した前掲の表-8に対して、機能回復難易度と機能補完性を大項目としてそれぞれ算定の後算定点数として整理し、大項目毎に1~4点の配点となるように調整した。その結果を表-10に示す。表内の配点基準以外は、表-3に示した最終の評価方法と同じである。

#### 4.2.4 令和元年度

平成 29 年度で抽出された課題のうち、①の「機能回復難易度」「修繕費用ランク」は、設備毎に評価の設定が必要であると考えられるという点について再考・検証した。

「復旧までの所要時間」「修繕費用ランク」は、これまでは研究途上であり、機能回復指標算出の有効性の確認のため、仮に設定したものである。実際に管理者が評価する場合は、実態に即した評価基準を設定する必要がある。

そこで設備管理者に対し、上記 2 項目について、適切と思う評価基準のアンケート調査を行った。調査対象は、国土交通省各地方整備局単位とした。

「復旧までの所要時間」に関する結果を表-11 と図-1 に、「修繕費用ランク」に関する結果を表-12 と図-2 に示す。

「復旧までの所要時間」については、図-1 より、評価基準の傾向が二分化されていることと、これまで設定していた評価基準が大きめ(甘い)であったことがわかる。

また、「修繕費用ランク」については、図-2 より、大多数が似たような傾向を示し、これまで設定していた評価基準とおおむね近い傾向ではあるが、一地

表-10 機能回復難易度評価表 (平成 30 年時点)

大項目	小項目	評価	4点	3点	2点	1点	機能回復指標算定のための点数配分の調整	
							元の合計点	機能回復指標算定点数
機能回復難易度 A	復旧までの所要時間 a	4段階	7ヶ月以上	4~7ヶ月	3~4ヶ月	3ヶ月未満	7~8点	→ 4点
	設備復旧者の違い b	2段階			メーカ	点検業者	6点	→ 3点
	設備復旧場所 c	2段階			工場	現場	5点	→ 2点
機能補完性 B	予備品・二重化によるもの d	4段階	なし	対応可(重)	対応可(軽)	二重化可能	3~4点	→ 1点(注)
							6~7点	→ 4点
	近隣他機場等による機能補完 e	3段階		不可能	能力不足だが可能	可能	5点	→ 3点
修繕費用ランク C	4段階	1000万円超	1000万円以下	100万円以下	30万円以下		4点	→ 4点
							3点	→ 3点
							2点	→ 2点
							1点	→ 1点
故障検知難易度 D	4段階		分解が必要			目視で特定可能	4点	→ 4点
			分解しても特定困難	メーカが分解	点検業者で分解可能		3点	→ 3点
							2点	→ 2点
							1点	→ 1点

機能回復指標を算定

機能回復指標は  $\sqrt[4]{A \times B \times C \times D}$  で算出

(A=a+b+c, B=d+e の合計点から、機能回復指標算定点数にランク分けする)

(注) 機能回復難易度Aは、「設備復旧者の違い」が操作員の場合は、他の点数に関わらず1点とする。

整のみ突出して金額が高くなっていることがわかる。

以上から、評価基準には地域差があると考えられる。この結果から、全国統一的な配点とすることが難しく、管理者各自の判断で設定することが適切であることが再確認された。だが、例示等がないとどう配点してよいか苦慮することも想定されるため、このアンケート結果も例示することが実用上必要とした。

以上の検討を進めた結果、機能回復難易度評価手法を冒頭の表-2の通りと定めた。

配点の例示については、本項での検討を元に4パターン考案し、表-13のとおり定めた。

表-11 「復旧までの所要時間」各管理者の回答

回答者	1点	2点	3点	4点
A	2週間未満	2週間以上	3ヶ月以上	6ヶ月以上
B	5日未満	5日以上	10日以上	1ヶ月以上
C	1日未満	1日以上	1週間以上	1ヶ月以上
D	1ヶ月未満	1ヶ月以上	3ヶ月以上	6ヶ月以上
E	1週間未満	1週間以上	1ヶ月以上	2ヶ月以上
F	3日未満	3日以上	7日以上	1ヶ月以上
G	1ヶ月未満	1ヶ月以上	3ヶ月以上	6ヶ月以上
H	3ヶ月未満	3ヶ月以上	4ヶ月以上	7ヶ月以上

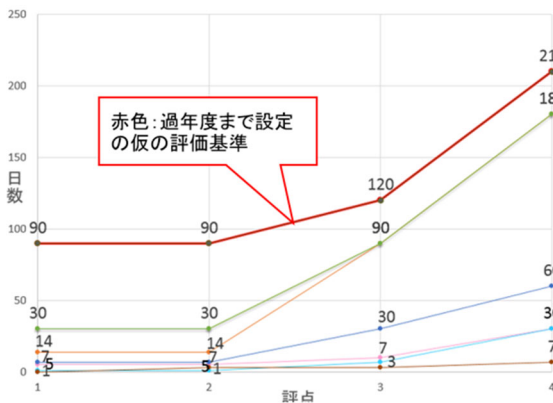


図-1 「復旧までの所要時間」各管理者の回答

表-12 「修繕費用ランク」各管理者の回答

回答者	1点	2点	3点	4点
A	50万円以下	100万円以下	1,000万円以下	1,000万円超
B	30万円以下	50万円以下	500万円以下	500万円超
C	250万以下	1,000万円以下	5,000万円以下	5,000万円超
D	100万円以下	300万円以下	500万円以下	500万円超
E	100万円以下	500万円以下	1,000万円以下	1,000万円超
F	50万円以下	100万円以下	1,000万円以下	1,000万円超
G	30万円以下	100万円以下	1,000万円以下	1,000万円超

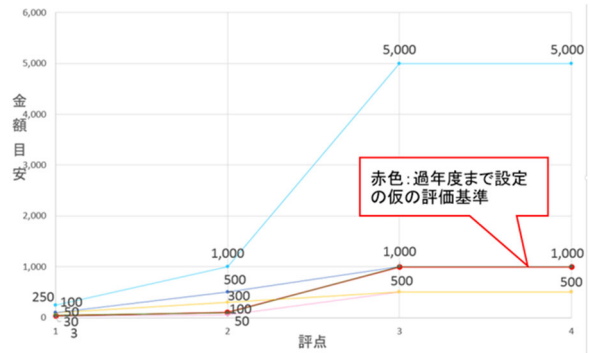


図-2 「修繕費用ランク」各管理者の回答

表-13 配点例示4パターン

配点算定基準	項目	4点	3点	2点	1点
全国平均	復旧までの所要時間	113日以上	56日以上 ~113日未満	23日以上 ~56日未満	23日未満
	修繕費用ランク	1250万円超	269万円超 ~1250万円以下	76万円超 ~269万円以下	76万円以下
最大最短	復旧までの所要時間	20日以上	7日以上 ~20日未満	1日以上 ~7日未満	1日未満
	修繕費用ランク	5000万円超	1000万円超 ~5000万円以下	250万円超 ~1000万円以下	250万円以下
傾向平均1	復旧までの所要時間	190日以上	100日以上 ~190日未満	45日以上 ~100日未満	45日未満
	修繕費用ランク	883万円超	192万円超 ~883万円以下	60万円超 ~192万円以下	60万円以下
傾向平均2	復旧までの所要時間	38日以上	14日以上 ~38日未満	4日以上 ~14日未満	4日未満
	修繕費用ランク	883万円超	192万円超 ~883万円以下	60万円超 ~192万円以下	60万円以下

### 4.3 機能回復難易度評価と故障等級FMEAによる評価との組み合わせによる評価の検討

4.2.3で示したとおり、マニュアルに掲載されている構成機器の致命度は故障等級FMEAによる評価を基本としており、機能回復難易度評価を維持管理計画に取り入れる際は、故障等級FMEAとの組み合わせ評価の仕方の検討する必要があった。

FMEAによる故障等級と機能回復指標との合算の仕方やそのしきい値設定など、様々な方法で組み合わせ評価の試行と検証を行ってきたが、最終的に整理した内容について以下に記す。

故障等級FMEAと機能回復難易度評価の考え方の違いを改めて整理した結果を表-14に示す。また、この表内の「評価項目の観点」を、設計から故障発生、機能回復までのフローと対応するように整理したものを図-3に示す。

その結果、故障等級FMEAと機能回復難易度評価は評価の観点が異なり、FMEAはポンプ運用中から故障発生までの評価であり故障発生の防止に活用されるもの、機能回復難易度評価は故障発生後から機能回復までの評価であり機能回復におけるリスク低減に活用されるものと整理した。

以上のことから、評価を横並びとする必要はない

表-14 評価方法の整理

	故障等級FMEA	機能回復難易度評価
概要(考え方)	システムを構成する機器に故障が発生したとき、その故障が全体に与える影響を解析し、システムにとって致命度の高い機器を明確化する評価手法	システムを構成する機器に故障が発生し機能喪失が起きた場合に、機能を回復させる上での遅速や難易度を定量的に評価する手法
評価項目	システムへの影響度	機能回復難易度
	故障モード発見の容易性	機能補完性
	故障発生頻度	修繕費用ランク
	—	故障検知難易度
最終評価項目	故障等級(致命度)	機能回復難易度
	(評価対象の構成機器が故障した場合の設備稼働への影響が)致命的/非致命的	(評価対象の構成機器の不稼働からの機能回復が)困難/容易
評価項目の観点	<ul style="list-style-type: none"> <li>システムへの影響度、故障モード発見の容易性は、故障発生時(直後)の評価</li> <li>故障発生頻度は、故障発生前の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機能回復難易度、修繕費用ランクは、機能回復時の評価</li> <li>機能補完性は、故障発生後機能喪失時の復旧時の方法の評価</li> <li>故障検知難易度は、故障後の復旧箇所の把握に関する評価</li> </ul>
	故障発生前～故障発生直後の評価である	復旧および機能回復に関する評価であり、故障発生後機能喪失時の評価である
設備の維持管理における活用方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>システムにとって、影響度の高い構成機器・部品の見極め</li> <li>上記より、維持管理上特に注意を払うべき機器の抽出</li> <li>維持管理上のポイントを得るために有効</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>効果的な維持管理計画の策定</li> <li>新設更新時の機器選定への活用</li> <li>予備品選定への活用</li> </ul>
評価の差別化	ポンプ運用～故障発生までの評価であり、故障発生防止のための機器の致命度の評価	故障発生後～機能回復までの評価であり、機器の機能回復の難しさの評価

ことから、しきい値の整合については考慮不要と考える。

また、機能回復難易度評価は故障等級 FMEA と同等の評価ではなく、FMEA を実施して「致命/非致命」の仕分けをした後、さらなる仕分けのための追加評価のような関係とすべきと考える。

例えば、故障等級 FMEA の故障等級のしきい値による致命/非致命的の仕分けも、明らかにしきい値から大幅に外れている場合(しきい値 2.0 の場合、4.0

や 1.0 等の場合) は明確に仕分けしてもさしつかえないが、しきい値近傍の場合(しきい値が 2.0 の場合、2.1 や 1.9 等の場合) は本来グレーゾーンであり、機能回復難易度評価による追加評価でグレーゾーンを明確に仕分けする、とすることが実用的である。

以上について、概念を図-4に示す。

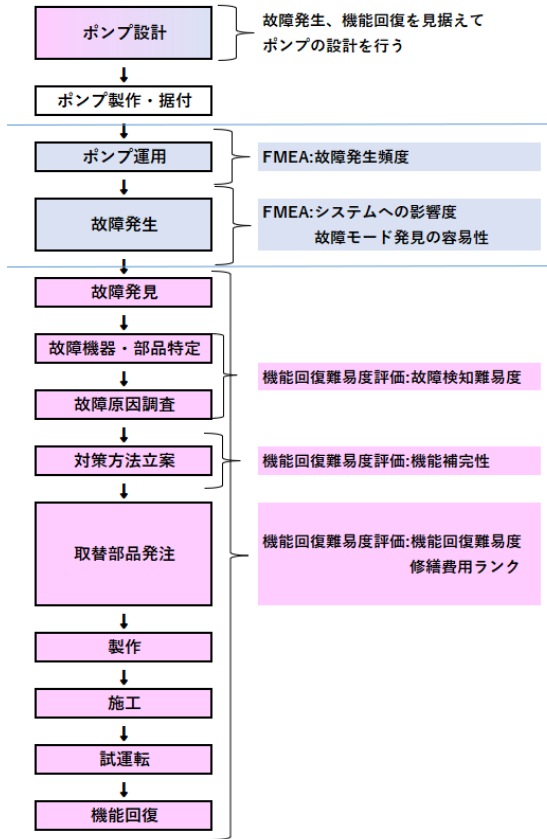


図-3 評価フロー

### 5. 機能回復指標の活用に関する検討

#### 5.1 概要

機能回復難易度評価による機能回復能力の定量化は、下記に示すように様々な活用があると考えられる。

##### ①維持管理計画への反映・活用

4.1に記載しており重複するが、改めて述べる。機械設備の維持管理計画は、マニュアルに則り策定される。構成機器を予防保全とするか事後保全とするかは、信頼性評価により「致命的機器」「非致命的機器」として仕分けすることで行われマニュアルにも例示されているが、この仕分けでも維持管理予算を超過し計画策定に苦慮している実例がある。そのような場合に、さらに機能回復の遅速を評価に加えることで、さらなる仕分けが可能となると考える。

##### ②維持管理計画策定時の影響度評価への活用

機械設備の維持管理計画作成時には、整備更新の優先度付けとして、点検結果等による健全度評価を行い、さらに細分化が必要な場合は影響度評価を行うこととしている。

影響度評価の項目は現在、4項目となっているが、そこに機能回復難易度評価を取り入れることで、より効果的な優先度付けが可能になると考える。

##### ③設備新設時等の機器選定への活用



図-4 グレーゾーン評価概念図

設備新設時の機器選定においては、評価要素の一つに「維持管理性」があるが、コストや設置スペースなどと異なり定性的評価となっている。これを定量化することでより具体的な評価が可能と考える。

#### ④予備品選定への活用

同じ構成部品でも、評価項目のうち、予備品の有無により「復旧までの所要時間」「修繕費用ランク」が異なる。そこで、予備品が有る場合と無い場合双方の機能回復指標を算定し、その差の大小により、予備品保有の効果（＝早期復旧が可能）を定量的に示すことができると考える（差が大きいものほど予備品保有効果が高い）。

#### ⑤河川GISによるリスク評価との併用による整備時期の優先付けへの活用

過年度弊所では、河川GISを活用した排水機場の機能停止時の社会的影響度の算定について研究を実施していた。そのツールと機能回復難易度評価を併用し、「被害リスク」から、各排水機場の各ポンプ設備の整備の優先順位付けを行えないかの検討を行った

以上の各項目について検討した結果を以下に記す。

## 5.2 機能回復難易度評価を用いた管理計画シミュレーション

これまで述べてきたように、機能回復難易度評価は、維持管理計画立案の際、機能回復難易度（回復までの遅速）を判断要素の一つとして盛り込むことを主眼に検討を進めてきた。

したがって、この評価手法の確立だけではなく、その効果と実効性を確認し示すことが、実用上重要である。そこで、実際の設備維持管理計画3例に対し、機能回復難易度評価を導入した場合の効果について検証した。検証したのは3例あるが、ここでは代表例として1例、下記に記す。

K3排水機場は、在来の手法で立案する維持管理計画で必要とされる維持管理予算が、実際に示達される予算を超過しており計画立案に苦慮していた。そこで、K3排水機場をモデルに、機能回復難易度評価による維持管理計画のリバイスのシミュレーションを試みることにした。

K3排水機場の主要諸元を表-15に示す。

表-15 K3排水機場 主要諸元

計画場排水量		揚水40m <sup>3</sup> /s 排水80m <sup>3</sup> /s			
号機	用途	主ポンプ		原動機	
		形式	吐出量	形式	出力
1～5号	揚水	立軸渦巻	10m <sup>3</sup> /s	電動機	4000kW
	排水			ディーゼル	1692kW
6号	排水	立軸渦巻	30m <sup>3</sup> /s	ディーゼル	3236kW

K3排水機場では、維持管理計画として3種類の長寿命化計画を策定している。

①従来計画：点検・整備・更新マニュアルの標準年数により整備更新を行う計画

②基本計画：設備機器の健全度評価を反映して長寿命化を図るとともに、合理的な送水方法の検討結果等による機器の合理化、簡素化を図る計画

③平準化計画：基本計画を基に、年度毎の予算が平準化されるように整備更新時期を調整した計画

ここでは、実際の計画は③平準化計画となることから、これを基に、機能回復難易度評価の導入によるライフサイクルコスト削減効果を確認することとした。

機能回復難易度評価の評点設定は、4.2.5のアンケート調査の回答のうち、管理者が所属する地方整備局のものとした。設定した評点を表-16に示す。

また、機能回復難易度の「早い」「遅い」のしきい値は3.0とする。

なお、点検・整備・更新マニュアルでは、事後保全であっても予防保全と同年数を使用して維持管理計画を立てることとなっている。そのため、長寿命化計画上は機能回復難易度評価により非致命機器を増やしてもコスト削減効果が現れない。

そこで、長寿命化計画の費用の合計欄を見直し、現状一括の合計累計を「致命的機器」「非致命的機器」毎の合計、累計に分け、致命的機器の割合の削減、つまり排水機場が最低限必要な施設運用に掛かる費用の削減として費用削減効果を確認することとした。

以上を元に実施した評価結果(抜粋)を表-17に、算定した機能回復指標(上位と下位をそれぞれ抜粋)を表-18、表-19に示す。

また、その評価による機器等の致命度(＝保全方式)に変化があったものを表-20に示す

以上の結果を元に、長寿命化計画の見直しシミュレーションを実施し、50年間のライフサイクルコスト削減効果を確認した。

その結果を表-21に示す。

表-16 機能回復難易度評価 評価項目 (K3 排水機場)

大項目	小項目	評価	4点	3点	2点	1点	合計点	機能回復指標算定のための点数配分の調整	
								元の合計点	機能回復指標算定点数
機能回復難易度	復旧までの所要時間	4段階	1ヶ月以上	1週間~1ヶ月	1日~1週間	1日未満	A:左記3項目の合計 3~8点	7~8点	4点
	設備復旧者の違い	2段階			メーカー	点検業者		6点	3点
	設備復旧場所	2段階			工場	現場		5点	2点
機能補完性	予備品・二重化によるもの	4段階	なし	対応可(重)	対応可(軽)	二重化可能	B:左記2項目の計 2~7点	3~4点	1点(注)
	近隣他機場等による機能補完	3段階		不可能	能力不足だが可能	可能		6~7点	4点
修繕費用ランク		4段階	5000万円超	5000万円以下	1000万円以下	250万円以下	C:1~4点	4点	4点
								3点	3点
								2点	2点
								1点	1点
								4点	4点
故障検知難易度		4段階	分解が必要			目視で特定可能	D:1~4点	4点	4点
			分解しても特定困難		分解可能			3点	3点
			メーカーが分解	点検業者で分解可能	2点			2点	
					1点			1点	

機能回復指標を算定

機能回復指標は「VA×B×C×D」で算出

(注) 機能回復難易度Aは、「設備復旧者の違い」が操作員の場合は、他の点数に関わらず1点とする。

表-17 K3 排水機場 機能回復難易度評価

機器区分	部品名	機能回復難易度					機能補完性			修繕費用ランク	故障検知難易度	機能回復指標	
		復旧までの所要時間	設備復旧者の違い	設備復旧場所	機能回復難易度合計	機能補完性のランク分け	機能補完性	機能補完性の合計	機能補完性のランク分け				
主ポンプ設備	1号ポンプ 10m/s	7ヶ月→4	2	2	8	4	なし→4	2	6	4	4	3	3.7
主原動機	1号ディーゼル機関 2300PS	12ヶ月→4	2	1	7	4	なし→4	2	6	4	4	4	4.0
始動系統	始動空気系統 (ディーゼル機関用)	4ヶ月→4	2	2	8	4	なし→4	2	6	4	2	2	2.8
潤滑油系統	減速機、液体継手、電動機、ディーゼル機関	4ヶ月→4	2	2	8	4	なし→4	2	6	4	2	2	2.8
遠隔監視操作制御設備	遠方監視制御盤	9ヶ月→4	2	1	7	4	なし→4	2	6	4	4	3	3.7
機側操作盤	主ポンプ(電動駆動用、ディーゼル駆動用)系統機器、自家発電機	5ヶ月→4	1	1	6	3	なし→4	2	6	4	2	2	2.6

表-18 K3 排水機場 機能回復指標 (上位)

設備区分	機器区分	部品名	機能回復指標
主ポンプ駆動設備	主原動機	ディーゼル機関 2300PS	4.0
主ポンプ駆動設備	主原動機	電動機 4000kW△こ形	4.0
電源設備	自家発電設備	1号発電機 1250kVA 6600V	4.0
監視操作制御設備	遠隔監視操作制御設備	遠方監視制御盤	3.7
監視操作制御設備	機場集中監視操作盤	操作卓	3.7
監視操作制御設備	補助機電器盤	PLC盤、リレー盤	3.7
監視操作制御設備	電動機制御盤	インバータ	3.7
監視操作制御設備	計装設備	監視制御用	3.7
主ポンプ	主ポンプ設備	主ポンプ 10m/s	3.7
主ポンプ駆動設備	動力伝達装置	減速機+流体継手	3.7

表-19 K3 排水機場 機能回復指標 (下位)

設備区分	機器区分	部品名	機能回復指標
付属設備	駆動部	所内排水ポンプ	2.2
系統機器設備	燃料系統	燃料移送ポンプ、燃料小出し槽	2.4
監視操作制御設備	機側操作盤	主ポンプ(電動駆動用、ディーゼル駆動用)、系統機器、自家発電機	2.6
電源設備	無停電電源設備	無停電電源設備	2.6
系統機器設備	冷却水系統	取水ポンプ、冷却水ポンプ、ストレーナ	2.7
系統機器設備	始動系統	始動空気系統(ディーゼル機関用)	2.8
系統機器設備	潤滑油系統	減速機、液体継手、電動機、ディーゼル機関	2.8
系統機器設備	燃料系統	貯油槽	2.9



表-20 K3 排水機場 シミュレーション結果による保全方式の変化

設備・装置・機器		機器名・諸元	現行の致命度と保全方式		機能回復難易度評価による仕分け	
			機器特性	保全方式	機器特性	保全方式
監視操作制御設備	機側操作盤	主ポンプ、自家発電機	致命	時間計画	非致命	事後保全
主ポンプ設備	主ポンプ設備	主配管・弁(補修弁)	非致命	事後保全	致命	状態監視
系統機器設備	燃料系統	貯油槽	致命	時間計画	非致命	事後保全
	冷却水系統	冷却水ポンプ、冷却水オートストレーナ	致命	時間計画	非致命	事後保全
	潤滑油系統	減速機、流体継手、電動機、ディーゼル機関	致命	時間計画	非致命	事後保全
電源設備	無停電電源設備	無停電電源盤 No.1,2	致命	時間計画	非致命	事後保全
	所内排水ポンプ	所内排水ポンプ No.1,2	致命	時間計画	非致命	事後保全

注：保全方式の時間計画、状態監視の区分は、「予防保全」のうち傾向管理可能な機器を「状態監視」、その他を「時間計画」としている。

表-21 K3排水機場ライフサイクルコスト削減効果

単位：百万円

	当初計画		評価シミュレーション		削減効果	
	金額	割合	金額	割合	金額	割合
全体額	32,415	100.0%	32,415	100.0%	-	-
致命的機器保全額	29,173	90.0%	27,145	83.7%	2,028	-7.0%
非致命的機器保全額	3,242	10.0%	5,270	16.3%	-	-

以上より、50年間で7%（約20億円）の削減効果が示された。

本検討では、コスト削減を目指し、機能回復難易度評価を活用してマニュアルで設定されている致命的機器から固有機場の特性を考慮し非致命的機器にできる機器を検討している。今回機能回復難易度評価により非致命となったものは、系統機器設備及び付属設備であり他に比べ、修繕が容易と考えられる機器であり、選定された機器は、変わらず点検を行いながら運用を行えば非致命としても十分であると考えられる。

ただし、これらの機器を実際に非致命とできるか否かの最終判断は、管理者が総合的に検討することが望ましい。

### 5.3 機能回復難易度評価を用いた影響度評価時の活用方法の検討

機械設備の維持管理計画作成時には、整備更新の優先度付けとして、健全度評価シートにより、点検結果等による健全度評価を行い、さらに細分化が必要な場合は影響度評価を行うこととしている。影響度評価の項目は現在、下記の4項目となっているが、そこに⑤機能回復難易度評価を取り入れた評価シミュレーションを行い、より効果的な優先度付け手法について検討する。

- ①：設置条件
- ②：故障履歴
- ③：保全状況
- ④：致命度

#### 5.3.1 概要・方針

影響度評価での機能回復難易度評価については、評価の都度を実施するのではなく、優先順位の決定のため対象機器に対して一般的に考えられる機能回復指標を入力する方法が望ましい。

そのため、標準的な機能回復指標を算定し、それを元に評価シミュレーションを実施した。

#### 5.3.2 影響度評価シミュレーション

本検討は、5.2と同じK3排水機場をモデルとして行う事とした。

影響度評価であるが、重み係数の総和は1であり、現在は4項目であるので、各項目の重み付けは0.25となっている。機能回復難易度の項目を追加する事で5項目となるため、1項目あたりの重みは0.2を基準としてシミュレーションを行う。追加前後の評価項目イメージを表-22、表-23に示す

#### 5.3.3 結果・考察

影響度評価に機能回復難易度を追加する前後の影響度指数の変化（一部を抜粋）を、図-5に示す。

均等に重みづけをしていることから、機能回復難易度による大きな影響度指数の変化は見られないが、機能回復難易度の評価を加えた事で、下記の様な変化がみられた。

・電気設備や制御設備については、機能回復難易度を追加する事で、影響度指数は低くなる傾向がある事が分かった。これは電気設備の機能回復難易度が低い事が影響している。電気設備関係は、機械設備に比べ機能復旧が早く、機器の製作も少ないため

表-22 健全度評価シート（影響度評価部分抜粋） 現行

装置・機器・部品	総合評価	健全度評価	保全方式	影響度評価								備考	
				設置条件	重み	故障履歴	重み	保全状況	重み	致命度	重み		影響度指数
φ2000主ポンプ(立軸) [No1]			状態監視	3	0.25	3	0.25	2	0.25	4	0.25	0.88	
φ2000主ポンプ(立軸) [No2]			状態監視	3	0.25	3	0.25	2	0.25	4	0.25	0.88	
φ2000主ポンプ(立軸) [No3]			状態監視	3	0.25	3	0.25	1	0.25	4	0.25	0.75	
φ2000主ポンプ(立軸) [No4]			状態監視	3	0.25	3	0.25	2	0.25	4	0.25	0.88	
φ2000主ポンプ(立軸) [No5]			状態監視	3	0.25	3	0.25	2	0.25	4	0.25	0.88	
φ3600主ポンプ(立軸) [No6]			状態監視	3	0.25	1	0.25	2	0.25	4	0.25	0.63	

表-23 健全度評価シート（影響度評価部分抜粋） 機能回復難易度評価追加

装置・機器・部品	総合評価	健全度評価	保全方式	影響度評価											備考
				設置条件	重み	故障履歴	重み	保全状況	重み	致命度	重み	機能回復難易度	重み	影響度指数	
φ2000主ポンプ(立軸) [No1]			状態監視	3	0.2	3	0.2	2	0.2	4	0.2	4	0.2	0.90	
φ2000主ポンプ(立軸) [No2]			状態監視	3	0.2	3	0.2	2	0.2	4	0.2	4	0.2	0.90	
φ2000主ポンプ(立軸) [No3]			状態監視	3	0.2	3	0.2	1	0.2	4	0.2	4	0.2	0.80	
φ2000主ポンプ(立軸) [No4]			状態監視	3	0.2	3	0.2	2	0.2	4	0.2	4	0.2	0.90	
φ2000主ポンプ(立軸) [No5]			状態監視	3	0.2	3	0.2	2	0.2	4	0.2	4	0.2	0.90	
φ3600主ポンプ(立軸) [No6]			状態監視	3	0.2	1	0.2	2	0.2	4	0.2	4	0.2	0.70	

評価を追加

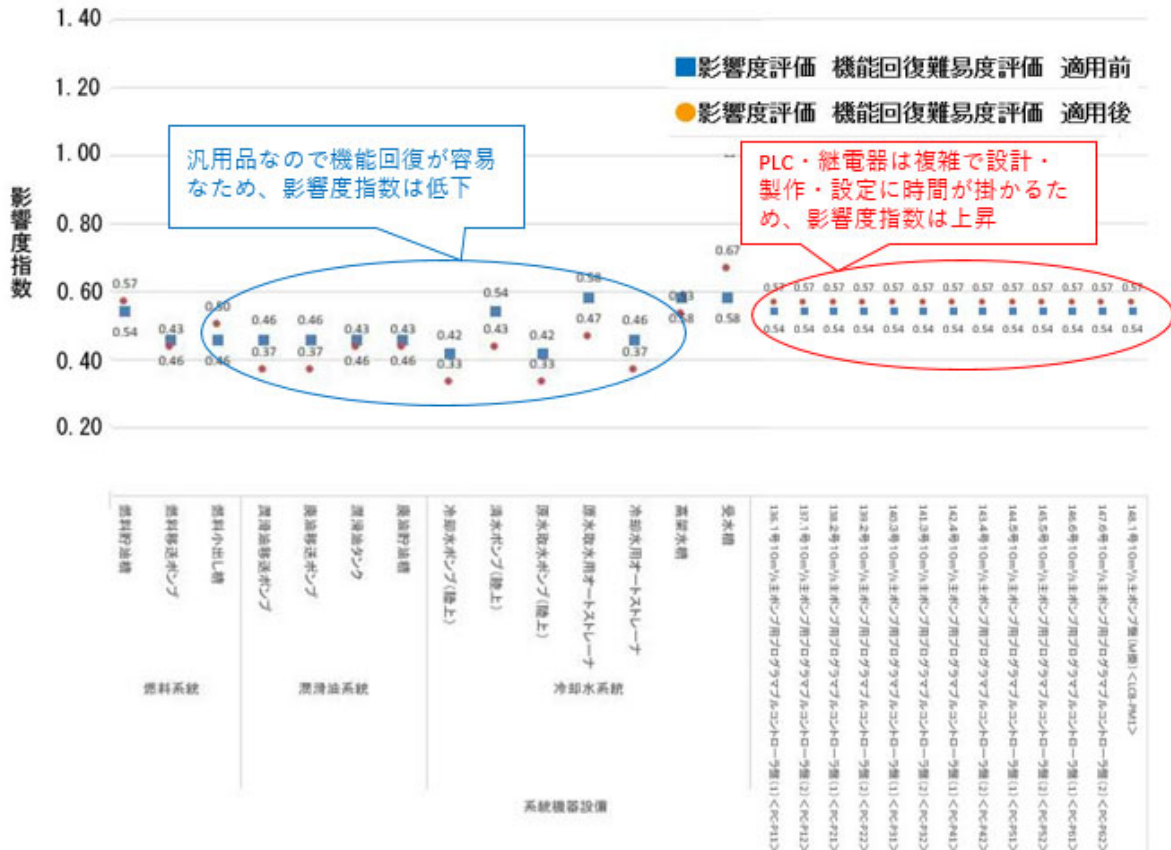


図-5 影響度指数の変化

ある。ただし、制御設備関係で PLC や計算機等で調達に時間を要するものは影響度指数が上昇する傾向にある。

・機械設備については、基本的に影響度指数は高くなる傾向がある。機械設備の場合、設計及び製作の必要がある受注生産品が多く存在する。また、撤

去・据付・補修等の復旧に必要な時間も長い事が原因である。

ただし、小型ポンプ等の汎用品の場合は影響度指数が低くなる傾向がある。

下記より、影響度指数の評価項目に機能回復難易度の評価を取り入れる事は効果があるものと思料する。

健全度評価シートの影響度指数は、健全度評価の重みづけで使用される指数である。今回機能回復難易度の要素を追加した事で、同一の健全度の評価（×、△1、△2、△3、○）であった機器に対して、機能を回復する上での遅速や難易度の評価がかわり、優先順位を決定できる事となる。

優先順位の決定は、限られた予算や時間から重要な判断項目である。多面的な判断が求められる優先順位の決定には、故障後の事を考慮した評価も必要であると考えられる。

機器の優先順位の決定において、機能回復難易度の評価が困難である機器は、優先的に予防すべき機器であり、影響度評価に必要な評価項目であると考えられる。

#### 5.4 予備品選定への活用について

予備品選定への活用であるが、同じ構成機器でも、表-16に示した評価項目のうち、予備品の有無により評点に変化が生じる。そこで、予備品が有る場合と無い場合双方の機能回復指標を算定し、その差の大小により、予備品保有の効果（＝早期復旧が可能）を定量的に示すことができると考える（差が大きいものほど予備品保有効果が高い）。そこで、4.2.1で検討対象としたk排水機場をモデルに、予備品の有無による機能回復指標の変化の比較分析を行った。

その結果の抜粋（差の大きいもの5つと差の小さいもの5つ）を表-24、表-25に示す。

この結果より、予備品の準備により、機能回復指標はどの機器も下がる事、予備品を準備による機能回復における効果は大きく定量的な評価でも現れる事がわかった。また、予備品によっては、効果が高い予備品と効果が低い予備品があることが確認された。よって、機能困難となった機器について、予備品の準備は回復困難の改善に効果的である事、予備品選定への活用可能という事が改めて証明できた。

なお、機能回復難易度評価の活用は予備品選定の判断に有用であるが、実際に判断する際は機能回復

難易度評価だけでなく他の要素も含めて総合的に判断しなければならない。

例えば、本検討では実際に予備品準備可能かどうかについては、判断していない。予備品の準備の可否は、予備期間による劣化度や、予備品が使用可能かどうかの試験・判断、予備品が使用不可時の責任の取り合い等の問題があることに留意する必要がある。

#### 5.5 新設・更新時の機器選定への活用について

設備の新設・更新時には、いくつかの項目でメリット・デメリットを比較し、総合評価のうえ形式を選定している。

その評価の一項目として、機能回復難易度評価の活用を検討した。その経過を以下に記す。

##### 5.5.1 機器選定への活用シミュレーションと課題抽出

機能回復難易度評価は構成機器毎に機能回復指標を算定することに対し、新設更新時は装置毎に評価するため、算定された数値をどのように評価するかの検討が必要となる。

評価に当たっては、①機能回復困難の部品数、②機能回復指標の平均値、③機能回復困難数の割合、の3方法があり、どの方法が適切かの決定が課題となる。

そこで、ディーゼル大、中、ガスタービン、電動機の異なる4施設で比較し、どの方法が適切かの検討を進めた。

選定時の実態として、機器選定の比較で他施設を比較することはなく、ある1施設について、ディーゼルにした場合、ガスタービンにした場合、電動機にした場合を比較することとなる。

よって、同一機場で各種原動機を採用した場合の機能回復難易度評価を実施し、上記①～③に基づく機器選定シミュレーションを行い、各方式の適否を評価することにした。評価結果を表-26に、その元とした、①～③の各方法で評価する際の集計数値を表-27に示す。

①については、構成部品種類数が考慮されておらず、それが異なる機器の比較には不適切である（機能回復困難部品数が構成部品種類数を上回ることはないので、構成部品種類数の多寡に影響されるため）。

表-24 予備品の有無による機能回復指標の変化(大きいもの5つ抜粋)

設備名	機器区分	部品名	予備品想定	機能回復難易度					機能補完性					修理費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標	予備品想定前 予備品想定後 の数値の差
				復旧までの 所要時間	設備復旧者 の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能補完性 の ランク分け	機能補完性	近隣に所在する 他の排水機等ボ ンプ設置等の障 害による 機能補完	機能補完性 合計	機能補完性 の ランク分け					
主ポンプ	主軸及び軸受	封水ブッシュ	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	4	4	4.00	2.14	
			予備品想定後	1	2	1	4	1	3	2	2	1	3	4	1.86		
主ポンプ	主軸及び軸受	軸継手	予備品想定前	4	2	1	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.73	
			予備品想定後	1	2	1	4	1	3	2	2	1	3	3	1.73		
減速機	潤滑油系統	油濾過器	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.40	
			予備品想定後	1	1	1	3	1	3	2	5	3	2	3	2.06		
減速機	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.40	
			予備品想定後	1	1	1	3	1	3	2	5	3	2	3	2.06		
減速機	冷却水系統	潤滑油冷却器	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.40	
			予備品想定後	1	1	1	3	1	3	2	5	3	2	3	2.06		

表-25 予備品の有無による機能回復指標の変化(小さいもの5つ抜粋)

設備名	機器区分	部品名	予備品想定	機能回復難易度					機能補完性					修理費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標	予備品想定前 予備品想定後 の数値の差
				復旧までの 所要時間	設備復旧者 の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能補完性 の ランク分け	機能補完性	近隣に所在する 他の排水機等ボ ンプ設置等の障 害による 機能補完	機能補完性 合計	機能補完性 の ランク分け					
減速機	減速機本体	入力軸ラジアル軸受	予備品想定前	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	3	3.72	0.50	
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	4	3	3.22		
減速機	減速機本体	出力軸ラスト軸受	予備品想定前	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	3	3.72	0.50	
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	4	3	3.22		
減速機	減速機本体	軸受ナット	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	4	3	3.72	0.50	
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	4	3	3.22		
減速機	潤滑油系統	潤滑油ポンプ駆動用歯車	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	0.46	
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	3	3	3.00		
吐出弁	吐出弁	水密ゴム	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	0.24	
			予備品想定後	2	2	2	6	3	4	2	6	4	3	3	3.22		

表-26 機器選定時の機能回復難易度評価活用方法の評価

集計方法	①機能回復困難の部品数	②機能回復指標の平均値	③機能回復困難数の割合
概要	設備内の機能回復が困難となった機器・部品の数より比較する。 設備の機能回復困難(しきい値3.0以上)となる機器・部品が多いという事は、故障時の復旧のリスクがそれだけ高い事をあらわす。	設備内全て機器・部品の機能回復指標の平均値より比較する。 上記は、各部品の集合である設備における、機能回復難易度の平均値であり、この平均値が高い程、機能回復難易度が全体的高い傾向がある事を示す。(機能回復難易度は正規分布でない為、平均値だけで全体的に高い傾向を一概にいうわけではない)	設備の機器・部品の内、機能回復困難である機器・部品の割合より比較する。 この割合が高い程、設備内に機能回復困難となるリスクが高い機器・部品が占める割合が多い事を表す。
メリット	・評価がシンプルであり、分かりやすい。 ・評価方法が簡単である。	・平均値としていることから①に比べ、部品数の違いによる影響が少なく、比較が可能である。 ・評価値を機能回復指標と同じ1~4で示す事ができる。	・設備の機器・部品数の違いによる影響が少なく比較が可能である。 ・機器・部品数の違いによる影響が少ないため、異なる形式の比較にも適している。 ・機器・部品数の違いによる影響が少ないため、機器・部品の細分化レベルが多少一致していなくても比較が可能である。
デメリット	・ガスタービンとディーゼル機関等の異なる形式の場合、機器・部品数が根本的に異なるため、比較困難である。(ただし、設備のリスクを考えた場合、機器・部品数が大小は、その分リスク大小と考えられるため、設備のリスクの考え方としては、デメリットではない) ・上記の機器・部品の数は、全ての機器・部品を同レベル細分化されており漏れ無く評価できた場合であり、評価者が異なる等の機器・部品の抽分化レベルが異なる場合、機器部品数のリスクとしては、比較できない。	・回復容易となった機器、回復困難となった機器を混合してしまう事から、設備の評価と考えるのは多少強引である。 (ボルトの取替(回復容易)とクランク軸の取替(回復困難))の評価を平均した値を設備の評価とする事は考え難い。 ・機能回復難易度は正規分布でない為、平均値だけで全体的に高い傾向とは一概にいえず、平均値での比較は適切でない。	・設備の機能回復評価として、パーセントで表示されるため、評価が多少分かりにくい。 (説明として、原動機設備内の機能回復困難となる機器・部品が占める割合等、記載する必要がある。) ・電動機のFRDAは構成機器が少なくすべてが機能回復困難であるため、100%となってしまふ。
総合評価	設備の機器・部品の漏れや細分化が適切であれば、設備のリスク評価として使用可能であるが、漏れや機器の細分化レベルを揃える等は容易でないため、正確な評価及び比較とする事は困難である。	設備に含まれる機能回復難易度が正規分布とならず、形式によっても異なるため、この平均値が全体的な機能回復難易度の高、低や傾向を表すものでなく、設備を表す評価として不適である。	設備の機器部品数の違いによる影響が少なく、評価結果についての比較等がしやすい。また、設備を機器・部品の集合である事から、設備内の機能回復困難である機器・部品の割合で示す事は、設備の評価としての適正が高い。
	△	×	○

表-27 評価時の各集計値

主原動機		ガスタービン	ディーゼル機関		電動機
規模		中規模	中規模	大規模	小規模
構成部品種類数		32	37	37	4
集計方法	①困難部品数	30	19	23	4
	②回復指標の平均	3.5	3	3.1	3.7
	③困難部品の割合	94%	51%	62%	100%

②については、機能回復難易度評価は正規分布にはならないので、平均値がその装置を代表する数値になるとは言いがたい。

③については、①のデメリットが軽減されるが、ガスタービンと電動機のように極端に構成部品種類数が異なると、やはりその影響が出る。

以上から、③機能回復困難数の割合 が評価として適切と考える。

また、表-27 から、①～③いずれの場合も、下記のことがいえる。

- a.ディーゼル機関は、規模による機能回復難易度は、大規模の方がやや大きいが中規模の物とさほど差がない（規模による影響は少ない）。
- b.ガスタービンとディーゼル機関とでは、ガスタービンの方が機能回復難易度は高い。
- c.電動機は他の形式よりも機能回復難易度が高い。

a, bについては実態に即していると考えられるが、cは実態に即しているかは電動機の方が故障からの機能回復が早いと、実情と乖離した結果となった。

以上の評価の不具合について、機能回復難易度評価は、故障等級 FMEA と同様、機器を部品レベルに細分化して実施したためであり、対策として、評価時の細分化レベルを改めることが考えられる。

案の一つは装置レベル（この場合は「ディーゼル機関」「ガスタービンエンジン」「電動機」）として評価することが考えられるが、その場合、下記の課題が生じる。

- ・装置レベルでの評価では、現行の評価項目で不要になる物が生じる可能性がある。
- ・装置のどの部分が故障するかによって、評価内容が変わる可能性がある。

もう一つの案は、修繕時に交換するアセンブリー単位で評価する方法が考えられる。

ディーゼル原動機は故障の際、故障した部位（例えば、過給器、燃料噴射ノズル、等）の部品交換となるが、電動機は本体の交換となる。

したがって、故障からの機能回復を比較評価する

際は、修繕する単位毎での評価がより現実的と思われる。ただしこちらも、装置レベルでの評価と同様の課題が生じる可能性がある。

以上について、そのような評価が可能かは、次項において検討する。

### 5.5.2 抽出した課題の解決手法の検討

前項の検討経緯から、機能回復難易度評価を活用して機器選定をするにあたり、これまでの「構成機器レベルでの評価と比較」では、傾向の把握は可能であるが、比較する事は難しい結果となったので、これとは異なる下記の2手法について考案した。

- ・「細分化せずに設備レベルでの評価」
- ・「修繕単位別での評価」

検討を進めるに当たり、まず、前項で検討した手法の他上記2案について手法を整理する。

#### ① 構成機器レベルでの評価と比較（現状の評価・比較方法）

設備を構成する各機器・部品レベルの評価結果を集計し、比較する方法である。イメージ図を図-6に示す。

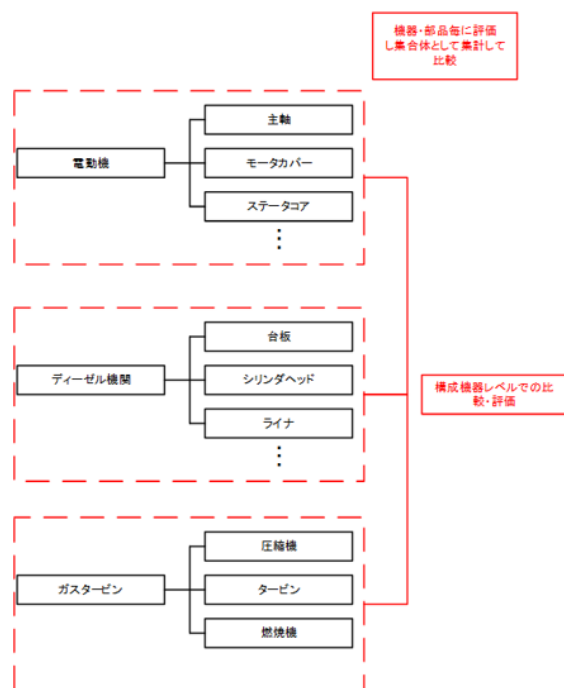


図-6 構成機器レベルでの評価 イメージ

#### ② 細分化せずに設備レベルでの評価

原動機の種類によって、構成機器数が極端に異なる設備を比較する事が難しい事から、細分化せずに設備レベルで評価し、比較する方法である。イメージ図を図-7に示す。

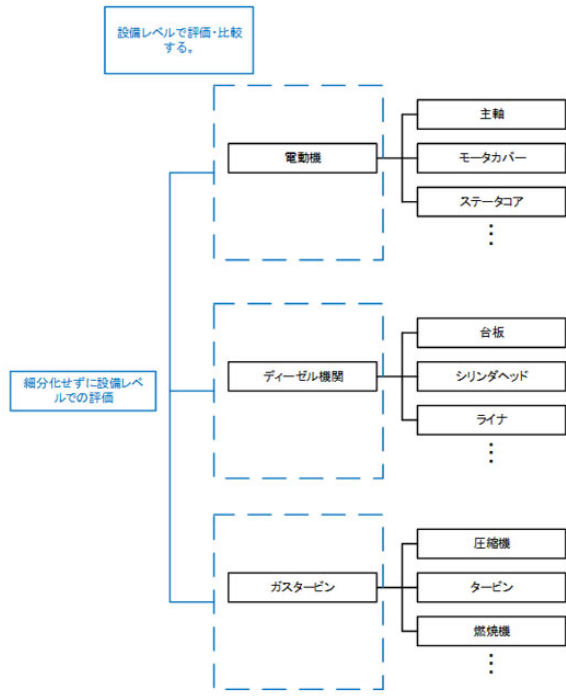


図-7 設備レベルでの評価 イメージ

③ 修繕単位別での評価

設備内で最も一般的に発生する故障事象（発生確率が高い故障事象又は故障率が一番高い部品、修繕頻度が高い部品）に対しての交換・補修についてFRDAより評価比較する。イメージ図を図-8に示す。

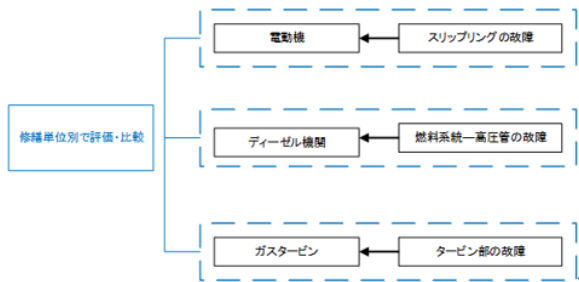


図-8 修繕単位別評価 イメージ

5.5.3 細分化せずに設備レベルでの評価に関する検討

この評価は、原動機の種類によって、構成機器数が極端に異なる設備を比較する事が難しい事から、細分化せずに設備レベルで評価し、比較する方法である。

以下に、本評価での機器選定シミュレーションを行った結果を示す。

機能回復難易度評価の条件は下記の通りとした。

- ・機器選定の比較とするため、ポンプ容量（原動機の出力）をある程度揃えて、評価を実施する。

- ・復旧までの所要時間は、更新時に最も時間の掛る機器を代表としている。

- ・復旧までの所要時間や修繕費用等については、メーカへのヒアリングを実施している。

- ・評価は全国平均を使用する。

以上について、各評価項目に関する情報については表-28に、それに基づく評価結果を表-29に示す。

表-28 各評価項目の情報

機器区分	復旧までの所要時間	復旧までの所要時間 最長機器	補充方法	費用(万)
ディーゼル機関	10ヶ月	インタークーラ (10ヶ月)	なし	15,000
ガスタービンエンジン	30ヶ月	本体部等 (24ヶ月～最大30ヶ月)	なし	30,000
電動機	7ヶ月	全体 (7ヶ月)	なし	3,000

この評価シミュレーションでは、中規模排水機場のディーゼル機関をベースに比較表を作成している事から、原動機の出力が400～450kw程度となり、原動機が大きい事もありコスト差や復旧までの所要時間で全て評価が4となる。電動機のみが故障検知度が3となり機能回復指標が3.7となる結果である。

実際に復旧までの所要時間は、表-28に示したとおり、ディーゼル機関で10ヶ月、ガスタービンで24～30ヶ月、電動機で7ヶ月であり、数値的には差がある。また、修繕費用についてもディーゼル機関で1.5億、ガスタービンで4億、電動機で3000万と差がある状況である。

上記の復旧までの所要時間と修繕費用ランクの優劣は具体的な数値により変化しないが、この優劣を評点で差として算出する必要がある。

よって、機能回復難易度評価を機器選定で活用する際に、設備レベルで細分化せずに評価する場合は、評価者が設備レベルに合せた評価点の設定を行う事で機器選定への活用が可能と考えられる。算定の手引き（素案）でも、評価設備に併せて、復旧までの所要時間と、修繕費用ランクについては、評価者が評点を設定する事としている。

そこで、復旧までの所要時間と修繕費用ランクをそれぞれ表-30、表-31の通り設定し直して再評価を行った。

その結果を表-32に示す。表-29に対して値が変更した箇所を赤字で示している。

表-29 各機器の機能回復難易度評価結果

機器区分	機能回復難易度					機能補完性				修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標
	復旧までの 所要時間	設備復旧 者の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能回復難易度 のランク分け	機能 補完性	近隣所在の 排水機場等 の稼働による 機能補完	機能補完 性 合計	機能補完性 のランク分け			
ディーゼル機関	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	4	4.0
ガスタービンエンジン	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	4	4.0
電動機	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	3	3.7

表-30 機能回復難易度 評点修正

機能回復難易度	
復旧までの所要時間	評点
13ヶ月以上	4
10ヶ月以上	3
7ヶ月以上	2
7ヶ月未満	1

表-31 修繕費用ランク 評点修正

修繕費用ランク	
修繕費用	評点
20,000万超	4
20,000万以下	3
10,000万以下	2
5,000万以下	1

上記により、ディーゼル機関で3.7、ガスタービンで4.0、電動機で2.4となり、より明確な評価ができる事が確認された。

#### 5.5.4 修繕単位別での評価に関する検討

設備内で最も一般的に発生する故障事象（発生確率が高い故障事象又は故障率が一番高い部品、修繕頻度が高い部品）に対しての交換・補修について機能回復難易度評価により比較する。

本評価での機能回復難易度評価の条件を下記に示す。

- ・代表的な故障を決定するため、故障履歴を統計し故障部品を想定する。
- ・故障部品の修繕及び交換について、FRDAを行い評価、比較する。
- ・機器選定の比較とするため、ポンプ容量（原動機の出力）をある程度揃えて、評価を実施する。

・復旧までの所要時間や修繕費用等については、メーカーへのヒアリングを実施している。

・評価は全国平均を使用する。

代表故障の選定であるが、後述する7. 故障情報活用方法で活用した故障情報を元に統計を取り、代表故障を選定する。

故障情報から集計した各原動機の故障の結果を表-33、表-34、表-35に示す。なお、最も多い故障部品にハッチングを行っている。

これらの表より、各設備の代表故障を下記に設定した。

・ディーゼル機関 — 燃料系統 — 高圧管（燃料配管）の交換が必要な故障

・ガスタービン — タービン部の交換が必要な故障

・電動機 — スリップリングの交換が必要な故障  
以上について、各評価項目に関する情報については表-36に、それに基づく評価結果を表-37に示す。

この評価を行った場合は、ディーゼル機関が2.6と最も有利である結果である。今回は想定する故障部品の根拠として、統計的に最も故障頻度が高い部品が故障する事を想定している。燃料系統—高圧管は、タービン部やスリップリングと違い内部部品でないため更新が容易であるためと考えられる。

修繕単位別に評価をした場合は、故障部品のみにフォーカスされる事から、想定する故障部品の選定が重要である。また、この想定する故障部品により設備全体の比較を実施するため、想定する故障部品にはある程度選定根拠が必要であると考えられる。

細分化せずに設備レベルでの機能回復難易度評価Aと同様に復旧までの所要時間については、全て4となってしまう。復旧までの所要時間の優劣は具体的な数値により変化しないが、この優劣を評点で差として算出する必要がある。

よって、機能回復難易度評価を機器選定で活用す

表-32 各機器の機能回復難易度 再評価結果

機器区分	機能回復難易度					機能補完性				修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標
	復旧までの 所要時間	設備復旧 者の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能回復難易度 のランク分け	機能 補完性	近隣所在の 排水機場等 の稼働による 機能補完	機能補完 性 合計	機能補完性 のランク分け			
ディーゼル機関	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	4	3.7
ガスタービンエンジン	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	4	4.0
電動機	2	2	2	6	3	4	2	6	4	1	3	2.4

る際に、修繕単位別での評価の場合も、評価者が部品レベルに合せた評価点の設定を行う事で、機器選定への活用が可能と考えらえる。

そこで、復旧までの所要時間を、それぞれ表-38の通り設定し直して再評価を行った。

その結果を表-39に示す。表-37に対して値が変更した箇所を赤字で示している。

表-33 ガスタービンエンジン 故障部品名と件数

部品名	故障数
エンクロージャ	2
カーボンシール	1
ガバナ	5
クイルシャフト	1
スクロール	2
スタータ	6
その他	6
タービン部	13
ブリード弁	1
温度センサー	2
吸排気	1
潤滑油クーラ	1
潤滑油フレキシブルホース	1
潤滑油ポンプ	1
潤滑油圧力センサー	1
制御部	10
燃焼機	3
燃料ノズル	1
燃料フィルター	2
燃料ポンプ	1
燃料遮断弁	1
燃料制御弁	1
燃料調量弁	1
排気ダクト	1
補機減速機駆動ギヤ	1

表-34 ディーゼル機関 故障部品名と件数

部品名	故障数
ガバナ	1
クランク軸部	2
クランク室	1
シリンダヘッド	5
その他	5
ピストン	4
温度スイッチ	1
温度調節弁	1
過給機	9
外部軸受	1
始動弁	6
潤滑油スイッチ	1
初期潤滑油ポンプ	1
消音器	1
制御部	4
速度リレー	4
停止弁	1
内部冷却水ポンプ	1
燃料ノズル	1
燃料遮断弁	1
燃料噴射ポンプ	6
燃料弁	3
排気管	3
冷却水配管	1
高圧管	12
電磁弁・減圧弁	1

表-35 電動機 故障部品名と件数

部品名	故障数
スリップリング	1
始動制御器	1



表-37 修繕単位別の各機器の機能回復難易度 評価結果

機器区分	機能回復難易度					機能補完性				修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標
	復旧までの 所要時間	設備復旧 者の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能回復難易度 のランク分け	機能 補完性	近隣所在の 排水機場等 の稼働による 機能補完	機能補完 性 合計	機能補完性 のランク分け			
ディーゼル機関	4	1	1	6	3	4	2	6	4	2	2	2.6
ガスタービンエンジン	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	4	4.0
電動機	4	2	1	7	4	4	2	6	4	2	3	3.1

表-39 修繕単位別の各機器の機能回復難易度 再評価結果

機器区分	機能回復難易度					機能補完性				修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標
	復旧までの 所要時間	設備復旧 者の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能回復難易度 のランク分け	機能 補完性	近隣所在の 排水機場等 の稼働による 機能補完	機能補完 性 合計	機能補完性 のランク分け			
ディーゼル機関	2	1	1	4	1	4	2	6	4	2	2	2.0
ガスタービンエンジン	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	4	4.0
電動機	1	2	1	4	1	4	2	6	4	2	3	2.2

表-36 各評価項目の情報

機器区分	復旧までの 所要時間
ディーゼル機関	4～5ヶ月
ガスタービンエンジン	18～24ヶ月
電動機	3～5ヶ月

表-38 機能回復難易度 評点修正

機能回復難易度	
復旧までの所要時間	評点
10ヶ月以上	4
7ヶ月以上	3
4ヶ月以上	2
4ヶ月未満	1

上記により、ディーゼル機関で2.0、ガスタービンで4.0、電動機で2.2となり、より明確な評価ができる事が確認された。

今回の場合、燃料系統—高圧管（燃料配管）が、メーカーでなくても対応可能であり、故障検知難易度が低い事から電動機よりも機能回復指標が低く出る結果である。

### 5.5.5 各評価・比較方法の比較・結果及び考察

構成機器レベルでの評価と比較では、傾向は出すが、比較できるような材料が出てこない結果である。これは、「ディーゼル機関」、「ガスタービンエンジン」、「電動機」で構成機器数が異なるためである。

細分化せずに設備レベルで評価した場合は、構成機器数は問題無くなり、ユーザーが評点を設定する項目である「復旧までの所要時間」と「修繕費用ランク」を比較対象に合わせて設定する事で、設備レベルの評価は可能である事が分かった。また、評価が定量的に出る事から比較も問題無く、手引きに沿う内容で評価・比較が可能である。

修繕単位別での評価の場合は、まず設備内のどの部品の故障とするか、評価ユーザーが設定する必要がある。更新設計であれば、過去に機場で起きた故障や、事務所内で不安な故障を想定する事ができる。また、一般的に故障が多い部品を設定する方法もある。今回であれば、故障件数から最も多い故障を設定している。実用にあたっては、コンサル業務の場合、設定する故障を客先と協議し、決定及び了承を得る必要があり、想定する故障を選定するために検討が必要となる。

また、修繕単位別の評価についても、ユーザーが比較対象に合わせて設定する事で、評価可能であり、

定量的に評価が出る為、比較も容易である。ただし、選定する設備や機器の形式全体ではなく、一つの故障部品にフォーカスして機能回復難易度評価を実施するため、設備・機器形式全体の選定時には、その点に留意が必要である。

機器選定時の機能回復難易度評価の活用の評点の設定については、下記が考えられる。

復旧までの所要時間と修繕費用ランクについては、「～ヶ月」「～万円」等と定量的に優劣が判明する項目である。そのため評点の設定により、尺度が変化するだけで、実際の優劣が変わる事はないため、評価者による作為的な比較となりにくい構造となっている。ただし、評価者も評点が作為的な比較

にならないよう注意する必要がある。

また、部品レベルの機能回復難易度評価では絶対値評価として評点をする必要があるが、機器選定時の活用として細分化せずに設備レベルで評価する場合は、復旧までの所要時間と修繕費用ランクは相対値評価で評価し、順位付けする事で評価選定が可能となる。

上記までの結果から、評価方法について比較表を作成する。表-40に評価方法の比較表を示す。

比較の結果、「細分化せずに設備レベルでの評価」が最も有効であると考えられる。

「構成機器レベルでの評価と比較」と違い、「細分化せずに設備レベルで評価」した場合や「修繕単位別

表-40 各評価方法比較

評価・比較方法	構成機器レベルでの評価と比較	細分化せずに設備レベルでの評価	修繕単位別での評価
評価の難易度	機器選定に対して、候補機器の構成機器を洗い出し、全機器・部品にFRDAを実施するため、煩雑である。	設備レベルでFRDAを実施する事で、構成機器の洗い出しが不要であり、実施は容易である。	修繕単位として、故障部品を想定する必要がある。故障部品を想定する方法について、検討する必要がある。想定する故障に機器選定決定者の同意が得られれば、評価としては容易である。
	△	◎	○
比較の難易度	全機器・部品のFRDA結果を集計した時に、機器部品数によって差異が出る為、比較が困難である。機能回復の傾向程度は把握可能である。	評価機器や規模にあわせ、機器選定用に評価者がしきい値を設定する事で、評価・比較が可能であり、定量的に評価結果が出るため分かりやすい。	評価機器や規模にあわせ、機器選定用に評価者がしきい値を設定する事で、評価・比較が可能であり、定量的に評価結果が出るため分かりやすい。
	△	◎	◎
評価結果の適正	傾向が分かる事から、相対的には比較可能であるが、機器選定の根拠としては薄くなる可能性がある。	評価結果が機能回復指標として数値化可能である。評価結果が定量的で比較もしやすい事から、適正が高い。	評価結果が機能回復指標として数値化可能である。評価結果が定量的で比較もしやすい事から、適正が高い。ただし、故障部品を想定している事から、その点を機器選定者に留意して頂く必要がある。
	○	◎	○
総合評価	△	◎	○

の評価」の場合は、機能回復難易度評価の実施は比較形式の数だけで良く、今回であれば、「ディーゼル機関」「ガスタービンエンジン」「電動機」の3つだけで良い。

「構成機器レベルでの評価比較」の場合は、細分化するレベルにもよるが、本例では、ディーゼル機関だけで37の機能回復難易度評価を実施する必要があり、評価の難易度は高いと言える。

また、「修繕単位別の評価」の場合は、想定する故障部品の選定が必要であることから、「細分化せずに設備レベルで評価」した場合に比べ多少劣ると考えられる。

「構成機器レベルの評価」では、細分化し機器・部品レベルとなった結果について、集計統計処理等を行う事で傾向を把握している。そのため、細分化の程度や機器や部品の違いから、比較が困難である。

「細分化せずに設備レベルで評価」した場合や「修繕単位別の評価」の場合は、機能回復指標として評価結果が定量的に数値化されることから、比較が容易である。

評価結果の適正では、評価方法や比較の結果から形式の比較が適正であるかどうかを比較している。

「構成機器レベルでの評価と比較」では、傾向の把握が可能のため、相対的にその形式が機能回復に有利か不利かは判断が可能である。

「修繕単位別の評価」の場合、機能回復指標により、定量的に出る評価結果から、比較も容易であるが、機器選定において1つの故障部品にフォーカスした機能回復難易度評価が適正であるか懸念がある。機器選定者（設備管理者等）が、想定する故障部品を了承し、その故障部品から全体の設備機器形式を判断する必要がある。

以上より、「細分化せずに設備レベルでの評価」が最も有効であると考えられる。表-41に、「細分化せずに設備レベルでの評価」した場合の比較表のイメージを示す。

### 5.5.6 評価項目を減らした場合の機器選定評価

機器選定時の評価方法は、機能回復難易度評価の項目を減らした独自の評価方法とする方法も考えられる。機器選定や形式比較では主原動機や主ポンプ等の大物の比較が多いことから、「設備復旧者の違い」や「設備復旧場所」「機能補完性」の項目は全て同値となり、機能回復指標を算出する際に差異が上手くない原因となりうる。

表-42に「設備復旧者の違い」や「設備復旧場所」「機能補完性」の項目を削除した場合の評価結果を、その場合の、細分化せずに設備レベルでの評価した場合（表-32）との比較結果を表-43に示す。

評価項目を削減しても評価者が比較対象に合わせて評点を変更しない場合は、差異が生じない。

表-41 新設更新時 機器選定比較表イメージ


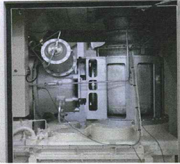

	ディーゼルエンジン	ガスタービンエンジン	電動機
概要写真			
概要	シリンダ内で空気と燃料の混合気を圧縮→燃焼させ、その爆発による膨張力によりピストンを往復運動する。このピストンの往復運動を回転運動に変えて動力を取り出す。	軸流圧縮機(圧縮タービン)にて空気を圧縮し、ここに燃料を噴射、燃焼させ、燃焼ガスで出力タービンを駆動させることにより動力を取り出す。 横軸は駆動軸が横出しに、立軸は駆動軸が立出しになっている。	電動機は固定子と回転子があって、どちらかが回転化する磁界を発生して、その磁界の変化によって、駆動力を得るものである。 回転子巻線に接続された外部回路を二次側回路といい、短絡接続や抵抗接続することでトルク・速度制限が可能である。
設置スペース	現行の通り	左案に比べ原動機の設置スペースが縮小可能だが、排気、排風ダクトが天井クレーンと干渉する可能性がある	現行と比較して、ディーゼルエンジンが電動機に代わるものの配置はほぼ変わらない
維持管理性	休止中も含め定期的な保守運転、管理が必要である。 点検設備はほとんど現地で可能である。	休止中も含め定期的な保守運転、管理が必要である。 オーバーホール、またガスタービン本体の故障対応は工場に持ち込む必要がある。	ディーゼルエンジンより部品点数が少ない分、定期点検は手間にならない。 分解整備時は、工場持ち込みとなる。
機能回復難易度	機能回復指標：3.7 故障から復旧までは最長で10ヶ月程度要し、機能回復難易度は高い。	機能回復指標：4.0 故障から復旧までは24ヶ月～最大30ヶ月程度掛かる場合がある。 比較案で最も機能回復難易度が高い。	機能回復指標：2.4 故障から復旧までは最長で7ヶ月程度掛かる。機能回復難易度は低い。
治水用途での採用実績	採用実績は最も多い	左案には劣るが採用実績は比較的多い	揚排水兼用としての実績はあるが、排水専用としての実績はほとんどない
総合評価	現行と同等の機器構成となるため、設置スペースの問題は無い。 信頼性についても、既設設備は設置後、約23年経過しており大きな支障も発生していないことから十分である。	排気・排風ダクトが大きく設置スペースが厳しい。 また、ガスタービン本体の整備は工場へ持ち込む必要があるため、維持管理の面でディーゼル機関や電動機と比べ劣る。	電動機はディーゼル機関に比べ小型のため、設置スペースを縮小できる。 但し、発電機設備は既設と比較し大型(100kVA⇒1000kVA)となるため配置検討が必要となる。
	○	△	○

表-42 評価項目を一部削除した場合の評価結果

機器区分	機能回復難易度	修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標
	復旧までの 所要時間			
ディーゼル機関	3	3	4	3.3
ガスタービンエンジン	4	4	4	4.0
電動機	2	1	3	1.8

表-43 評価項目削除前後の比較

評価項目削除前 (表-5.4.7より引用)

原動機形式	機能回復指標
ディーゼル機関	3.7
ガスタービンエンジン	4.0
電動機	2.4

評価項目削除後

原動機形式	機能回復指標
ディーゼル機関	3.3
ガスタービンエンジン	4.0
電動機	1.8

よって、項目を削減した場合でも評価者による評点の設定は必要である。

評点設定後で評価項目を削減した場合は、評価の差異が削減前と比べ大きくなっている。同点となる、機能復旧者の違い、機能復旧場所、機能補完性の評価が無いため、1項目の評価の重みが増したためだと考えられる。

## 5.6 河川GISモデルを用いた浸水被害比較でのリスク回避度合いの評価

限られた維持管理予算でより的確な設備維持管理を行ううえで、年度によって維持管理費が突出しないよう可能な限り平準化して維持管理計画を立案することが行われている。予算の平準化のためには管理する設備の優先順位付けは必須であり、これまでも様々な取り組みが行われてきている。

その一手法として、「被害リスク」から、各排水機場の各ポンプ設備の整備の優先順位付けを行えないかの検討を行った。

一般に、被害リスクの算定は下式により行われて

いる。

$$\text{被害リスク} = \text{故障発生頻度} \times \text{被害想定額}$$

検討対象は、4.2.2で対象としたK排水機場とM排水機場の2機場を有する水系とした。

排水機能の排水能力喪失パターンは、M排水機場が表-44に示す5パターン、K排水機場が表-45に示す3パターンであり、その組み合わせで表-46に示す15パターンとなる。

各パターンの組み合わせによる被害総定額は、当チームの研究で排水機場の機能喪失時の社会的影響度を検討するためのツールとして作成したCommonMPのGISモデルを利用して行った。算定結果を表-47に示す。

故障発生確率については、これも当チームでの研究で排水機場の信頼性評価のために作成したFTA (Fault Tree Analysis: 故障木解析) を元に算定した。FTA図を図-9に、算定された故障発生確率を元に算出した組み合わせパターン発生確率と被害リスクを表-

48に示す。

表-44 M 排水機場 排水機能発生パターン

		1号	2号	3号	計	割合
排水能力		25	25	50	100	100%
パターン1	運転可否	○	○	○		
	排水能力	25	25	50	100	100%
パターン2	運転可否	×	○	○		
	排水能力	0	25	50	75	75%
パターン3	運転可否	○	×	○		
	排水能力	25	0	50	75	75%
パターン4	運転可否	○	○	×		
	排水能力	25	25	0	50	50%
パターン5	運転可否	×	×	○		
	排水能力	0	0	50	50	50%
パターン6	運転可否	×	○	×		
	排水能力	0	25	0	25	25%
パターン7	運転可否	○	×	×		
	排水能力	25	0	0	25	25%
パターン8	運転可否	×	×	×		
	排水能力	0	0	0	0	0%

表-45 K 排水機場 排水機能発生パターン

		1号	2号	計	割合
排水能力		7.5	7.5	15	100%
パターン1	運転可否	○	○		
	排水能力	7.5	7.5	15	100%
パターン2	運転可否	○	×		
	排水能力	7.5	0	7.5	50%
パターン3	運転可否	×	○		
	排水能力	0	7.5	7.5	50%
パターン4	運転可否	×	×		
	排水能力	0	0	0	0%

表-46 排水機能発生パターン 組み合わせ

組み合わせ パターン名	パターン名		排水能力割合 (M%×K%)
	M排水機場	K排水機場	
パターン1	パターン1	パターン1	100×100
パターン2	パターン1	パターン2	100×50
パターン3	パターン1	パターン3	100×0
パターン4	パターン2	パターン1	75×100
パターン5	パターン2	パターン2	75×50
パターン6	パターン2	パターン3	75×0
パターン7	パターン3	パターン1	50×100
パターン8	パターン3	パターン2	50×50
パターン9	パターン3	パターン3	50×0
パターン10	パターン4	パターン1	25×100
パターン11	パターン4	パターン2	25×50
パターン12	パターン4	パターン3	25×0
パターン13	パターン5	パターン1	0×100
パターン14	パターン5	パターン2	0×50
パターン15	パターン5	パターン3	0×0

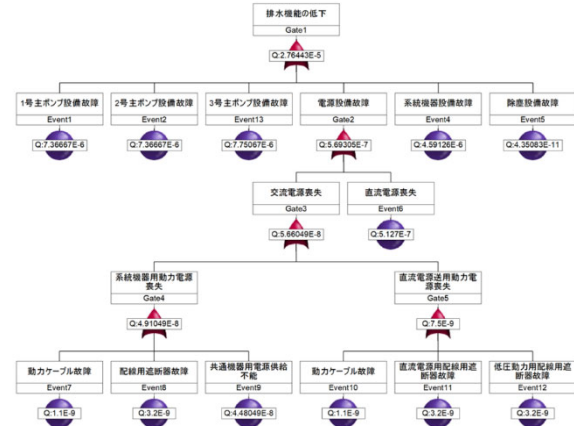


図-9 FTA図 (例)

今回、パターン7、8、9では、同パターン（同排水能力、同排水割合時）であっても、被害リスクの値に差が出ている。

これは、M排水機場の排水能力50 m<sup>3</sup>/s（排水能力割合50%）の場合に、2種類の組合せがあるからである。1つは、1号ポンプ25 m<sup>3</sup>/s及び2号ポンプ25 m<sup>3</sup>/sの2基が故障した場合、もう1つは3号ポンプ50 m<sup>3</sup>/sが故障した場合である。1号・2号ポンプは同形式であり故障率も同じであるが、3号ポンプは故障率が若干高い事から、同パターンであっても故障リスクに差が出たと考えられる。

各パターンの被害リスクについて、被害リスク順に表を並び変え被害リスクの順位付けを行う。その結果を表-49に示す。パターン1については、故障が発生しない確率を1で算出しており、全機場の排水機能が保たれている状態である事から想定被害額は0としている。よって被害リスクは0となり、故障しない場合の被害リスクは無いと考える。

各パターンの中で、特に被害リスクが高いパターンは、赤色で示したパターン4、次に青色で示したパターン7 (No.13:3号ポンプの排水機能が停止した場合)、黄色で示したパターン2である。パターン2～8は約1/10000の値となり、差が大きい。

よって、注意すべき被害リスクが高い排水機場の各ポンプ設備の排水機能停止のパターンは、

- ・ パターン4のM排水機場の1号・2号ポンプ設備のどちらかが壊れた場合
- ・ パターン7のNo.13:M排水機場の3号ポンプ設備が壊れた場合
- ・ パターン2のK排水機場の1号・2号ポンプ設備のどちらかが壊れた場合

であると言える。

表-47 排水機能発生パターン別 被害総定額

(単位:百万円)

項目	パターン	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5	パターン6	パターン7	パターン8	パターン9
	M排水機場×K排水機場 (%)	100*100	100*50	100*0	75*100	75*50	75*0	50*100	50*50	50*0
直接被害額	一般被害額計	63.6	192.9	848.9	752.9	961.6	2562.1	998.1	1996.7	2845.6
	農作物被害額(水稲)	1.5	1.8	2.5	1.8	2.3	2.9	2.5	2.8	3.0
	農作物被害額(畑作)	0.3	0.3	0.6	0.3	0.6	1.2	0.6	1.5	2.4
	公共土木被害額	107.7	326.8	1438.0	1275.5	1629.0	4340.2	1690.8	3382.4	4820.5
間接被害額	営業停止損失額	3.0	9.5	50.7	56.4	52.3	150.9	54.3	119.9	164.4
	清掃労働対価	1.9	7.6	34.0	28.0	36.8	90.0	38.6	75.0	97.0
	代替活動等の出費	3.5	14.5	65.2	53.5	70.4	170.3	73.7	142.6	183.2
	事務所代替活動	2.3	8.7	27.2	22.4	29.6	70.9	31.0	58.9	76.0
合計	183.8	562.0	2467.1	2190.7	2782.5	7388.4	2889.5	5779.7	8192.1	

項目	パターン	パターン10	パターン11	パターン12	パターン13	パターン14	パターン15	
	M排水機場×K排水機場 (%)	25*100	25*50	25*0	0*100	0*50	0*0	
直接被害額	一般被害額計	1509.5	2265.6	2866.2	4193.6	7203.3	12693.9	
	農作物被害額(水稲)	2.6	2.7	3.2	3.5	4.3	4.5	
	農作物被害額(畑作)	0.9	1.5	2.1	4.2	4.2	4.2	
	公共土木被害額	2557.1	3837.9	4855.3	7104.0	12202.3	21503.4	
間接被害額	営業停止損失額	84.5	133.4	167.6	228.7	278.4	374.3	
	清掃労働対価	59.2	80.8	97.4	128.5	180.7	269.9	
	代替活動等の出費	112.5	153.0	184.1	240.5	330.6	463.4	
	事務所代替活動	45.8	63.9	76.5	105.9	144.3	218.3	
合計	4372.1	6538.9	8252.3	12009.1	20348.1	35531.7		

表-48 組み合わせパターン発生確率と被害リスク

No.	組み合わせパターン	M×K(%)	M排水機場		K排水機場		M排水機場の 事象発生頻度	K排水機場の 事象発生頻度	各パターンの 事象発生頻度	各パターンの 想定被害額	被害リスク		
			1号	2号	3号	1号						2号	
			25	25	50	7.5						7.5	
1	パターン1	100*100	○	○	○	○	○	1	=	1	0.0	0.0	
2	パターン2	100*50	○	○	○	○	×	1.50859E-05	=	1.50859E-05	562.0	8.47887E-03	
3			○	○	○	×	×	1.50859E-05	=	1.50859E-05	8.47887E-03		
4	パターン3	100*0	○	○	○	×	×	5.68964E-11	=	5.68964E-11	2467.1	1.40369E-07	
5			○	○	○	○	○	1.47333E-05	×	1	=	1.47333E-05	3.22770E-02
6	パターン4	75*100	○	×	○	○	○	1.47333E-05	×	1	=	1.47333E-05	3.22770E-02
7			○	×	○	○	×	1.47333E-05	×	1.50859E-05	=	2.22266E-10	6.18456E-07
8	パターン5	75*50	○	×	○	×	○	1.47333E-05	×	1.50859E-05	=	2.22266E-10	6.18456E-07
9			○	○	○	○	×	1.47333E-05	×	1.50859E-05	=	2.22266E-10	6.18456E-07
10	パターン6	75*0	○	○	○	×	×	1.47333E-05	×	5.68964E-11	=	8.38274E-16	6.19351E-12
11			○	×	○	×	×	1.47333E-05	×	5.68964E-11	=	8.38274E-16	6.19351E-12
12	パターン7	50*100	○	○	×	○	○	7.75067E-06	×	1	=	7.75067E-06	2.23956E-02
13			○	×	○	○	○	5.42678E-11	×	1	=	5.42678E-11	1.56807E-07
14	パターン8	50*50	○	○	×	○	×	7.75067E-06	×	1.50859E-05	=	1.16926E-10	6.75794E-07
15			○	○	×	×	×	7.75067E-06	×	1.50859E-05	=	1.16926E-10	6.75794E-07
16	パターン9	50*0	○	×	○	×	×	5.42678E-11	×	1.50859E-05	=	8.18681E-16	4.73170E-12
17			○	○	○	○	○	5.42678E-11	×	1.50859E-05	=	8.18681E-16	4.73170E-12
18	パターン10	25*100	○	○	×	×	×	7.75067E-06	×	5.68964E-11	=	4.40985E-16	3.61258E-12
19			○	×	○	×	×	5.42678E-11	×	5.68964E-11	=	3.08764E-21	2.52942E-17
20	パターン11	25*50	○	×	×	○	×	1.14193E-10	×	1	=	1.14193E-10	4.99263E-07
21			○	○	×	×	○	1.14193E-10	×	1	=	1.14193E-10	4.99263E-07
22	パターン12	25*0	○	×	×	×	×	1.14193E-10	×	1.50859E-05	=	1.72271E-15	1.12646E-11
23			○	○	×	×	○	1.14193E-10	×	1.50859E-05	=	1.72271E-15	1.12646E-11
24	パターン13	0*100	○	×	×	○	×	1.14193E-10	×	1.50859E-05	=	1.72271E-15	1.12646E-11
25			○	○	×	×	○	1.14193E-10	×	1.50859E-05	=	1.72271E-15	1.12646E-11
26	パターン14	0*50	○	×	×	×	×	1.14193E-10	×	5.68964E-11	=	6.49718E-21	5.36169E-17
27			○	○	×	×	×	1.14193E-10	×	5.68964E-11	=	6.49718E-21	5.36169E-17
28	パターン15	0*0	○	×	×	×	×	4.20612E-16	×	1	=	4.20612E-16	5.05118E-12
29			○	○	×	×	○	4.20612E-16	×	1.50859E-05	=	6.34533E-21	1.29115E-16
30	パターン14	0*50	○	×	×	×	×	4.20612E-16	×	1.50859E-05	=	6.34533E-21	1.29115E-16
31			○	○	×	×	○	4.20612E-16	×	5.68964E-11	=	2.39313E-26	8.50321E-22
32	パターン15	0*0	○	○	○	○	○	4.20612E-16	×	5.68964E-11	=	2.39313E-26	8.50321E-22

表-49 被害リスク (高い順)

No.	各パターン	全体計	割合 (全体)	M×K(%)	各パターンの 事象発生頻度	各パターンの 想定被害額 (百万)	被害リスク	順位
5	パターン4	90	78%	75*100	1.47333E-05	2190.7	0.03227696	1
6	パターン4	90	78%	75*100	1.47333E-05	2190.7	0.03227696	1
13	パターン7	55	48%	50*100	7.75067E-06	2889.5	0.02239561	3
2	パターン2	107.5	93%	100*50	1.50859E-05	562.0	0.00847887	4
3	パターン2	107.5	93%	100*50	1.50859E-05	562.0	0.00847887	4
15	パターン8	57.5	50%	50*50	1.16926E-10	5779.7	6.7579E-07	6
16	パターン8	57.5	50%	50*50	1.16926E-10	5779.7	6.7579E-07	6
7	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
8	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
9	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
10	パターン5	82.5	72%	75*50	2.22266E-10	2782.5	6.1846E-07	8
21	パターン10	30	28%	25*100	1.14193E-10	4372.1	4.9926E-07	12
22	パターン10	30	28%	25*100	1.14193E-10	4372.1	4.9926E-07	12
14	パターン7	55	48%	50*100	5.42678E-11	2889.5	1.5681E-07	14
4	パターン3	100	87%	100*0	5.68964E-11	2467.1	1.4037E-07	15
23	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72271E-15	6538.9	1.1265E-11	16
24	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72E-15	6538.9	1.1265E-11	16
25	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72271E-15	6538.9	1.1265E-11	16
26	パターン11	32.5	28%	25*50	1.72271E-15	6538.9	1.1265E-11	16
11	パターン6	75	63%	75*0	8.38274E-16	7388.4	6.1935E-12	20
12	パターン6	75	63%	75*0	8.38274E-16	7388.4	6.1935E-12	20
29	パターン13	5	4%	0*100	4.20612E-16	12009.1	5.0512E-12	22
17	パターン8	57.5	50%	50*50	8.18681E-16	5779.7	4.7317E-12	23
18	パターン8	57.5	50%	50*50	8.18681E-16	5779.7	4.7317E-12	23
19	パターン9	50	43%	50*0	4.40985E-16	8192.1	3.6126E-12	25
30	パターン14	7.5	7%	0*50	6.34533E-21	20348.1	1.2912E-16	26
31	パターン14	7.5	7%	0*50	6.34533E-21	20348.1	1.2912E-16	26
27	パターン12	25	22%	25*0	6.49718E-21	8252.3	5.3617E-17	28
28	パターン12	25	22%	25*0	6.49718E-21	8252.3	5.3617E-17	28
20	パターン9	50	43%	50*0	3.08764E-21	8192.1	2.5294E-17	30
32	パターン15	0	0%	0*0	2.39313E-26	35531.7	8.5032E-22	31
1	パターン1	115	100%	100*100	1	0.0	0	32

上記より、どれもポンプ設備が1台壊れた場合の被害リスクが高い事が分かる。これは、1台だけが故障する確率が高いからである。また、表-49の各パターンの被害リスク順位表からも各パターンの事象発生頻度の被害リスクの寄与率が高い事が分かる。

多くのポンプ設備が機能停止になった場合の被害想定額は高い。しかし、各排水機場でポンプ設備が同時に壊れる可能性はとて低い事から被害リスクは小さい事が分かる。ポンプ設備だけに関して言えば、台数が多い方が同時に壊れる可能性はさらに減りリスク分散となる可能性が考えられる。

ここで、被害リスクの算定より、被害リスクから整備・更新の優先順位を行う場合を考える。

表-49の結果から優先順位付けを行うと表-50のとおりになる。この優先順位表では1号or2号ポンプを整備・更新した場合、残りの一方と他のパターンのどちらが優先か不明である。

表-50に示す各パターンに一方を整備・更新した場

表-50 被害リスクを元にした整備優先順位付け (再算出前)

No.	施設名	全体計 m <sup>3</sup> /s	パターン4	整備・更新するポンプ設備	M排水機場の 事象発生頻度	K排水機場の 事象発生頻度	各パターンの 事象発生頻度	各パターンの 想定被害額(百万)	被害リスク	優先 順位
1	M排水機場	90	パターン4	1号ポンプor2号ポンプ	1.47333E-05	1	1.47333E-05	2190.742605	0.032276956	1
2	M排水機場	55	パターン7	3号ポンプ	7.75067E-06	1	7.75067E-06	2889.506145	0.022395609	2
3	K排水機場	107.5	パターン2	1号ポンプor2号ポンプ	1	1.50859E-05	1.50859E-05	562.0377735	0.008478868	3

表-51 被害リスクを元にした整備優先順位付け (再算出後)

No.	施設名	全体計 m <sup>3</sup> /s	パターン4	整備・更新するポンプ設備	M排水機場の 事象発生頻度	K排水機場の 事象発生頻度	各パターンの 事象発生頻度	各パターンの 想定被害額(百万)	被害リスク	優先 順位
1	M排水機場	90	パターン4	1号ポンプor2号ポンプ	1.47333E-05	1	1.47333E-05	2190.742605	0.032276956	1
2	M排水機場	55	パターン7	3号ポンプ	7.75067E-06	1	7.75067E-06	2889.506145	0.022395609	2
4	M排水機場	90	パターン4	M機場の残りの1号ポンプor2号ポンプ	7.36667E-06	1	7.36667E-06	2190.742605	0.016138478	3
3	K排水機場	107.5	パターン2	1号ポンプor2号ポンプ	1	1.50859E-05	1.50859E-05	562.0377735	0.008478868	4
5	K排水機場	107.5	パターン2	K機場の残りの1号ポンプor2号ポンプ	1	7.54297E-06	7.54297E-06	562.0377735	0.004239434	5

合について各排水機場の事象発生頻度、各パターンの事象発生頻度、被害リスクについて再算出し優先順位を決定したものを表-51に示す。

これは、たとえばパターン4で1号ポンプか2号ポンプどちらか一方を整備・更新した場合、そのポンプはその後「故障しない(故障率0%・故障しない確率100%:1)」と仮定して算出を行った。その結果、2台のポンプの内どちらか一方が故障する確率から、そのポンプが故障する確率に変わる事となるため、発生確率が半分となる。

M排水機場の1号ポンプを整備・更新した場合、その後1号ポンプは故障しないと仮定する事から、M排水機場の2号ポンプだけが排水不可となる事象発生頻度は、M排水機場2号ポンプの故障確率7.6667E-06となる。よって、被害リスクは、0.016138478となる。この被害リスクは、パターン2のK排水機場1号ポンプor2号ポンプが機能停止する故障リスクより大きい事から、優先順位は3位となる。

K排水機場の1号ポンプを整備・更新した場合、その後1号ポンプは故障しないと仮定する事から、K排水機場の2号ポンプだけが排水不可となる事象発生頻度は、K排水機場2号ポンプの故障確率7.54297E-06となる。よって、被害リスクは、0.004239434となり、一番低い被害リスクとなる。

以上より、M排水機場・K排水機場の各ポンプの優先順位は以下のとおりである。

1. M排水機場1号ポンプor2号ポンプ
2. M排水機場3号ポンプ
3. M排水機場の残りの1号ポンプor2号ポンプ
4. K排水機場1号ポンプor2号ポンプ
5. K排水機場の残りの1号ポンプor2号ポンプ

以上より、リスク評価による設備整備の優先順位付けは可能であることが確認された。ただし、この評価手法はコストがかかることから、実用化には費用対効果を勘案する必要がある。

## 6. 機能回復難易度評価手法とりまとめ

これまでの検討ならびに「機能回復難易度評価の活用」の検討結果を元に、機能回復難易度評価算定の手引き(案)をとりまとめた。

最終的な手引き(案)のとりまとめに先立ち、まず(素案)を作成し、実用化に向けて、算定の趣旨や活用法、算定のしやすさを主眼に、各地方整備局本局を対象に、令和元年度に意見照会を行った。

また、「素案」では実際の算定作業を重視し、それに特化した(それがあれば最低限の算定作業ができる)「かんたんマニュアル」を作成し、合わせて意見照会をした。その経過を以下に記す。

意見照会内容は下記の4点である。設問1～3は「しやすい」「ややしやすい」「ややにくい」「しにくい」の4段階評価としている。

設問1：内容の理解のしやすさ

設問2：機能回復指標算定作業のしやすさ

設問3：マニュアルの見やすさ

設問4：その他自由意見

(以上、素案、かんたんマニュアル双方とも同じ質問とした)

回答であるが、特に設問4の「その他自由意見」では、機能回復指標による評価について、前向きな意見がある一方、これまでに無い評価手法なので、一部の地整から戸惑いや拒否反応が出るなど、現場実装に向けての課題が抽出された。

集約した意見のうち、特に多かったものは下記2点である。

- ・ 本マニュアルの目的やマニュアルの位置づけが不明であり、作成義務や事務所の負担増を心配する意見。
- ・ 復旧時間や修繕費用の評価指標を評価者に決定させる部分等の評価者によって評価が異なる部分について、評価設定の難易度が高い事や、評価がばらつくのではないか(統一的な評価基準がほしい)という意見。

前者については、下記①～③を行うことで解消できると考える。

①活用方法について誤解されている面があるので再度説明する

本件については、大多数が「本評価の義務化」に関する拒否感であるので、下記に示すように、「必要に応じて評価を行うものである」ことを周知することで解消するものと考ええる。

これについては、素案、かんたんマニュアルの

他、主旨や活用場面に対する理解が進むよう説明資料も作成した。

また、「マニュアル」という名称が、作成義務化を想起させ誤解を生んだと思われるので、「手引き」と名称を改めることとした。

②この評価を行うことによる導入効果を明確にする

本件については、5.2.1で述べた、K3排水機場をモデルに検討した管理計画策定シミュレーション結果を示したことで明確に出来たと考える(本アンケート実施時にはシミュレーション中で結果が出ていなかった)。また、導入効果の説明は、繰り返しになるが先述のとおり説明資料を作成している。

③業務化した際の規模感を示す

本件については、業務量と外注した際の概算費用を示すことになるが、長寿命化計画が既存でその見直しをする際にこの評価を実施する場合、大幅な費用増とはならないことが想定されるので、それを示すことを検討する。

後者については、評価の設定方法については、令和元年度に実施した評点のアンケート結果から4パターンを提示し、評価者がその4パターンから実情や考えに合うものを選択することを基本とし、実情や考えに合わない場合は自分で設定する、という流れに修正することとした。その4パターンについては、4.2.5で先述した通りである。

また、5.3.1で先述したように、標準的な機能回復指標を算定し掲載することで、算定が困難な場合でも指標を活用できるようにした。

以上に示したように、本研究の成果である「算定の手引き(案)」ならびに各種資料は、このアンケート結果や先述した各種算定シミュレーションを元にとりまとめている。

なお、設問1～3の回答結果を図-10、図-11、図-12に示す。令和元年度時点の照会結果ではあるが、「かんたんマニュアル」の効果については、これらの図に示されるように、マニュアル素案に比べ「しにくい」「ややしにくい」が減り「ややしやすい」「しやすい」が増えたことから、作成の効果はあったと考える。



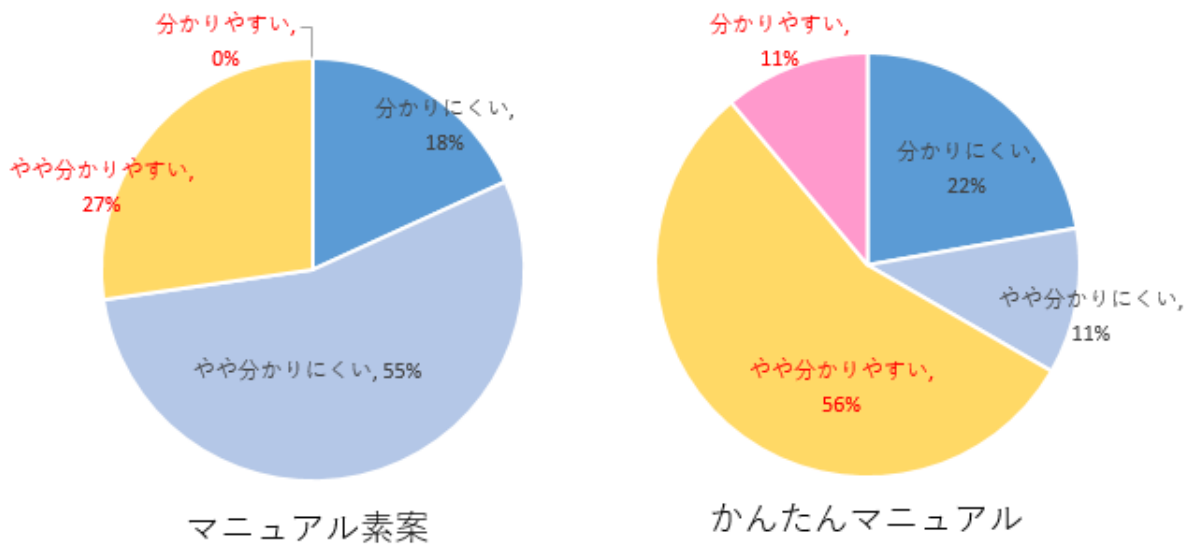


図-10 マニュアル素案とかんたんマニュアル 設問1「分かりやすさ」 結果比較

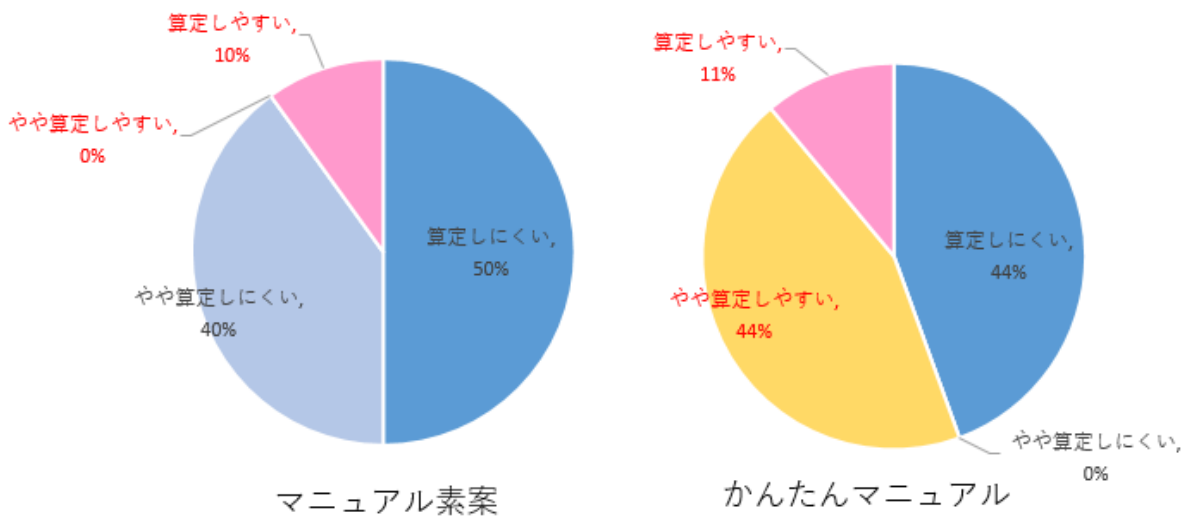


図-11 マニュアル素案とかんたんマニュアル 設問2「算定しやすさ」 結果比較

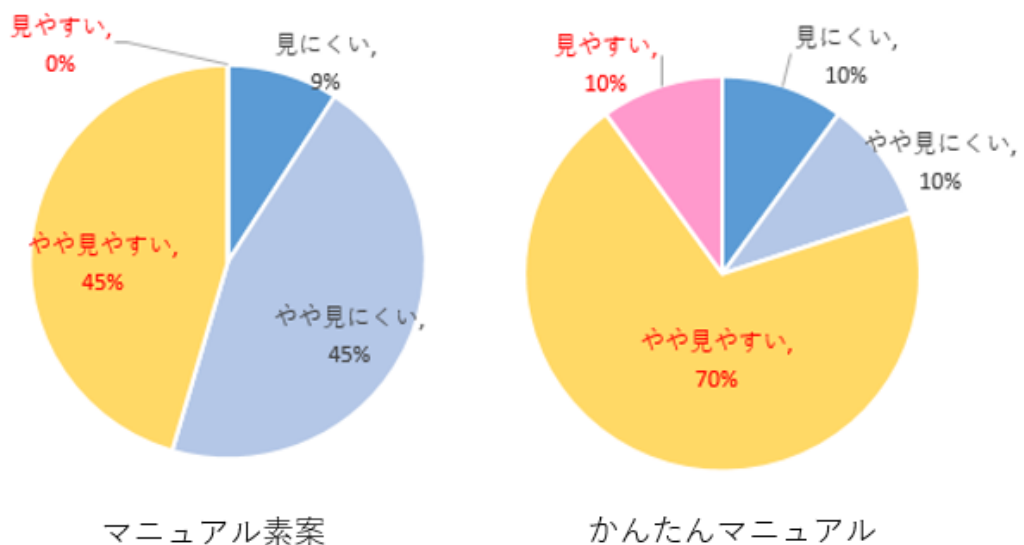


図-12 マニュアル素案とかんたんマニュアル 設問3「見やすさ」 結果比較

## 7. 災害時に弱点となる設備構造の抽出及びFTA等の信頼性評価手法を活用した弱点克服の検討

設備構造の弱点抽出にあたっては、FTAを用いる手法が有効である。しかしながら、河川用ポンプ設備において設備更新により大幅な仕様変更を行った場合など、従前のトップ事象を「排水機能低下」とした設備全体評価による信頼性評価では実際に運用する場合でのリスク評価を表せていないものと思われる。このため、以下の2点においてリスク低減効果を検討した。

### 7.1 大幅な仕様変更によるリスク回避の比較評価

表-52に示すO排水機場は設備更新において、ポンプ台数を3台から10台に増やすことによりリスク分散を図り全機能停止に至る可能性を低くしたものである。

表-52 仕様変更した排水機場例

施設名	区分	主要仕様			
		形式	台数	吐出力 (1台当たり)	総吐出力
O排水機場	更新前	立軸斜流ポンプ	3台	3.3m <sup>3</sup> /s	10m <sup>3</sup> /s
	更新後	コラム式中モータポンプ	10台	1.0m <sup>3</sup> /s	10m <sup>3</sup> /s

「排水機能低下」をトップ事象としたFTAは、機能を100%維持する確率を示している。FTAの性格上、100%機能維持をトップ事象とした場合では一般に構成要素が多ければ多いほど故障の可能性がある機器が多くなるため、システム全体としては信頼性が低くなる傾向にある。しかしながら、全機能停止に至るリスク自体は、同機能の要素（この場合、排水ポンプ）を複数用意することで低減（リスク分散）を図ることができるため、これを評価する必要がある。

このリスク低減効果を、FTAを用い定量評価する方法を検討する。FTAを実施するにあたっては、更新前後それぞれについてトップ事象を「ポンプ機能停止台数別」として故障発生確率を算出し、比較分析する。

分析にあたっては、図-13に示す「排水機能低下アンアベイラビリティ」ではなく、対象をポンプ系のみとした「既定台数ポンプ機能停止アンアベイラビリティ」で行った。これはシステム全体を評価する「排水機能低下」の場合、施設全体の評価となり全てのポンプ台数が機能停止する場合の確立がきわめて小さくなり、電源設備等の他設備の故障率に収束するため、リスク分散を示す評価が得られないた

めである。

図-14は、「規定台数ポンプ機能停止アンアベイラビリティ」と比較しやすくするため排水能力として「稼働台数＝排水量 (%)」で表したものである。

この図から、更新後の「2.97E-10」と更新前の「1.83E-10」は近似のアンアベイラビリティであり、ともに2台のポンプが機能停止した状態であるが、更新後では「80%」の排水が可能であるのに対して、更新前では「33%」しか排水できないことが分かる。また更新前に比べ更新後では近似線の傾きが緩やかであることが分かる。

以上のことから、リスク分散の評価は稼働台数とアンアベイラビリティにより定量的に評価が可能と考えられる。

### 7.2 信頼性向上検討を図った場合のリスク回避の比較評価

「土木機械設備のストックマネジメントに関する研究」において、設備の信頼性の確保・向上を考慮し、経済的な予防保全や技術改善、冗長化を図るモデルを、K排水機場を対象に経済性を評価している。

上記モデルは、FMEA・FTAを活用して表-52に示す判別方法により機能不全に対する寄与度が大きい機器を抽出し改善させた場合に設定したものであり、改善例を表-53に示す。なお、改善実施判定は、(ウ) > (イ) > (ア)の順で優先設定とし重複しないものとしている。

上記モデルにおいて、予防保全や技術改善、冗長化を図った場合、ライフサイクルコストの低減や延命化が見込まれる結果を得ているが、リスク低減効果についても評価する必要がある。

評価方法は、前項と同様にFTAに基づくアンアベイラビリティの評価によるものとしたが、排水ポンプ台数が同数であるため施設全体の評価として「排水機能低下アンアベイラビリティ」により比較評価する。

図-15は、「排水機能低下アンアベイラビリティ」と「稼働台数 (%)」で表したものであるが、排水量50% (1運転時) において「信頼性向上前」より「信頼性向上後」でアンアベイラビリティが20%低下 (20%信頼性向上) となっている。なお、前項(1)と同様に排水ポンプ系のみでの評価では大きな差が出ないことから、共通設備である系統機器設備の影響が大きいと認められる。

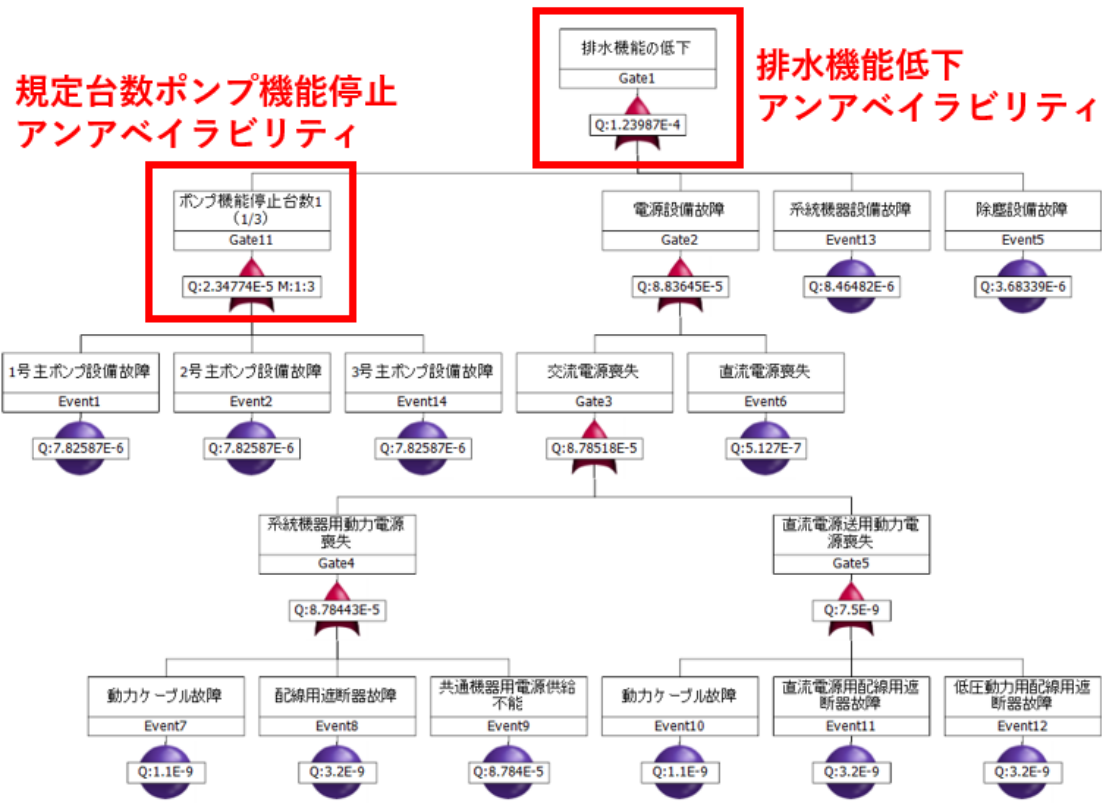


図-13 FTA (故障木)

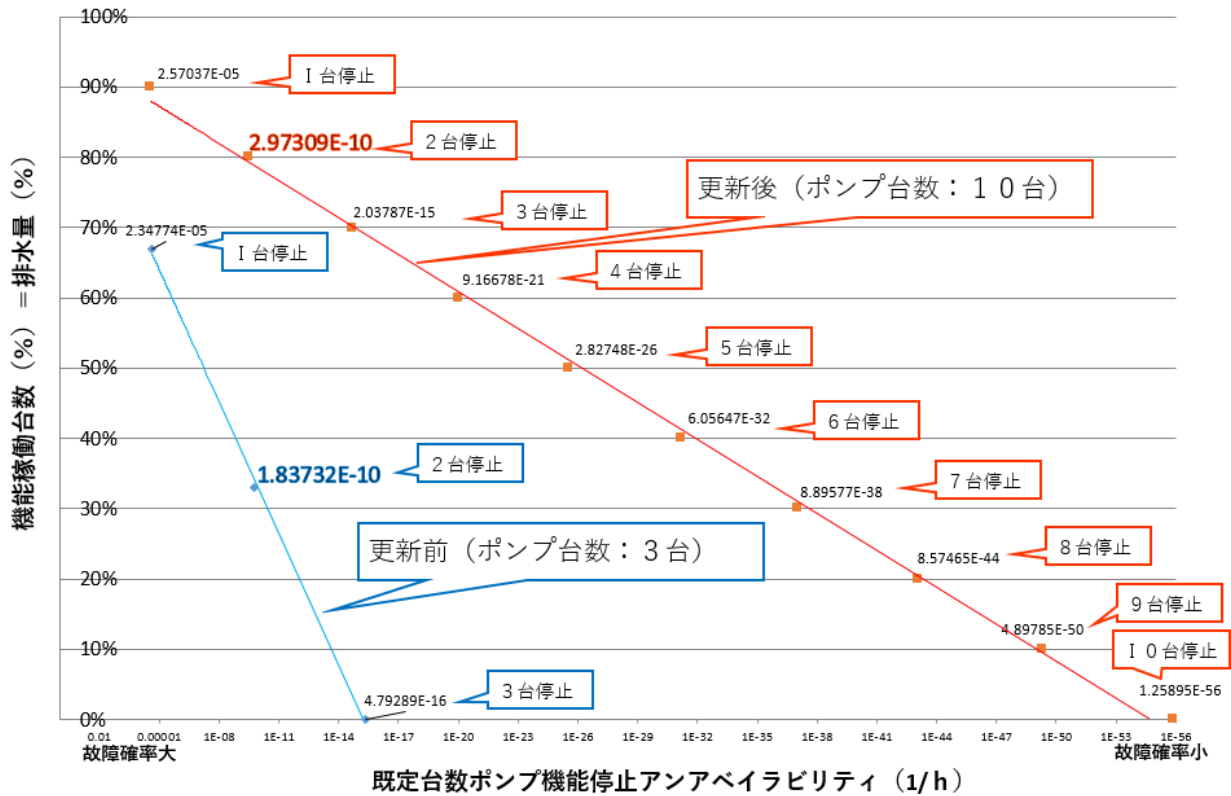


図-14 規定台数ポンプ機能停止アンアベイラビリティ比較

表-52 判別方法及び故障率の設定

分類	判別方法	故障率の設定(仮定)
(ア) 予防保全対象機器 時間管理または状態監視に基づき予防保全を行うことにより、信頼性が向上する機器	マニュアルにより、「予防保全機器」と「事後保全機器」の仕分けにより判別	従前故障率と同じ
(イ) 技術改善対象機器 技術改善を行うことにより、上記(ア)より信頼性が向上する機器	材質変更や他方式への変更の余地がある機器部品を判別	従前故障率の3/4 (アとウの中間値)
(ウ) 安全管理対象機器 二重化、保護装置の追加または予備品の設置により、上記(イ)より信頼性が向上する機器	二重化や予備品の対象となり得る機器部品を判別	従前故障率の1/2 (二重化等のため従前故障率の半分と仮定)

表-53 寄与度の大きい機器・部品の分類表(抜粋)

設備区分	機器区分	部品名	故障等級(致命度)順位	(ア)	(イ)	(ウ)
操作制御設備	補助継電器盤PLC盤	PLC	1	○	○	×
主ポンプ設備	インペラ	羽根車	2	○	○	×
主ポンプ設備	主軸及び軸受	軸継手	3	○	○	×
主原動機	機関本体関係	吸・排気弁	4	○	×	○
主原動機	機関本体関係	ピストン	5	○	×	×
主原動機	機関本体関係	ピストンリング	6	○	×	×
主原動機	機関本体関係	ピストンピン	7	○	×	×
主原動機	冷却装置	インタークーラ	8	○	×	×
吐出弁	吐出弁	本体	9	○	×	×
系統機器設備	燃料系統	配管	10	○	×	○

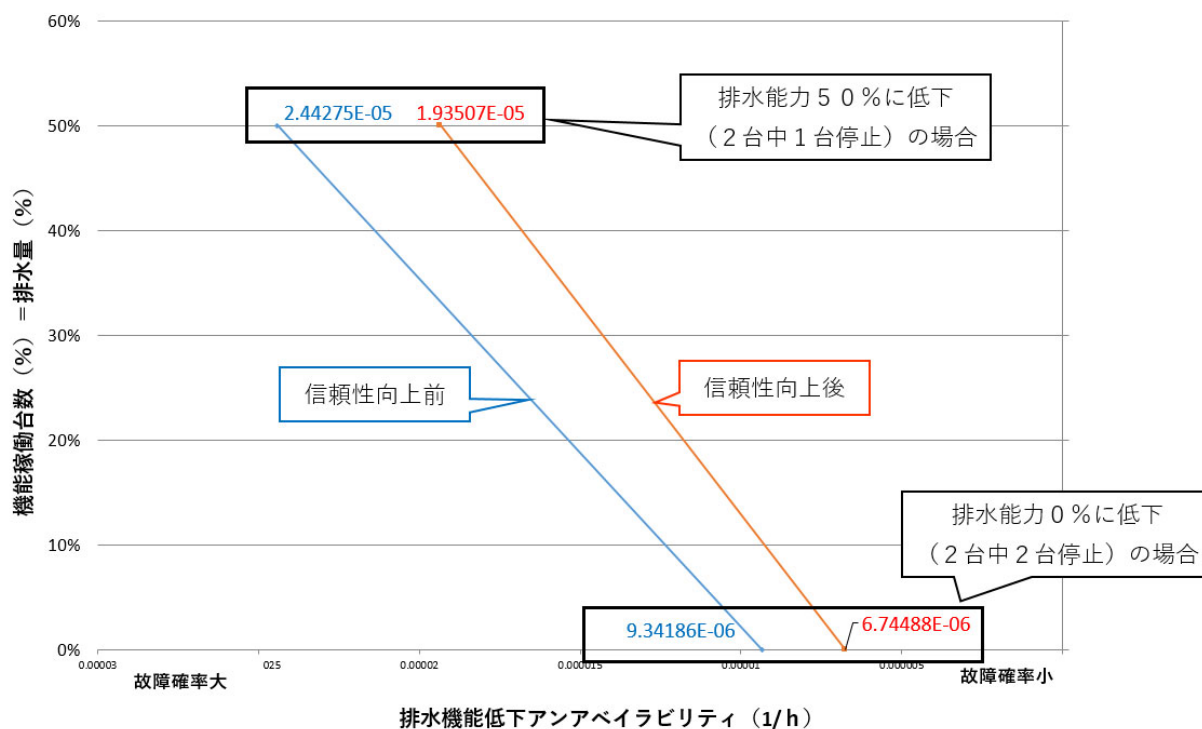


図-15 排水機能低下アンアベイラビリティ比較

表-54 ミニマルカットセット

検討モデル	No.	ミニマルカットセット	ミニマルカットセット故障率	機能停止台数
信頼性向上後	1-1	排水機能低下-1号主ポンプ設備故障-主ポンプ設備故障-主ポンプ故障-駆動設備故障-主エンジン機能喪失-主エンジン本体部不良-回転部不良- <b>過給機故障</b>	5.01E-07	1台
	1-2	排水機能低下-系統機器故障-始動条件成立後の始動失敗-系統機器故障による主ポンプ設備始動失敗-燃料系統故障による主ポンプ始動失敗-燃料配管不良- <b>配管故障【信頼性向上（ウ）】</b>	2.24E-07	2台
信頼性向上前	2-1	排水機能低下-1号主ポンプ設備故障-主ポンプ設備故障-主ポンプ故障-駆動設備故障-主エンジン機能喪失-主エンジン本体部不良-回転部不良-クランク軸部故障-クランク軸回転不良-ピストン不動作-始動空気系統不良-本体始動空気系統不良-始動弁不動作- <b>塞止弁故障</b>	6.33E-07	1台
	2-2	排水機能低下-系統機器設備故障-系統機器故障-始動条件成立後の始動失敗-系統機器故障による主ポンプ設備始動失敗-燃料系統故障による主ポンプ始動失敗-燃料配管不良- <b>配管故障</b>	4.48E-07	2台

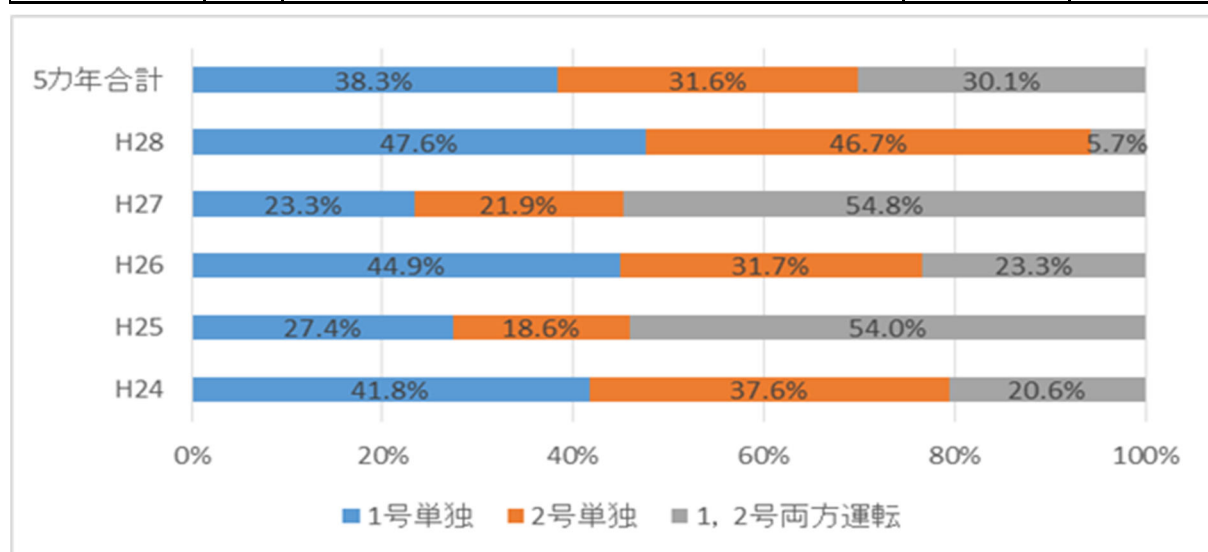


図-16 K排水機場 過去5年間稼働実績

FTAからミニマルカットセットを求めると、表-54のとおり、機能停止台数が1台のポンプ設備にミニマルカットセットがあるが、機能停止台数が全台数（2台）となると、ポンプ設備の故障率が下がるため系統機器設備にミニマルカットセットが変化している。

また、機能停止台数が1台の場合、信頼性向上前のミニマルカットセットは塞止弁であるが、信頼性向上後では塞止弁の予備品有りとしていることから、予備品等が無く故障率が高い過給機がミニマルカットセットとなった。

機能停止全台数の場合は、両方も燃料配管がミニマルカットセットになっており、配管故障が弱点であることが分かる。もともと燃料配管の故障率が高いことが関係していると考えられる。

以上のとおり、設備構造の弱点を抽出するには、ミニマルカットセットを求めることが有効と考えるが、機能維持レベル（「1台でも機能停止はNG（わ

ずかの排水機能喪失も許されない）」と「2台同時に機能喪失はNG（100%の排水機能喪失に至らない＝1台でも稼働可能なら許容範囲）」によって弱点が変化することに注意が必要である。

機能維持レベルの判断であるが、この機場の例では2台同時運転の実績が大幅に少なければ、維持管理レベルを「2台同時のとも機能喪失はNG（100%の排水機能喪失に至らない＝1台でも稼働可能なら許容範囲）」としてもよいと思われる。その場合、管理している排水機場すべての整備計画を立案する際には「A排水機場1号ポンプ→A排水機場2号ポンプ→B排水機場1号ポンプ→B排水機場2号ポンプ」としていたものを「A排水機場1号ポンプ→B排水機場1号ポンプ→A排水機場2号ポンプ→B排水機場2号ポンプ」のようにするなど、流域全体の浸水リスクを軽減する判断要素の一つとなると考える。

そこで、過去5年間のK排水機場のポンプ稼働実

績から、この機場の機能維持レベルをどちらとした方が適切かを検討した。

図-16が稼働実績であるが、2台同時運転は5年間全体では30%程度だが、平成28年度のように著しく低い割合の年度もあれば、平成25、27年度のように50%超の年度もあり大きくばらついている。

また、判断要素にはこの他、浸水被害などの社会的影響度も考慮されることはいうまでもない。河川GISにより運転台数別の被害想定をシミュレートしたので、その結果を表-55、表-56に示す。特に、表-56より、全台不稼働になった場合は1台機能確保できたときより被害総定額が6割増しであることがわかった。

これらの結果を総合的に判断すると、過去の稼働実績では運転台数にばらつきがあることと、被害総定額にも大きく差が生じることから、この場合は「1台でも機能停止はNG（わずかの排水機能喪失も許されない）」として評価することが適切であり、台数毎の維持管理レベルの設定は困難との結果となった。

以上から、FTAを活用した方法では、河川GISモデルを用いた浸水被害シミュレーションでの評価も加えて機能確保レベル毎での設備維持管理の設定可能か検討してみたが、今回の例では難しいとの判断となった。しかし、稼働実態や被害想定によっては設定可能となる事例もあると思われる。

表-55 ポンプ稼働台数別被害想定（氾濫メッシュ）

氾濫メッシュ数(1メッシュ50m×50m)				
		全台不稼働	1台稼働	全台/1台 比
氾濫なし		39739	39818	1.00
床下浸水		244	168	1.45
床上浸水	50cm以下	3	2	1.50
	50～100cm	14	12	1.17
	100～150cm	0	0	-
	150cm以上	0	0	-

表-56 ポンプ稼働台数別被害想定（被害総定額）

想定被害額表				
項目		全台不稼働	1台稼働	全台/1台 比
直接被害額	一般被害額計	1,101	688	1.60
	農作物被害額(水稻)	2	2	1.13
	農作物被害額(畑作)	1	1	1.00
	公共土木被害額	1,865	1,165	1.60
間接被害額	営業停止損失額	62	36	1.74
	清掃労働対価	50	31	1.59
	代替活動等の出費	95	60	1.60
	事務所代替活動	39	25	1.54
合計		3,215	2,008	1.60

(単位:百万円)

## 8. 故障情報活用に関する検討

### 8.1 故障データの解析

設備の信頼性評価を行う際には、基礎データとして故障実態のデータが必要である。そこで土木研究所で収集したデータについて、後述する機能回復指標の再設定や点検診断しやすい設備構造の検討への活用のために改めてデータ分析を行った。

対象設備の一つは排水機場ポンプ設備である。標準的な構成機器例を図-17に示す。

分析データは、国土交通省で収集した昭和57年～平成25年までの排水ポンプ設備の故障事例(285件)である。故障発生件数や復旧までの所要時間、費用などを事例分析した。その結果は、平成30年に国土交通省総合政策局公共事業企画調整課で策定した「河川ポンプ設備予備品調達の手引き(試行案)」の参考資料として添付されている。分析結果の抜粋を図-18、図-19、図-20、図-21に示し、明らかになったことを以下に列挙する。

- ・ 装置別では、主原動機の故障が多い。
- ・ 電源設備と合わせると、原動機の故障が排水機場全体の故障件数の半数以上を占める。
- ・ ディーゼル原動機(以下「DE」と記載)とガスタービン原動機(以下「GT」と記載)との故障件数は、DEの方がやや多い。しかし、DEとGTの設置数比率はおおよそ7:3なので、故障頻度はGTが多いといえる。
- ・ 「発生時運転状況」は、運転時が半数を占める。その中でも、実排水時が大多数である。
- ・ 「点検調査時」あるいは「工事時」に故障がわかるのは、20%弱となっている。
- ・ 故障発生までの経過年数を見ると、ほとんどが0年から発生している。初期故障あるいは突発的な故障のためと考えられる。また、部品別に細分化した場合は多くが1部品1件の故障なので、経過年数を検証するにはデータが足りない。
- ・ 復旧費用はデータが少ないため検証は難しい。
- ・ 故障要因は、経年劣化が多い(62件)が、人為ミス系を合計すると人為ミス系が多い(97件)。

もう一つの対象設備は河川水門設備である。水門は扉体形式、開閉方式が多種多様だが、標準的なワイヤロープウィンチ式ローラゲートの構成機器例を図-22に示す。

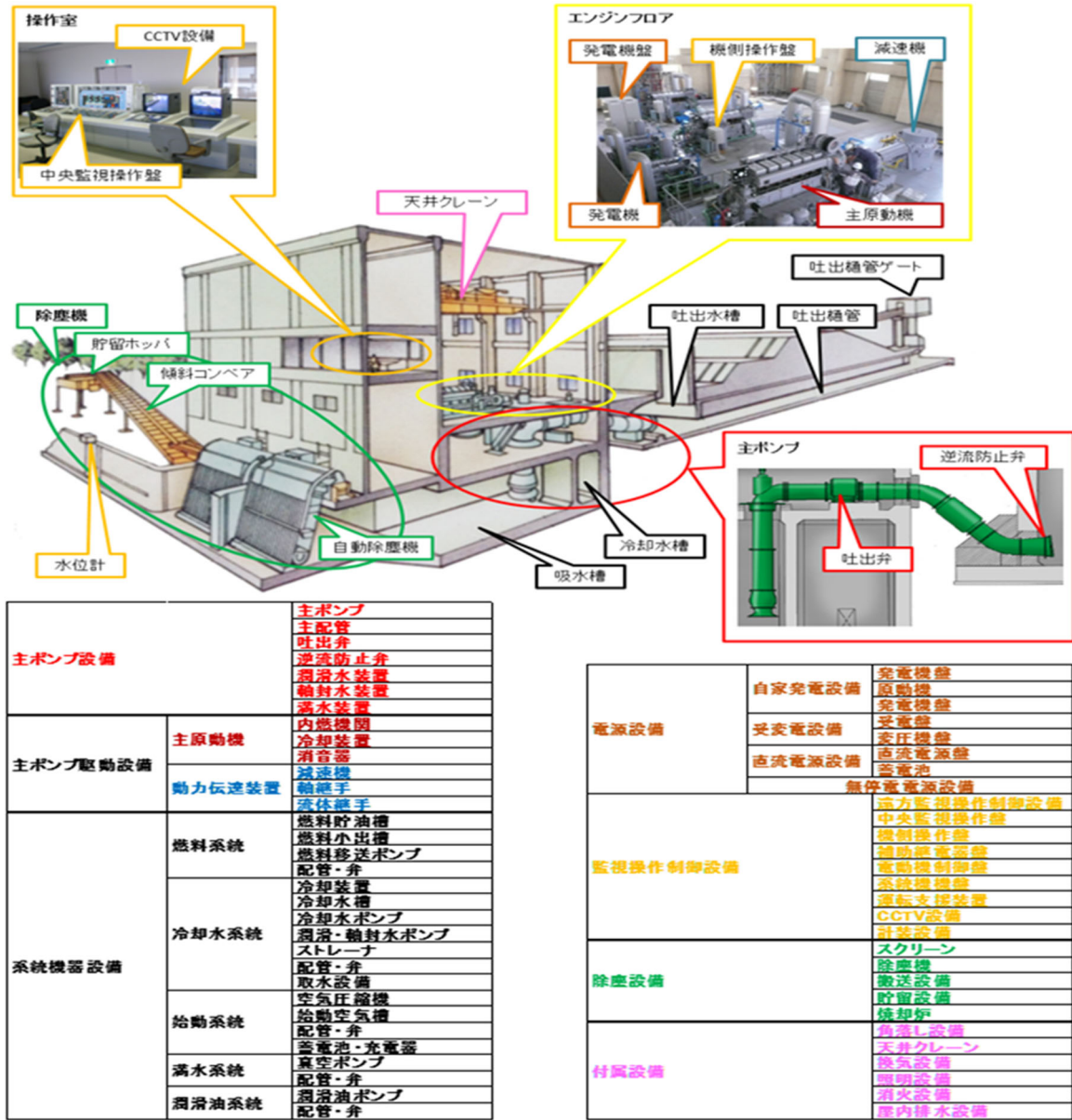


図-17 排水機場ポンプ設備の標準的な構成機器

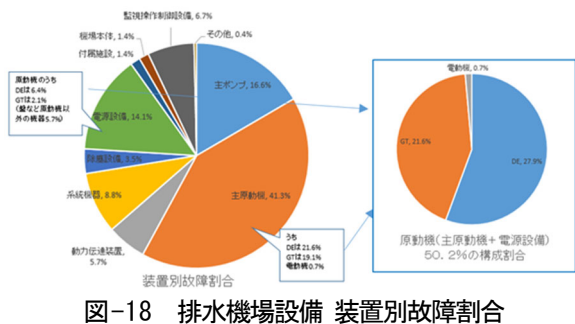


図-18 排水機場設備 装置別故障割合

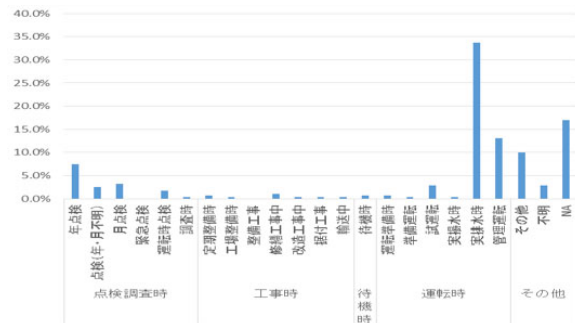


図-19 排水機場設備 故障発生時運転状況





ことである。しかし、統計としては元データが少ないことから、必ずしもそう言い切れるものではない。このような分析を行い維持管理に反映するには、より多くの件数と情報量のデータが必要である。真に故障が少ないがためにデータが少ないのであれば設備管理上喜ばしいことではあるが、データに漏れがあるならばそれを効率的かつ確実に収集する方法の検討が必要と考える。

## 8.2 予備品保有に関する所見

5. では、機能回復難易度評価から予備品選定を行う手法を述べたが、ここでは、故障情報から予備品保有に関する検討を行った。

まず、予備品として保有することで、設備の故障からの早期機能回復が期待できる、故障頻度の高い部品を抽出した。その結果を表-57に示す。この表を元に、予備品としての保有の適否を検討した。

1点目であるが、これらの部品は高額であるものが多く、また仕様も多様である（他の機場に流用することが困難）ことから、費用面や効率面は悪いと思われる。

2点目として、主ポンプ、ディーゼル機関のピストン、ガスタービン機関のタービンブレードの復旧は、設備の分解を伴うことから時間がかかる。復旧の手配をしている間に部品調達できるものもあるのではないかと思われる。

3点目として、特に過給器や潤滑油ポンプのように、部品ではなく機器（それ単品で作動する状態のもの）として保有が検討されるものについては、保管中の固着・腐食等により作動が保証されないことが想定される。

4点目として、低額である燃料配管についても、機場ごとに機器配置が異なること（他の機場に流用困難）や即時機能回復の観点から、（やるのであれば）予備品対応よりも異なる配管ルートでの二重化の方が効果的と思われる。

以上より、残念ながら予備品として保有すべきものは、かなり限定されるものと思われる。

## 8.3 故障情報の正確かつ効率的な収集手法の検討

前述の機能回復難易度の定量化手法の検討を含めた、今まで実施してきた信頼性評価に関する研究を進めるに当たり、設備管理者から故障情報等を収集したが、管理者ごと、あるいは年代ごとに情報の質にばらつきがあり、適正な評価に難があることがわかった。そこで、情報の質の向上と均質化、さらには必要な情報を容易かつ簡便に入手する方法の検討が必要となった。そこでまず、故障情報の充実度と課題抽出を主に行った。

故障情報の充実度については、各地方整備局から国土交通省公共事業企画調整課に報告のあった故障情報のうち、平成26～29年度分をとりまとめた検索

表-57 故障頻度の高い部品（故障情報解析結果より）

故障頻度の高い部品	金額	備考	
主ポンプ	羽根車	高	
	水中軸受	高	
	メカニカルシール	高	
ディーゼル機関	ピストン	中	
	過給器	高	
	燃料配管	？	人為ミス(品質不良)が多い
ガスタービン機関	タービンブレード	高	
動力伝達装置	潤滑油ポンプ	？	
系統機器	燃料配管	低	
除塵機	レーキ	中	軽故障が多い
電源装置・監視制御盤類	(故障頻度の高い特定の部品はない)	低～中	突発的な故障(主に落雷)が他に比べて多い 予備品対処事例あり

様式から、各項目の情報の有無（回答率）を調査した。その結果を表-58に示す。

また、課題抽出については、設備管理者に「設備トラブル時に参考としたい過去情報は何か？」とヒアリングを行った。ヒアリングの結果、参考としたい過去情報は以下のものが挙げられた。

- ・修理費用
- ・故障を受けての改善策

数や金額などの値は「〇ヶ月」、「〇日」、「円」、「万円」など単位を示す文字が混在している。

・故障部品名などの文字列入力について、同じ部品名であっても、例えば「モータ」「モーター」「モター」「モター」など、同じものを指す表現にばらつきがあるケースが見られる。

これらの改善策や効果について、表-59に示す。

表-58 故障頻度の高い部品  
(故障情報解析結果より)

故障頻度の高い部品		金額	備考
主ポンプ	羽根車	高	
	水中軸受	高	セラミック軸受の故障が多い。原因は人為ミス（設計ミス）が多い。
	メカニカルシール	高	
ディーゼル機関	ピストン	中	
	過給器	高	
	燃料配管	?	人為ミス(品質不良)が多い。
ガスタービン機関	タービンブレード	高	
動力伝達装置	潤滑油ポンプ	?	
系統機器	燃料配管	低	
除塵機	レーキ	中	軽故障が多い
電源装置 監視制御盤類	(故障頻度の高い特定の部品はない)	低～中	突発的な故障(主に落雷)が他に比べて多い 予備品対処事例あり

しかし、これらの情報は、図-25によると欠落しているケースが他の情報より多いことがわかる(同図の赤枠)。

その原因だが、故障報告は速報性を求められるため初期にわかる情報は比較的充実するが、修理費用や改善策は事後しばらくしてから明確になるものであるため報告が忘れられがちになること(場合によっては担当者の異動で経緯等が不明になること)が考えられる。

また、これまでの故障情報を精査すると、同じ故障状況であっても、報告者が異なる場合(地方整備局、事務所別。同じ事務所であっても異なる担当者の場合)、特に、故障原因、故障モードの記載に統一性がない事例が見られた。

検索様式であるが、上記に示した入力率の他、入力形態は下記のような状況であり、統計処理上好ましくない。

- ・数値入力について、データの入力率が高いが、年

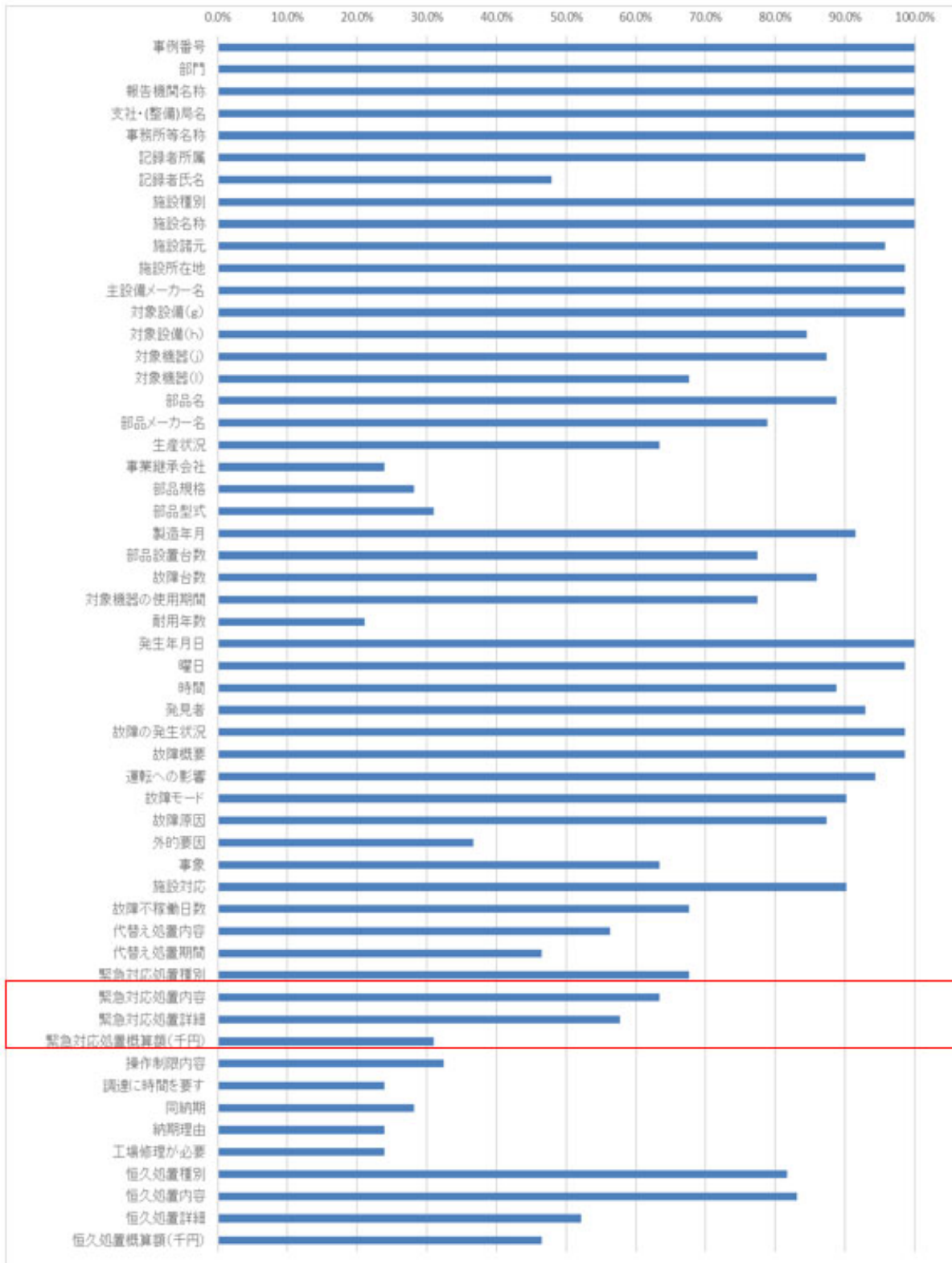


図-25 故障情報各項目の回答率

表-59 故障情報入力改善案

	改善策	検討目的	効果
入力書式	<b>入力書式の改良・入力ルールの整備</b> 入力書式の欄の一部は、数値データ・文字データのいずれでも入力可能な様式となっているが、このことで入力データの形式のばらつきが生じているため、入力できるデータ形式を「数値」に制約するなどの <b>書式の改良、または入力ルールを明確化</b> することが望ましい。	A) 耐用年数・故障率の精度向上	・ 数値を分析に活用しやすくなり、統計計算精度が向上する
		B) 機能回復難易度評価の精度向上	・ 機能回復時間や金額の情報を的確に集めることで、評価精度が向上する
		C) 故障発生後の対応の円滑化	・ 故障原因や、応急対策に対する情報を読み取りやすくなり、ノウハウが蓄積することによって故障発生後の対応の円滑化が期待できる
		D) 故障予防対策に関する知識共有	・ 故障原因や、恒久対策に対する情報を読み取りやすくなり、ノウハウが蓄積することによって故障発生後の対応の円滑化が期待できる
運用	<b>集計表の作成・記載内容照査</b> 今回の検討の「代表的な事例の深掘り」で作成したような <b>集計表を用いて、1年分の収集された事例一覧表を各現場に配布し、記載内容のチェックを行う機会をつくる</b> ことを提案する。この事により以下の効果が期待できる。 ・ 入力内容の第3者(上位職員など)による照査機会が生まれること、 ・ 報告書提出後に判明した事象や原因の追記機会が生まれること ・ 他担当者の記述内容と比較することで、入力詳細度の統一が自然と図られ、過剰に情報の少ない記述が是正されること	A) 耐用年数・故障率の精度向上	・ チェックが働くことで入力状況が向上し、統計計算精度が向上する。
		B) 機能回復難易度評価の精度向上	・ チェックが働くことおよび、対応後の情報(機能回復期間や金額)が追加で入力されることにより、機能回復難易度の評価に有益な情報がより集まる
		C) 故障発生後の対応の円滑化	・ チェックが働くことで、故障原因や応急対応に関する入力内容の詳細度や正確さが向上し、ノウハウ蓄積に資する
		D) 故障予防対策に関する知識共有	・ チェックが働くことで、故障原因や応急対応に関する入力内容の詳細度や正確さが向上し、ノウハウ蓄積に資する
分析手法	<b>テキストマイニング技術</b> 入力内容のばらつきに対応する手段として、テキストマイニング技術が有効である可能性がある。(※統一様式以外の個別の故障報告書を分析対象とすることで、より精度の高い情報を抽出できる可能性がある)	A) 耐用年数・故障率の精度向上	・ (該当なし)
		B) 機能回復難易度評価の精度向上	・ (該当なし)
		C) 故障発生後の対応の円滑化	・ 異なる設備における故障原因の共通性や傾向の分析に活かせる可能性がある
		D) 故障予防対策に関する知識共有	・ 異なる設備における故障原因の共通性や傾向の分析に活かせる可能性がある

## 9. まとめ

本研究では、機械設備の機能喪失時からの機能回復の遅速を定量的に評価する「機能回復難易度評価」の手法を確立し、活用方法についてとりまとめた。

それと平行し、故障情報の有効活用方法や、信頼性向上によるリスク回避についても検討を進めた。これらを実現場で活用する場面はこの先になるが、特に機

能回復難易度評価は、令和2年度から国土交通省で開催されている「社会資本整備審議会河川分科会・河川機械設備小委員会」において、これまでの「壊れない維持管理」から「壊れることを考慮した維持管理」へのパラダイムシフトを審議していることから、設備が機能喪失してから普及の遅速に関する評価が着目されると思われ、今後の機械設備維持管理に寄与するものと思料する。

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (1)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、山本将、藤木裕二、吉田英二

#### 【要旨】

PC 構造物では、厳しい塩害環境や想定外の水分浸入などによる PC 鋼材の腐食・破断などの劣化・損傷が生じると、耐荷性能が低下して重大な事象に至ることもある。本研究では、既設 PC 橋を対象として、損傷による曲げ耐力不足の程度やその範囲を耐荷性能の評価に考慮するための手法を開発するための検討を行った。平成 29 年度から令和 2 年度の間、載荷試験および解体調査にて既設 PC 鋼材破断およびグラウト充填不足が曲げ耐力に与える影響が大きいことを確認し、それらの結果に基づき、損傷を考慮した破壊抵抗曲げモーメントの算出方法を提案するとともに、その妥当性について、PCT 桁の梁モデルの解析結果との比較により検証した。

キーワード：既設 PCT 桁橋、破壊抵抗曲げモーメント、PC 鋼材破断、グラウト充填不足

#### 1. はじめに

PC構造物では、厳しい塩害や想定外の水分浸透などによるPC鋼材の腐食・破断といった損傷が生じると、耐荷性能が低下して重大な事象に至ることがある。一方、PC鋼材の腐食・破断などの影響を精緻に考慮した耐荷性能評価方法についてはさまざまな研究<sup>1)</sup>が行われている。これらの評価方法を補強設計に活用することで、損傷箇所における補強の必要箇所を詳細に把握して局所的な補強を実施できるなど、合理的な補強設計につながる。本研究では、損傷した既設PCT桁橋の補強設計に活用することを目的に、既設PC橋を対象として、損傷による曲げ耐力不足の程度やその範囲を耐荷性能の評価に考慮するための手法を開発すべく検討を行った。平成29年度から令和元年度にかけ載荷試験および解体調査にて既設PC鋼材破断およびグラウト充填不足が曲げ耐力に与える影響が大きいことを確認し、それらの結果に基づき、PC鋼材破断やグラウト充

填不足の損傷事象を考慮した耐荷性能（破壊抵抗曲げモーメント）算出方法について検討した。あわせて、その破壊抵抗曲げモーメントの算出方法の妥当性について、梁モデル（ファイバーモデル）を用いた解析結果と比較し検証した。

#### 2. 対象橋梁

対象橋梁は昭和37年に海岸から約70mの河口上に建設された3連のポストテンション方式PC単純T桁橋である（写真-1）。昭和51年より塩害補修が着手され、そののち、既設PC鋼材の破断が点検で確認されたため、平成8年に外ケーブル補強が行われた。平成29年には新



写真-1 対象橋梁全景

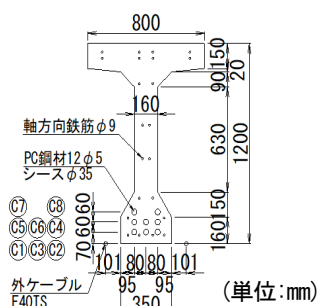


図-1 撤去桁の支間中央断面図

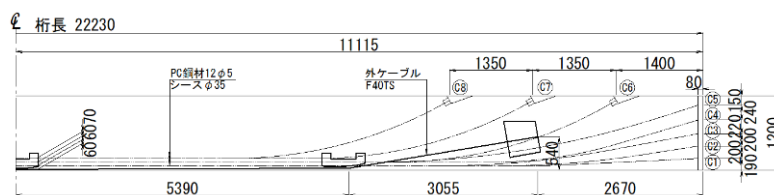


図-2 撤去桁の側面図 (単位:mm)

橋建設に伴い撤去されることになり、外ケーブル補強された主桁を譲り受けた（以下、撤去桁）。平成30年には外ケーブルの補強効果を確認するために載荷試験を行い、さらに解体調査によりPC鋼材破断やグラウト充填不足を確認した<sup>2)</sup>。撤去桁の支間中央部断面図を図-1、側面図を図-2に示す。

### 3. 梁モデルの構築

#### 3.1 梁モデルの設定

##### 3.1.1 部材のモデル化

本章では、4章で検討する破壊抵抗曲げモーメント算出方法の検証に用いる梁モデルを構築した。梁モデルは平成30年に載荷試験および解体調査を実施した撤去桁を対象として、各部材の非線形性を考慮した2次元骨組みモデルとした（図-3）。コンクリート部は断面形状を定義できる梁要素（ファイバー要素）でモデル化し、各断面形状の領域内に埋め込み鉄筋要素を考慮した。PC鋼材および外ケーブルはトラス要素を鋼材配置による偏向力と載荷時の応力増加を見込めるよう、仮想剛部材を用いて実配置でモデル化した。

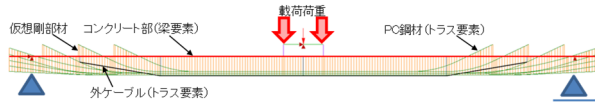


図-3 梁モデル  
(支持条件は図中の左側がピン、右側がピンローラー)

##### 3.1.2 材料のモデル化

材料特性について、物性値は表-1によるものとし、

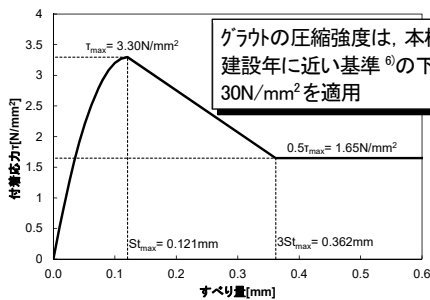


図-4 PC鋼材とグラウトとの付着特性

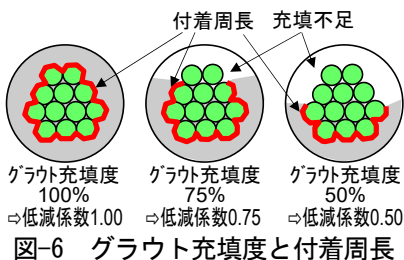


図-6 グラウト充填度と付着周長

表-1 各材料の物性値

コンクリート	設計基準強度: 40N/mm <sup>2</sup>
主鉄筋	降伏点強度: 295N/mm <sup>2</sup> (SR295)
PC鋼材	引張強度: 1620N/mm <sup>2</sup> (SWPR1相当)
ケーブル	引張強度: 1850N/mm <sup>2</sup> (F40TS)

材料構成則等は以下の方法にて設定した。

コンクリート: コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に基づく軟化挙動を考慮したモデルを圧縮側、引張側に設定した。

主鉄筋、PC鋼材、外ケーブル: 道路橋示方書<sup>4)</sup>に基づき設定した。PC鋼材とグラウトとの付着特性は、是永ら<sup>5)</sup>の提案式に基づく付着応力-すべり量関係を設定した（図-4）。

また、PC鋼材の有効引張応力度は外ケーブル補強設計当時の計算書より836N/mm<sup>2</sup>、外ケーブルの有効引張応力度は過年度に実施した載荷試験時の計測結果<sup>7)</sup>より973N/mm<sup>2</sup>とした。

##### 3.1.3 損傷のモデル化

損傷について、解体調査にて得られたPC鋼材破断およびグラウト充填不足を以下の方法にてモデル化した。

PC鋼材破断: PC鋼材破断の程度をPC素線残存本数の割合でモデル化した。PC鋼材の素線破断が12本中0本の場合、残存本数割合は1.00、素線破断が12本の場合は0とした（図-5）。

グラウト充填不足: PC鋼材とグラウトとの付着特性については、PC鋼材の付着周長（図-6の太線部）をグラウト充填度に応じ低減する付着周長低減係数の考え方を取り入れた（図-7）。付着周長低減係数は、素線残存本数とグラウト充填度のパラメータの影響を簡易的に表現し、両者の積と考えた。たとえば、PC鋼材C1ケーブルの支間中央から-1350mmの位置では、素線が12本

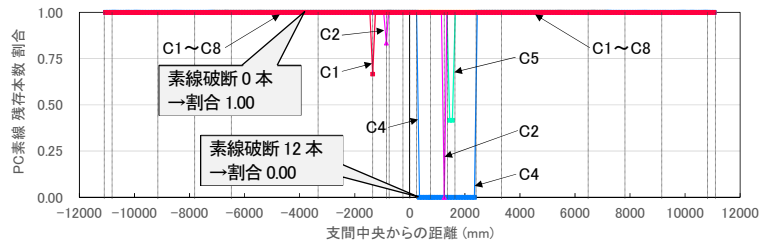


図-5 解体調査結果に基づくPC鋼材破断状況

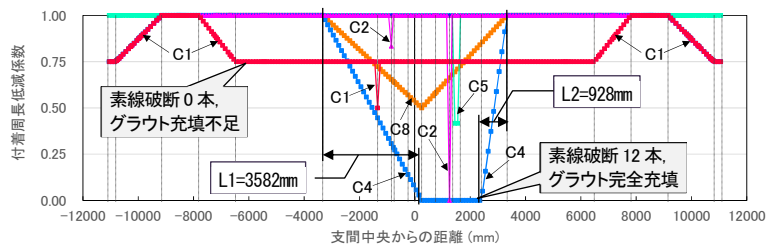


図-7 グラウト充填状況を考慮した付着周長低減係数  
※L1, L2: PC鋼材破断箇所から生じるC4ケーブルのグラウト充填不足区間

中8本残存、グラウトは充填度が75%であったため、付着周長低減係数は $8/12 \times 0.75 = 0.50$ とした。

### 3. 2 再現性の確認

構築した梁モデルに、載荷試験時の荷重載荷位置と同じ位置(2点載荷)で最大荷重まで荷重漸増させ解析を行った。解析プログラムはDIANA10.4を使用した。梁モデルの最大荷重はコンクリートの上縁圧縮ひずみが終局ひずみ $3500\mu$ に達した時点<sup>8)</sup>とした。荷重漸増解析で得られた梁モデルの最大荷重と載荷試験結果の最大荷重の比較を図-8および表-2に示す。両者の比較の結果、最大荷重の比率が95.7%であり、また解析結果は載荷試験結果と類似した変化を示していることから、梁モデルは載荷試験結果を概ね再現できていることを確認した。

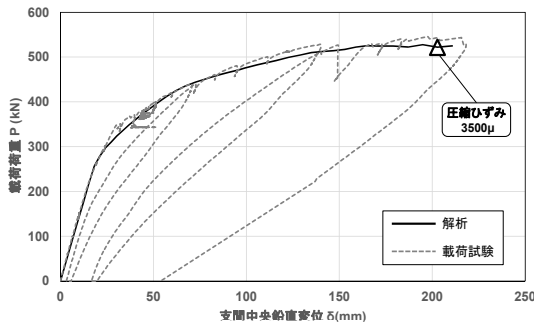


図-8 梁モデルの解析と載荷試験の結果

表-2 梁モデルと載荷試験の最大荷重

①梁モデルの最大荷重	②載荷試験結果の最大荷重	比率(①/②)
522.0kN	545.7kN	95.7%

## 4. 破壊抵抗曲げモーメント算出方法の検討

### 4. 1 破壊抵抗曲げモーメント算出

3章の梁モデルと同じ撤去桁を対象として、損傷を考慮した破壊抵抗曲げモーメント(以下、 $M_{uc}$ )を道路橋示方書<sup>9)</sup>に準じた断面計算により算出した(図-9の太実線)。なお、段階的に検討を進めるため、まずは耐荷性能への影響が大きく考え方が明確であるPC鋼材破

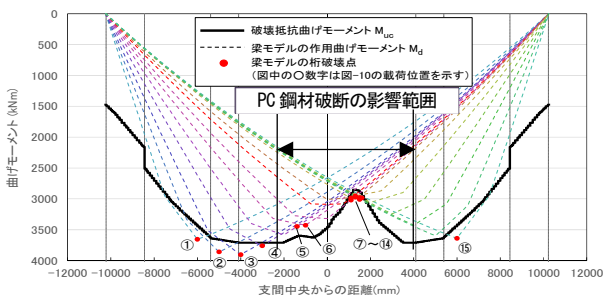


図-9 作用曲げモーメント  $M_d$  と破壊抵抗曲げモーメント  $M_{uc}$

断<sup>2)</sup>を損傷の対象とした。損傷を考慮する方法については以下の考え方を取り入れた。

**PC鋼材破断**：破断した素線分の断面積を低減した。

**PC鋼材破断の影響**：プレテンション部材におけるPC鋼材の定着長の考え<sup>10)</sup>を準用し、PC鋼材破断箇所から $65\phi$ ( $\phi$ :PC鋼材の直径)でプレストレスが回復すると仮定した。なお、プレストレスの分布は道路橋示方書<sup>10)</sup>では二次放物線で与えられるが、本検討では簡易的かつ安全側になるよう線形分布で近似した。

また、外ケーブル補強の影響は、桁の変形に伴い生じる外ケーブルの張力増加量 $\Delta\sigma_p = 429\text{N/mm}^2$ <sup>7)</sup>として考慮した。

### 4. 2 算出方法の妥当性検証

3章にて再現性を確認した梁モデルを用いて、図-10に示す①~⑮の15箇所に荷重を載荷し、荷重漸増解析により得られる桁破壊点の作用曲げモーメント(以下、 $M_d$ )と $M_{uc}$ を比較することで算出方法を検証した。なお、桁破壊点はコンクリートの上縁圧縮ひずみが終局

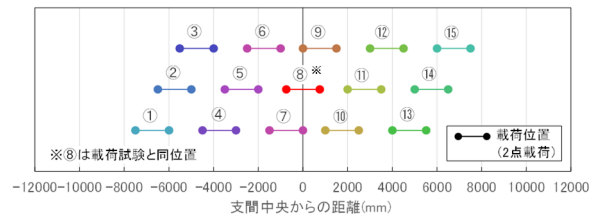


図-10 梁モデル解析時の載荷位置

ひずみ $3500\mu$ に達した点<sup>8)</sup>とした。

図-9にて、梁モデルの載荷位置が図-10に示す⑦~⑭では、PC鋼材最多破断付近(図-9の支間中央からの距離0~2000mm)にて桁破壊点が発生することを確認した。一方、梁モデルの載荷位置が図-10に示す①~④、⑮では、載荷位置にて桁破壊点が発生することを確認した。桁破壊点発生位置が異なる要因として、①~④、⑮ではPC鋼材破断による $M_{uc}$ 減少の影響が及ばないことが考えられる。また、 $M_d$ と $M_{uc}$ の比較の結果、両者の比( $M_d/M_{uc}$ )は約95~107%と概ね近い値になることが確認されたことから、4. 1での算出方法は概ね妥当であると考えられる。

ただし、図-10に示す載荷位置⑤、⑥では $M_d < M_{uc}$ となる箇所が確認された。 $M_d < M_{uc}$ になる場合、断面計算にて算出した桁の $M_{uc}$ が危険側(過大)となる可能性がある。なお、同区間のPC鋼材のうちC4ケーブルでは、PC鋼材破断箇所を含むその周辺でグラウト充填不足が生じていた(図-5、図-7)。 $M_d < M_{uc}$ となる要因として、 $M_{uc}$ 算出にPC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足が反映されていないことが考

えられる。

### 4. 3 グラウト充填不足を考慮した影響検討

4. 2で挙げられた課題に対し、PC鋼材破断に加えてPC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足を考慮した $M_{uc}$ の算出方法について検討した。検討にあたっては、PC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足区間の1/2まではPC鋼材定着端部と同等とみなしプレストレスを考慮せず、残りの1/2ではPC鋼材破断側から $65\phi$  ( $\phi$ :PC鋼材の直径)でプレストレスが回復すると想定し設定した(図-11)。

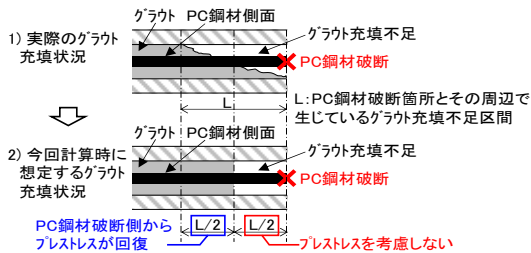


図-11 PC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足区間のプレストレス

今回はPC鋼材の素線破断およびグラウト充填不足が最大であるC4ケーブルを検討対象とした。PC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足区間はPC鋼材破断箇所の両側でそれぞれ $L1=3582\text{mm}$ 、 $L2=928\text{mm}$ である(図-7)。

上記で設定した方法を取り入れて $M_{uc}$ を再度算出し(図-12の太実線)、4. 2で解析から算出した $M_d$ と比較した。図-10に示す荷重位置⑤、⑥において、PC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足を考慮することにより $M_{uc}$ が減少するため $M_d > M_{uc}$ となり、 $M_{uc}$ を算出する上で安全側となることを確認した(図-12)。よって、 $M_{uc}$ の算出にあたっては、PC鋼材破断に加えてPC鋼材破断箇所を含むその周辺で生じていたグラウト充填不足を考慮することによって算出精度が向上することを確認した。

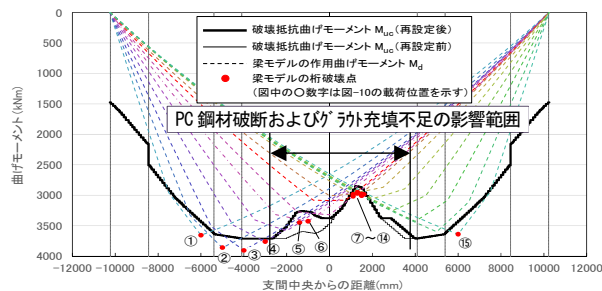


図-12 作用曲げモーメント  $M_d$  と破壊抵抗曲げモーメント  $M_{uc}$  (再設定)

## 5. まとめ

PC鋼材破断やグラウト充填不足が生じたPC桁の破壊抵抗曲げモーメントの算出について、これらの損傷を付着周長低減係数によってモデル化し、さらに、グラウト充填不足区間のプレストレスの評価をグラウト充填不足区間の1/2まではPC鋼材定着端部と同等とみなしプレストレスを考慮せず、残りの1/2ではPC鋼材破断側から $65\phi$  ( $\phi$ :PC鋼材の直径)でプレストレスが回復すると評価することによって算出精度が向上することを確認した。算出した破壊抵抗曲げモーメントの妥当性は、平成30年に実施した荷重試験結果と同一した梁モデル(ファイバーモデル)を用いて、複数の荷重位置に対して荷重漸増解析を行い得られた桁破壊点の作用曲げモーメントと対比する手法で検証し、妥当であることを確認した。なお、付着低減係数の設定については、本研究では解体調査をもとに設定したが、供用中の橋梁においては非破壊検査をもとに設定することになるため、PC鋼材破断やグラウト充填不足の損傷程度を精度よく測定できる非破壊検査技術の向上が課題となる。

従来の既設PC桁においては、PC鋼材が破断すると実質的に主桁全区間で緊張力損失と評価するため、主桁全区間を外ケーブル工法などで補強する方法が用いられている。本研究での耐荷性能評価手法を用いることで、PC鋼材一部破断による部分的な曲げ耐力低下を把握することができるため、たとえば、緊張させた炭素繊維プレートを曲げ耐力不足範囲に取り付けるなど、PC鋼材が一部破断している既設PC橋への局所的な補強設計への活用が期待される。

## 謝辞

本研究は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究の一環として行われた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) たとえば、横田敏広、Isuru WIJAYAWARDANE、睦好宏史：腐食したPC鋼材を有するPC梁の耐荷力特性と解析的性能評価手法の検討、土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)、Vol. 74, No. 4, pp. 218-233, 2018
- 2) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター、プレストレスト・コンクリート建設業協会：撤去橋梁を用いた既設PC橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究報告書—既設PC橋の性能評価法および外ケーブル補強



技術に関する研究一、共同研究報告書第520号、pp. 23-25、2020.12

- 3) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp. 486-488、2018.3
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 149-157、2017.11
- 5) 是永健好、渡辺英義：PC鋼より線とグラウト材の付着特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp. 1083-1084、1999.9
- 6) 土木学会：昭和36年度改訂 土木学会 プレストレストコンクリート設計施工指針、p. 90、1961.8
- 7) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター、プレストレスト・コンクリート建設業協会：撤去橋梁を用いた既設PC橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究報告書－既設PC 橋の性能評価法および外ケーブル補強技術に関する研究一、共同研究報告書第520号、p. 43、2020.12
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 150-151、2017.11
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 152-154、2017.11
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 101-102、2017.11

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.2 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (2)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、山本将、藤木裕二、吉田英二

#### 【要旨】

既設PC橋の塩害対策の一環として、予防保全等の観点でも塩分侵入抑制を目的に表面被覆工法（表面塗装）が採用されてきたが、期待される補修効果が発揮されず塩害劣化が発生していると考えられる事例が散見される。このような状況に対し表面被覆の品質・施工管理等の留意事項の提案を目的に、平成29年度から令和2年度の間に、既設PC桁の部位ごとに塩化物イオン量が異なること、損傷等が生じていない表面被覆は一定年数経過後も高い遮塩性能を維持していることを確認し、塩害対策として表面被覆工法で補修された既設PC桁を対象に、補修前後のコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布等に着眼し整理・分析および詳細調査を実施した。

キーワード：既設PC橋、表面被覆工法、遮塩性、塩化物イオン、拡散

#### 1. はじめに

既設橋の塩害対策工法のひとつとして、予防保全等の観点でも表面被覆工法（表面塗装）による補修が行われてきたが、期待される補修効果が発揮されず塩害劣化が発生していると考えられる事例が見受けられる。そのような劣化の発生を抑制するには、塩害劣化が発生した橋梁において、表面被覆工法の一定年数経過後の遮塩性や、コンクリート内の塩化物イオン濃度分布の経年変化など、劣化要因を時間経過に着眼して調査する必要がある。

本研究では、表面被覆工法施工後に補修効果が発揮されない要因を実橋にて確認し、既設PC橋を対象に表面塗装の品質・施工管理等の留意事項を提案することを目的に、平成29年度から令和元年度にかけ既設PC橋を対象に調査を行い、桁の部位ごとに塩化物イオン量が異なること、また損傷等が生じていない表面被覆は一定年数（10年程度）経過後も高い遮塩性能を維持していることを確認<sup>1)</sup>した。令和2年度は、塩害対策とし

て表面被覆工法で補修された既設PC桁を対象に、補修前後におけるコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布等に着眼し整理・分析および詳細調査を実施した。

#### 2. 整理・分析対象橋梁の概要

対象橋梁について、塩害劣化の影響が大きい地域（日本海沿岸、塩害対策区分:S）の橋梁データをもとに、以下の条件にて抽出した（表-1）。

（抽出条件）

- ・PC橋。
- ・表面被覆工法が実施されている。
- ・過年度に塩分量に関する調査が行われている。
- ・塩化物イオン濃度の経年変化の比較が可能なデータが確認されている。

#### 3. 塩化物イオン濃度における経年変化の整理・分析

期待される補修効果が発揮されず塩害劣化が発生していると要因として、塩化物イオンの内部拡散<sup>1)</sup>が想定

表-1 整理・分析対象橋梁概要

橋梁名	完成年	上部工形式	架橋種別	海岸線からの距離	橋長（支間割）	最小鋼材径かぶり（設計図上）	調査・分析対象	表面被覆実施年
A橋	1962年	単純PCボーステンション方式 T桁×3連	渡河橋	20m程度	76.8m(24.8@3)	23.5mm	第1径間G2桁	1985年
B橋	1970年	単純PCボーステンション方式 T桁×4連	渡河橋	30m程度	110.0m(26.75@4)	23.5mm	第2径間G2桁	1987年
C橋	1975年	単純鋼合成鉄桁＋ 単純PCボーステンション方式 T桁×31連	その他 (駐車場・海岸 保全施設)	5～50m 程度	991.6m(44.75+22.8+ 30.8@29+30.85)	ウェブ 27.0mm 下フランジ 35.0mm	第4径間G5桁	2007年
							第8径間G2桁	2007年
							第8径間G5桁	2007年

される。本章では、2章にて抽出した3橋5箇所（A橋1箇所、B橋1箇所、C橋3箇所）を対象に、過年度の塩分量調査データを用いて、補修前後の塩化物イオン濃度の経年変化について整理・分析を行った（図-1）。なお、今回用いた塩分量調査データについては、実橋でのコア採取による構造物への影響を考慮しウェブから採取されている。

深さ方向の塩化物イオン濃度を確認した結果、表面被覆工の施工後に表面付近の塩化物イオン含有量は低下し、深部では増加する内部拡散の傾向が確認された。なお、鋼材腐食発生限界濃度について、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>の式では水セメント比が50%の場合、普通ポルトランドセメントで $1.9\text{kg/m}^3$ 、早強ポルトランドセメントで $1.5\text{kg/m}^3$ であり、調査5箇所の鋼材付近の塩化物イオン濃度はこれらの値を超過する結果となった。

このことより、表面被覆工法により外部からの塩化物イオン供給が抑制できたとしても、塩化物イオンの

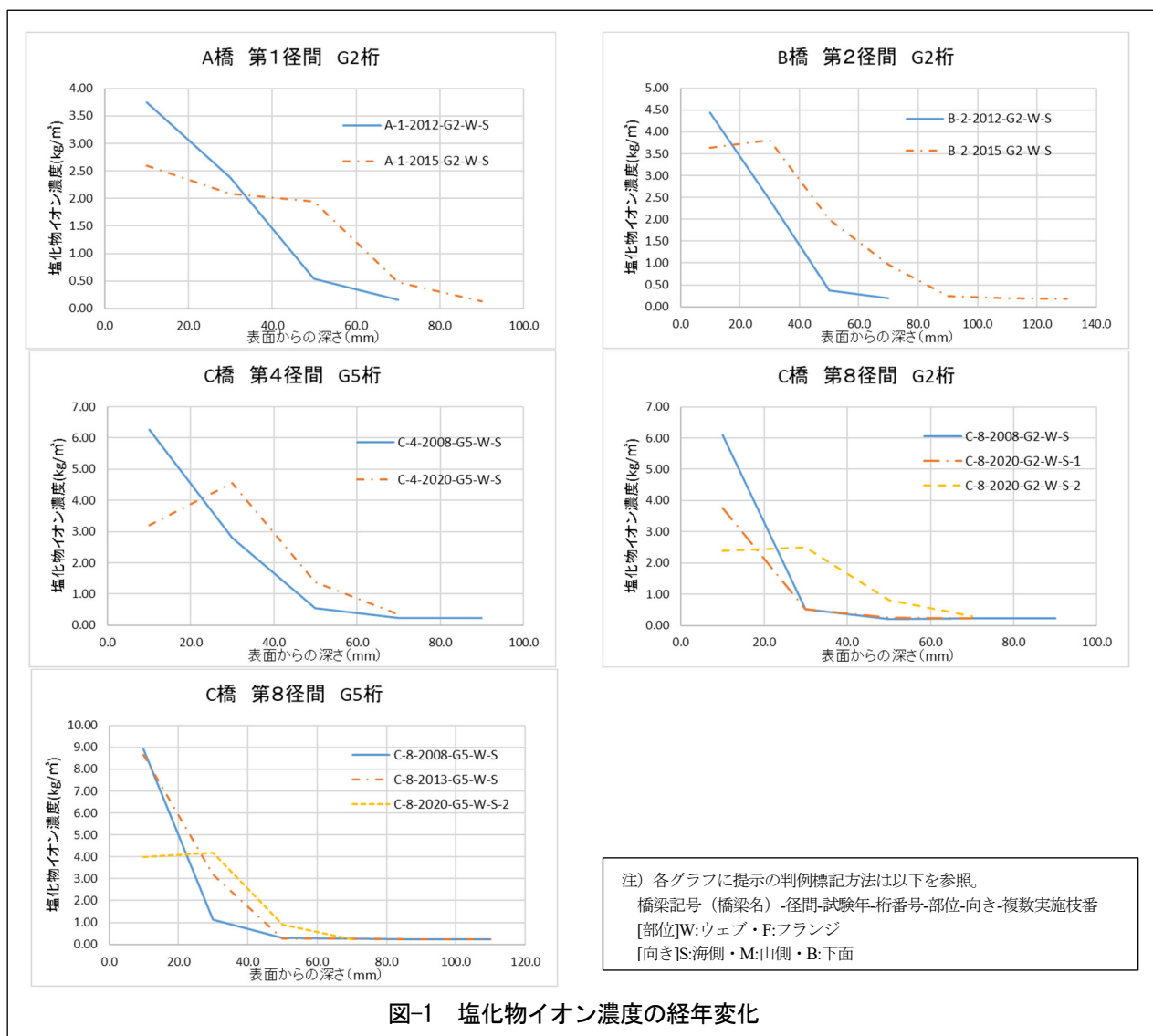
内部拡散が進行し、これにより表面付近の塩化物イオン濃度は低下するものの、深部では増加する現象が起こりうることを確認された。

## 4. 詳細調査

### 4.1 概要

3章にて、表面被覆工法施工後の橋梁において、鋼材付近の塩化物イオン濃度が内部拡散により上昇していることが確認された。本章では、表面被覆工法施工後に補修効果が発揮されない要因を詳細に把握するため、塩化物イオン濃度に加えて、内部拡散に影響を及ぼす中性化深さ、腐食リスクの程度に影響を及ぼす最小鉄筋かぶり、コンクリート内への塩分浸透度合い（水セメント比）に着眼し、詳細調査を実施し整理した。

上記の調査については、3章で整理・分析対象とした橋梁のうち、新橋への交通切り替えに伴い発生した



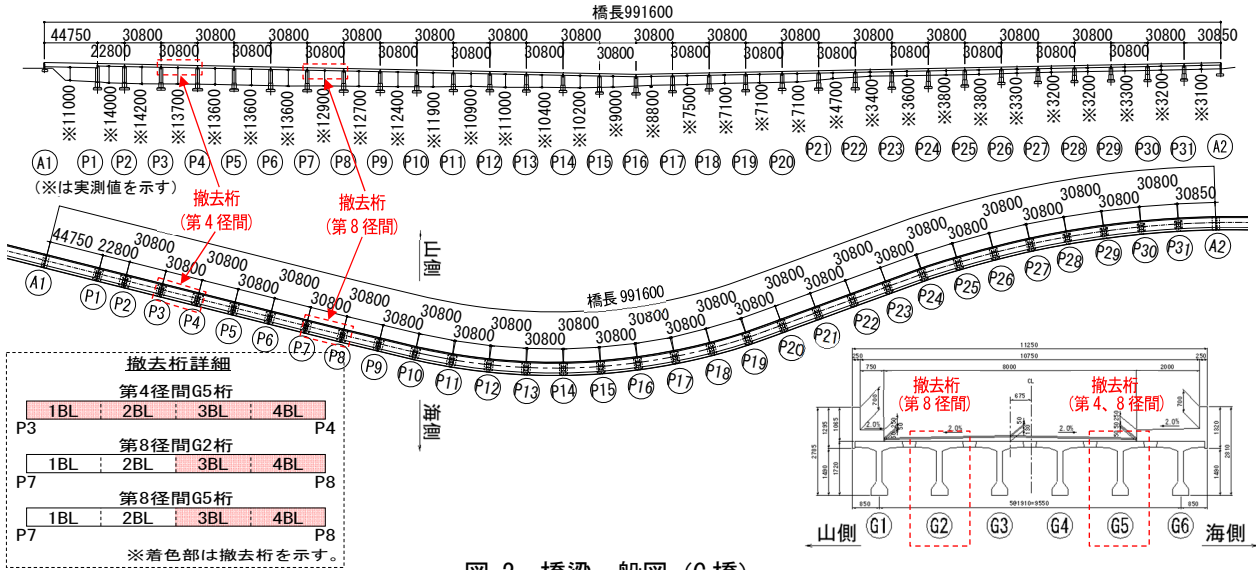


図-2 橋梁一般図 (C 橋)

撤去桁を受領できたC橋を対象とした (図-2)。なお、受領した撤去桁は第4径間G5桁、第8径間G2桁1/2支間、G5桁1/2支間であり、土木研究所まで運搬した後、調査を実施した (図-2、写真-1)。



写真-1 撤去桁 (土木研究所に運搬後の状況)

次に、主な詳細調査項目について、塩化物イオン濃度、中性化深さ、最小鉄筋かぶり、水セメント比 (配合推定調査) とし、それらの調査箇所 (調査部位) と箇所数について、表-2および図-3に示す。

表-2 詳細調査箇所 (調査部位) および箇所数

調査箇所 (調査部位)		調査箇所数
全調査箇所		24
内訳	フランジテーパ部	7
	フランジ鉛直部	12
	ウェブ	5

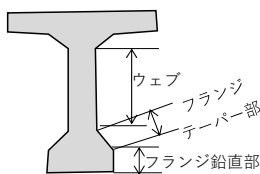


図-3 本研究における調査部位の定義

## 4. 2 調査結果

### 4.2.1 塩化物イオン濃度と中性化の関係

内部拡散に影響を及ぼす中性化と塩化物イオン濃度との関係を確認すべく、塩化物イオン濃度分布 (JIS A 1154に準じ実施)、全塩化物および可溶性塩化物イオン濃度との割合および、中性化深さ (JIS A 1152に準じ実施) と塩化物イオン濃度の関係を整理した。なお、可溶性塩化物イオン濃度について、中性化に伴う劣化事象のひとつである炭酸化によりフリーデル氏塩が  $\text{CaCl}_2$  を生成し、これが溶解して塩化物イオンを遊離<sup>3)</sup> することから、詳細調査の整理対象とした。

(1) 塩化物イオン濃度分布について、コンクリート表面からの深さ0~20mm (以下、0~20mm) より、コンクリート表面からの深さ20mm以深 (以下、20mm以深) における塩化物イオン濃度が大きい傾向が見受けられた (表-3)。また、0~20mmに比べて20mm以深における塩化物イオン濃度が大きい箇所が、調査箇所24箇所中13箇所確認された。このことより、少なくとも0~20mmより20mm以深における塩化物イオン濃度が大きい箇所では、塩化物イオンの内部拡散が発生している可能性が示唆される。

表-3 塩化物イオン濃度分布 (全塩化物イオン濃度、平均値)

調査箇所 (調査部位)	全塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )				
	0~20 mm	20~40 mm	40~60 mm	60~80 mm	
全調査箇所	4.99	5.26	1.92	0.55	
内訳	フランジテーパ部	6.16	6.91	2.47	0.66
	フランジ鉛直部	4.37	4.93	2.06	0.62
	ウェブ	4.84	3.77	0.80	0.26

(2)全塩化物イオン濃度に対する可溶性塩化物イオン濃度の割合は、調査箇所24箇所において、0~20mmにおいて74%~96%（平均値84%）であり、深さごとと比較すると最も大きな値であった（表-4）。

表-4 全塩化物イオン濃度に対する可溶性塩化物イオン濃度の割合（平均値）

調査箇所 (調査部位)	全塩化物イオン濃度に対する 可溶性塩化物イオン濃度の割合			
	0~ 20 mm	20~ 40 mm	40~ 60 mm	60~ 80 mm
全調査箇所	84%	75%	60%	45%
内訳	フランジテーパ部	87%	76%	69%
	フランジ鉛直部	83%	73%	59%
	ウェブ	83%	77%	50%

前出の表-3および表-4より、表面付近にて物理的または科学的に固定された塩分が溶液中に塩化物イオンとして溶解することで可溶性塩化物イオン濃度の割合が高くなり、溶解した塩化物イオンが内部に拡散することで、0~20mmより20mm以深における塩化物イオン濃度が大きくなったと推察される。参考として、今回の調査箇所のうち、内部拡散が発生したと推察される一例を図-4に示す。

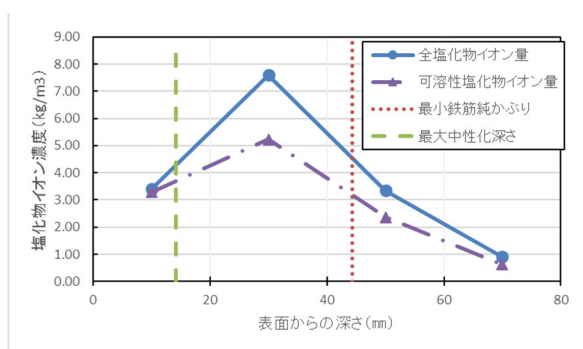


図-4 内部拡散が発生したと推察される一例

(3)中性化は1箇所を除き発生していることが確認された。調査箇所24箇所における最大中性化深さの平均は14.80mmであり、中性化深さは最小鉄筋かぶり位置に達していなかった（表-5）。

表-5 最大中性化深さと最小鉄筋純かぶり（平均値）

調査箇所 (調査部位)	最大中性化深さ (mm)	最小鉄筋純 かぶり※ (mm)
全調査箇所	14.80	37.85
内訳	フランジテーパ部	15.66
	フランジ鉛直部	13.47
	ウェブ	16.78

※：調査箇所ごとの純かぶりの最小値を指す。

このことから、今回の調査箇所では、中性化に伴う不動態被膜破壊による鋼材腐食の可能性は低いものの、中性化により炭酸化が生じ塩化物イオンの内部拡散が発生した可能性がある。

以上より、今回の調査箇所においては、中性化により炭酸化が生じ、塩化物イオンの内部拡散が発生した可能性があることから、表面被覆工法施工後においても中性化（炭酸化）による塩化物イオンの内部拡散が発生し鋼材が腐食するリスクがあることが確認された。

#### 4.2.2 塩化物イオン濃度と鋼材かぶりの関係

4.2.1にて、表面被覆工法施工後においても中性化（炭酸化）による内部拡散発生とそれに伴う鋼材腐食のリスクがあることを整理したが、鋼材のかぶりが小さい部位は塩化物イオンの内部拡散による腐食リスクが大きいことから、調査部位ごとの塩化物イオン濃度と最小鉄筋純かぶり深さとの関係を整理した。

整理の結果、フランジテーパ部においてはフランジ鉛直部やウェブに比べ相対的にかぶりが薄く、かつかぶり位置付近の塩化物イオン濃度が多い傾向が見受けられた。（表-6、図-5）

表-6 最小鉄筋純かぶり位置の全塩化物イオン濃度（平均値）

調査箇所 (調査部位)	最小鉄筋純かぶり位置 の全塩化物イオン濃度 (kg/m³)	最小鉄筋純 かぶり※ (mm)
全調査箇所	4.03	37.85
内訳	フランジテーパ部	6.91
	フランジ鉛直部	2.99
	ウェブ	2.49

※：調査箇所ごとの純かぶりの最小値を指す。

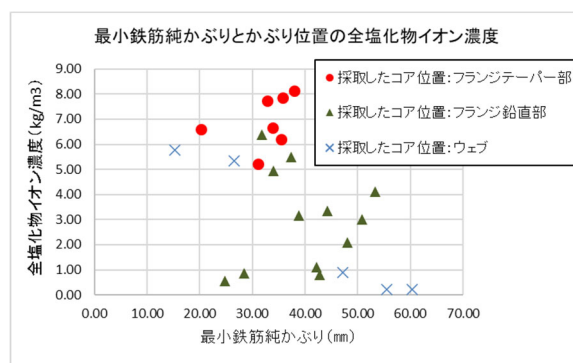


図-5 最小鉄筋かぶりとかぶり位置の全塩化物イオン濃度

以上より、今回の調査箇所においては、フランジテーパ部では鉄筋かぶりが相対的に薄く、そのために最小鉄筋かぶり位置の塩化物イオン濃度も高くなる傾向が見受けられたことより、フランジテーパ部のような鋼材かぶり不足が発生しやすい傾向がある部位で

は鋼材腐食のリスクがより大きいことが確認された。

#### 4.2.3 コンクリート内への塩分浸透度合い

コンクリート内への塩分浸透度合いが内部拡散を促進しているかを確認するため、配合推定試験<sup>4)</sup>にてコンクリートの水セメント比を推定し整理した。配合推定試験を実施するにあたり、骨材の材質を事前調査したが、粗骨材は流紋岩質溶結凝灰岩、砂岩、流紋岩、頁岩および安山岩などからなる砂利であり、また細骨材も粗骨材同様の岩石からなる砂と見られることから、粗骨材、細骨材ともに石灰岩は確認されなかった。

また、塩分浸透度合いを多方面から確認するため、表面吸水試験<sup>5)</sup>による表面吸水量(24時間後吸水量)を調査した。表面吸水試験による調査箇所については、試験用のコア径(φ100mm)が採取可能となるよう、配合推定試験の調査箇所のうちの一部(ウェブおよびフランジテーパー部)を調査箇所とした(表-7)。

表-7 表面吸水試験細調査箇所(調査部位)および箇所数

調査箇所(調査部位)		調査箇所数
全調査箇所		12
内訳	フランジテーパー部※	7
	ウェブ	5

※: 配合推定試験と同一部位で比較できない箇所(1箇所)を除いた箇所数。

(1) 配合推定試験による調査箇所24箇所の水セメント比は35%~45%(平均値: 39.2%)であり、調査部位による明確な違いは確認できなかった(表-8)。一方、ウェブ同士の比較では桁下からの距離が小さい調査箇所(下層部)では相対的に水セメント比が小さくなる結果となった(図-6)。なお、道路橋示方書<sup>6)</sup>では想定される水セメント比の目安として、工場で製作されるプレストレストコンクリート構造以外のプレストレストコンクリート構造では43%とされていることおよび、中間部および下層部では相対的に水セメント比が減少する傾向になるという既往研究<sup>7)</sup>とも同様の傾向が見受けられることから、配合推定試験結果は概ね妥当であると判断される。

表-8 水セメント比(平均値)

調査箇所(調査部位)	水セメント比	
全調査箇所	39.2%	
内訳	フランジテーパー部	39.9%
	フランジ鉛直部	38.7%
	ウェブ	39.6%

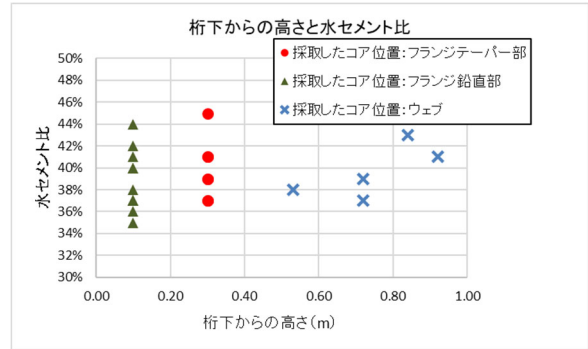


図-6 桁下からの高さ和水セメント比

(2) 調査箇所12箇所の表面吸水量は2.58g~16.68g(平均値: 7.00g)であり、部位ごとの平均値ではウェブのほうが大きな値となった(表-9)。一方、ウェブ同士の比較では桁下からの距離が小さい調査箇所(下層部)では相対的に表面吸水量が小さくなる結果となった(図-7)。

表-9 表面吸水量(平均値)

調査箇所(調査部位)	表面吸水量(g)	
全調査箇所	7.00	
内訳	フランジテーパー部	5.52
	ウェブ	9.07

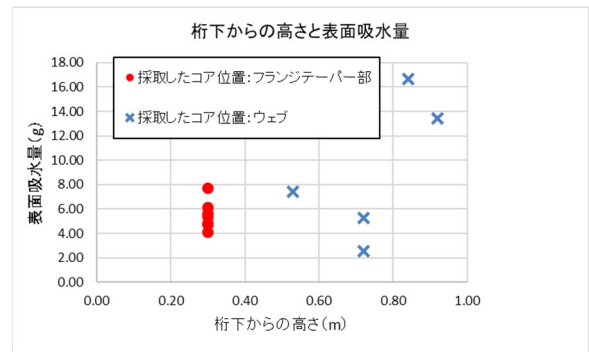


図-7 桁下からの高さと表面吸水量

(3) 配合推定試験による水セメント比と表面吸水量の関係について、水セメント比の大小は表面吸水量にある程度影響されていることが確認された(図-8)。このことより、配合推定試験結果は概ね妥当であると判断される。なお、採取したコア位置がウェブで、配合推定試験での水セメント比が40%未満の箇所は、桁下からの距離が構造図面上で50cmから70cm程度(フランジテーパー部を含む下フランジの高さは約40cm)であることから、フランジテーパー部と同様の傾向になったと推察される。

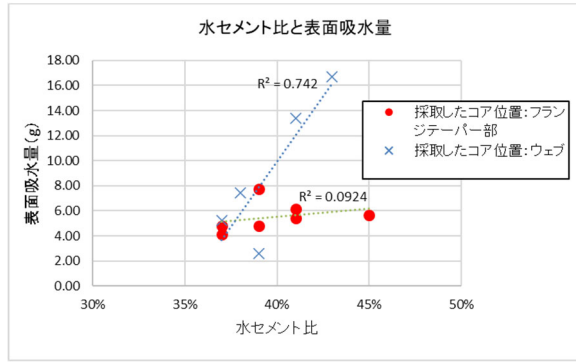


図-8 水セメント比と表面吸水量の関係

以上より、今回の調査箇所においては、配合推定試験により算出した水セメント比は道路橋示方書において想定している水セメント比の目安に近い値であったことから、コンクリートの品質（緻密性）の観点からはコンクリート内部に塩分が浸透しやすい状態ではないと言える。そのため、本橋において、コンクリート内への塩分浸透度合い（水セメント比）が内部拡散に影響している可能性は低いことが確認された。

5. 表面被覆工施工時の留意事項

本研究でのデータ整理・分析及び詳細調査の結果、予防保全等の観点で実施された表面被覆工法の施工後に補修効果が発揮されない要因として、施工後においても中性化（炭酸化）による塩化物イオンの内部拡散が発生することおよび、フランジテーパー部のような鉄筋等鋼材かぶり不足が発生し鋼材腐食するリスクがより大きい傾向である部位の存在が挙げられる。本研究における実橋での調査結果を踏まえ、品質・施工管理上の留意事項と留意事項を踏まえた調査・補修例を表-9の通り整理した。

表-9 品質・施工管理上の留意事項

品質・施工管理上の留意事項	留意事項を踏まえた調査・補修例
内部拡散による塩化物イオン濃度上昇	(調査) 内在塩分量の事前調査 ・コア削孔、ドリル法など (補修) 内在塩分の事前除去 ・はつり取り、脱塩工法など
鋼材かぶり不足部位（フランジテーパー部など）	(調査) かぶり厚さの事前調査 ・電磁波レーダーなど (補修) 防錆機能の向上 ・防錆材の塗布、含浸など ・腐食反応の抑制 ・電気防食工法 など

品質・施工管理上の留意事項で挙げているリスクにより発生する塩害劣化を抑制できる調査・補修等を行うことで、補修効果を確実に発揮させることが期待される。

6. まとめ

本研究を通じ、確認および整理された事項を以下に示す。

- (1) 表面被覆工法で補修された既設PC桁を対象に、補修前後の塩化物イオン濃度分布について整理・分析を行ったところ、表面被覆工法により外部からの塩化物イオン供給が抑制できたとしても、内部では塩化物イオンの拡散は進行し、これにより表面の塩化物イオン含有量は低下するものの、深部では増加する現象が起りうるということが確認された。
- (2) 詳細調査を実施したところ、今回の調査箇所において以下の事項が確認された。
  - ①中性化により炭酸化が生じ、塩化物イオンの内部拡散が発生した可能性があることから、表面被覆工法施工後においても中性化（炭酸化）による塩化物イオンの内部拡散が発生し鋼材が腐食するリスクがあることが確認された。
  - ②フランジテーパー部では鉄筋かぶりが相対的に薄く、そのために最小鉄筋かぶり位置の塩化物イオン濃度も高くなる傾向が見受けられたことより、フランジテーパー部のような鋼材かぶり不足が発生しやすい傾向がある部位では鋼材腐食のリスクがより大きいことが確認された。
  - ③配合推定試験により算出した水セメント比は道路橋示方書に示される水セメント比の目安の範疇であったことから、コンクリートの品質（緻密性）の観点からはコンクリート内部に塩分が浸透しやすい状態ではなく、コンクリート内への塩分浸透度合い（水セメント比）が内部拡散に影響している可能性は低いことが確認された。
- (3) 詳細調査による表面被覆工法施工後に補修効果が発揮されない要因として、表面被覆工法施工後においても中性化（炭酸化）による塩化物イオンの内部拡散が発生することおよび、フランジテーパー部のような鋼材かぶり不足が発生し鋼材腐食するリスクがより大きな傾向である部位の存在が挙げられことを踏まえ、品質・施工管理上の留意事項と留意事項を踏まえた調査・補修例を整理した。品質・施工管理上の留意事項で挙げているリスクにより発生する塩害劣化を抑制できる調査・補修等を行うことで、補修効果を確実に発揮させることが期待される。

従来は、補修効果が発揮されない要因を意識しない

で表面被覆工法を施工した結果、劣化損傷が発生したと考えられるケースが散見されるが、実橋での調査を踏まえ整理した品質・施工管理上の留意事項を踏まえ調査・補修等の維持管理を行うことで、表面被覆工法による補修効果を確実に発揮させることができ、また補修効果を発揮させるための調査・補修技術の開発につながることを期待される。

## 謝辞

本研究は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究の一環として行われた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 塚崎翔太、山本将、杉江匡紀、石井智大：補修10年程度経過した既設PC橋の塗装工法に関する調査、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、Vol. 29、pp. 385-388、2020. 10
- 2) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、p. 156、2018. 3
- 3) たとえば、小林一輔、牛島栄：コンクリート構造物の維持管理、森北出版（株）、p. 46、2006. 12
- 4) セメント協会：コンクリート専門委員会報告：F1-F18合本版、pp. 353-411、1967. 12
- 5) 古賀裕久、渡辺博志、河野広隆、片平博：表面吸水試験を用いたコンクリート品質評価に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol. 35、No. 1、pp. 739-744、2013. 7
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、pp. 185-186、2017. 11
- 7) 神田衛、吉田八郎：コンクリート打込み後の部材断面における水セメント比の分布性状、セメント・コンクリート、No. 357、pp. 38-43、1976. 11



## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.3 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (3)

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：西崎到、新田弘之、古賀裕久  
佐々木巖、櫻庭浩樹、小沢拓弥

#### 【要旨】

本研究では、既設コンクリート橋の長寿命化に向けて、コンクリート橋の代表的な補修工法の一つである表面保護工法の設計方法を高度化し、補修の効果や信頼性を向上させることを目的としている。平成 28 年度の検討では、表面保護工法の塗布部位の違いによりコンクリート内部の含水状態が変化し、鉄筋腐食環境に影響を及ぼすことを明らかにした。補修においては水分をはじめとしたコンクリート内部の環境状態の制御が重要になることから平成 29 年度から実大断面を有する桁供試体による水分分布とその経時変化を実際に把握するための検討を行った。平成 30 年度から令和 3 年度は表面保護工法の塗布部位に関する腐食抑制効果の長期耐久性評価として、暴露 7 年後までの鋼材腐食状況や、実大桁における水分状態の年間変動を観測した。その結果、表面被覆や含浸材の種類と塗布範囲により水分状態が相違することを明らかにし、劣化機構に応じた適切な設計法の知見が得られた。また、材料選定のための評価法を検討し、表面被覆材と含浸材ともに適用できる評価指標を提案した。

キーワード：既設コンクリート橋、補修、表面保護工法、塗布部位、鉄筋腐食

#### 1. はじめに

表面保護工法は、表面被覆材や表面含浸材をコンクリート構造物の表面に塗布して遮蔽層を形成することにより、劣化因子の侵入を抑制する工法である。表面保護工法は、劣化因子が侵入する可能性がある全ての面に施工することが望ましいとされている<sup>1)</sup>。しかし、塩分を含んだ水の移流が避けられない部位や、ASR や凍害等の劣化機構により乾燥状態を維持したい部位等では、遮蔽型の表面保護工法の適用が好ましくない場合もあると推察される。既設構造物の場合は、施工が困難な部位もある。塗布される保護材料には様々なものがあるが、環境条件に応じた使い分けの考え方は確立されていない。

本研究では、表面保護工法の塗布部位の選定方法および塗布材料の使い分けの考え方を高度化させることで、表面保護工法の補修効果や信頼性を向上させることを目的としている。調査の視点として、まず鋼材の腐食環境をとりあげているが、水分状態の制御であり ASR や凍害などのコンクリート部の対策にも適用できる。

水分をはじめとしたコンクリート内部の環境状態を踏まえた補修設計を可能にするために、表面保護材を塗り分けた供試体<sup>2)</sup>の暴露 8 年後までの鋼材腐食状況調査、実大断面の桁供試体による観測、保護材料の評価試験法の検討を行った。

#### 2. 塗布部位の異なるコンクリート供試体による試験

##### 2.1 試験方法

##### 2.1.1 供試体

基材コンクリートの配合を表-1 に示す。初期の塩化物イオン量の影響を検討するために、全塩化物イオン量が  $0\text{kg/m}^3$ 、 $2.4\text{kg/m}^3$ 、 $6\text{kg/m}^3$  となるように、 $150\times 150\times 500\text{mm}$  でかぶり  $30\text{mm}$  の供試体を作製した。図-1 に供試体の概要図、表-2 に塗布部位を示す。供試体の名称は、例えば E3 のように、塗布材料と塗布部位の数で表した。塗布材料の記号は、基準無塗装を R、被覆材を E、含浸材(表-2 の記号 S,N,L)とし、材料記号の後に塗布部位の面数を表記した。なお、E3 と E4 の供試体は鉄筋軸方向の両側端面に表面被覆材を塗布し、その他の供試体は片側端面にのみ塗布した。表面被覆材料は表-3 に示す市販エポキシ樹脂系の塗装を、含浸材も市販の標準的な材料を規定の塗布量で用いた。

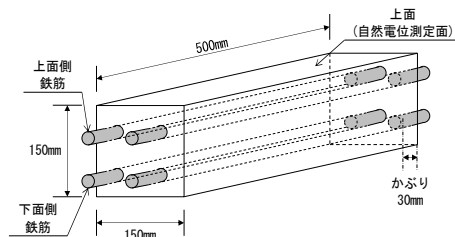


図-1 供試体の概要図

表-1 基材コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
55	160	299	858	968	4.19

初期塩化物イオン量 0kg/m<sup>3</sup>、2.4kg/m<sup>3</sup>、セメント 普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法 20mm、スランプ 8cm、空気量 4.5%

表-2 供試体の種類


名称	鉄筋軸方向の面における塗布面		概要図
	表面被覆材	表面含浸材	
R	—	—	
E2	2面 両側面	—	
E3	3面 両側面 および底面	—	
E4	4面	—	
S1E2	2面 両側面	底面にシラン系	
E1H2	両側面 (底面から 50mm) および底面	側面 (上端から 100mm) にシラン系 表面含浸材	
S3 or N3 or L3	—	両側面および底面 S: シラン系 N: 有機 Na 系 L: 有機 Li 系	

表-3 使用した表面被覆材料の仕様

構成材料の 名称	主成分	塗布量 (kg/m <sup>3</sup> )	目標膜厚 (μm)
プライマー	エポキシ樹脂	0.10	—
パテ	エポキシ樹脂	0.50	—
中塗り	エポキシ樹脂	0.20	110
上塗り	アクリルウレタン樹脂	0.12	30

### 2. 1. 2 促進劣化サイクル試験

促進劣化サイクル試験は、初期塩化物イオン量 0kg/m<sup>3</sup>の供試体を用いて実施した。試験には、環境温湿度の制御および塩水散布が可能な設備を用いた。試験条件は、3%NaCl 水溶液の散布を 0.5hr、40°C90%RH を 5.5hr、60°C30%RH を 6hr と設定し、1 サイクルを 12hr とした。促進劣化サイクル試験は、鉄筋の腐食によるひび割れの発生状況を考慮し、440 サイクルで終了した。

測定項目は、全塩化物イオン量、鉄筋の自然電位および腐食減量とした。全塩化物イオン量の分析は JCI-SC4 (硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法) に準拠して行った。供試体の上面中央部から直径 26mm のコンク

リートコアを乾式方法にて採取し、供試体の上面から板厚 2~3cm のスライス片に切断して測定試料とした。

鉄筋の自然電位は、照合電極に銀塩化銀電極を用いて、上面側、下面側 1 本ずつの計 2 本 (以下、上部鉄筋と下部鉄筋) を対象とし、供試体の上面から測定した。測定箇所は、供試体上面の鉄筋軸方向 (L=500mm) を約 83mm 間隔で等分した 5 点とした。自然電位の測定値は、照合電極の温度依存性を考慮して飽和硫酸銅 (CSE) 基準に換算し、hASTM の基準に従って腐食状態を判定した。鉄筋の腐食減量は、上部鉄筋と下部鉄筋の計 2 本を対象とし、JCI-SC1 に準じて行った。

### 2. 1. 3 屋外暴露試験

#### (1) つくばにおける試験

供試体内部の含水状態を確認することを目的として、飛来塩分の影響を受けない茨城県つくば市の屋外で暴露試験を行った。試験対象の供試体は、初期塩分量 0kg/m<sup>3</sup> の R、E3、E4 とした。

含水状態を確認するため、供試体の上面側および下面側の左右鉄筋間のコンクリート電気抵抗を測定した。測定には、ポテンショールガルバノスタットと FRA (周波数特性分析器) を用いた。測定は、交流インピーダンス法により、電圧 30mV、周波数 100kHz から 500mHz の交流波を印加して行い、得られた液抵抗成分を鉄筋間の電気抵抗 (以下、電気抵抗と称す) とした。屋外暴露は、暴露期間 161 日まで計 8 回電気抵抗を測定した。なお、屋外暴露開始直前まで、供試体は常温の室内に静置した。

#### (2) 沖縄大宜味における試験

飛来塩分の影響を受ける環境での供試体の腐食挙動を検討するために、沖縄県大宜味村の海岸に位置する暴露試験場で暴露試験を実施した。

大宜味での屋外暴露は初期塩分 2.4 および 6kg/m<sup>3</sup> の供試体を対象とし、暴露供試体の調査は原則として夏と冬の年 2 回、定期的に行われてきた。調査項目は、供試体の自然電位、電気抵抗、分極抵抗である。

自然電位の測定は促進劣化サイクル試験と同様に実施した。電気抵抗は、コンクリート中の水分状態の把握として、LCR メータを用いて、鋼材表面の腐食分極状態に影響されないよう周波数を 1kHz としてコンクリートのインピーダンスを測定した。

分極抵抗は、つくばでの電気抵抗の測定と同じ機器を用い、照合電極を銀塩化銀電極、対極を測定対象鉄筋以外のもう一方の上面側鉄筋と下面側鉄筋を短絡させて実施した。測定は交流インピーダンス法により行い、電圧 10mV、周波数 100kHz から 0.1mHz の交流波を印加した。測定

された見かけの分極抵抗測定値から鉄筋の腐食電流密度を算出した。

## 2. 2 試験結果および考察

### 2. 2. 1 促進劣化サイクル試験

鉄筋の自然電位と腐食減量の測定結果を図-2 に示す。上面側鉄筋の自然電位に着目すると、一般的な腐食判定基準によれば、Rは90%以上腐食ありの判定領域、E2とE3は不確定の判定領域であった。下面側鉄筋はRとE2は90%以上腐食ありの判定領域、E3は90%以上腐食なしの判定領域であった。また、腐食減量を測定した結果も同様の傾向が示され、上面側、下面側ともに腐食減量の小さいものからE3<E2<Rという順列となった。

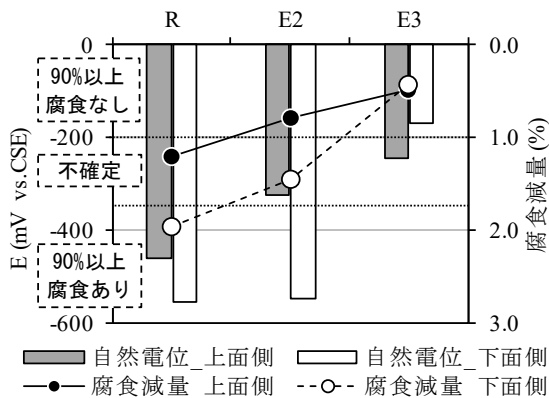


図-2 440 サイクル終了時の鉄筋自然電位

供試体の塩化物イオン量測定結果を図-3 に示す。図にはコンクリート標準示方書設計編 (2012 年) の普通ポルトランドセメントの腐食発生限界量算定式から求めた腐食発生限界量 (1.75kg/m<sup>3</sup>) も併せて示す。

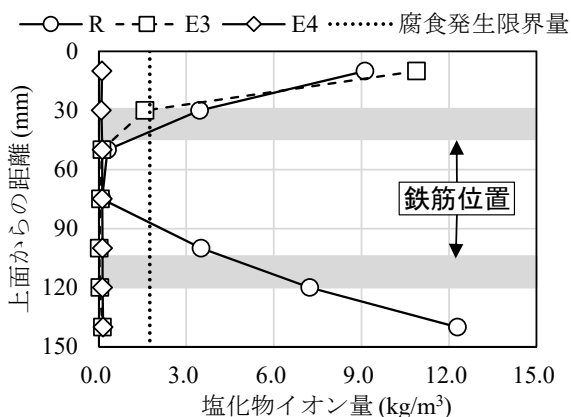


図-3 440 サイクル終了時の塩化物イオン量分布

E4は6面全面が被覆されているため、全ての範囲でほぼ0kg/m<sup>3</sup>であった。一方、Rは供試体上面から40mmま

での範囲、および90mmから150mm(下面から60mm)までの範囲で腐食発生限界量を上回った。E3は上面から20mmまでの範囲は腐食発生限界量を上回ったが、20~40mmの範囲で1.6kg/m<sup>3</sup>となり、これ以外の範囲はほぼ0kg/m<sup>3</sup>であった。さらに、E3はRに比べて、上面付近(0~20mm)の範囲では塩化物イオン量が多かったものの、上面側鉄筋位置に相当する20~40mmの範囲ではRよりも少なかった。これらの結果は、自然電位測定の腐食判定結果と一致している。

以上の結果から、表面被覆材による塗布部位の違いが内部への塩分進入挙動に影響を与え、鉄筋位置に応じて腐食抑制効果に差異を生じることが確認された。

### 2. 2. 2 屋外暴露試験

#### (1) 飛来塩分の影響を受けない環境(つくば)での暴露

暴露に伴う鉄筋間の電気抵抗の変化を図-4 に示す。図中には平均湿度として測定日と測定日5日前までの日平均湿度の平均値、および日降水量を合わせて示す。屋外暴露による供試体内部の水分分布の変化を確認するため、暴露前に供試体を相対湿度20~40%の室内で静置し、含水率が低い状態から暴露を開始した。

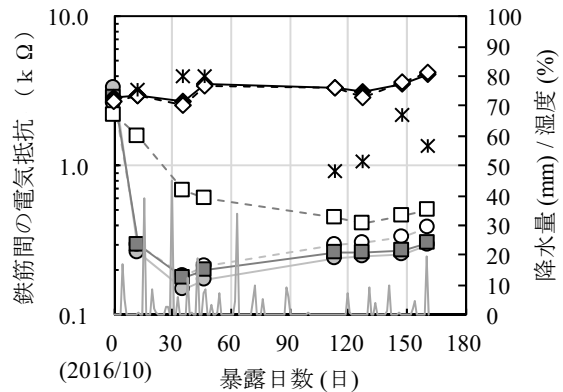
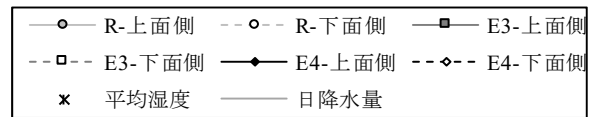


図-4 暴露に伴う鉄筋間の電気抵抗の変化

暴露開始直後から、RとE3は、電気抵抗が低下した。一方、E4はほぼ一定の値を示した。RとE3の電気抵抗の低下は、暴露開始時の湿度や降水の影響によるものと推察される。E4は露出部がないため水分の影響を受けにくく、他の供試体と比較して、電気抵抗は変化していない。RとE3はコンクリートの露出部があるため、大気中の水分の影響を受けてコンクリート内部の含水量が増加して、電気抵抗が小さくなっている。Rの上面側、下面側、およ

びE3の上面側は、およそ14日で電気抵抗の急激な低下が収束したが、E3の下面側はおよそ40日まで収束せず、その後も緩やかに低下した。また、暴露からおおよそ150日後の電気抵抗を比較すると、上面側についてはRとE3はほぼ同じ値を示したが、下面側では若干異なり、E3の方が抵抗は大きかった。

以上より、下面側の電気抵抗および暴露に伴う変化がRとE3で異なる結果であったため、塗膜で周囲を覆われているE3の下面側鉄筋付近の内部環境は異なることが示唆された。

**(2) 飛来塩分環境下 (沖縄大宜味) での暴露**

**1) 自然電位**

鋼材の腐食環境としての自然電位の測定結果を図-5~9に示す。まず表面保護材の塗布範囲に着目すると、塩化物イオンが6kg/m<sup>3</sup>入っている供試体群では、図-5に示すように上面側の鉄筋は暴露直後から腐食状態にある。これは、供試体上面が開放(素地)部であり、保護状態の影響をあまり受けない無被覆R(図中●)に近い環境であるためと考えられる。下面側の鉄筋では表面保護の影響がやや見られ、図-6において一部のシリコン系供試体では3年後までは腐食不確定であったが、4年目を以降はすべてが継続的に腐食状態にある。塩分が高濃度に浸透すると表面保護工では対策できないことが確認できる。

塩化物イオンが2.4kg/m<sup>3</sup>については、上面側の鉄筋では6kg/m<sup>3</sup>に類似し無被覆Rと似た結果で、図-7に示すように暴露後すぐに腐食不確定にあり、腐食ありの状態に近い値をとり暴露8年まで腐食傾向が続いた。表面保護がなければ腐食を生じる塩分と暴露環境にある。

表面被覆材の塗布範囲の影響を受ける下面側鉄筋をみると、図-8に示すようにE3(▲)下面側鉄筋は90%以上腐食なしか腐食不確定の判定領域で推移し、RおよびE2(■)では、数年間不確定ののち腐食ありに移行した。この相違は、側面と底面が被覆されているE3では、下面側鉄筋での含水状態が高く維持されるなど酸素が供給されにくい状況にあったと考えられ、腐食をある程度抑制できる環境となるとみられる。それ以外の条件では、塩化物、水、酸素の供給が十分で、被覆による効果が得られなかったことがわかる。

含浸材の影響は、シリコン系含浸材では図-9の破線で示すように90%以上腐食なしが数年続いたのちに不確定の判定領域付近にやや低下したが、暴露8年まで同様な傾向を示し、適用条件によっては乾燥状態の維持等による腐食抑制に寄与しうることがわかる。

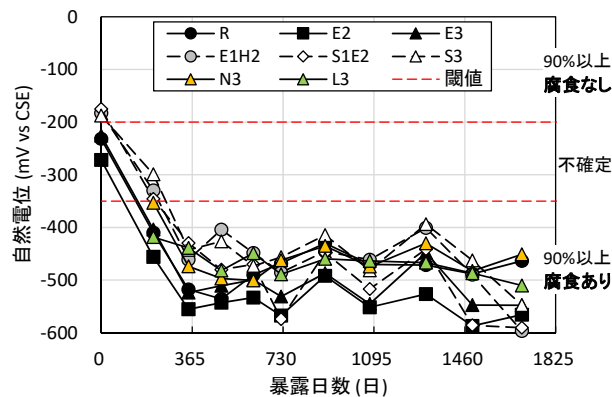


図-5 塩化物6kg/m<sup>3</sup>上側鉄筋の自然電位変化

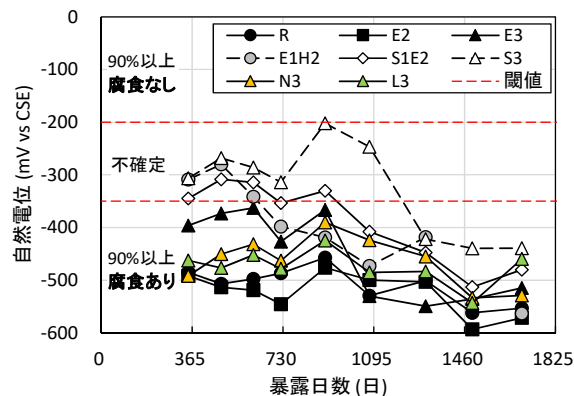


図-6 塩化物6kg/m<sup>3</sup>下側鉄筋の自然電位変化

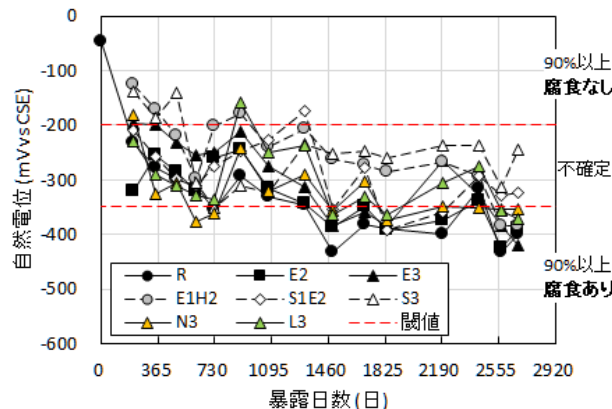


図-7 塩化物2.4kg/m<sup>3</sup>上側鉄筋の自然電位変化

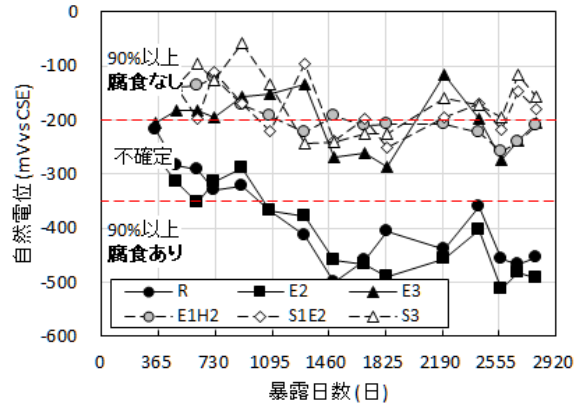


図-8 塩化物2.4kg/m<sup>3</sup>下側鉄筋の自然電位変化

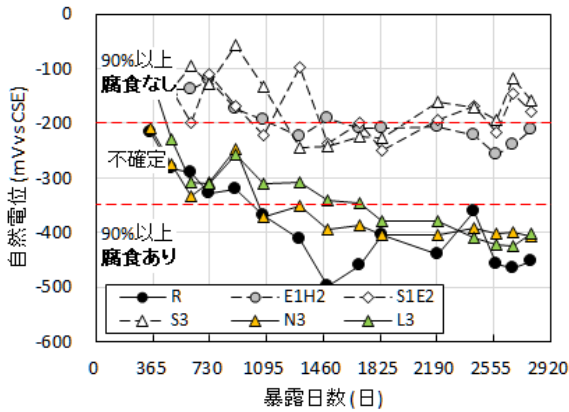


図-9 塩化物 2.4kg/m<sup>3</sup> 下側鉄筋の自然電位変化

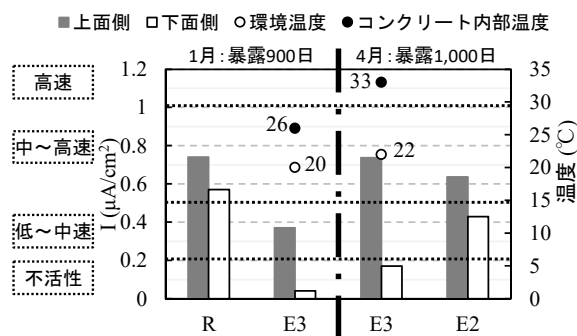


図-10 鉄筋の腐食電流密度の比較

けい酸塩系の表面含浸材は、図-9 に示すように暴露開始後 1 年で腐食不確定になり、数年後には腐食ありに移行していることから、塩分存在下での対策に用いるのは困難であることが示唆される。

## 2) 腐食電流密度

鉄筋の腐食速度として、分極抵抗測定より算出した腐食電流密度の結果を図-10 に示す。また、腐食電流密度から判定される一般的な腐食速度の基準を併せて示す。腐食電流密度の測定は、暴露 2.5～3 年時点での 1 月と 4 月に実施した。900 日後に測定した R と E3 の腐食電流密度を比較すると、上面側、下面側鉄筋ともに R の方が大きく、特に下面側で違いが顕著であった。次に 1000 日後に測定した E3 と E2 とを比較すると、上面側鉄筋はほぼ同じであったが、下面側鉄筋に違いが見られ、E2 の方が大きかった。また、両測定日に共通して測定した E3 の結果から、900 日後に比べて、1000 日後の方が腐食電流密度は大きいことが分かる。これは、図中に標記した環境温度とコンクリート内部温度 (R 供試体中央部の温度) から、測定時の温度が高いほど腐食速度は大きくなることも影響している。

これらを踏まえ被覆範囲の影響をみると、供試体の上面

が無処理であることもあり、下面側鉄筋にて腐食電流密度の差が顕著に表れており、腐食の小さいものから順に、E3 < R ≒ E2 と考えることができる。暴露数年後の腐食速度測定でみられたこの順列は、自然電位の測定結果とも一致しており、5 年暴露後の自然電位の状態はその腐食速度の相違の結果として生じていることが調査結果から確かめられた。

表面含浸材の効果については、シラン系含浸材は、塗布範囲を底面および側面とした被覆材 E3 と同等以上の腐食抑制効果がみられている。一方、けい酸塩系の含浸材は、塩害に対する有効な腐食抑制効果が得られるとはいえない結果となっている。

## 3) コンクリート中の水分量 (電気抵抗)

腐食抑制効果が異なる要因解明として、コンクリート中の水分量に着目し、暴露中の変化を調査した。含水率と関連性の高い鉄筋間の電気抵抗 (交流インピーダンス) の変化を図-11 に示す。コンクリート中の水分量は次章でも検討するが、本試験での挙動においては、温度、水分量、塩分量の変化を表すものと考えられる。ここで、塩分量は長期的に変化してゆくもの他因子に比べるとその変化割合は小さく、測定値の相対変化は主に温度と水分量の影響を受けていると考えられる。

まず初期塩分 6kg/m<sup>3</sup> 供試体をみると、測定時期や供試体の種類に関わらず測定結果に大きな変化はみられない。とくに上部鉄筋間では、塩分量が多く水分を保持しやすいうえ表面が素地のままであるため、含水状態の変化が比較的少ないものと推測される。一方、底面がシラン系含浸された供試体 S1E2, S3 (破線) の下部鉄筋では、暴露初期は未測定ではあるものの数年後までは比較的抵抗値が大きく、すなわち乾燥した状態を保持でき、その後無処理や被覆供試体と同様な環境になったことがうかがえる。これは、図-6 の結果とも符合しており、高濃度塩分での腐食抑制挙動の要因を説明できる結果である。

初期塩分 2.4kg/m<sup>3</sup> では、シラン系含浸材の範囲近傍、E1H2, S1E2, S3 (破線) での鉄筋間電気抵抗が大きいことがわかる。温度未補正で夏季より冬季のほうが大きな抵抗値を示すが、シラン系含浸材では、暴露期間が長くなると徐々に乾燥側に变化してゆくことがわかった。2.4kg/m<sup>3</sup> であれば暴露により内部が徐々に乾燥状態に変化してゆき、これが前述の結果で鉄筋腐食を抑制できている要因であるとみられる。上面以外を被覆した E3 (▲) の下部でも、無処理供試体 R (●) に比べると高抵抗を示している。一方、側面のみを被覆した E2 (■) とけい酸塩系含浸材 N3 (▲), L3 (▲) は、いずれも R と大きく相違しない

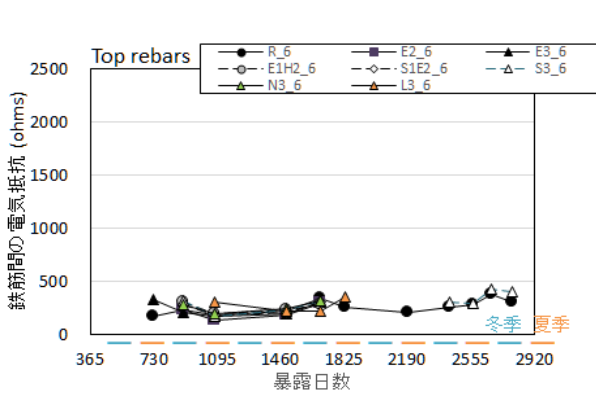
変化を示した。自然電位等の結果において塩害に対する有効な腐食抑制効果が得られなかった要因は、水分状態が高い状態が続いているためとみられ、電位による腐食環境の評価結果を裏付けるものである。

4) 塩化物イオン量分布、中性化深さ、鉄筋腐食面積率

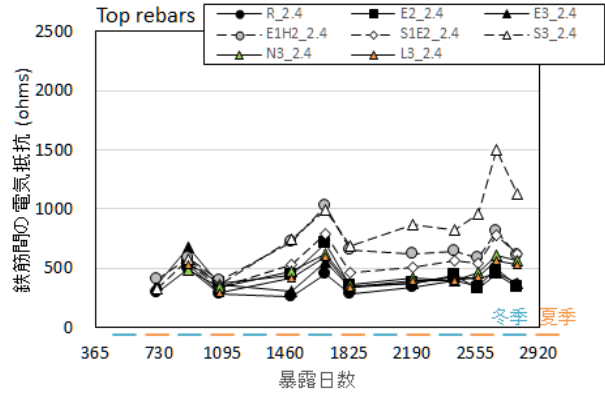
沖縄での屋外暴露 5 年後に解体調査を行い、供試体中央部での塩化物イオン量分布、中性化深さ、鉄筋腐食面積

率を測定した結果を図-12 に示す。

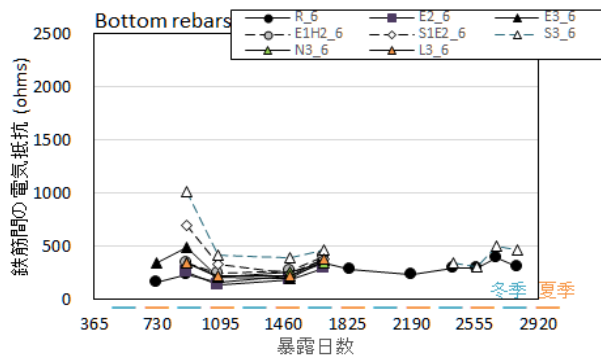
中性化深さは、上面は全て無処理素地面のため顕著な差はみられなかった。底面は、E3,E1H2 は被覆材が塗布されており 0mm であるが、けい酸塩系含浸塗布面では無処理と同程度かやや大きく、シラン系含浸材では明らかに中性化が進行していた。これは、乾燥状態が維持され二酸化炭素の拡散が多かったためであると考えられる。



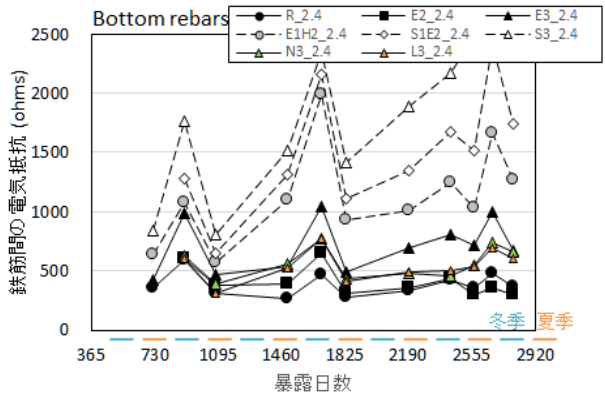
a) 上側鉄筋間:初期塩化物 6kg/m<sup>3</sup> 供試体)



c) 上側鉄筋間:初期塩化物 2.4kg/m<sup>3</sup> 供試体)

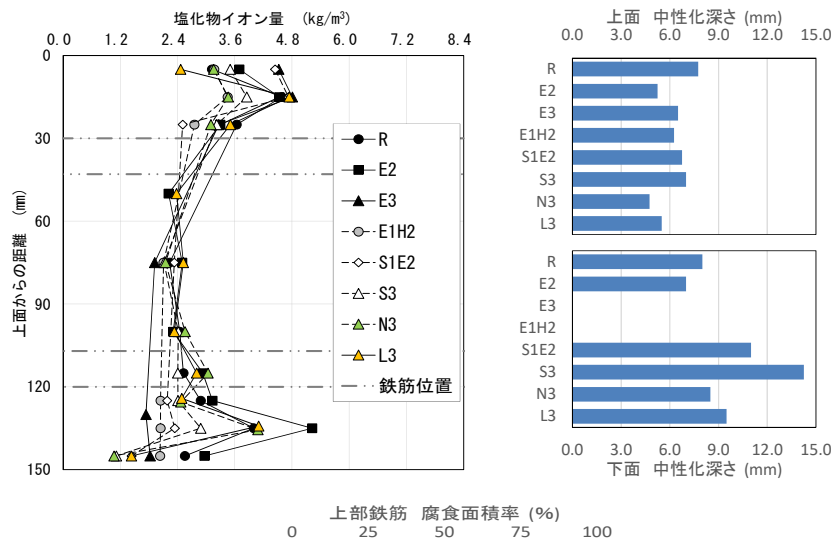


b) 下側鉄筋間:初期塩化物 6kg/m<sup>3</sup> 供試体)



d) 下側鉄筋間:初期塩化物 2.4kg/m<sup>3</sup> 供試体)

図-11 コンクリート中の水分量と関連付けられる鉄筋間の交流インピーダンスの変化 (暴露2~8年)



上部鉄筋 腐食面積率 (%)

塩化物イオン分布は、供試体中心部では初期混入量と概ね同程度の値を示し、E3, E1H2 の底面は被覆材が塗布されているため中性化しておらず、下側での塩化物イオン量分布は一定である。供試体上面と被覆部以外の下面では中性化フロントへの塩分濃縮がみられ最表面よりも次層がやや高いことがわかる。上面での塩化物分布は、側面の処理材等に起因する差が少しあるものの、顕著な相違とはいえない。一方、底面側には明確な差があり、これは前述の結果と符合するものであった。

鉄筋腐食面積率は、図-7, 8, 9 に示した自然電位の測定結果とよく対応しており、側面と底面を全て被覆した場合と、側面や底面にシラン系含浸材を用いた場合に腐食抑制効果が得られ、塩化物が内部にあるとけい酸塩系含浸材による補修効果は限定的であることがわかった。

### 3. 実大断面を有する供試体による内部環境の評価

鉄筋コンクリート供試体を用いた促進劣化サイクル試験および屋外暴露試験より、塗布部位によりコンクリート内部の環境が異なり、鉄筋の腐食抑制効果に影響を及ぼすことが確認された。この効果を実大規模で部材としての形状の中での挙動を検証するため、JIS A 5373 道路橋用橋げたを模擬した供試体 (T 形断面) を製作し、屋外暴露試験を開始した。供試体の概要と暴露後約 1 年間の評価法検討、ならびに 3.5 年間の長期観測結果を示す。

#### 3. 1 水分評価方法の検討

供試体の設置状況を図-13 に、コンクリートの配合を表-4 に示す。供試体は合計 4 体製作し、茨城県つくば市の屋外暴露場に平成 29 年 2 月に設置した。



図-13 実大断面を有する供試体の設置状況

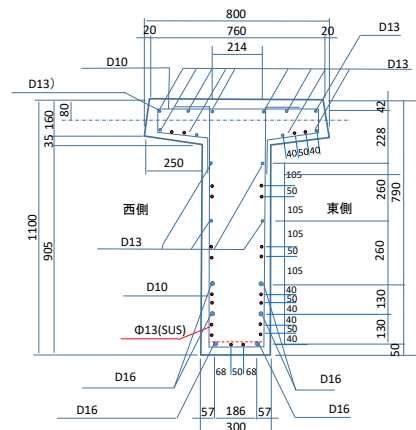
表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
40.5	181	447	668	991	4.02

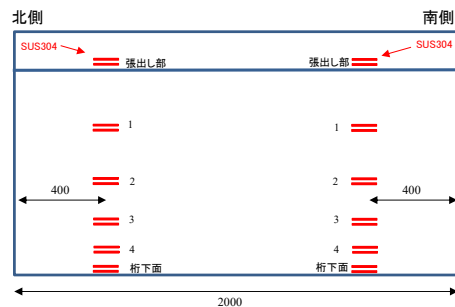
セメント：普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法 20mm、スランブ 13cm、空気量 3.7%

この桁供試体では、コンクリートの水分量により電気伝導性が変化することを利用し、電気抵抗を測定することに

より含水状態の分布を把握する。供試体の両端部から 400mm の位置に、直径 13mm、長さ 100mm のステンレス鋼材 (SUS304) を、2 本 1 組で鉄筋等と電氣的に絶縁して 11 箇所 (22 本) ずつ、図-14 のように各供試体の北側と南側にコンクリート打設時に埋設した。交流インピーダンス (電気抵抗) は、周波数を 1kHz に設定した LCR メータを用いて測定した。また、電気抵抗の測定結果との比較のため、コンクリート表層の水分量の測定に一般に使用されている、高周波容量式水分計による測定も行った。この水分計は、コンクリート表面に電極を押し当て、表層数 cm の領域における高周波容量 (キャパシタンス) から水分量を推定するものである。



(a) 断面図



(b) 側面図

図-14 ステンレス鋼材埋設位置 (寸法 : mm)

#### 3. 2 電気伝導性による水分量の評価

供試体の北側に配置したステンレス鋼材間の電気伝導率の測定結果の一例を図-15 に示す。図より、張出部の電気伝導率が大きい傾向にあることがわかる。コンクリート中の水分が多いほど電気伝導率は大きくなると考えられることから、張出部は比較的高い含水状態にあるものとみられる。また、測定日によって、電気伝導率の分布が異なることが確認される。

ステンレス鋼材間の電気伝導率の経時変化を、気象庁

つくば館野における降水量と併せて図-16に示す。図より、ある程度降水が続くと数日間は電気伝導率が高くなる。これは供試体内部の含水状態が高くなるためと推察される。電気伝導率の序列は、張出部>ウェブ>桁下面であり、測定期間内でその傾向は変わらないことが確認された。

次に、高周波容量式水分計による水分量の経時変化を図-17に示す。測定期間では徐々に水分量が低下していく傾向にある。水分量の序列は、電気伝導率の測定結果のように明確ではない。測定対象深さも異なるため、電気伝導率のみで含水状態の分布や経時変化の傾向を把握することは困難と考えられる。温度をはじめとした他の影響因子により電気伝導率を補正して水分量の評価を行う必要があることがわかった。

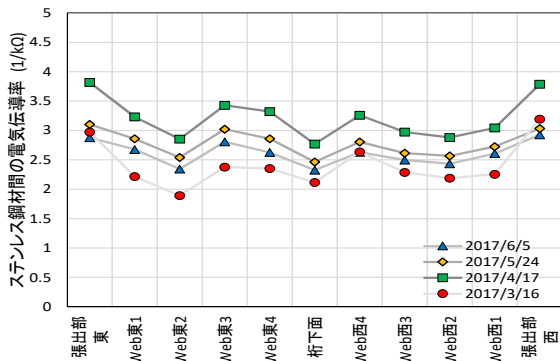


図-15 ステンレス鋼材間の電気伝導率の分布

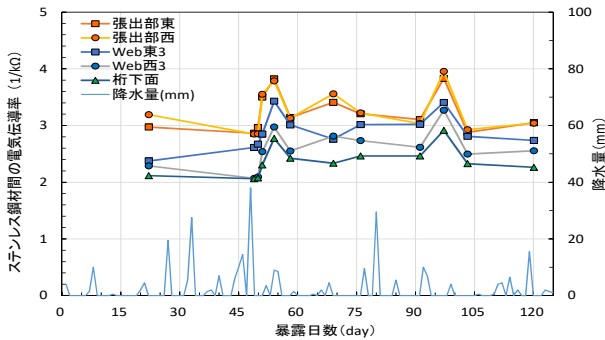


図-16 ステンレス鋼材間の電気伝導率と降水量

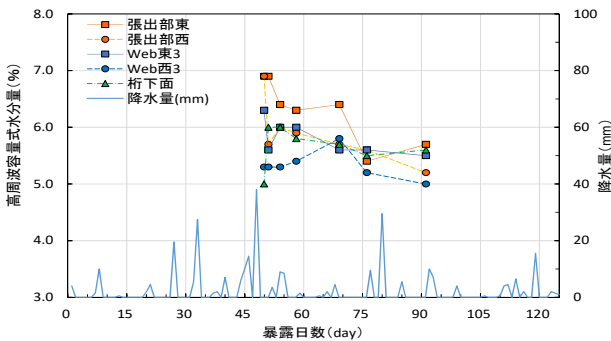


図-17 高周波容量式水分計による水分量と降水量

電気伝導率により水分量の動態観測を行うために、交流インピーダンスの測定値の自動観測に移行した。交流インピーダンスZ値は、細孔構造、塩分、温度、水分等の様々な要因により変化しており、測定される値は、 $Z = f(W, T, Cl, \text{etc.})$  のような関数で示される変化を示すと考えられる。このため、温度（内部分布）の測定を行って、その結果から温度影響を除去することを試みた。

実大桁のSUS電極センサ対の各位置を中心に熱電対を埋設して同時測定し、その結果からコンクリート桁内の温度分布を推定してZ値を補正することとした。図-18に3.5年間の交流インピーダンスと温度の関係を示す。温度変化により電気抵抗率は大きく変化するものの一定の相関が見られ、電気抵抗率Z値は指数関数で近似される関係を呈し、乾燥時には高抵抗値の側に、湿潤飽水時に最低値をとって下側包絡線を形成すると考えられる。ここでプロットが3本に分かれているのは、長期観測期間中に内部の乾燥化（後述）が進み高抵抗値を示すようになり、特に冬季において前年よりも高めに推移したためである。

温度補正は、電解質がボルツマン分布に従うとした場合にアレニウス則により補正でき<sup>3)</sup>、絶対温度の逆数を指数関数で基準温度(今回は23°C)に換算した。3.5年間の測定結果からもわかるように、個々の測定結果は近似線に沿って基準温度に補正され、これを電極位置とその経時変化として整理すれば、実大断面コンクリート桁内の含水率分布とその経時変化を把握できることとなる。

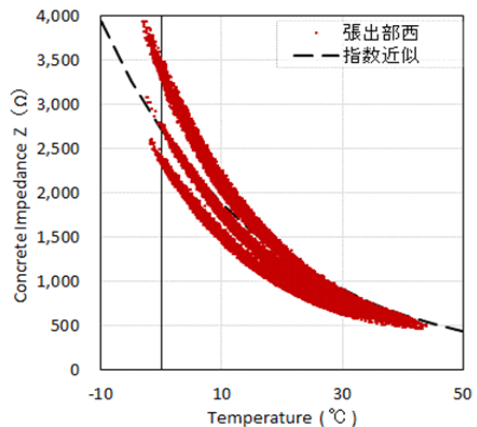


図-18 交流インピーダンスの温度依存性

### 3.3 水分量変化の観測結果

1kHzでの交流インピーダンスを多チャンネルで測定



記録できるデータロガーを用いて、平成29年度後半から長期観測を開始した。平成30年3月に床版防水と橋面舗装を施工し、平成30年9月に表面保護材を塗布した。その後、平成30年度前半までは天端に防水工を施したことによりコンクリートが乾燥側に变化し電気抵抗が増加傾向を示していた。基準温度を23℃として交流インピーダンス値を補正した変化として、電気抵抗値による水分量変化の測定、および表面保護塗布から3.5年間

の観測結果の例を図-19に示す。温度補正後のZ値が水分量変化を示すとすると、含水状態は同一箇所でも時間とともに変化している。図中の期間では無処理(素地)桁の結果は、内部の水分状況は比較的安定しているが徐々に乾燥が進行し、当初5%程度であったが数年間で4%程度まで低下した。季節的な変動としては、春から夏にかけて湿潤化が進み冬季に乾燥する傾向がある。部位に着目すると、張出部ではその季節変動が強いほか、降雨が

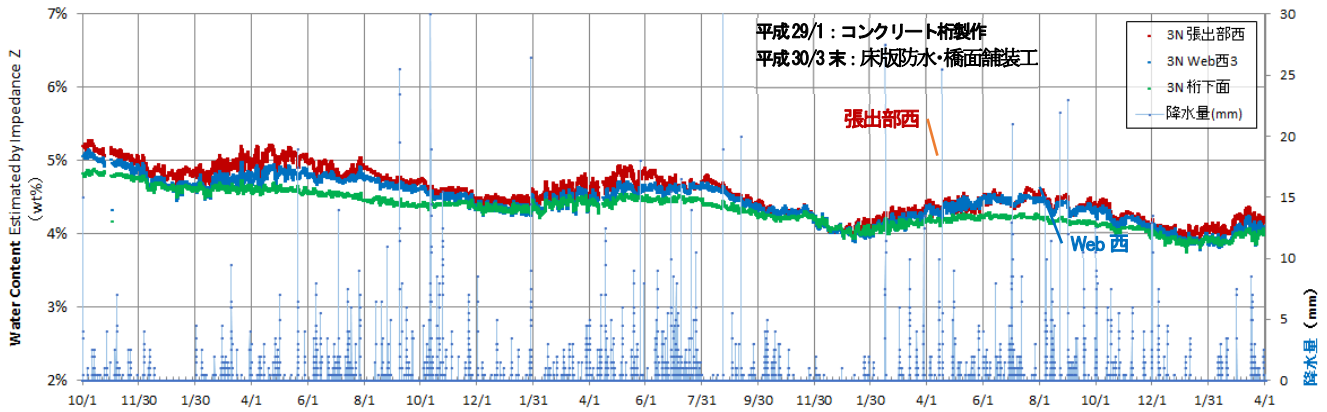


図-19 無処理(素地)桁の温度補正後電気抵抗率(含水状態)の観測結果 [平成30/10~令和4/3]

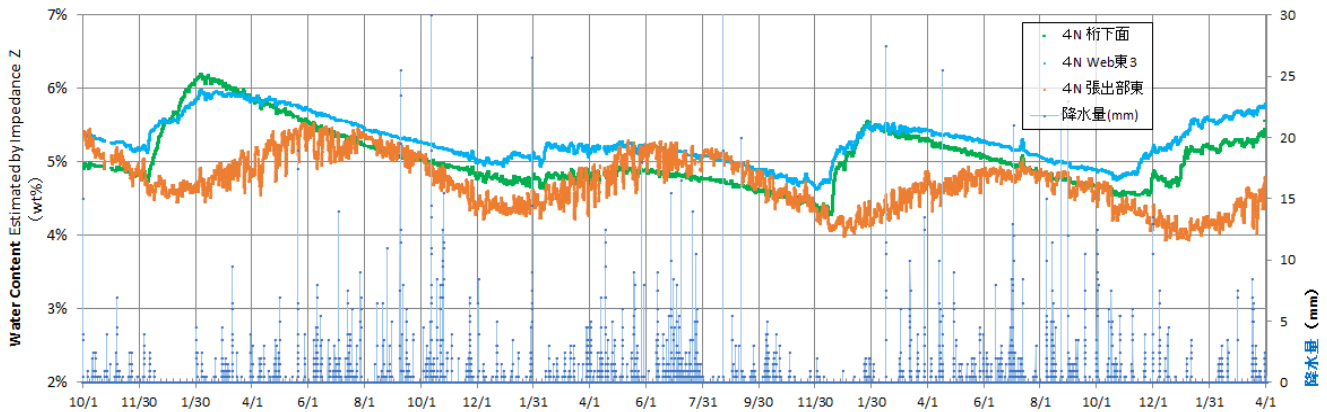


図-20 有機系被覆桁の温度補正後電気抵抗率(含水状態)の観測結果 [平成30/10~令和4/3]

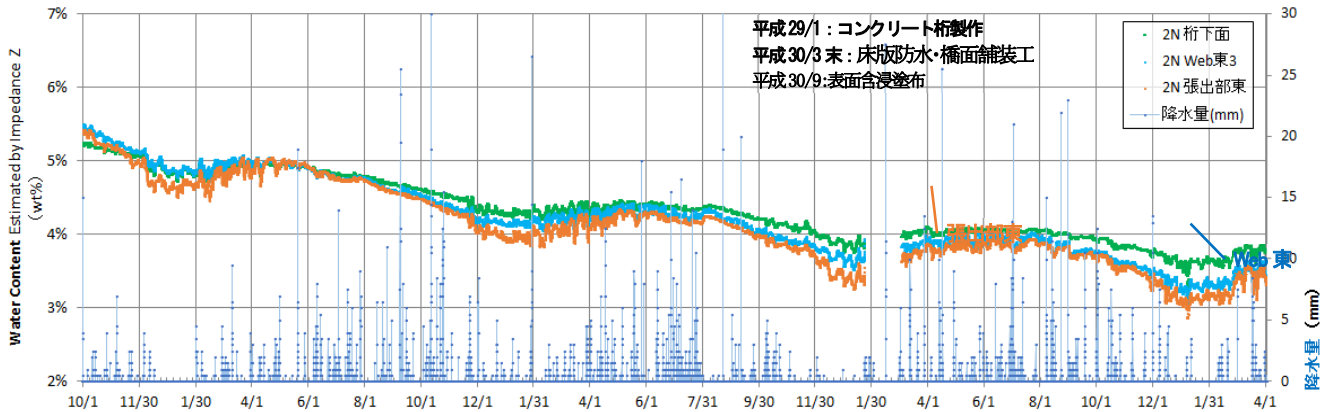


図-21 シラン含浸桁の温度補正後電気抵抗率(含水状態)の観測結果 [平成30/10~令和4/3]

あるとその後一定時間は湿潤傾向を示すなど短期的な変動幅が他の部位より大きく、少雨期(たとえば12~2月)は乾燥側に変化するなど気象作用の影響が強いことがわかる。

表面保護工によるコンクリート内部の環境制御の検討として長期観測を続けた調査結果から、有機系被覆を施工した場合の例を図-20に示す。無処理(素地)桁では部位間ではほぼ変わらない、あるいは桁下面が少し乾燥側になっていたが、有機系被覆ではほとんどの期間で張出部よりも桁の下方が高含水状態で推移することがわかる。とくに、桁下面とウェブではほとんどの年で12月時点から急激な高含水傾向を示し、飽水状態に近い6%程度と推定される期間もあった。一方、張出桁下面では冬季の高含水化がみられず、含水状態の変動幅も大きい。その短期間の変動振幅は一連の観測結果の中で最も大きく、週単位で1%以上変化する時期もある。これは、周囲が盆状に封止されていること等から、浸透や蒸散が活発であるためであると考えられる。

シラン含浸を施工した場合の例を図-21に示す。平成30年9月のシラン含浸材塗布から、無処理(素地)桁よりも急激に乾燥化が進んでいることがわかる。これは、図-6や図-11の小型供試体での結果とも符合しており、シラン含浸材の適用によりコンクリート内を乾燥傾向に調節できることを示す結果である。実大桁では漏水や床板防水欠陥部も施しているが、この試験桁でもシラン含浸の内部乾燥効果を確認できた。測定箇所間に着目すると、降雨が少なく乾燥が続くと同程度に収束するが、降雨が続くと桁部位による相違がやや拡大し、その序列は、張出部>Web>桁下面の順に含水状態が低い傾向を示すことがわかった。

#### 4. 表面保護材料の評価試験法

表面保護工は対策目的の劣化機構に応じて決まる要求性能をもとに設計されるもので、たとえば塩害対策であれば、現場の塩害環境外力および保護対象のコンクリート状態に応じて遮塩性能を設計、すなわち材料を選定する必要がある。もし基材品質によって遮塩効果が異なるのであれば、その補修対策の効果を発揮できないことにもなる。ところが現状の品質体系は、施工対象コンクリートの品質に基づいて決められておらず、これが工法選定を困難にする一つの要因といえる。そこで、試験条件や基材品質が表面保護材料の試験結果に与える影響について検討を行った。

##### 4.1 試験概要

補修対象となるコンクリート(基材)の品質の影響を

めて評価するために、PC部材、RC部材、施工不備や劣化の生じたコンクリートを模擬し水セメント比を65%、50%、35%の3段階設定した。このモルタルに、有機系表面被覆材、ポリマーセメント系表面被覆材、シラン系含浸材、けい酸塩系含浸材を施工し性能評価試験を行った。

##### 4.2 遮塩性評価試験方法の検討

試験条件や基材品質による遮塩性への影響を評価した試験結果の例として、土研資料4343号II編付属資料E(濃度差拡散セル法)を参考に、塩水濃度および浸漬温度を変えて、イオンクロマトグラフにより無処理のモルタルに対する透過量の経時変化を測定した結果を図-22に示す。試験結果に与える影響は、温度の影響は小さく、塩分濃度(塩害環境)と基材品質(補修対象のコンクリート状態)により塩分浸透が大きく異なることがわかる。

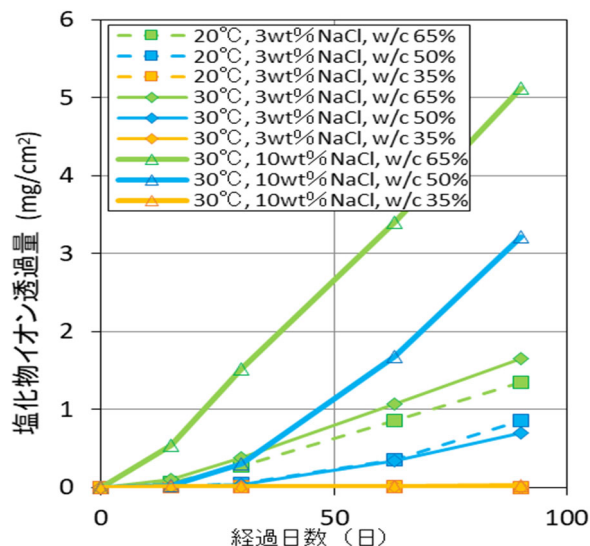


図-22 モルタル板を透過する塩分量への塩水濃度および温度の影響(拡散セル法)

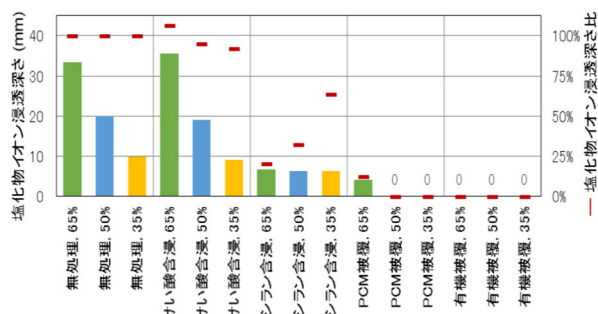


図-23 塩化物イオン浸透深さ(土研資料4186号法)

各種の表面保護材料について塩分浸透深さを測定した結果<sup>4)</sup>を図-23に示す。試験体表面に成形膜を有する表面

被覆では、内部への塩分浸透はほぼみられなかった。無処理の現状供試体の結果は、前述のように水セメント比すなわち基材品質の影響を強く受けており、けい酸含浸材でも同様の傾向がうかがえる。一方、シラン含浸では水セメント比の影響はほとんどみられず、浸透深さは同程度の値になっている。含浸改質層は薄いものの遮塩性を発揮していることがわかる。一方、品質の良い基材ほど含浸深さも小さく遮塩効果を得られないことになる。

表面含浸材の品質指標はW/C50%や55%基材に対する塩化物浸透深さ比として示されるが、その値が基材の品質に影響される。よって、補修設計においてコンクリートの品質を考慮しないと適切に塩害対策をできない。補修設計では、供用後の鋼材位置での塩化物濃度を予測し、それに必要となる塩化物上限流束を求め、現状コンクリートの品質にあわせて保護材を選定する必要があることがわかった。

表面保護材料や水セメント比の異なる供試体の塩分浸透である図-23の試験結果を、コンクリートの質量変化すなわち塩化物溶液の吸水率(吸塩水率)と塩化物イオン浸透深さの関係として示したのが図-24である。これには正比例の相関がみられ、吸水量が多いものほど塩化物が深く浸透するといえる。表面保護材を含めたモルタル基材の吸水率は、遮塩性の評価指標の一つになりうることを示唆する。既往の研究<sup>5)</sup>で、W/C55%のコンクリートと表面含浸材20種類で試験した結果でも明確な相関性が示されているが、表面被覆を含めた表面保護材料全般について、この関係が適用できることがわかった。

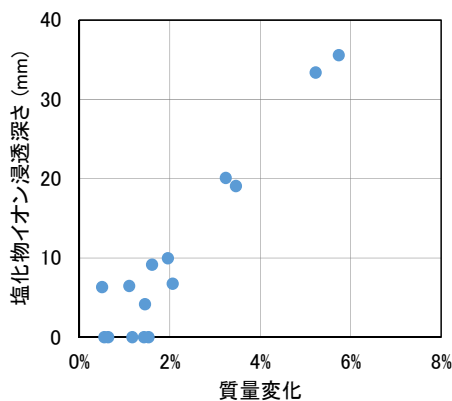


図-24 塩化物イオン浸透深さと質量変化(吸塩水率)

## 5. 施工性の良好なコンクリート含浸材技術

コンクリート構造物の長寿命化を目的として、コンクリート表面に塗布し含浸させることでコンクリート表層部に撥水性やアルカリ性等の特殊な機能を付与させ

る表面含浸材を適用するケースが増加しており、本研究でも代表的な製品について試験調査してきた。表面含浸材は、新技術情報提供システム (NETIS) 等でも多くの種類が提案されているが、コンクリートの品質や施工条件などで試験結果が異なるため、製造者が示す試験値が統一的に比較できず、どのような含浸材を選定すべきか明確でなかった。

これに対し、平成 27 年度より、中部地方整備局では、新技術情報提供システム (NETIS) のテーマ設定型 (技術公募) を活用することで、ある一定の品質を有し、かつ市場で標準的に使用されているシラン系含浸材を対象にした共通試験を実施している。土木研究所では、その共通試験計画の立案から技術的な面で協力している。

この共通試験では、現場で想定される施工条件を模擬できる試験体を用いて、技術公募した種々のシラン系表面含浸材を塗布することにより、施工性や塗布したことの効果等を同一条件で比較した。その試験体は、実環境下 (新潟県糸魚川市) で暴露試験を継続中であり、令和 3 年度には暴露開始から 5 年が経過していることから、土木研究所で 5 年目の追跡調査を行った。

### 5. 1 試験概要

#### (1) シラン系表面含浸材

シラン系表面含浸材は、表-5 に示す、塩化物イオン浸透抵抗性の基準値、もしくは、吸水抵抗性の基準値を満足するものである。対象技術は、11 製品である。

#### (2) 試験体

図-25 に、試験体の概要を示す。3 枚のコンクリート版 (高さ 1.8m、幅 2.0m、厚さ 15cm) がコの字状に組み立てられた試験体には、シラン系表面含浸材が頂版の上面と下面、側壁の山側と海側のそれぞれの面に塗布されている。試験体は、対象技術数を適用した 11 体と比較のため含浸

表-5 シラン系表面含浸材

確認項目	指標	基準値
塩化物イオン浸透抵抗性	塩化物イオン浸透抑制率	60%を超えるもの
吸水抵抗性	吸水率	0.3%以下

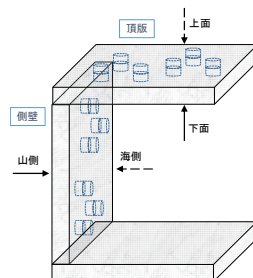


図-25 試験体の概要



図-26 暴露試験場の全景

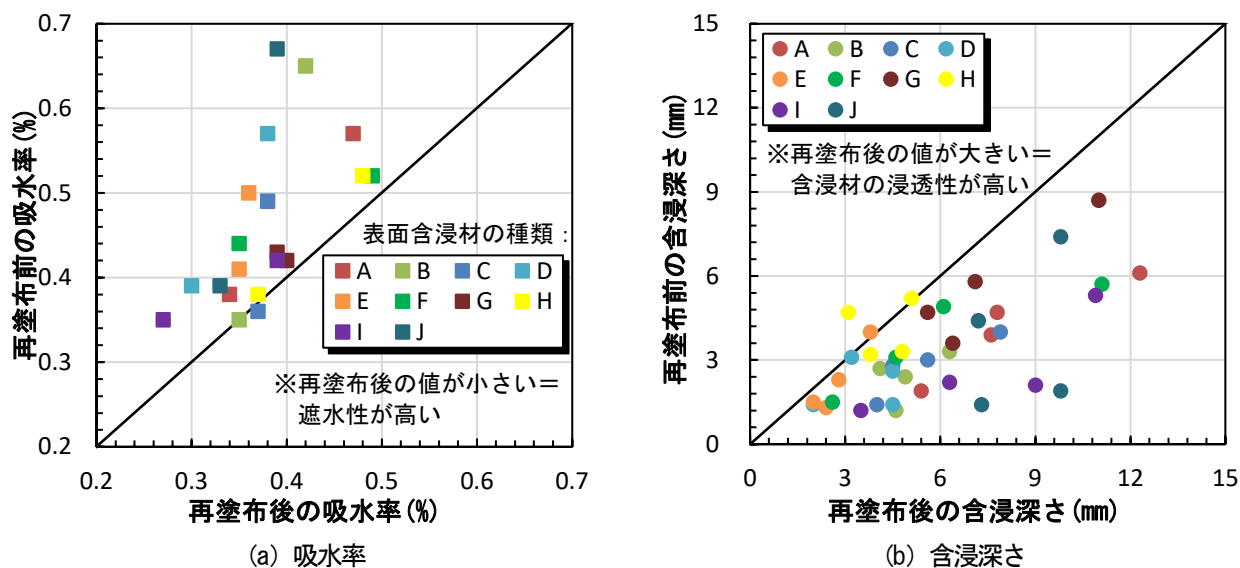


図-27 シラン系表面含浸材の再塗布による性能回復

剤を適用していない2体の合計13体がある。暴露試験場は、新潟県糸魚川市で、海からの飛来塩分の多量に供給される場所である。暴露試験の様子を図-26に示す。現地では、それぞれの試験体からコア（φ100×150mm）を採取し、そのコアを用いて室内試験を実施した。

## 5.2 追跡調査結果

対象の11技術を適用した試験体における含浸深さ、吸水率、透湿比、塩化物イオン量、中性化深さの合計5項目について、試験を行ってその結果を整理した。例えば、次の知見が得られた。

シラン系表面含浸材が塗布されているものの、何らかの理由で十分な塗布量がなかったり、供用中に効果が低下したりした場合は、塗布により性能回復を図ることが考えられる。図-27に示すように、シラン系表面含浸材の再塗布を模擬した試験箇所では、吸水率の回復に有効であり、含浸材の浸透深さも大きくなることが確認された。

製品によって塗布量や施工手順が異なるため、施工時間や施工費用等の施工性に違いがあった。しかし、追跡調査の結果、施工性の良さと劣化因子の遮断性能や水分の制御に対応する性能が比例しなかった。したがって、施工性と、劣化因子の遮断性能や水分の制御について要求される性能は独立して評価する必要がある。なお、調査結果は、今後、新技術情報提供システム（NETIS）にて紹介される予定である。

## 6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 鉄筋コンクリート供試体を用いた促進劣化サイクル

試験および屋外暴露試験の結果から、表面保護工の塗布部位が異なることによって、コンクリート内部の環境が変化し、鉄筋の腐食環境に影響を及ぼすことを確認した。鉄筋の腐食抑制効果は、上面から水分や塩分が侵入する本試験では、下面側の鉄筋から表面保護による腐食抑制効果がわかり、被覆範囲や含浸材の種類による影響を把握できた。

(2) 塩害環境にある沖縄で8年間の暴露試験を行い、鉄筋電位、コンクリートの電気抵抗（水分量）、塩化物イオン分布を測定したところ、表面被覆や含浸材の種類と塗布範囲による水分状態の相違によるとみられる腐食抑制効果への影響を把握できた。

(3) 塗布部位および塗布材料の効果については、底面も封止する表面被覆を行った場合とシラン系含浸材を用いた場合において、腐食抑制効果が認められた。その他の塗布条件では水分状態が大きく変化しないため、塩分浸透状態での長期耐久性は期待できないことがわかった。

(4) 実大T形断面を有する桁供試体を用いた測定から、電気抵抗値から含水状態の変化を動態把握する手法を開発した。含水率は季節的に変化すること、張出部の含水状態が変化しやすい傾向が確認された。表面保護材による内部水分環境の特徴として、有機系表面被覆ではとくに桁の下方で高含水状態になること、シラン系含浸では内部の乾燥が進むことがわかった。

(5) 塩化物イオンに関する評価試験法の検討から、表面含浸材は、遮塩性の要求性能と現状コンクリートの品質に応じて選定する必要があることを示した。そして、品質指標として吸水率を用いて、表面被覆材と表面含浸材

を横断的に比較して比較評価することを提案した。

(6) 表面含浸材 11 製品による 5 年間の暴露調査の結果、施工性と性能は必ずしも比例しなかったことから、劣化因子の遮断性能や水分の制御について要求される性能は独立して評価する必要があることがわかった。

これらの研究成果をうけて、表面保護材料によるコンクリートの含水状態制御、遮塩性の性能評価方法、表面含浸材の追跡調査の結果から得られたシラン系含浸材に関する知見などを、土木研究所が作成している「コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル (案)」の改定案に反映した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針(案)、工種別マニュアル編、p.28,100,164、2005
- 2) 櫻庭浩樹, 熊谷慎祐, 加藤智丈, 佐々木徹, 西崎到：表面被覆材や含浸材の塗布面が異なる RC 供試体の腐食性状, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 16 巻, pp.633-638, 2016.
- 3) 中村英佑, 水戸健介, 鈴木雅博, 古賀裕久：高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの電気抵抗率の温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019.
- 4) 佐々木徹, 新田弘之, 西崎到：表面保護材料の遮塩性評価における試験条件の基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 21 巻, 2021.
- 5) 土木研究所材料地盤研究グループ(新材料)：コンクリート表面保護工の施工環境と耐久性に関する研究, 土木研究所資料, 第 4186 号, 2011

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.4 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、地質・  
地盤研究グループ（特命、地質）、材料資源研究グループ  
（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西崎到、  
新田弘之、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一弘、  
尾西恭亮、佐々木巖、大浦正樹、若林由弥

#### 【要旨】

本研究は、多様な交通条件、気象条件下で供用されている舗装を対象に、それら現場条件に応じた適切な維持修繕手法に関する検討を通じ、重交通道路及び軽交通道路の舗装の長寿命化・延命化手法を提案することを目的としている。平成 28 年度は、軽交通道路の破損特性と、維持工法に用いられる材料の基礎物性について調査分析を行い、表面 1cm 程度の材料劣化が顕著で、表面からのひび割れに起因して破損が進展することを明らかにした。平成 29 年度は、軽交通道路に多い表面のアスファルト劣化から生じるトップダウン型ひび割れ、ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどの損傷形態に対応した延命化補修工法として、表面処理工法ならびにじょく層併用薄層補修工法について現道調査による検討を行った。平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法について試験舗装による検証を開始し、ひび割れ状態の変化などから適用条件の初期データを得た。じょく層併用薄層補修工法ではボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどのリフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できた。令和元年および令和 2 年度は、表面処理工法の適用目安を示すための試験舗装による評価を行った。令和 3 年度までの調査結果から、表層機能維持としての表面処理工法の適用にあたっての、下層の状態や交通量等の条件、浸透水の抑制効果を明らかにするとともに、劣化曲線の推定を行いライフサイクルコスト検討のための知見を得た。

キーワード：舗装、表面機能、路面破損、構造破損、材料劣化、実態調査

#### 1. はじめに

本研究では、多様な交通条件、気象条件下で供用されている舗装を対象に、それら現場条件に応じた適切な維持修繕手法に関する検討を通じ、舗装の長寿命化・延命化手法を提案することを目的としている。多様な管理レベル下にあることが多い軽交通道路の舗装については、その管理レベルに対応した路面の維持工法と材料が求められる。そのためには、損傷の実態、特に損傷要因を把握し対策を選定することが必要である。

平成 28 年度は、予防保全の観点から維持工法に着目し、軽交通道路の破損特性の整理、舗装表面の材料劣化状況の評価、維持工法に用いられる材料の用途や基礎物性について調査分析を行った。なお本研究では、N5 交通以下の道路を軽交通道路としている。

平成 29 年度は、舗装表面のアスファルト劣化から生じるトップダウン型ひび割れの抑制につながる表面処理

工法について、試験舗装による検証を開始した。また、軽交通道路に多いボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどの損傷形態に対応した延命化補修工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について追跡調査による検討を行った。平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法について試験舗装による検証を開始した。

令和元年から令和 3 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法の適用目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件が異なる現道で試験舗装による評価を行った。

#### 2. 軽交通道路の管理と破損特性

##### 2.1 舗装の診断区分と措置

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、「点検要領」という。）において、アスファルト舗装では表層の供用年数に対する使用目標年数を設定し、これを

通じて表層の供用年数と損傷レベルに応じた適切な措置の実施により長寿命化をはかってゆくことになっている。軽交通道路等の多くは、損傷の進行が緩やかな道路等に分類（C,D）され、表層を使い続ける目標期間の設定は各道路管理者に求められていないが、道路特性を踏まえて管理基準を設定し、点検と診断を行って、適切な措置を講ずることとされている<sup>1)</sup>。

舗装の点検と診断においては、管理基準に照らした劣化の程度に応じた診断区分が、Ⅰ健全、Ⅱ表面機能保持段階、Ⅲ修繕段階に区分されている。これを受けて、舗装点検必携では使用目標年数と診断区分の対応を図-1のように整理している<sup>2)</sup>。

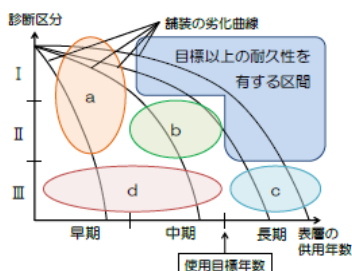


図-1 使用目標年数と診断区分のイメージ<sup>2)</sup>

舗装構造が比較的単純で舗装厚が薄い軽交通道路では、図中の措置の区分cとdでは表層を更新する場合が多く、必要に応じ路盤改良の要否を検討することとなる。このための確な点検と診断が必要となるものの、措置としての修繕工事には技術的な課題は多くない。

一方、区分aとbでは、表面処理やクラックシールといった維持工法が主体になる。しかしながら、維持材料工法の選定方法や判断基準が体系的に定まっているとは言えず、表層がどの程度延命されるのかもあまり明らかになっていない。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層、措置としての路面の維持工法の効果的な使用の重要性が増してくると考えられる。

## 2.2 表面の損傷形態と劣化要因

表層機能の保全による舗装の長寿命化・延命化は、表層の機能である快適な路面の保持と路盤の保護の持続によって達成される。これを阻む要因は、舗装表面の材料劣化と、ひび割れ等の不連続箇所からの水の浸透に大別される。ポットホールや段差などの即応せざるを得ない損傷や、放置しうる損傷もあるものの、破損進行が問題となる損傷として、ひび割れへの対応は重要である。

舗装のひび割れには、通過車両の繰返し载荷で舗装下面から発生し上に伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ

(以下、ボトムアップひび割れ)、舗装表面から下層に伸びるトップダウン型疲労ひび割れ(以下、トップダウンひび割れ)、凍上ひび割れ、温度応力ひび割れがある。

ボトムアップひび割れは、重ね梁としての舗装版の曲げ疲労破壊であり、舗装の構造設計の基本となる損傷形態である。路面に現れたひび割れは版を貫通しており、下層に水が浸透し剥離を生じるほか支持層である路盤の損傷を促進することとなる。

トップダウンひび割れは、表面の変形抵抗性が乏しい場合にタイヤ近傍の引張ひずみで生じるといわれており、特に劣化によるアスファルトの硬化が指摘されている。路面は日射を直接受けるため、紫外線や温度上昇で酸化劣化が進みやすい。表面の微細ひび割れや剥離による疲労性状の低下も過年度の研究課題で確認されている<sup>3)</sup>。

軽交通道路における損傷の進行要因として、水の浸入と表面付近の材料劣化が二つの大きな形態であり、その状況把握と抑制のための維持工法が重要となる。

## 3. 舗装表面の材料劣化の調査

表層機能保持において表面付近の材料劣化を正確に把握することが必要であるため、試験舗装工区の材料を用いて深さ方向のアスファルト劣化を調べた。

### 3.1 国道50号下館試験舗装

国道50号下館BPではカーボンブラックによるアスファルト舗装の耐久性評価を行っており<sup>4)</sup>、この採取表層材を用いて、舗装表面からの深さ方向に細かくスライスしてアスファルト劣化を調べた。当該舗装は平成26年3月に新設工事として施工され、令和2年度に供用3年後の試験を行った。使用材料は表-1に示すとおりである。なお、舗装厚などの面から試験未実施の箇所があるほか、歩道工区の1年後は20mmスライスで試験した。

表-1 試験舗装工区(下館)の表層材料

工区	混合物の種類	As量	空隙率	アスファルトの種類
車道	密粒度アスファルト混合物(13)[75]	5.4%	—	ポリマー改質Ⅱ型
歩道	開粒度アスファルト混合物(13)[50]	4.5%	12%以上	ストレートアスファルト60~80

図-2と図-3に試験結果を示す。車道部の改質密粒混合物では、表層深部では新設当初の針入度および軟化点を示しているのに対し、表面に近づくほど劣化度が大きくなり、表面1cmだけをみると針入度は20未満で軟化点もかなり高く、アスファルトの劣化が著しいことがわかる。歩道部は0年(練落とし材)のアスファルト試験が未

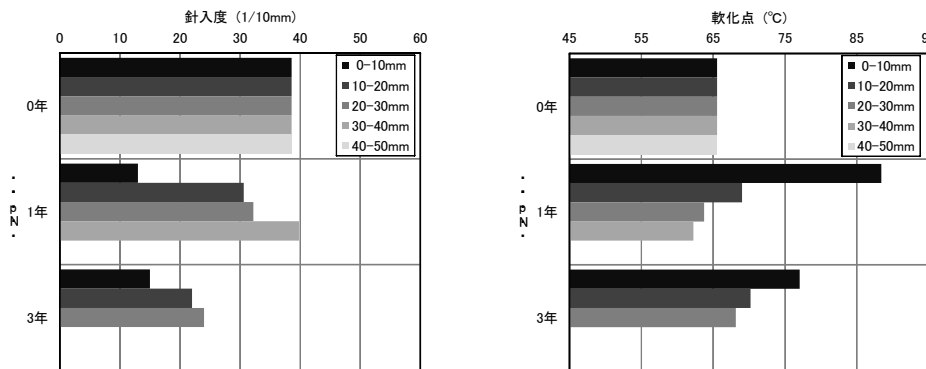


図-2 表面深さ方向の劣化状況(車道密粒)

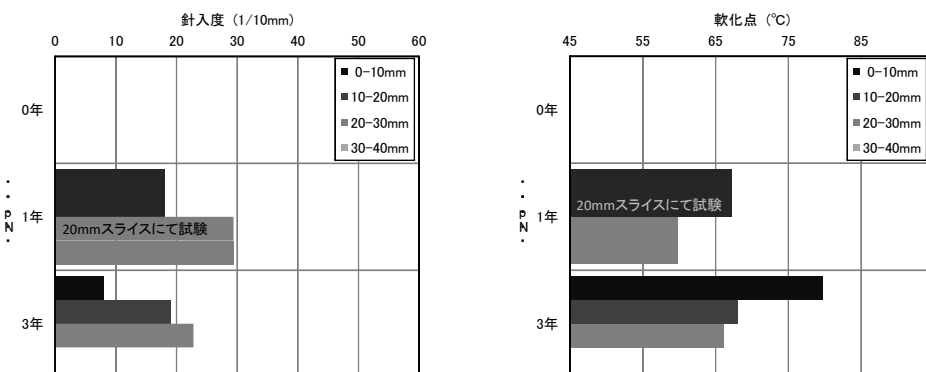


図-3 表面深さ方向の劣化状況(歩道開粒)

実施であるが、使用アスファルト級から針入度 50 強程度であるとみられ、開粒度であり劣化は車道よりもさらに早いとみられる。アスファルトの劣化は供用年数とともに進行するが、表面付近ではその進行は急激なことがこれらの結果からわかる。その理由としては、紫外線および酸化による劣化が挙げられる。表面部の締固め状態にもよるが深部では酸素に触れる機会も相対的に少ないため、材料劣化の条件は表面付近で顕著に厳しい。

これまでの研究では表層 5cm を一体として材料評価することがほとんどであったが、今回、深さ方向に細かく分割して経年変化を調べたところ、表面付近の劣化条件が特に厳しいことがわかった。これは、耐候性に優れた表面処理材料等で路面を保護すれば、舗装の耐久性を大幅に向上でき得ることを示唆する。

表-2 試験舗装工区(青梅)の表層材料

工区	混合物の種類	再生骨材 (%)	新材 (%)	新アスファルトの種類	再生用添加剤量 (%)
①	再生密粒度アスファルト混合物(13)[75]	60	40	ストレートアスファルト 40~60	旧アスファルトに対し 8.0
④	新規密粒度アスファルト混合物(13)[75]	-	100	ストレートアスファルト 40~60	-

### 3. 2 東京都青梅試験舗装

土木研究所では、東京都土木技術支援・人材育成センターおよび(一社)日本アスファルト合材協会の三者で高針入度のアスファルトの舗装への適用性を検証するための共同研究として青梅市内の東京都道での試験舗装を平成 26 年 4 月に施工した<sup>5)</sup>。今回、供用 2.5 年後および暴露 1 年後の再取材のアスファルト劣化度評価試験を前項と同様に行った。ここでは使用材料のうち表-2 に示す、通常の再生アスファルト混合物および新規アスファルト混合物の試験結果を述べる。

図-4 と図-5 に試験結果を示す。劣化傾向は定性的には前項と同様であるが、再生混合物と新規混合物ではその進行速度が異なり、再生混合物の方が劣化は早いことがわかる。特に再生混合物の表面 1cm だけをみると針入度は 10 未満で軟化点も異常に高く、アスファルトの劣化が著しい。表面付近ではその進行が急激であることはこの結果からも裏付けられる。

当該試験舗装では、同じアスファルト混合物を用いた供試体を、東京都土木技術支援・人材育成センター(江東区)の屋上で暴露している。約 1 年間後に回収した供試体の結果を図中に示しているが深さ方向に材料を一括して試験しており、再生と新規ともに、0 年や 2.5 年供用後の深部と同程度の値を示した。表面近傍では劣化が





設定が必要となっている。

アスファルト系舗装の補修材料として、国内で使用されている材料製品の公表資料を市場調査により網羅的に整理し、表-3の例示のように集約した。今後、材料製品の技術資料等から、対策効果と謳い文句を整理し、比較評価のための性能表示や適用条件を示すための表示項目の標準化などを検討する予定としている。

## 5. 軽交通道路における舗装の長寿命化・延命化技術・手法の構築

### 5.1 背景

損傷要因に応じた維持修繕工法の適用法を明らかにすることで、軽交通道路の舗装の長寿命化と維持管理技術を向上させることを目指している。軽交通道路における維持修繕工法の延命効果データを取得し、その適用手法を提案する。

これまでの調査におけるひび割れ発生形態を含めた路面損傷調査から、トップダウン型ひび割れとボトムアップ型ひび割れの、二つの形態に分けられることがわかっている。前者は、舗装構造的には必要な断面を有している。表面の材料劣化が進行することによりトップダウン型ひび割れを生じ、それが進展することにより舗装全体の破壊に進行する。後者は、アスファルト混合物層厚が薄いことによる表層版の曲げ破壊や低温ひび割れが生じ、そのひび割れが表面まで貫通した時点で舗装全体の破壊に到る。そこで、その形態に着目し、表面処理工法およびじょく層併用薄層補修工法の延命効果データを調査している。

### 5.2 表面処理工法の調査

舗装表面のアスファルト劣化が進行するとトップダウン型ひび割れを生じ、それが水の浸透を促して全層破壊に到る。軽交通道路では、重荷重が繰り返し作用する構造破壊や疲労損傷が卓越するよりは、材料劣化によることの損傷が多く、表面機能の維持が求められる。表面処理工法は、表面のアスファルト劣化を抑制することによるひび割れ発生防止効果とともに、表層の水密性向上による路盤をはじめとした下層の損傷抑制をはかることができる工法である。クラックシール等の事後保全型の対策工法と異なり、予防保全が可能となる表面処理工法についてその適用の目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件ごとの有効性を把握するための試験舗装を進めている。



図-6 ひび割れ形態の異なる破損（つくば市内試験舗装区間）

#### (1) 試験施工のための調査

つくば市内の舗装を調査し、同程度の路面損傷状態が続く複数の区間を抽出した。これらの区間からコア抜きして調べたところ、図-6に示すように、交通量や表層の供用年数の相違により損傷形態が異なり、トップダウンおよびボトムアップなどの形態の異なるひび割れが生じている箇所を選定できた。表層のアスファルトの劣化度を、表面部分と内部に分けて抽出回収して調べたところ、図-7に示すように表面部分のアスファルトの劣化が顕著であることも確認できた。これらの区間について、さまざまな表面処理工法の試験舗装を施工して、損傷段階や交通/環境条件ごとの適用性を検証するための試験舗装を施工した。

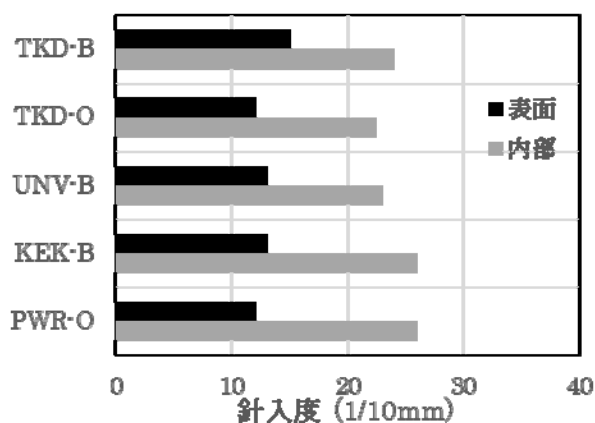


図-7 表面処理工法試験舗装区間の針入度

#### (2) 表面処理工法の試験施工

適用可能な交通条件の把握とともに、延命効果の検証を比較的短期間に行うために、生活道路から重交通路線

までを対象とした。既設舗装の損傷に関する適用範囲の調査として、ひび割れ状態や下層の健全性が異なる路線を含むよう試験箇所を選定を行った。試験箇所の概要を表-4に、表面処理工法とその使用材料を表-5に示す。

表面処理工法は構造的な保全措置にはならないためと条件として下層状態の把握は重要であり、その目安となるひび割れの進行方向を推定した。ひび割れの進行方向は採取コアの観察から、下層の損傷状態はFWD試験のD0たわみ量とその評価指標ならびに箇所ごとの補修履歴等から判断した。

各工法の延長を10mとし、薄層表面処理工法は全箇所（試験箇所①と②）では、クラックシールとの併用工区も設定で工区を設け、その他シール処理は交通量の多くない箇所で行った。

表面処理の施工期間は、最高気温は40℃近くまで、路面温度は65℃程度まで達した日々が続いた。過酷な条件下ではあったが、各工法ともに施工性は問題なく、良好な仕上がりが得られたものの、一般にアスファルト乳剤は極寒や酷暑期の養生制約があることから、施工条件に関する耐久性等の検証も必要であることがわかった。

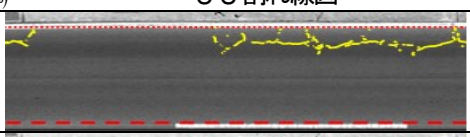
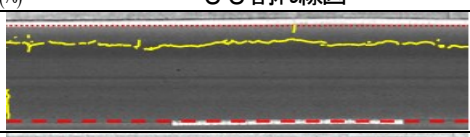
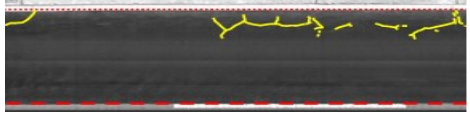
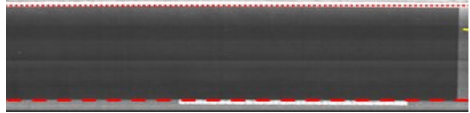
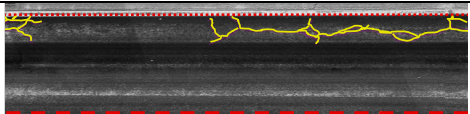
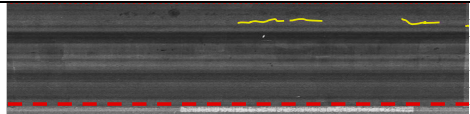
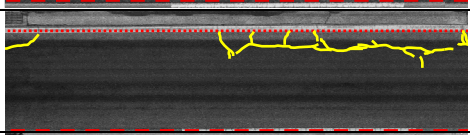
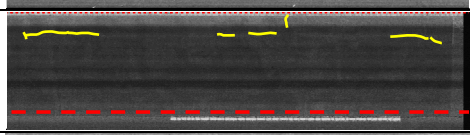
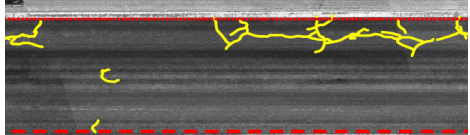
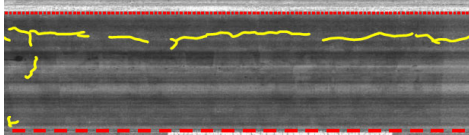
表-4 試験施工箇所と既設舗装の状態

箇所記号	交通量	下層状態(推定)	たわみD0( $\mu\text{m}$ )	表層供用期間	ひび割れ率(箇所平均%)	路面テクスチャきめ深さ(mm)
①	重	損傷大	505	<5年	2.2% (ボトムアップ)	0.46 mm
②	重	損傷中	491		7.5% (ボトムアップ)	0.88 (粗い)
③	重	損傷中	395	15年<	14.2	0.54
④	中	損傷小 (セメント安定処理)	421	15年<	2.8 (トップダウン)	0.72 (粗い)
⑤	軽	健全	210	10-15年	0.1	0.58
⑥	軽	健全	542	<5年	0.2	0.35 (良い)

表-5 試験舗装に用いた表面処理工法

工法名	主な結合材料	骨材	塗布量 $\text{kg}/\text{m}^2$
フォグシール	改質As乳剤(PKM-T)	—	0.6~1.0
フォグシール	ポリマー改質As乳剤	—	0.4~0.8
チップシール	改質As乳剤	砕石7号	7.4
チップシール	改質As乳剤	単粒砕石 5-8mm	10.3~10.8
薄層表面処理A	改質アスファルト	細骨材	1.8~2.3
薄層表面処理B	弾力性As乳剤	珪砂	0.6~0.9
薄層表面処理C	As乳剤およびセメント	細骨材	1.9~2.6

表-6 表面処理工法施工前後と2.5年供用後までのひび割れ状況の変化の例

試験箇所③ (R408 土研前)	フォグシール(PKM-T)		薄層表面処理A	
	ひび割れ率(%)	ひび割れ線図	ひび割れ率(%)	ひび割れ線図
施工前	12.5		13.4	
施工5日後	10.5		0.0	
0.5年供用後	11.0		3.3	
1.3年供用後	13.3		5.9	
2.5年供用後	11.4		9.2	

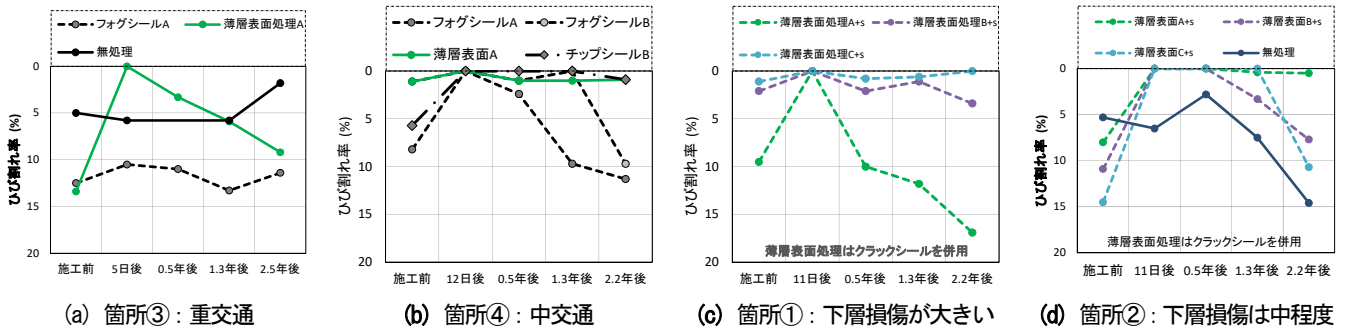


図-8 表面処理工法施工前後と2.5年供用後までのひび割れ状況の変化の例

(3) 試験施工のひび割れ状況調査結果

表層アスファルトの劣化防止の効果は長期供用後の評価を待つ必要がある。ここでは、水の浸入抑制としてのひび割れ状況の調査結果<sup>9)</sup>を示す。交通量が多く既設路面のひび割れが進んでいる試験箇所③での調査結果の例を表-6に示す。 Fogシールでは施工5日後には表層の既存ひび割れに沿った変状が生じ、薄層表面処理でもひび割れは顕在化しつつある。このひび割れ率を図示したのが図-8(a)である。 Fogシールではその損傷を修復することは困難であるが、薄層表面処理では数年程度程度のひび割れ修復効果が得られるとみられる。

交通量が多くない試験箇所④、図-8(b)では重交通区間とはやや異なり、 Fogシールでは1年程度でひび割れが再発し、その後はさらにひび割れが拡大してゆく兆候がみられる。一方、チップシールと薄層表面処理では数年経過後でも1%以下に維持できている。下層状態が比較的健全で交通量が多くなければ適用性があることが示唆される。図-8(c), (d)は重交通区間でクラックシールと薄層表面処理を併用した場合の結果であるが、ひび割れが一年以内に再発するか否かが両箇所で大きく異なる。試験箇所①では、0.5年後には施工前のひび割れ率に戻り、さらに施工前よりも損傷が進行しつつある傾向がうかがえる。この箇所は下層損傷が大きい状態で表層のみを切削OLした区間であり、舗装表面の封止のみでは延命効果が得られなかったものとみられる。一方、試験箇所②では、比較工区のひび割れ率が増加傾向にあるが、薄層表面処理すると一定期間ひび割れの再発を抑制でき、数年経過した後でも施工前よりはひび割れ率の小さな状態を維持できている。表面処理の効果は舗装の構造的健全性に大きく影響を受けることが確認できる。

施工前と供用後のひび割れ率に着目すると、無処理の比較工区や Fogシールでわかるように、供用期間を経るとひび割れ率は上昇している。その中で、表面処理工法によりひび割れを一定期間抑制できることは舗装の延

命に有効であることが示唆される。ただし、損傷進行の抑制がどの程度であればライフサイクルを通じた適用効果が得られるのか、費用便益や二酸化炭素排出抑制効果等を検討し判断することが求められる。

本試験舗装では、施工前のひび割れ率が異なり工区ごとの単純比較は困難である。無処理の比較工区を初期ひび割れの程度ごとに再整理して、損傷程度に応じた表面処理工法の適用効果を整理する必要がある。そこで、初期のひび割れ率をもとに、延長1mごとに評価区間をグループ分けした区間群とし、その区間群ごとに整理したひび割れの進行状況が図-9である<sup>8)</sup>。初期の損傷程度を揃えて進行速度をみると、損傷程度ごとに進行速度が異なることがわかった。

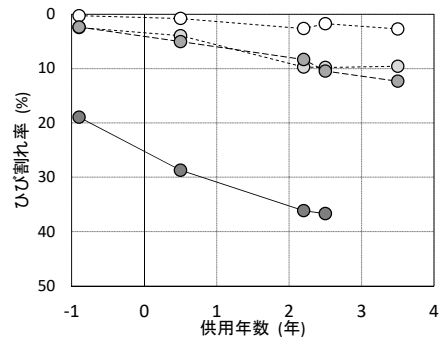


図-9 初期ひび割れ率毎の区間群のひび割れ率変化の例

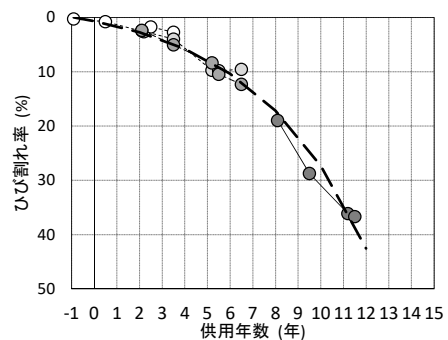


図-10 初期ひび割れ率ごとの整理から得た劣化曲線

それぞれの変化は平均値と傾きを持つことから、図-10のように劣化曲線を推定でき、これを活用して表面処理工による延命効果の検証やライフサイクルコストを検討できることを見いだした。

初期のひび割れ率や表面処理工法ごとに劣化曲線を推定し、その傾きから施工後のひび割れ進行速度を求めたのが図-10である。初期のひび割れ率が大きいほどその進行が速いことを確認した。そして、表面処理工法の適用により損傷進行の抑制が可能であること、初期のひび割れが10%以上であっても施工後数年までの結果では進行速度は大きく増加しないことがわかった。

表面処理工法では、路面上にひび割れが見られていても、塗布材料がひび割れ内部に浸透することによる延命効果も期待できる。下層が損傷している場合でも遮水性を付与できれば延命効果が期待できる。損傷区間における実際の遮水性を面的に把握し、下層の保護効果を評価することが望まれる。また、ひび割れの進行状況と表面処理層のひび割れ追従性など検討すべき項目も多い。

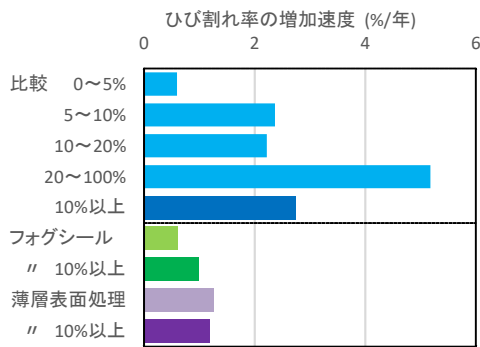


図-11 舗装表面処理工とひび割れ率の増加速度

(4) 表面処理工法による遮水性の評価

ひび割れや締固め不良箇所等があると、それが微細なものであっても雨水が下層に浸透し舗装全体の破損につながる。表面処理の遮水性の評価として、ひび割れ部からの水の浸透状況の評価を試みた。図-12の例に示す測点で透水試験を行い、水分浸透の有無を調べた。図中の薄層表面処理Aでは、供用2.5年後に塗膜の消耗やひび割れの再発があっても水が浸透しなかった。その一方、隣接した無処理の比較工区では、ひび割れ箇所から数L/hr以上の水の浸透が観察された。そこで、簡易な現場透水試験円筒を用いて舗装表面からの浸透水量の測定を行った<sup>9)</sup>。

図-13は、ひび割れ状態の異なる複数箇所での水位低下の経時変化を調べた結果である。また、図-14には損傷

状態や表面処理の有無による水位低下を示す。これらの結果から、下層への水の浸透状態は、ひび割れの有無やその進行程度により大きく異なることがわかった。また、表面処理のない比較工区ではひび割れ部の試験延長約15cmの開口部から10分間で40mm(700mL)以上の水が下層に侵入した箇所もあり損傷部からの浸透水を確認できた。一方、表面処理工法施工箇所では水位低下が小さい測点もあり、表面処理工法により遮水性を付与できることが示され、表面にひび割れが再発した後もその遮水効果はある程度期待できることがわかった。



図-12 試験舗装箇所②の路面と透水状況

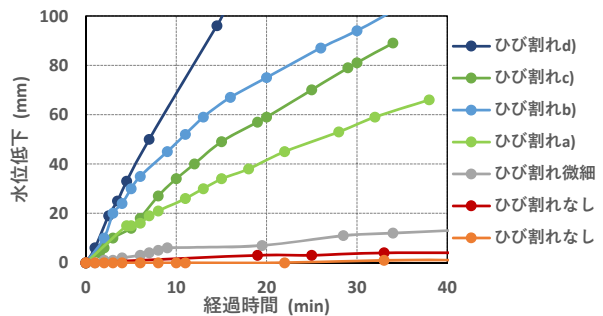


図-13 ひび割れの状態と透水試験の水位低下

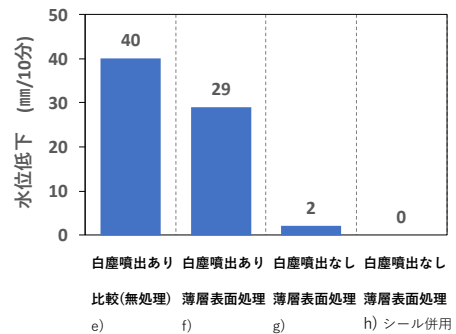


図-14 ひび割れ部からの浸透水量測定結果

(5) 表面処理工法による路面粗さの評価

舗装表面の粗さ（テクスチャ）が変化すると、走行車両による振動や騒音、すべり抵抗等が変化する。損傷が進みつつある既設舗装の耐久性向上とともに、路面粗さをはじめとした表面機能の回復は、表面処理工法の主目的の一つである。

レーザセンサ(CT メータ)による路面粗さの調査結果を図-15 に示す。表面処理の施工により路面のきめ深さは平滑化し適度なテクスチャとなる。既存路面が荒れきりが深くなっていた場合においては、薄層表面処理の改善効果が明確で、既存路面に 0.1mm 程度の荒れがあっても 0.5mm 程度の平滑面に整生できる。そしてその状態は数年間の供用後も維持されている。これは、塗布した処理材が既存路面の谷部に残り機能を発揮しているためと考えられ、路面の状態が異なることは図-12 からわかり、そのような箇所では遮水性が維持できている理由であると考えられる。一方、無処理の比較工区の供用前後の変化では、きめ深さ 0.5mm 以下の現状路面を継続使用した箇所の全てで面荒れが進行している。

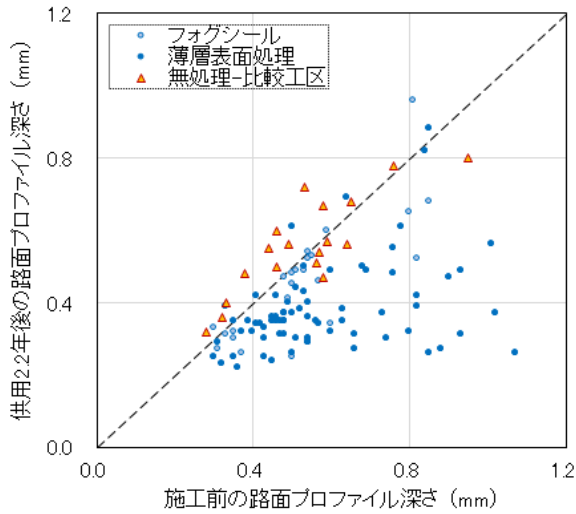


図-15 舗装表面処理工による路面粗さの変化

試験舗装において、施工前のキメ深さが 0.6mm 以上で比較的荒れの進行した重交通箇所での路面粗さの変化を図-16 に示す。比較工区では、0.6mm 程度であったキメ深さが年数に応じて増加している。一方、表面処理工区では施工によりキメ深さは 0.4mm 以下になり数年間は平滑な状態を維持し、その後増加傾向はあるものの比較工区に比べると良好な状態を維持していることがわかる。

図-17 は、0.5mm 以下の軽交通路面に対して様々な表

面処理工法を施工しその後の変化を見た結果である。フグしい一つと薄層表面処理では、施工直後にはキメ深さが小さくなり、年数を経ても比較工区に比べるとやや小さな値を保っているが、初期の面荒れが大きくないこともありその効果は限定的である。表面処理工法による路面粗さの改善は、たとえば 0.5mm を超えるような条件で適用するとその効果が高いと考えられる。なおチップシール工法は、排水性舗装のような粗面を形成する工法であり、施工直後の値は大きくなるが、その後の変化は同様である。

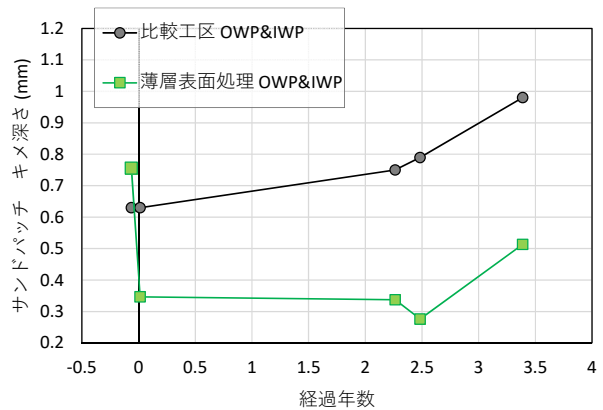


図-16 路面粗さの変化(初期 0.6mm 以上:重交通)

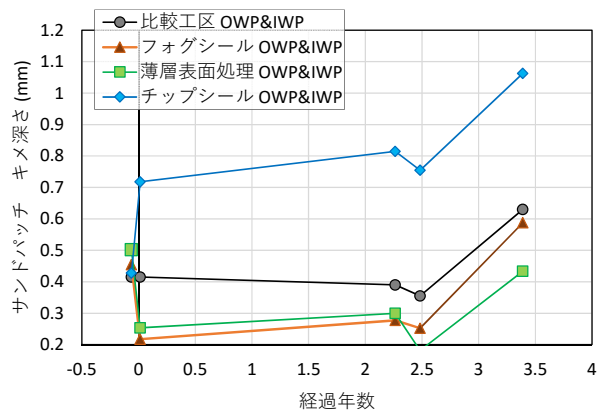


図-17 路面粗さの変化(初期 0.5mm 以下:軽交通)

5. 3 じょく層併用薄層補修工法の調査

アスファルト混合物層厚の薄い軽交通路線区間には、ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れが発生しやすいことがわかっている。そのため、軽交通路線区間ではこれらの損傷形態に対応した延命化補修工法を検討することが大切である。ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れ箇所を補修する工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について検討を行った。

じょく層併用薄層補修工法の供用後 12 年間の追跡調

査結果を整理した。じょく層併用薄層補修工法とは、図-18に示すように、既設路面にじょく層（上のアスファルト混合物に応力を伝えないようにする層）を1cm程度の厚さで敷設し、さらにその上に変形追随性を高めるために、柔軟性の高い軟質改質アスファルトを使用した混合物層を3cm程度舗設するもので、リフレクションや低温クラックの抑制効果が期待できるものである。調査箇所では混合物層に空隙10～15%の開粒度アスコン(3cm)を舗設している。

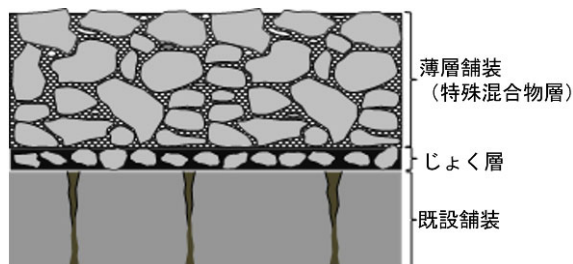


図-18 じょく層併用薄層補修工法断面図

じょく層併用薄層補修工法を施す前の既設舗装の状態としては、低温クラックが10mに一本の割合で入っており、ひび割れ率は約12%であった。比較区として、標準的な補修工法である合成繊維シートとオーバーレイを併用した区間を設けて比較している。じょく層併用薄層補修工法と標準工法の区間の、既設舗装のひび割れ率はほぼ同程度であり、平等な条件で補修効果の比較ができると考えられる。なお、調査対象箇所は北海道の道北内陸部に位置しており、近傍のアメダス観測点における1980～2000年の凍結指数の平均値は約900であり、全道の平均値(585℃・日)よりもかなり高い数値を示す、非常に厳しい寒さに晒される箇所であると言える。

施工後12年間のひび割れ率追跡調査結果を図-19に示す。標準的な薄層舗装区間は、10%を越えるひび割れ率となっているのに比べて、じょく層併用薄層補修工法のひび割れ率は2%程度であり、リフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できる。

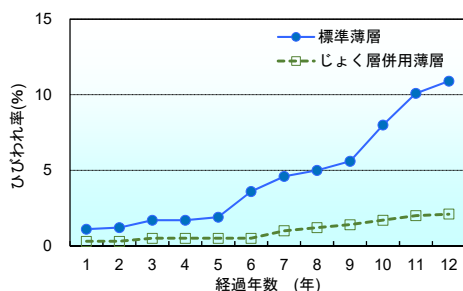


図-19 じょく層併用薄層補修工法区間のひび割れ状況

## 6. まとめ

アスファルト混合物層が薄い軽交通道路では、表層機能の保全を目的とした維持工法が主たる措置である。損傷レベルの大きい診断区分Ⅲの多くは舗装打換えや表層更新となるものの、管理方針によっては維持工事により延命をはからざるをえない場合もある。

研究の初年度である平成28年度は、アスファルト舗装の破損特性の整理、舗装表面の材料劣化状況の評価、維持工法に用いられる材料の用途や基礎物性について調査分析を行った。その結果、表面近傍の材料劣化が顕著であることがわかり、既往研究課題の水浸疲労の知見とあわせて、表面劣化やひび割れの処置が延命化に直結することを確認した。表面機能確保のための表面処理工法の適用の目安を示すための、試験舗装を含めた試験調査を進めてゆくことにした。

平成29年度は、予防保全としても可能な措置であり、その適用の目安を示す必要がある表面処理工法について、つくば市内の現道舗装での適用性評価のための試験舗装に着手した。また、軽交通道路に多いボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れ区間における延命化工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について追跡調査による検討を行った結果、じょく層併用薄層補修工法はボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどのリフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できた。

平成30年度は、予防保全あるいは劣化初期における延命化の観点から維持工法に着目し、破損のメカニズムを踏まえて、いつどこに適用すべきであるか、試験舗装による検証を開始した。ひび割れ状態の変化などから適用性条件の初期データを得た。

令和元年および令和2年度は、予防保全が可能となる表面処理工法の適用目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件が異なる複数の現道における試験舗装による検証を行った。最終年度である令和3年度までの調査結果としての3.5年間の追跡調査から、初期の損傷段階ごとにひび割れ率を整理すれば劣化曲線の推定できることを見だし、その傾きから劣化度毎の進行速度や表面処理工法の延命効果を把握した。また、キメ深さとして示される路面の平滑性の維持についても、その効果を定量的に確認できた。交通条件等の異なる試験箇所によるこれら一連の結果から、下層状態が比較的健全であれば交通量に応じた工法選定により路面機能の維持が可能であることが示唆された。

表面処理工法による延命効果発現メカニズムとしては、塗膜による表層アスファルトの材料劣化抑制とそれによ

るひび割れ発生と進展防止が考えられる。その他、ひび割れ等の路面損傷部からの浸透水を抑制する効果による、下層保護が挙げられる。本研究から、表面処理の遮水効果を透水試験等の測定により確認でき、これがひび割れ率の増加速度の差にも表れたものと考えられる。これらの効果により、表面処理の下層損傷抑制としての延命効果が期待できることがわかり、適用箇所に応じたライフサイクルコストを検討することにより、表面処理工法を有効に適用することが可能となった。

なお、現道における調査はそれぞれ道路管理者の協力を得て、また試験舗装には共同研究において実施しているものもある。道路管理者ほかの多大なるご協力のもと実施しているものであり、ここに記して関係各位に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 日本道路協会：舗装点検必携 平成29年版、p.50、2017.1
- 3) 渡邊一弘、藪雅行：舗装の表面処理工法による延命効果、土木技術資料、Vol.58、No.8、pp.16-17、2016.8
- 4) 佐々木巖、新田弘之、西崎到：歩道用開粒度アスファルト混合物へのカーボンブラックの適用性、土木学会第70回年次学術講演会、Vol.70、No.V-268、pp.535-536、2015.9
- 5) 峰岸順一、西岡佑介：再生アスファルト混合物への高針入度アスファルトの適用性検討、土木技術資料、Vol.59、No.3、pp.44-47、2017.2
- 6) 佐々木巖、永原篤：表面処理工法の適用性評価のための試験舗装と初期性状、日本道路会議論文集 DVD、2019.11
- 7) 佐々木巖、新田弘之、日本アスファルト乳剤協会：アスファルト乳剤を用いた表面処理工法による表層機能保持、アスファルト、Vol.236、2021.5
- 8) 佐々木巖、新田弘之、永原篤：初期ひび割れ率ごとに整理した損傷進行速度と表面処理工法の効果、日本道路会議論文集、2021.11
- 9) 佐々木巖、新田弘之、永原篤：ひび割れ等の損傷部の透水試験による表層破損状態の評価、土木学会第76回年次学術講演会、Vol.76、No.V-163、2021.9



## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、材料の開発・評価

### 6.4.5 先端的維持管理技術による管理用施設（機械設備）マネジメントに関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）

寒地技術推進室（寒地機械技術チーム）

研究担当者：藤野健一、梶田洋規、新田恭士、  
森川博邦、伊藤圭、上野仁士、吉  
田潔、黒田浩章、須山友貴

（以上、先端技術チーム）

巖博、片野浩司、牧野正敏、

中島淳一、永長哲也、澤口重夫

平地一典

（以上、寒地機械技術チーム）

#### 【要旨】

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、河川・道路において非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。しかしながら近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要とされていた部品故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、施設の健全性評価や早期機能回復のために点検診断・維持管理の容易な設備構造も検討する必要がある。本研究では、国民の生命、財産を守る上で不可欠な土木機械設備の確実な機能発揮を目指し、土木機械設備の効率的・効果的な設計に関する手法について提案するものである。これまで実施してきた河川ポンプ設備を中心とした土木機械設備のストックマネジメントに関する研究結果を基に、点検診断が容易な設備構造を検討するため、設備構造及び点検技術の実態調査と、既往研究等により設備診断に有効と考えられる状態監視診断技術等の点検診断手法が現在の設備構造で適用可能であるかの実証試験を実施するとともに、これまでの調査内容を資料としてとりまとめた点検診断しやすい設備構造事例集の作成を行った。

キーワード：土木機械設備、維持管理、状態監視保全、ストックマネジメント

#### 1. はじめに

土木研究所においては、これまで土木機械設備の効率的・効果的な維持管理の実現を目的として、信頼性評価手法及び関連する複数の施設における社会的な影響度と設備の健全度の総合評価手法、また「非」常用設備への状態監視技術に係る研究を実施し、効果的な更新や整備の計画立案に寄与してきたところである。

土木機械設備の状態監視技術に関する研究成果は国土交通省の「河川用ポンプ設備状態監視ガイドライン(案)」<sup>1)</sup>にその知見が反映されているが、状態監視のための計測機器を設置しにくい設備構造となっていることが障害となり十分に適用できない事例がある。このため設備構造と状態監視技術を含めた点検手法、整備方法との融和を図る必要がある。

#### 2. 研究実施内容

本研究では、土木機械設備についてより効果的・効率的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資する、以下の研究に取り組んでいる。

- ・点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

#### 3. 研究の基本方針

土木機械設備の状態監視技術については、これまで研究を進めており、国土交通省のガイドラインに知見が反映されるなど一定の成果を上げている。しかしながら、既存設備においては、設備構造が障害となり点検診断技術が十分に適用できない事例がある。

このため、設備構造と状態監視技術を含めた点検手法、整備方法との融和を図り、点検診断、維持管理の容易な設備構造を検討し、設計の考え方や既存設備の

表-1 研究実施内容の整理

実施計画書上の研究実施項目  本報告書の章立て	(1) 設備構造等実態及び活用すべき点検技術の調査		(2) 点検・診断しやすい設備構造の検討				(3) 既存設備の改良手法に関する検討	(4) 点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築
	設備構造及び点検技術の実態調査	点検診断技術と設備構造の適合性検討、評価	河川ポンプ設備における設備構造の具体化検討	既設ポンプ設備による検証	点検診断しやすい設備構造の評価・整理	既存設備への改良手法検討	手法としてとりまとめ	
4. 1点検診断の容易な設備構造の技術動向・実態調査等	4.1.1 状態監視対象の点検実態の把握	○						
	4.1.2 ポンプメーカーの技術開発実態調査	○	○	○	○	○		
	4.1.3 点検等で苦慮している事例の調査（排水機場）	○						
	4.1.4 過去の調査や知見による検討	○	○					
	4.1.5 点検等で苦慮している事例の調査（排水機場以外）	○	○					
4. 2点検しやすい構造の実証試験	4.2.1 排気ガス組成計測 センサ投入孔について			○	○	○	○	
	4.2.2 ディーゼル機関の内視鏡診断			○	○	○	○	
	4.2.3 ディーゼル機関の過給器の停止時間調査			○	○	○	○	
	4.2.4 主ポンプ軸変位計測用センサ固定方法に関する検討			○	○	○	○	
	4.2.5 ガスタービンエンジン用振動センサの熱対策に関する検討			○	○	○	○	
	4.2.6 積雪寒冷地における設備凍結対策に関する検討			○	○	○	○	
5. まとめ（事例集の作成）							○	

改良を盛り込んだ基準化へ向けての技術資料を策定し提案する必要がある。

これらを実現するにあたって、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 設備構造等実態及び活用すべき点検技術の調査
  - ・設備構造及び点検技術の実態調査
  - ・点検診断技術と設備構造の適合性検討、評価
- (2) 点検・診断しやすい設備構造の検討
  - ・河川ポンプ設備における設備構造の具体化検討
  - ・既設ポンプ設備による検証
  - ・点検診断しやすい設備構造の評価・整理
- (3) 既存設備の改良手法に関する検討
  - ・既存設備への改良手法検討
- (4) 点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築
  - ・手法としてとりまとめ

以上は研究実施計画書による実施内容だが、研究遂行に当たっては上記内容を何度か繰り返して実施または並行して実施するなどしており、この順では研究の流れが見えにくいことから、本報告書の記載は目次の通りの順に整理した。

なお、目次の記載と研究実施計画書の記載の関係は、表-1の通りとなっている

## 4. 研究内容

### 4.1 点検診断に苦慮する設備構造の実態調査等

「非」常用設備である土木機械設備の点検診断・維持管理が容易な設備構造の検討に際しては、まず、点検診断対象設備に適用すべき点検診断技術の整理と、点検診断に苦慮している事例の調査が必要である。

そこで、下記に着目して調査を実施した。

- ・現在一般的な機械設備で利活用されている点検診断技術
  - ・弊所で研究を進めている点検診断技術を活用するための設備構造。
  - ・国土交通省管理の機械設備で現在利活用されている点検診断技術。
  - ・設備メーカー等で開発した点検診断技術(それを活用するための設備構造を含む)。
  - ・点検等で実際に苦慮している事例。
- その結果について、以降に示す。

#### 4.1.1 状態監視管理対象の点検実態の把握

「非」常用設備である土木機械設備の点検診断が容易な設備構造を検討するにあたって、まず一般的な機械設備である、上下水道・工場等のポンプや回転機器を対象として常用設備における点検実態を調査した。

調査は、診断機器メーカーや診断業務を行っている業

表-2 常用設備の状態監視実態調査結果

No.	対象機器	状態監視項目 (計測項目)	計測箇所	計測方法	設置方法・設置時の問題点
1	上下水道ポンプ	振動	軸受、ケーシング本体、主軸、電動機軸受	ポータブル常設オンラインセンサ 常時監視 又は、定期的	・フラット面が無くポータブル及び常設センサの設置ができない。 ・設置スペースが無くセンサを当てたり、設置できない場合がある。
2		温度	軸受	ポータブル常設オンラインセンサ 常時監視 又は、定期的	・ポータブル式の場合は特に問題なし。 ・振動計と一体型の場合は、フラット面が無い場合や設置スペースが無い等の構造的問題で設置できない場合がある。
3	工場のポンプ設備	振動、圧力、流量、水位、電流値	軸受、本体	日常目視点検ポータブル常設オンラインセンサIoTセンサ 常時監視 又は、定期的	・設置スペースが無くセンサを計測箇所にあてたり、設置できない場合がある。 ・コスト的な問題により、設置できない場合がある。
4	工場設備の回転機器	振動	軸受、本体	ポータブル常設オンラインセンサ 常時監視 又は、定期的	・アルミ系材質等でマグネット式が使えない場合もある。 ・フラット面が無くポータブル及び常設センサの設置ができない。 ・設置スペースが無くセンサを当てたり、設置できない場合がある。
5		軸振動	主軸	常設オンラインセンサ 常時監視	・工場、プラントでは重要設備のほとんどが軸振動を測定。 ・主軸が露出しておらず測定できない場合がある。
6		周波数分析	軸受	ポータブル常設オンラインセンサ 常時監視 又は、定期的	・アルミ系材質等でマグネット式が使えない場合もある。 ・フラット面が無くポータブル及び常設センサの設置ができない。 ・設置スペースが無くセンサを当てたり、設置できない場合がある。
7		温度	軸受、本体等	ポータブル常設オンラインセンサ 常時監視 又は、定期的	・温度センサには様々な種類があり用途により使い分けができるため、問題は特でない。
8		AE	軸受、本体等	ポータブル常設オンラインセンサ 常時監視 又は、定期的	・フラット面が無くポータブル及び常設センサの設置ができない。 ・設置スペースが無くセンサを当てたり、設置できない場合がある。 ・コストが高く、設置条件が他に比べ厳しい。
9		電流周波数	電動機	ポータブル 定期的	・電動機に特化した計測であるため大きな問題はない。
10	潤滑油分析	潤滑油	フェログラフイー法 SOAP法	必要に応じ 特に問題はない。	

者に対しヒアリング等により行った。調査結果は表-2に示すとおりである。上下水道ポンプ設備の状態監視の実態は、待機系設備である排水ポンプと現状においては大きな差はない状況であった。上下水道ポンプ設備では、主に振動、温度で状態監視を行っており、計測箇所は軸受である。計測機器はポータブル式が多く、施設によっては常設のセンサの場合もあるとの結果であった。

工場設備等の常用設備においては、設備の停止や故障による損害が直結することや設備・機器の停止により事故が起る可能性があり、以前から状態監視に力を入れている。ただし、故障、停止した場合の損害費用と状態監視及び維持管理に掛かるコストのバランスが重要になることから、設備の重要度毎に状態監視や維持管理のレベルを分けており、重要となった設備・機器については、常設のセンサやオンラインセンサ等を使用し状態監視を行っているとのことであった。特に重要な回転機器では常設センサによる軸振動による状態監視が多く使われており、通常とは異なる挙動が現れた場合に周波数分析等の詳細な分析を行っている模様である。

設備構造上の問題点としては、センサは後付が多く、センサの設置を考えた構造の物は少なく、適切な振動計測に必要な取付方法や取付箇所への設置が困難な場合があるとのことであった。このため、「非」常用設備である河川用ポンプ設備と状況としては同様と考えられる。

一方、この構造的問題点に対する設備改良等の対策事例は、調査した範囲内では事例はなかった。

#### 4.1.2 点検診断における設備構造の課題の整理

上項の実態調査結果を基に、河川用ポンプ設備に適用する場合の課題と対応策案を設備構造に即し整理した。

まず、現時点で土木研究所での研究により有効性が確認されている状態監視の点検診断項目としては、主に「振動」及び「潤滑油分析」であるが、劣化状況等を直接確認するため「内視鏡」による診断も有効であるため、これらに絞り表-3に示すとおり整理した。

特に検討を進めた項目については、その内容を記載した項について、同表の「対応策案」に付記している。

また、現在別途実施している、機械設備のAI診断に関する研究では、上記の計測項目を含め、多様な計測項目の有効性について調査している。その内容を表-4に示す。また、その中で計測に苦慮する事例と対策について、その内容を記載した項についても付記している(一部、表-3と重複している項目あり)。

現在、国土交通省管理の機械設備で点検時に計測している項目についても、計測に苦慮する事例と対策について整理した。対策内容を記載した項についても付記しているものを、表-5に示す(一部、表-3、表-4と重複している項目あり)。

ディーゼルエンジンには気筒毎や過給器の排気側等に排気温度計や冷却水温度計(水銀柱温度計)が設置されているが、設置位置や向き、室内への日光の入射角によっては目盛りの読み取りの困難な事例がある。温度計設置位置が奥まっておき配管が邪魔で目盛りを読み取りにくい事例を写真-1に、温度計の目盛り面が上を向いているため目盛りを読み取りにくい事例を写真-2に示す。

表-3 河川用ポンプ設備における設備構造の課題

測定項目	測定対象	測定方法	測定箇所	測定における問題	対応策案
振動	原動機（ディーゼル）	振動加速度	出力軸上部軸封部またはエンジンマウントボルト上部	設置箇所が平坦面でない場合がある	接地面の平坦加工（本項に記載）
	原動機（ガスタービン）	振動加速度	エンジン側部	熱によりマグネット磁気劣化 熱によるセンサへの影響懸念	ねじ固定箇所の設置 センサの熱対策（5.5に記載）
	減速機	振動加速度	軸受上部	曲面部が多い	接地面の平坦加工 （対策については本項末に記載）
	主ポンプ	振動変位	主軸露出部	設置箇所が狭い（作業しづらい、アーム設置箇所が限定される）	常設化（5.4に記載）
				マグネットアームが固定できない（非鉄）	主軸の無塗装品に換装
				主軸に塗装が施されたものがある	傷補修
メカニカルランアウトがある（主軸の傷が原因）				アプローチ（階段）仕様の見直し	
測定箇所へのアプローチ（階段）が狭く傾斜がきつい					
潤滑油	原動機	潤滑油分析	給油口またはレベルゲージ	油面が低い場合摂取できないがある	採油口の増設 （オンライン化の課題と対策について、5.6に記載）
	減速機	潤滑油分析	ラインフィルタ	給油口等の構造によりサンプリングチューブが挿入できない	採油口構造の改良 （オンライン化の課題と対策について、5.6に記載）
				採油箇所がない場合がある。写真のように場合によっては設備の一部を外さざるを得ないこともある。 	摂取用バルブの増設
				フィルター部採油場合、サンプリングに適正な油が不明	摂取用バルブの増設
内視鏡	主ポンプ（縦軸）	画像確認	ポンプ点検口	点検口がない場合がある	内視鏡用小窓の増設等 （5.2に記載）
				点検口が大きく、点検口蓋の脱着が困難	点検口蓋開閉の簡素化（ヒンジ仕様等）、小窓の増設 （メーカーでの対策例あり。4.3に記載）

表-4 AI診断に資する計測項目での計測に苦慮する事例

対象機器	センサ名	計測項目	計測により期待される効果	計測に苦慮する事例と対策
原動機 DE	A Eセンサ	弾性波	弾性波発生有無と頻度による内部損傷の早期把握	
	排気ガス組成計	排気ガス組成 (CO, CO <sub>2</sub> , No x 等)	燃焼状態による機関状態の把握	センサ投入が困難な設備構造が多い。 （対策について5.1に記載）
	3方向加速度計	DE本体振動加速度	振動増加による設備異常兆候の把握	設置箇所が平坦面でない場合がある （対策については本項末に記載）
	熱電対	排気ガス温度 （各気筒、過給器出入口）	燃焼状態による機関状態の把握	配管の取り回し等で設置ができない事例がある。 （対策について4.4に記載）
	回転計	エンジン回転数	計測開始トリガ用	
	オンライン鉄粉濃度計	潤滑油中铁粉濃度	内部摩耗兆候の早期把握	オンライン化の課題と対策について、5.6に記載
原動機 GT	3方向加速度計	GT燃焼器振動加速度	ガスタービンエンジンの異常兆候と状態の把握	熱によりマグネット磁気劣化 熱によるセンサへの影響懸念 （対策について5.5に記載）
	3方向加速度計	GT減速機振動加速度	歯車、軸受異常兆候と状態の把握	設置箇所が平坦面でない場合がある （対策については本項末に記載）
減速機	3方向加速度計	減速機本体振動加速度	歯車、軸受異常兆候と状態の把握	設置箇所が平坦面でない場合がある （対策については本項末に記載）
中間軸受	3方向加速度計	振動加速度	軸受異常兆候と状態の把握	設置箇所が平坦面でない場合がある （対策については本項末に記載）
主ポンプ	A Eセンサ	弾性波	弾性波発生有無と頻度による内部損傷の早期把握	
	3方向加速度計	ポンプ本体振動加速度	振動増加による設備異常兆候の把握	設置箇所が平坦面でない場合がある （対策については本項末に記載）
	回転計	ポンプ回転数	計測開始トリガ用	
	圧力計	吐出圧力	主ポンプの異常兆候（軸曲がり、インペラ摩耗等）の発見と状態の把握	
	渦電流変位計	主軸振動変位		常設時の課題と対策について5.4に記載

表-5 国土交通省管理の機械設備で現在利活用されている点検診断技術と計測に苦慮する事例

対象機器	計測項目	計測器	計測単位	計測時期	計測に苦慮する事例と対策
主ポンプ	軸振動変位	渦電流変位計(常設している場合に計測)	$\mu\text{m}(p-p)$	運転開始5分後以降の定常状態	常設時の課題と対策について5.4に記載
	振動(原動機、減速機含む)	ポータブル振動計	mm/s	運転開始5分後以降の定常状態	設置箇所が平坦でない場合がある(対策について4.4に記載)
主原動機 (ディーゼルエンジン)	デフレクション	ダイヤルゲージまたはデフレクションゲージ	1/100mm	運転前の機関停止時	
	過給器入口温度	機付温度計または温度センサからのゲージ表示 熱電対によるデジタル計測の事例あり	°C	運転前と運転中10分毎	熱電対の場合、配管の取り回し等で設置ができない事例がある。(対策について4.4に記載)
	潤滑油温度	機付温度計	°C	運転前と運転中10分毎	
	潤滑油圧	機付圧力計	MPa	運転開始5分後以降の定常状態で運転中10分毎	
	冷却水温(一次冷却水)	機付水温計	°C	運転前と運転中10分毎	
	各気筒排気温度	機付温度計(熱電対によるデジタル計測の事例あり)	°C	運転前と運転中10分毎	熱電対の場合、配管の取り回し等で設置ができない事例がある。(対策について4.4に記載)
	回転速度	非接触回転計	min <sup>-1</sup> (rpm)	運転開始5分後以降の定常状態	
主原動機 (ガスタービンエンジン)	始動時間・停止時間	ストップウォッチ	秒	機関始動時および停止時	
	始動時間・停止時間	ストップウォッチ	秒	ガスタービン始動時	
	停止時間	ストップウォッチ	秒	ガスタービン停止時	
	回転速度	操作盤の回転計	min <sup>-1</sup> (rpm)	運転開始5分後以降の定常状態	
	排気温度	操作盤の排気温度計	°C	始動(加速)中の最高温度と運転中10分毎の定常温度	
	潤滑油温度	機付温度計	°C	運転前と運転中10分毎	
	潤滑油圧	機付圧力計	MPa	始動(加速)中の最高温度と運転中10分毎の定常温度	
減速機	燃料消費量	燃料配管の流量計	l/h	運転開始5分後以降の定常状態	
	潤滑油温度	機付温度計	°C	運転前と運転中10分毎	
	軸受温度	温度計(常設または棒状温度計または非接触)または手	°C		

参考文献：「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル」(平成27年3月 国土交通省)



写真-1 配管干渉 写真-2 目盛面不備

また、点検では目盛りを点検員が読むので、点検員の癖が出る可能性がある。特に複数人で手分けする場合や、点検ごとに点検員が変わる場合は状態監視データとしては統一性に欠けるので注意しなければならない。

現在では、デジタル式の温度計や表-4で示したようにデータ収録可能な熱電対の採用例もある。表-3、表-4で示した各気筒温度計測、過給器入口温度計測については、別の研究で標準の棒温度計に変えて熱電対温度センサによるデータ計測を実施した例がある。

なお、この方法は確実な計測が可能だが、点検業者へのヒアリングでは、経年によりセンサにすず等が付着すると計測精度が落ちるので定期的な清掃が必要、との意見もあげられており、活用の際は注意が必要である。

表-3、表-4、表-5に記した、振動加速度計測における「センサ設置場所平坦でない場合がある」に関する対応策についてだが、マグネットによるセンサの確実な固定と塗膜による減衰の影響を受けないように

するため、地金のところで計測することが望ましい。

また、国土交通省で発出している「状態監視ガイドライン」では、傾向管理を行うため、同一の箇所、計測機器で継続的に計測を行うことが望ましい、とされており、設備管理者は各設備に、写真-3に示すように計測点のマーキングをしている例が見られる。

しかしメーカーでは、新設時の工場出荷時に振動計測を行っていることから、写真-4に示す製造時点での振動計測点を明示しておく(ナンバリングもする)ことや、センサが設置しやすいように計測点を平滑にしておく(塗装もしない)ことが望ましいと考える。

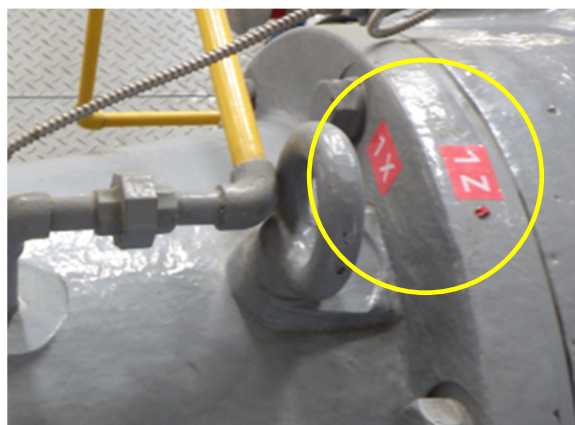


写真-3 計測地点のマーキング



写真-4 計測地点のマーキング

4.1.3 ポンプメーカーの技術開発実態調査

各ポンプメーカーでは、点検診断の容易なポンプ構造の検討が進んでおり、多様な技術がすでに商品化されている。その調査結果を表-6に示す。

調査結果からは、主ポンプについては、民間の技術開発が進んでいることがわかる。しかしほとんどがポンプ新設時のみ導入可能であり、既存設備への適用が困難とされていることから、今後は既存設備へ適用できる技術の開発に期待したい。また、土木研究所の今後の検討は、排水機場については主ポンプ以外について進めていくこととした。

表-6 ポンプメーカーの技術開発事例

メーカー	商品名	概要
(株)石垣	水中軸受診断システム EGウォッチャー	主ポンプの水中軸受部に設置した変位センサにより、水中軸受の摩耗量を自動的に測定し、ポンプの健全度を判定する。
(株)在原製作所	泵々点検ポンプ	主ポンプの水中軸受を羽根車下方のベルマウスに設けることで、ポンプを据え付けたまま水槽内からの点検・交換を可能とした。
クボタ機工(株)	GENSO	既設主ポンプの点検窓枠に設置する、内視鏡カメラ投入口
クボタ機工(株)	スリッパライナー-229	吸込ラインにスリッパラインを埋め込み、摩耗・変化により肉厚が任意の値まで減ってくればスリッパサインが出現する技術。
(株)電業社機械製作所	羽根厚み&ギャップ計測システム	主ポンプのインベラケースに設置されたギャップセンサにより、ケーシングと羽根車のギャップならびに羽根車の厚さを計測する。
(株)西島製作所	セラミックベアドクター	主ポンプのポンプ主軸と水中軸受(セラミック軸受)との隙間に圧縮空気を送り込み、差圧および空気流量から水中軸受の異常や摩耗量を判定する。
(株)西島製作所	TR-COM	IoTを活用してポンプやモータ、ファン、コンプレッサ等、様々な回転機械の劣化や故障状態を管理するための状態監視システム。

4.1.4 点検で苦慮している事例の調査(排水機場)

実際の設備点検にあたっては、本来点検しなけれなければならない箇所でも、設備構造上それが困難あるいは事実上不可能な事例も散見される。これらの解消にあたっては、その事例の調査が必要である。そこで、設備管理者や実際に点検業務に就いている点検技術者

に、これらの事例についてのヒアリング調査を行った。

また、土木研究所においても点検診断・維持管理に苦慮することが推定される設備構造について独自に調査した。その結果を表-7に示す。

これらについては、技術的難易度は低いものがほとんどであり、容易に対策が可能であるが、「機器配置」に分類したものは、設備新設・増設時に、点検等に支障が無いかが考慮したうえで配置を決める必要がある。

表-7 点検苦慮等事例調査結果

分類	内容	写真	備考
主ポンプ	ポンプのベント管へ吐出弁の間に、点検扉があげば良い(標準化してほしい)。特に大型のポンプだと、真空状態でも安全な点検が実施できる点検扉が実用化されているが、安全な点検を行うためには、安全な点検を行うための工夫が必要(点検扉が壊れていることもある)。		
ガスタービン	ガスタービンパッケージ上の吸気ファン(右写真)が奥所にあり点検しにくい。また、故障時発生できる騒音レベルが高いため、防音対策(はしご等の必要性あり)。排気ファンも同様。目視で状態を見ることもできない。ようとうと見ると見えない状態を維持する必要がある。点検ができれば点検できるのだが(点検業者談)。		
機器配置(操作室)	操作室の奥側に設備があるため、運転時点検作業がしにくい。また、運転時点検を行う場合は、分析用サンプルの採取がしにくい(右写真)。		
機器配置(潤滑油系統)	減速機潤滑油ターボが、減速機基台に吊り下げられる形でポンプ室内に設置されている。油を多く含む状態でターボが回転し、潤滑油を噴霧しているが、ポンプ室内には潤滑油ターボを外さなければならず、整備性の面では好ましくない。		
機器配置(本体)	ある排水機場のポンプ室内の様子だが、点検扉が設置されているが点検時の点検扉を開く際は黄色の部分に寄り込む必要がある。その際は点検扉が壊れる可能性がある。右写真(左の点検扉)に示すように点検扉が多く寄り込みにくい。		増設のポンプの設置時に、点検扉の配置を考慮する必要がある。
冷却水系統	二次冷却水系統がゴミ等で詰まりやすい事例があったので、逆洗バルブを取り付けた。(その設備が壊れた)	NO PHOTO	対策について別に記載
排気機	排気機が奥側にある。天井にクレーンはあるが排気機とのクリアランスが大きいので整備に苦慮している		
	排気機の前に負荷レートを投入できるよになっているが、ボタ土がたまると、下り音があがらなくなる。その場合は排水水を呼びなればならない		
上屋	ポンプ設備設置後に建物を建設したが、屋根の設置ができないので、ポンプ設備を工場に搬出することが難しい場合がある。搬出にもあるが、設備の劣化や故障の原因。搬出を考慮する。		

4.1.5 点検で苦慮している事例の調査(排水機場以外)

河川水門設備に関しても排水機場と同様に、点検技術者を対象としたヒアリングを実施した。また、ダム水門設備については、現地調査と管理者に対するヒアリングを行った。その結果について、ダム機械設備については表-8に、河川水門設備については、装置別は表-9、年代別は表-10に示す。

表-8の調査対象のダムは建設後48年(調査時点)を経過している。表-9の番号2と表-10の番号4以降から、年代の古い設備は維持管理性が意識されていないことがわかる。

特に表-10の番号6以降は機器配置の問題であり、新設時あるいは改造時には、BIM/CIMの活用により維持管理性の確認を行うことが有効と見られる。

表-8 ダム機械設備での事例

番号	分類	内容	写真
1	コンジットゲート	油圧ユニット内に錆害のため水が入る。防塵カバーを入れても取り除けないので、換気等を行う必要ありと考えている。	
2	ハウエルバンパーバルブ	ベベルギアの向きが悪く（上か下にあるべきが横にある）、現場では潤滑油交換が出来ない。潤滑油交換は工機の日時に行っている。前回は114。	
3	取水ゲート	声響りがすべて直撃のため、ローラの点検が出来ない。	

表-9 水門点検業者とのヒアリング結果（装置別）

番号	部位	意見	構造・対策等
1	主ローラ	ローラボックス構造(右図)のローラゲートはローラが露出していないので状況が目視が困難で、点検も困難。 ローラが露出している場合は、ローラが露出している状態を確認し、点検が可能になる。実際にゲートが止まった際に、油圧回路が複雑なものなのかわからない原因が判断し難い。	大型ゲート等で採用されている、各主ローラが同一軸に接続されているため、ローラが露出している状態を確認し、点検が可能になる。実際にゲートが止まった際に、油圧回路が複雑なものなのかわからない原因が判断し難い。
2		動きが多いゲートで、ローラチェーンは点検が難しい。 チェーンは定期的な点検が必要だが、点検が難しいのが困難。	
3		主ローラの点検がしづらい。専用の器具が必要になる場合がある。	
4	シープボックス	シープボックス内のシープとワイヤロープの接続の目視確認・点検が困難な事例がある。このため、ワイヤロープ真直の確認ができず、ワイヤロープが破断した事例がある。	詳細は本項末に記述
5	圧巻装置	圧巻装置はメーカーごとに特長がある。現在自社製品扱いだが仕様は異なる。10年近く前に併用した)の製品があるが、構造設計が現在では設計思想が不明なので点検しにくい。他社製品も高価なため手を出しにくい。	
6		油圧パイロットチェックバルブのシール性が悪いとゲートが落ちる。最近のソフトウェアで油圧を完全に止めているが(ソフトシールを採用した)ユニットに故障する可能性がある。油圧が完全に止まらないうえで油圧上のトラブルが発生する(油圧上昇による膨張で圧が上がる)との話も聞かされた。油圧が上がりすぎてバルブが閉じない、など。	
7	油圧系統	油圧系統の潤滑管理、油漏れは原因の特定しにくいので、検知しても再発することもある。	油圧の点検箇所(油圧検出器)を導入して検知率を高め、検知した場合は、その箇所を点検してはどうか
8		油圧バルブの故障が多い	
9		鋼材の腐食の油圧シリンダ(コンクリートの中に埋まっている)のOリングは、抜くのに非常に困難かつ大変高価だ。(もうやりたくない) Oリングが壊れたら修理はできない。費用的にも乗り切れないと思う。Oリングの交換は非常に難しい。Oリングの交換は非常に難しい。Oリングの交換は非常に難しい。	
10		電気系統、配線も点検が多い。	電気系統は監視ができるので、これを重視的に行うことが重要だと思われる。配線も点検が必要だと思われる。配線も点検が必要だと思われる。
11	電気系統	鋼のタンクは近年錆びてきているため、交換から優先して交換する確率が高くなる。ただし、この装置の寿命は6~7年なので、定期的な交換が必要。 (鋼材は数年前10000円程度。手動品として持つとは、コンクリートが壊れてから修理の費用は年間10000円程度)	
12		特に古いものが多い。メーカーで製造しているものも、同一メーカーであってもサイズが合わないことがある(鋼材の強度を持ってしま)。メーカーを新しくしても古い装置なので他の部分も壊れる、という懸念も感じている。	
13		他社のOリングの不具合は対応が困難。	
14		Oリングが破損した場合はOリングを交換する必要がある。	
15	停止装置	構造上点検できず点検できない装置が多い	
16	構造	上層の構造が、開閉装置更新を考慮しておらず、更新にあたって容易な事例がある。 上層の構造は、開閉装置更新を考慮しておらず、更新にあたって容易な事例がある。 上層の構造は、開閉装置更新を考慮しておらず、更新にあたって容易な事例がある。	

表-10 水門点検業者とのヒアリング結果（年代別）

番号	項目	意見	対策等
1	止水している設備	止水している。水圧のかかっているゲート、角質のない止水できない構造のゲートなどは故障時の対応が困難。	
2		平時全開で運用する設備は開閉が容易ではなく、全開位置まで移動させるために予備ゲートの導入が必要になる場合があり大がかりな作業となる。	
3	古い設備(メーカー製造)	製造してしまっメーカーが販売した部品のアフターメンテ、運用して、部品交換が困難。 メーカーが製造しているため、動作がうまくいかず、管理側の対応が難しい。メーカーが製造しているため、動作がうまくいかず、管理側の対応が難しい。	
4	古い設備(メーカー製造)	古い設備は設計思想を考慮して設計した設備が重要。	
5	古い設備(メーカー製造)	設計思想は当時の設計思想がわからず点検に困難。	
6		維持管理について、新設計は構造上変更されていても、改造による増設設備が、元あった設備の故障を招く例(点検スペースを確保しない)がある。	
7		点検履歴と点検が合っていない。開閉との不一致があり、作業員が確認できていない事例がある。	
8		点検スペース確保、点検履歴の管理が難しい(メーカー以外の業者が点検した場合は)。	
9	古い設備(改造で作りもの)	改造履歴と点検が合っていない。開閉との不一致があり、作業員が確認できていない事例がある。	
10		開閉の時は大きな点検設備があるが、ゲートを開閉装置を投入、設置した後に点検する場合は、その後の点検設備で点検できない。点検できない場合もある。	
11		水門・扉の操作室が狭く点検困難(特に機器を後で増設した場合に点検が難しい)という懸念も感じている。	

表-9の番号4、表-10の番号3からは、メーカー撤退による必要情報の失伝を示している。維持管理に必要な情報は、メーカーに頼らず管理者側でも保持する重要性がここから示されている。

以上の調査結果については、容易に対策が可能なものもある。対策案が考えられるものについては、各表に付記したとおりである。

## 4.2 点検しやすい構造の実証試験

前項の調査結果を基に、設備の点検診断が容易に行える設備構造についての検討を行い、いくつかの項目について実証試験を実施したので報告する。

### 4.2.1 排気ガス組成計測のセンサ投入抗について

原動機の状態の把握のため、いくつかの機場では排気ガスの組成計測を実施しているが計測当初は、排気管にセンサ投入孔がなく、竿などを利用して排水機場屋上に設置されている排気管にセンサを投入して計測を行っていた(写真-5)。

しかし、排気管の位置が屋上から距離がある他、排気管が集合管となっており他の原動機と共用されているなど、計測できない機場も多く存在するが、煤煙測定は現在も年1回の測定が必要なことから、機場内の排気管にセンサ投入口を設けることが望ましいと考える。

そこで、実際の排水機場ポンプ設備を改造して実証実験を行った。表-11に対象とした機器の諸元を、写真-6に投入口設置状況を示す。



写真-5 計測地点のマーキング

表-11 対象機器諸元

対象設備	K排水機場 1号ポンプ主原動機
形式	ディーゼル機関 V型12気筒
定格出力	736kW (1,000PS)
定格回転数	900rpm

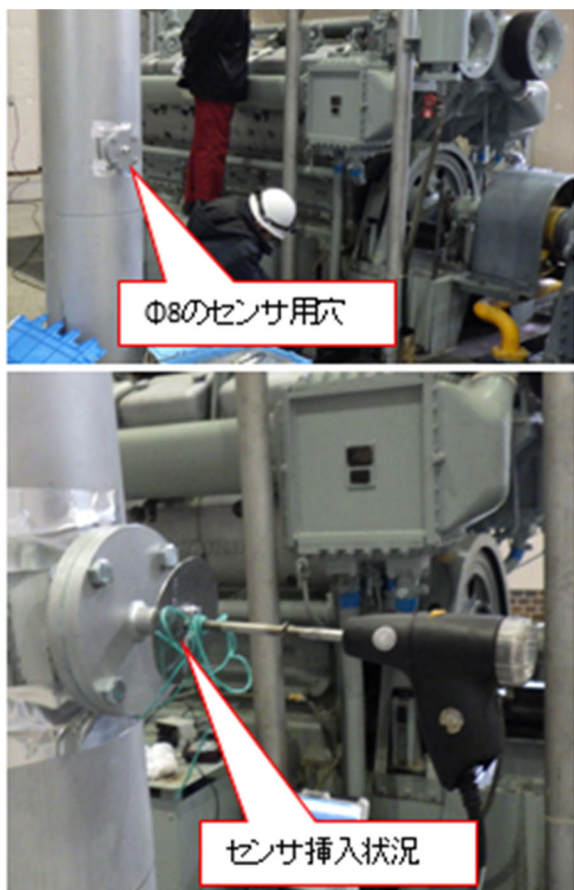


写真-6 排気管へのセンサ投入口設置状況

この投入孔による排気ガス計測試験については、下記2点に着目し、センサ付属の円錐状金具を用いることで、排気漏れを低減できることが確認できた(図-1)。

- ・計測時の安全性(計測時の排気ガス漏れはないか)
- ・的確なデータが得られるか

また、図-2に示す計測結果からは、NO<sub>x</sub>濃度が低い傾向既往がみられるが、計測結果は従来の計測手法とおおむね似た傾向であり、的確な計測が可能であることがわかった。

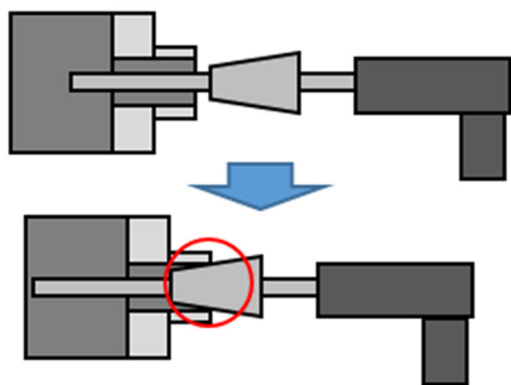


図-1 排気ガス計測概要図

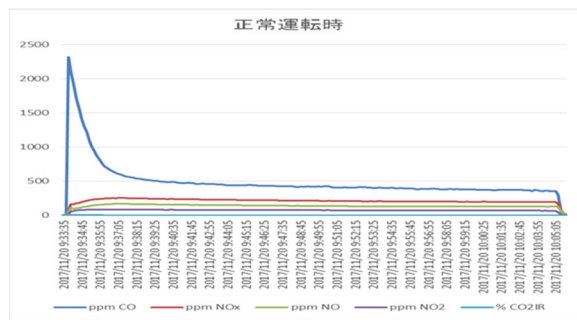


図-2 排気ガス計測結果

#### 4.2.2 過給機内視鏡投入試験

ディーゼル原動機の故障事例は構成機器別に見ると、過給器の故障が多く、修理に費用、時間がかかることから、過給器の点検診断技術に関する現場ニーズは高いと考える。

過給器の構造概要を図-3に示すが、船用機関の過給器では、吸気室の油堆積物の影響やタービン、タービンノズル等への不完全燃焼発生物の付着が故障原因としてあげられている。その為、これら付着物の目視確認ができれば故障を未然に防止できるものと考え

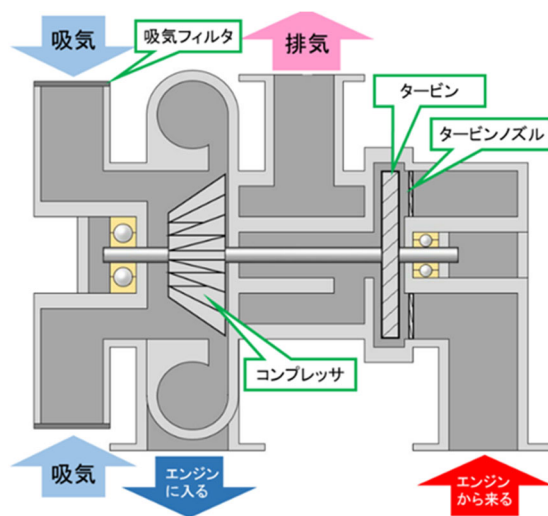


図-3 過給器構造概要図

一般の工場プラントやその他の機械設備では、工業用内視鏡を用いた点検診断が行われている例があり、土木機械設備においても、排水機場ポンプ設備の主ポンプ内部の摩耗状況の確認やガスタービンエンジンの内部状況の調査に工業用内視鏡が用いられている。そこで、ディーゼル機関の過給器にもこれを適用し、油堆積物や不完全燃焼発生物の目視確認ができれば、より高度な点検診断が可能になる。これまで、民間で



表-12 試験対象機器諸元

実施年度	試験目的	機場名	対象機器	機関形式	出力	定格回転数	設備状態	備考
初年度	内視鏡投入手法の検討を主目的	K排水機場	旧1号主原動機	V型12気筒	736kW	900rpm	更新のため撤去	
			2号主原動機	V型12気筒	736kW	900rpm	供用中	
			新1号主原動機	V型12気筒	865kW	1500rpm	供用中	内視鏡投入は検討のみ
2年目	内視鏡による診断の可否の確認が主目的	B排水機場	1号主原動機	直列6気筒	272kW	1000rpm	更新のため撤去	
			2号主原動機	直列6気筒	268kW	1800rpm	供用中	

船用機関等の実績はあるが、排水機場ポンプ設備では実績がない為、既存の設備で内視鏡を投入し、診断に活用できる画像の取得が可能であるかの実証試験を行った。

### (1) 試験方法 (初年度)

試験は、メーカーや規模が異なる複数のディーゼルエンジンを対象に、2年間で実施した。過給器内部へ内視鏡を適切に投入できる箇所の確認（なればどのような構造であれば投入できるかの検討）を行うことが必要である。また、投入した際の内部のタービン等への接触・損傷のリスクがあるため安全性の確認も必要である。

そこで初年度は、内視鏡投入手法の検討を主目的とし、同一形式の原動機が2台あり、1台（1号原動機）は更新のため撤去済み、もう1台（2号原動機）は現役で供用中のK排水機場で試験を実施した。

2年目は、内視鏡による診断の可否の確認を主目的として試験を実施した。こちらについても、投入が容易な撤去済みの原動機と、実際に供用している原動機の2パターンで実施した。

試験対象とした機器の諸元を表-12に示す。

### (2) 試験結果 (初年度)

初年度の撤去済みの1号原動機での試験結果からは、以下のことが確認できた。

- ・当初内視鏡投入予定箇所であった潤滑油のドレンボルトは、過給機内部まで貫通しておらず、撮影ができなかった。
- ・排気管の接続箇所から内視鏡を投入したところ、問題なく撮影できることが分かった。内視鏡投入状況を写真-7に、内部の撮影画像を写真-8に示す。



写真-7 内視鏡投入状況 (排気管接続部)



写真-8 内部撮影画像

写真-8からは、内部の様子が鮮明に撮影できることが確認でき、タービンブレードに油汚れが付着している様子も確認できた。

現在供用中の2号原動機での試験結果では排気管の貫通ボルトを外して内視鏡の投入を試みた。投入状況を写真-9に、撮影画像を写真-10に示す。1号機の場合と同様に内部の様子を確認することがある程度鮮明に確認することが出来た。

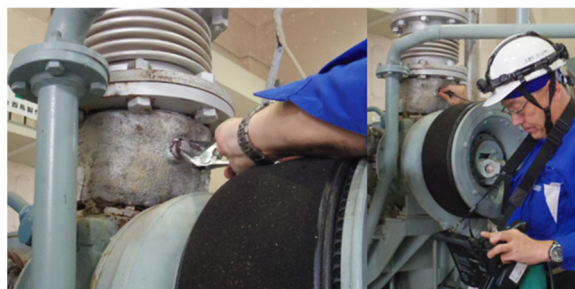


写真-9 内視鏡投入状況 (初年度)

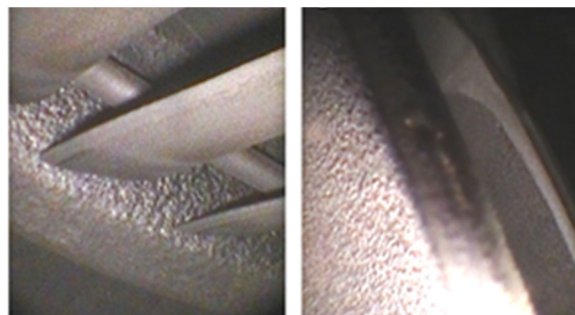


写真-10 内部撮影映像

(3) 試験方法 (2年目)

2年目の試験では、初年度得られた知見に基づき排気側(タービン側)は、なるべく過給器に近い側にある貫通孔(排気温度計取付用ボルト)から内視鏡投入し、吸気側(コンプレッサ側)はハウジングを外して投入した。

また、初年度は土研職員が内視鏡投入を行ったが、2年目はメーカーに内視鏡投入を依頼し、その後、結果に関してヒアリングを実施した。内視鏡投入状況を写真-11に示す。



写真-11 内視鏡投入状況 (2年目)

(4) 試験結果 (2年目)

表-13に示す試験結果から、内視鏡による点検診断は有効性が高いと判断できる。さらにアンケート結果からも分解点検に比べ、点検日数、コスト的に有利であるという意見があった。内視鏡投入口について、過給器本体に加工をすることで死角箇所等の解消は可能と思われるが、過給器のトラブルを誘発しかねないことや、内視鏡は過給器診断の1要素であることの2点から、本体の加工は得策ではないと考える。

ただし、可能な範囲で死角解消ならびに投入のしやすさを目的に、排気管の過給器に近い位置に投入口を設けることは有効であるため、それに適した箇所を検討する必要がある。

表-13 試験対象機器諸元

		1号原動機	2号原動機
診断箇所	吸気側	問題なく投入できた	問題なく投入できた
	タービン庫室(センターケース)	排気入口側から投入。問題なく投入できた	空冷式のため、内視鏡投入ができない構造となっている
診断結果(メーカーの見解)	排気側	排気入口側から投入。複雑に曲がる形状のため、タービノズルの観察はできなかった	排気出口側から投入。見える範囲が限られており、観察できなかった箇所がある
	吸気側	コンプレッサは汚れが少なくきれい。翼に異物吸い込みによると思われる打痕があったが問題となる状態ではなく健全	コンプレッサは汚れが少なくきれい。損傷等は無い
タービン庫室(センターケース)	タービン庫室(センターケース)	室内、タービンともに湿りカーボンが付着し汚れが多い。損傷等は無い	(投入できなかったため無し)
	排気側	タービノズルについては上述の通り観察不可。ケース内は湿りカーボンが多量に付着	タービン翼に損傷等は無い。カーボンも乾燥しており良好な燃焼状態と推定

4.2.3 原動機シリンダ内視鏡投入試験

(1) 試験方法

シリンダ内部は、本来内視鏡を投入できる構造とはなっていないので、整備中のS排水機場では、あらかじめ、各気筒のシリンダヘッド上に取り付けられている始動弁(エンジン始動のため、ピストンを動かすための圧縮空気をシリンダ内に送り込む部品)を外し、そこから内視鏡を投入した。

また、B排水機場では、過給器の内視鏡試験で対象とした1号主原動機が更新で撤去済みのため、始動弁の脱着の難易度の調査を兼ねて、土研職員が始動弁の脱着を行うことが可能であった。

本試験では投入のしやすさと診断の可否の検証が目的のため、対象シリンダを絞り込んで実施した。対象箇所を表-14に示す。また、ディーゼル機関の全景を写真-12に、内視鏡投入箇所を写真-13に示す。

表-14 内視鏡投入箇所

機場名	対象機器	機関形式	出力	定格回転数	設備状態	内視鏡投入箇所	撮影対象	備考
B排水機場	1号主原動機	直列6気筒	272kW	1000rpm	更新のため撤去	始動弁を外して投入(土研職員が実施)	6番シリンダ	過給器内視鏡試験と同一の機関
	S排水機場	1号主原動機	直列6気筒	73kW	900rpm	機場内で整備中	始動弁を外して投入(整備業者が実施)	1番、3番、6番シリンダ
	2号主原動機	直列6気筒	73kW	900rpm	機場内で整備中	始動弁を外して投入(整備業者が実施)	1番、3番、6番シリンダ	



写真-12 S排水機場原動機全景



写真-13 内視鏡投入箇所

(2) 試験結果

内視鏡によるシリンダ内の観察はおおむね良好に行えることが分かった。特にカーボンの付着・堆積は、エンジントラブルの原因の一つであり、これを把握できたことは内視鏡診断の有効性を示すことができた。なお、カーボンの付着は、低負荷運転が原因であることが多い。また、シリンダライナのホーニング加工痕が残っていることは運転時間が少なく摩擦が軽微であることを示しており、エンジンの状態を把握する点においても有効である。内視鏡投入口については、エンジンの構造上、専用の投入口を設けることは難しく、始動弁などシリンダ内に通じている部品の脱着が必要になる。部品脱着の時間はそれほどかからないが、脱着する際には新品ガスケットへの交換を要すること、正常な始動系配管を脱着するのはいじり壊しによる故障を招く可能性があることなど注意が必要である。

試験結果の一例として、S 排水機場の結果を表-15 に示す。

表-15 S 排水機場内視鏡診断結果

撮影部位	内視鏡撮影画像	所見
1番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着（左写真。こすれた痕があるがこれは内視鏡ファイバの接触によるもの）。</li> <li>●シリンダブロックとライナの境目に摩耗痕と思われる形状あり（右写真赤丸）。</li> <li>●ピストンが上死点近くのため、ブロックとライナの間が見えるなど、シリンダライナ等の観察が困難であった。</li> </ul>
3番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン全景を確認することができた（左写真）。これはピストンが下死点近くに位置しているためである。</li> <li>●ピストン近くに寄ることによって、カーボンの堆積が確認できた（右写真）。</li> </ul>
6番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●シリンダライナに摩耗痕を確認できた（左写真）。</li> <li>●周方向に段差が発生している（右写真）。</li> </ul>
6番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着（写真）。</li> <li>●その他の異常は認められない。</li> <li>●1番シリンダと同様、ピストンが上死点近くのため、シリンダライナ等の観察が困難であった。</li> </ul>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>●空気管（エンジン始動時にピストンを動かす空気をエンジン内に送り込むためのもの）内も観察可能であった。</li> <li>●特に異常は認められない。</li> </ul>

4.2.4 ディーゼル機関過給機の停止所要時間調査

過給器停止所要時間は、現時点では点検整備要領等では必須の計測項目とはなっていないが、正常値より短いと内部の摩擦抵抗が大きくなっているなど過給器の健全性を量るうえで有用な項目であり、「河川ポンプ設備状態監視ガイドライン（平成30年4月 国土

交通省総合政策局）」に、その計測方法が記載されている。

しかし、その計測方法は、ロータ軸が露出していればその動作を目視、ロータ軸が見えない場合には停止のタイミングを音で判断する、というものである。過給器の多くはロータ軸が露出しておらず、音の聞き取りは熟練を要する。そこで、計測機器を用いた試験を行うこととした。

試験対象設備は、前項の内視鏡試験を実施した K 排水機場とした。

(1) 試験方法

左右の過給器ならびに原動機基部の左右に加速度センサを取り付けて振動を計測し、機関運転直前と停止直前・直後の振動加速度 RMS、振動時刻歴波形及び周波数分布の比較を行った。

計測機器の仕様等を表-16 に、センサ設置位置を写真-17 に示す。

表-16 計測機器仕様

機器類名	形式
圧電式加速度センサ	SA12ZSC-T1
データロガ	RION DA-40
振動解析ソフトウェア	DADisp Pro ver. 6.7

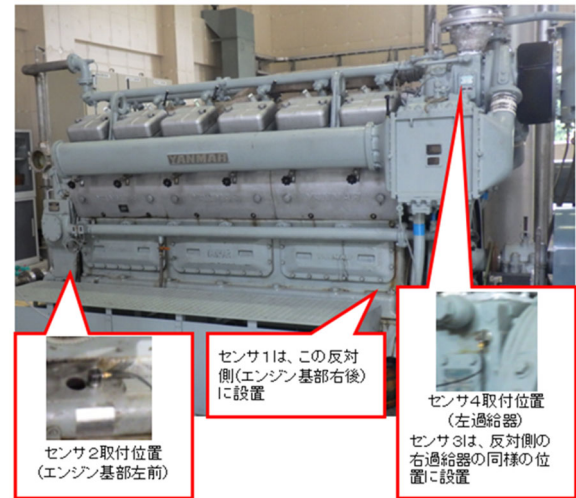


写真-17 加速度センサ取付位置

(2) 試験結果

表-17 に振動加速度 RMS、図-4 に機関停止直前直後の FFT 解析結果を示す。

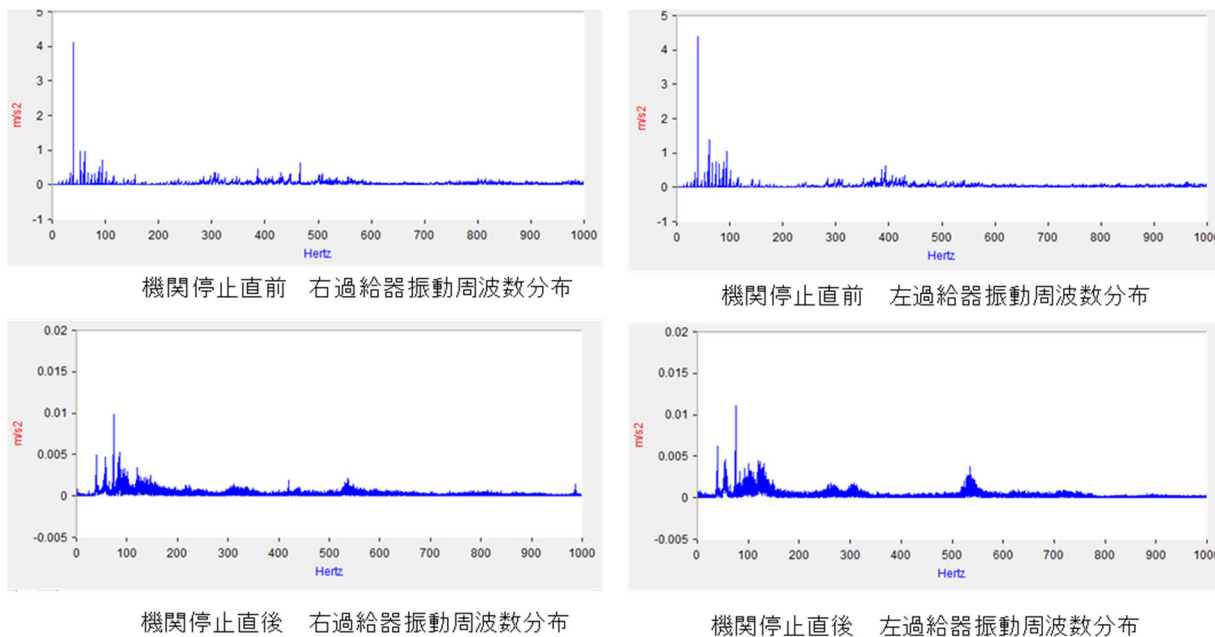


図-4 過給機停止時FFT解析結果

表-17 振動加速度RMS値(m/s<sup>2</sup>)

	運転直前	停止直前	停止直後
センサ1(エンジン基部右後)	0.34	12.25	0.065
センサ2(エンジン基部左前)	0.2	21.25	0.1
センサ3(右過給器)	0.26	40.04	0.43
センサ4(左過給器)	0.08	29.19	0.45

周波数分布では、過給器の定格回転数である39000rpm=650Hz付近の振動は停止前後とも確認できなかった。

最もそれに近い振動周波数は、右が466Hz付近、左が393Hz付近で見られた。これは停止直後でも見られるが値としては小さく、過給器による振動かは不明。また、エンジンが停止しエンジン基部の振動が0に近くなっても、過給器の振動はわずかながら高いことや運転直前より運転停止直後の振動が高いなど、今回の調査では、過給器停止時間を明確に把握できる結果とはならなかった。今後取り組む際には、センサ位置の再考や、集音マイク等の活用を検討するなど課題として抽出された。

#### 4.2.5 主ポンプ軸変位計測センサ固定方法に関する検討

センサ固定金具は、主ポンプの形状が千差万別のため、それに合わせた形状、場合によっては現地での現物合わせになることがある。今年度実際に取り付けた4例について、取付対象としたポンプ諸元を表-18に、設置状況を写真-18、写真-19、写真-20、

写真-21に示す。

表-18 取付対象ポンプ諸元

機場名	形式	諸元等			金具形状
		号機	主軸回転数	軸封部	
S排水機場	立軸斜流	1号機	146rpm	グランドバックキン	1号と2号は異なる
		2号機	146rpm	メカニカルシール	
Y排水機場	立軸斜流	1号機	230rpm	メカニカルシール	1号と2号は同じ
		2号機	230rpm		
T排水機場	横軸斜流	2号機	120rpm	グランドバックキン	1号と2号は同じ
		3号機	120rpm	無注水軸封装置	



写真-18 S排水機場1号主ポンプ

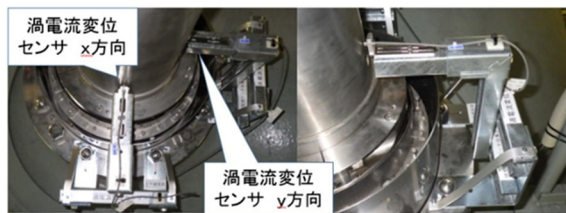


写真-19 S排水機場2号主ポンプ

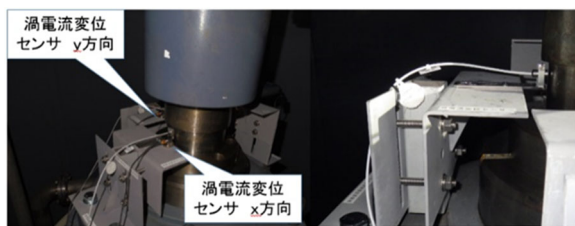


写真-20 Y排水機場1号主ポンプ



写真-21 Y排水機場1号主ポンプ

S排水機場は、基本的には同型同仕様のポンプではあるが、金具取付部である主ポンプ軸封部が1号機はグランドパッキンだが2号機はメカニカルシールに改造されているため形状が異なり、そのため取付金具の形状も異なるものとなった。いずれの場合も、固定部とセンサ部までの距離が離れていることから、振動やたわみによる計測データへの影響が懸念された。実際、取付金具を手で軽くたたくと金具が振動し、センサ部のたわみが見られた。そのためL型金具の振動を抑制するように斜めのステーを取り付けた。

Y排水機場では、たわみに対してS排水機場より有利な構造としたため、特段の改良は不要であった。

なお、これらの作業を行った作業員からは、金具取り付け位置の選定や設置に苦慮した、との意見が聞かれた。横軸ポンプであるT排水機場では、センサ固定金具の取付場所が限られるため、1つの固定金具でx方向、y方向2つのセンサが取り付けられる方式とした。また、横軸ポンプでは、主軸を覆うケーシング部に金具を固定するが、機場によって主軸の太さや主軸とケーシングとの離れが違うため、センサ固定金具は、分割できる方式としてセンサ取付部や分割部にスリット加工を行うことで、主軸の太さや主軸とケーシングの離れにある程度対応できるようにした。

以上の経験から、渦電流変位計センサの固定の際には以下のことに留意するという教訓が得られた。

- ・可能な限り、センサ位置と主ポンプへの取付位置の長さを短くする
- ・振動・たわみが発生しない形状とする

- ・主ポンプ側も、主軸近傍に渦電流変位計センサ取付金具を設置しやすい構造にする

従来のマグネットスタンドでの軸振動変位計測データの周波数分布では、スタンドの固有振動数と思われる50Hz前後の振動が発生している場合が見られる。これは取付金具がポンプ運転時に発生する各種の振動により加振されるためであり、センサを固定した場合も取付金具の固有振動数の振動が発生する可能性がある。そこで、各排水機場において、取付金具の固有振動数の調査のため、インパルスハンマによる打撃時の取り付け架台の振動周波数を測定した。代表例として、Y排水機場での測定について、計測方法を表-19に示す。

表-19 取付対象ポンプ諸元

サンプリングレート	256Hz	
打撃方向	取付金具に対し上からと横からの2方向	
振動計測方向	x方向: ポンプ主軸方向	
	y方向: ポンプ主軸と直交方向	
	z方向: 上下方向	

この結果から、Y排水機場のセンサ取付金具の固有振動数は100Hz前後ということがわかった。

また、他の対象ポンプの結果を含めた固有振動数の測定結果を表-20に示す。この結果が、実際の測定時のどのような影響を与えるかは、今後の実運転時の軸振動変位計測結果を含めて検討する必要があるが、少なくともこの振動周波数が発生している場合は、金具の振動を拾っており診断の際は除外して考えることに留意する。同様に、今後渦電流変位計センサを主ポンプに設置する際には、金具の固有振動数をあらかじめ計測しておくことが望ましいと考える。

表-20 固有振動数計測結果

機場名	号機	固有振動数	
		X方向	Y方向
Y排水機場	1号機	102Hz近傍	114Hz近傍
	2号機	93Hz近傍	114Hz近傍
S排水機場	1号機	56Hz近傍	45Hz近傍
	2号機	29Hz近傍	45Hz近傍
T排水機場	2号機	78Hz近傍	
	3号機	82Hz近傍	

表-21 水抜き手法検討結果

	排水バルブの追加	真空乾燥	エアブロー
概要	・滞留水の推定箇所排水バルブを設置する。 ・排水箇所を増やし、滞留水を排水する。	・真空ポンプを使用し、管内の真空状態にする。 ・減圧状態を維持することで、水分の除去が可能である。	・空気の送り込みにより水分を飛ばすことができる。管内の乾燥が期待される。
効果	滞留水の排水能力は向上するが、完全排水は困難であると考えられる。	管内を減圧状態で維持し、管内を乾燥させる。滞留水の除去には効果があると考えられるがバルブ内の滞留水の除去は困難である。	水分を飛ばすことで管内の乾燥させる。そのため、滞留水の除去には効果があると考えられる。
実績	多くの事例が確認される。	機場等での実績は確認されていない。	機場等での実績は確認されていない。
費用(傾向)	バルブの増設はあるもの大規模な施工はない。	真空ポンプとの接合が必要となるため、大規模な施工が必要になる。	始動用空気を使用するため、大規模な施工が必要となる。
まとめ	上記の比較結果から、排水バルブの追加が有意である。		

4.2.6 積雪寒冷地における設備凍結に関する検討

積雪寒冷地に設置されている横軸ポンプは、冬期間の凍結対策として、毎年、非出水期になると冷却系統の水抜き作業を実施している。しかし、近年、水抜き作業を実施しても冷却系統の凍結破損が報告されている。そこで、現状の水抜き作業を調査し、凍結破損の対策について検討した結果を以下に示す。

(1) 水抜き作業の現状と問題点

現在の水抜き作業は、低い位置に設置されたバルブなどから順次排水し、高い位置の配管に滞留する冷却水の有無を確認しながら行われている。代表的な手順については以下のとおりである。

- ①制水バルブの開放による膨張タンクからの水抜き
- ②冷却水弁の開放による水抜き
- ③各弁開放による主ポンプの水抜き
- ④周辺設置バルブの開放による二次冷却水の水抜き
- ⑤周辺設置バルブの開放による真空ポンプの水抜き
- ⑥配管等の水抜き

現状における作業の問題点と破損実態については、以下のとおりである。

- ①ポンプ周りの小配管バルブの開放による水抜き作業を実施しているが、弁体の残水凍結の影響により弁体下部の破損が発生。
- ②小配管に異物の影響とみられる詰まりが発生し、残水凍結による配管の破損が発生。

横軸ポンプにおいて、小配管やバルブに破損事例が見られ凍結対策が重要であることがわかった。

(2) 凍結対策の検討

凍結対策としては、滞留水の推定箇所から滞留水を排水し乾燥空間にする必要がある。そのため、滞留水を排水する手法について検討を行った。検討結果を表-21に示す。比較結果から最も安価で効果的であると考えられる排水バルブの追加をいくつかの弁に対して実施したので、その結果を図-5、写真-22、写真-23に示す。

仕切弁

ボール弁

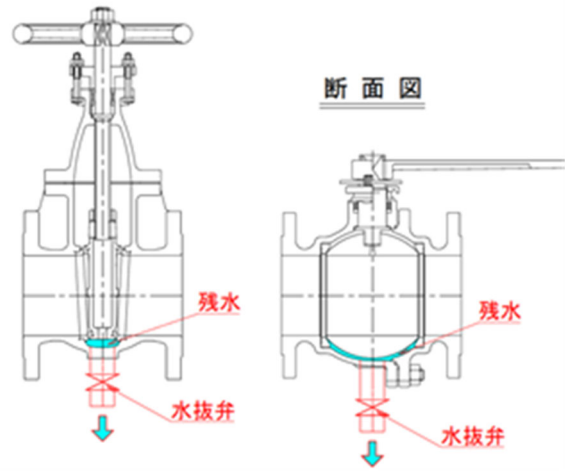


図-5 排水バルブ追加

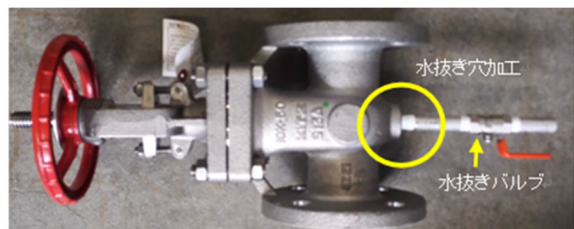


写真-22 水抜き加工済み仕切弁



写真-23 水抜き加工済みボール弁

水抜き加工を施したバルブの強度を確認するため、屋外にて、バルブに簡易なL字配管を架設し、バルブ

内に水を充填させ、3日間程度凍結試験を実施した。最低気温は、 $-10^{\circ}\text{C}$ 程度であり、配管内及びバルブ内を完全に凍結させることが出来た（写真-24）。

凍結試験後、内部の氷を融解させ、外観を確認したところ凍結に伴う、ひびや割れなどの破損はなかった。また、バルブ内に注水したところ漏れもなく良好な状態が確認でき、水抜き穴加工に伴う、強度の低下は確認できず問題なく使用できることがわかった。

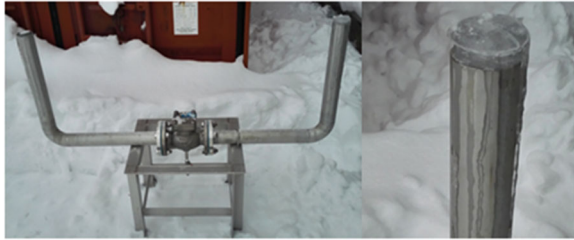


写真-24 水抜き加工済み逆止弁による凍結試験

## 5. まとめ

本研究は、土木機械設備についてより効果的・効率的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資することを目的に平成28年度から取り組んできた。これまでの成果として、現地調査やメーカー及び点検業者による聞き取り調査から、既存設備の改良改造案として、センサ設置個所の平坦加工やガスタービン原動機における計測での熱対策、センサ用治具の製作などを取りまとめた。また、新設時の改良案として、潤滑油採油のためのバルブの増設、エンジン及び過給機診断のための内視鏡納入口の増設、凍結対策のための水抜きバルブの増設の方法について取りまとめた。その他の事例についても、研究成果の一環として点検診断しやすい設備構造事例集を作成し取りまとめた。

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.6 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

材料資源研究グループ（先端材料）

材料資源研究グループ（汎用材料）

研究担当者：日下敦、巽義知、小泉悠

新田弘之、富山禎仁

古賀裕久、加藤祐哉

#### 【要旨】

道路トンネル内にはジェットファン等の付属施設が設置されており、それらの多くはあと施工アンカー等の取付部材により覆工コンクリートに取り付けられている。土木研究所では、アンカーに作用する荷重や様々な条件下にあるアンカーの耐力について、現地計測や室内実験による調査研究を進めてきた。令和3年度は、主にこれらの研究成果を取りまとめ、アンカー等の設計・施工・維持管理上の留意点を示した土木研究所資料の原稿を作成した。本報告では、代表的な成果を抜粋し、その概要を報告する。

キーワード：道路トンネル、あと施工アンカー、付属施設、現地計測、引張試験、耐力

#### 1. はじめに

道路トンネル内には、換気用ジェットファン等の付属施設が設置されており（写真-1参照）、それらの多くは図-1に例示するように、あと施工アンカー（以降、アンカーと称する）等の取付部材により覆工コンクリートに取り付けられている。なお、道路トンネル定期点検要領における用語の説明<sup>1)</sup>と同様に、取付部材とは、天井板や内装板、トンネル内の付属施設を取り付けるための金具類で、吊り金具、ターンバックル、固定金具、アンカーボルト・ナット、継手等を指す。ジェットファンは、大きなもので質量が2.3t程度あり、万一、取付部材の破断・脱落が生じた場合、道路利用者の安全に多大な影響を及ぼすことが懸念される。そこで、トンネルチームと材料資源研究グループで連携し、アンカーに作用する荷重や様々な条件下にあるアンカーの耐力について、現地計測や室内実験による調査研究を実施した。トンネルチームでは、道路トンネルの供用前にジェットファンを支持するターンバックルに計器を設置し、ジェットファン据付け時の発生軸力の現地計測等を実施した。また、様々な条件下で金属系アンカーの引張試験を実施し、施工の不具合がアンカーの引張耐力に及ぼす影響等について調査した。材料資源研究グループでは、金属系や接着系など、様々な種別のアンカー用いて引張試験を実施し、母材コンクリートのひび割れやへりあきがア



写真-1 換気用ジェットファンの取付状況の例

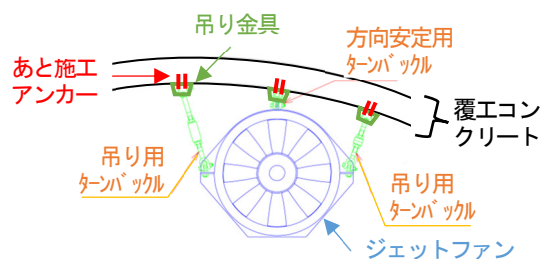


図-1 ジェットファンとその取付部材の例

ンカーの引張耐力に及ぼす影響、また、アルカリや持続荷重など、各種環境下における接着系アンカーの耐久性を調査した。

令和3年度は主にこれらの研究成果を取りまとめ、アン



カー等の設計・施工・維持管理における留意点を示した土木研究所資料の原稿を作成した。本報告では、代表的な成果を抜粋し、その概要を報告する。

**2. 道路トンネル換気用ジェットファンを支持する  
ターンバックルでの発生軸力の現地計測**

**2.1 現地計測の概要**

道路トンネル技術基準（換気編）・同解説<sup>2)</sup>では、ジェットファンの取付部材の設計にあたり「吊り金具を含めアンカーの強度はファン本体の静荷重の15倍以上をとることが望ましい」と記載されている。ただし、ジェットファンの取付部材の設計に関する要領や指針等は存在しない。そこで、実務における取付部材の強度計算例を確認した。その結果、吊り金具に接続される取付部材では、それらの強度がジェットファン本体の静荷重の15倍以上あること、方向安定金具に接続される取付部材では、それらの強度がジェットファン運転時の推力の15倍以上あることの確認が標準的に行われている実態を把握した。

これら現行の設計の妥当性を評価するため、供用前の道路トンネルにおいて、ジェットファンが据え付けられる前にターンバックル（以降、TBと称する）にひずみゲージを設置し、ジェットファンの据付け前後や起動・停止時、大型車両通行時、地震発生時のターンバックルの軸力とその変動傾向等を計測した<sup>3)</sup>。対象としたトンネルは北海道小樽市に位置し、延長約1.7kmの2車線の国道トンネルで、山岳工法により建設された。対象としたジェットファンは、口径1,250mm、概算質量2,000kgであった。図-2に示すように、吊り金具に接続するターンバックル4本（TB2、TB3、TB5、TB6。以降、「吊り用TB」と称する）と方向安定金具に接続するターンバックル2本（TB1、TB4。以降、「方向安定用TB」と称する）を対象に、平成30年2月より計測を行った。

**2.2 ジェットファン据付け時のTBの発生軸力**

6本のターンバックルTB1～TB6について、無負荷の状態ではゼロ点を取った後、ジェットファンを据え付けた際のTBの軸力の計測値を図-3に示す。同図には、取付部材の設計において、ジェットファンの静荷重及び吊り角度より計算された軸力の計算値を併記した。なお、軸力はすべて引張方向を正として示す。吊り用TB（中央側）のTB2及びTB3では、計測値が計算値を下回り、TB2で17%、TB3で27%小さかった。これに対し、吊り用TB（アーチ側）では、計測値が計算値を上回り、TB5で52%、TB6で35%大きかった。また、吊り用TBに比較するとわずかながら、方向安定用TBでもTB1で0.38kN、

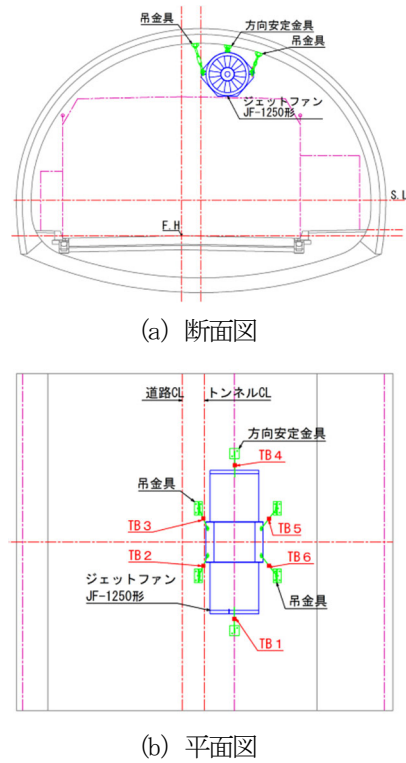


図-2 計測対象としたターンバックルTB1～TB6の位置

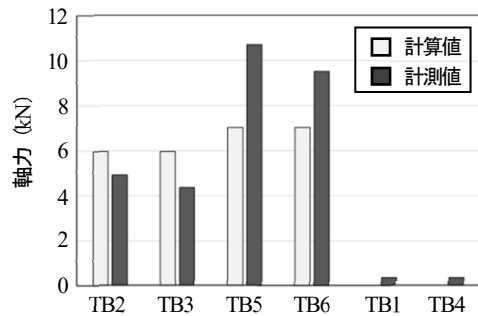


図-3 ジェットファン据付け時のTBの発生軸力

TB4で0.39kNの軸力が計測された。吊り用TBでは、最大で5割程度、計算値と計測値の乖離が認められたが、先述した道路トンネル技術基準（換気編）・同解説に記載された安全率を考慮すると小さな変動幅であり、一定程度の安全性は確保されていると考えられた。このような現地計測の事例は少なく、更なるデータの蓄積が必要と考えられる。また、計算値と計測値で乖離が生じた要因は、ジェットファンの取付構造が不静定構造であり、トンネルの覆工の形状や取付部材の設置時のわずかな施工誤差等によるものと考えられる。このような点に留意して、取付部材の設計やジェットファンの設置工事が行われる必要があると言える。

## 2. 3 地震発生時のTBの軸力変動

平成30年9月6日、北海道胆振東部地震(マグニチュード6.7)が発生し、道内では最大震度7、対象トンネル付近では震度4が観測された。この地震発生時の軸力変動が6本のTBで計測された。計測結果からは、吊り用TBに比較し、方向安定用TBで軸力変動が大きい傾向が認められた。ここでは代表的なデータとして方向安定用TBのTB4と吊り用TBのTB6の軸力変動を図-4(a)に示す。同図より、TB4では地震発生時、0.24kNの変動が生じており、地震動に起因するものと考えられた。また、反対側の方向安定用TBのTB1でも0.18kNの変動が生じていた。一方、図-4(b)に示すTB6及びその他の吊り用TBでは、地震発生時、有意な軸力変動は認められなかった。

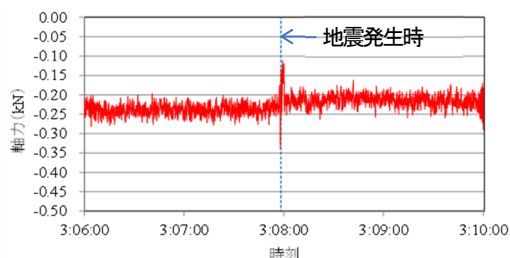
以上、地震動の卓越する加振方向等の影響も考慮する必要があると考えられるが、本計測結果からは、常時ジェットファン本体の荷重を支持している吊り用TBよりも、方向安定用TBにおいて、より大きな軸力変動が生じる可能性が高いことが示された。ただし、ここで計測された軸力変動(最大0.24kN)であれば、TBの引張強度に対して十分な余裕があると考えられる。また、この後の余震発生時でもTBの軸力が計測されたが、この時はいずれのTBにおいても有意な軸力変動は認められなかった。その要因として、当該余震のマグニチュードは5.4で、対象トンネル付近の震度は3であり、本震と比較して小さなものであったためと考えられる。地震動の大きさや卓越する加振方向等と、TBの軸力変動との関連について調査を進めていく。

## 3. アンカーの引張耐力と設計上の留意点

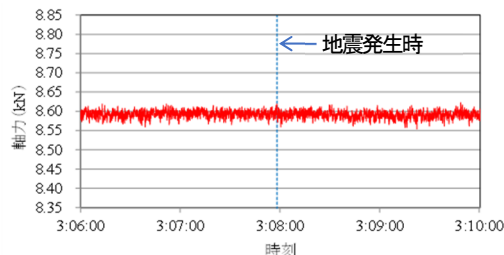
### 3. 1 アンカーの引張耐力の設計に関する現状

アンカーは様々な付属施設の取付けに用いられるが、ジェットファンの取付けに関する技術基準には、2章に記述したように「吊り金具を含めアンカーの強度はファン本体の静荷重の15倍以上をとることが望ましい」<sup>2)</sup>と示されるに留まっている。また、機械工事共通仕様書(案)<sup>4)</sup>に、「ステンレス製の金属拡張アンカー(金属系アンカーの一種)により吊り金具を設置する」と記載されている。本研究では、ジェットファンのような大型の付属施設の取付けを考慮し、一般的に用いられる金属拡張アンカー(スリーブ打込み式)を主な対象として検討を行った。

アンカーに引張荷重を行った場合、想定される破壊モードには、鋼材降伏による破断、母材コンクリートが円錐状に破壊するコーン状破壊などがある。また、アンカーの引張耐力については、土木学会<sup>5)</sup>や日本建築学会<sup>6)</sup>から計算



(a) TB4 (方向安定用TB)



(b) TB6 (吊り用TB)

図-4 地震(震度4)発生時のTBの軸力変動

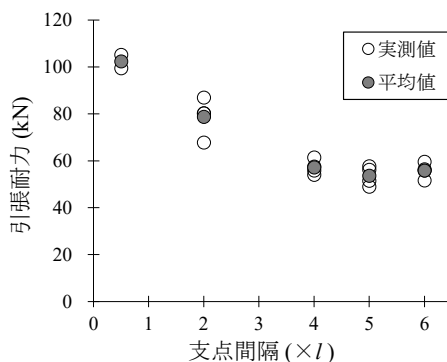
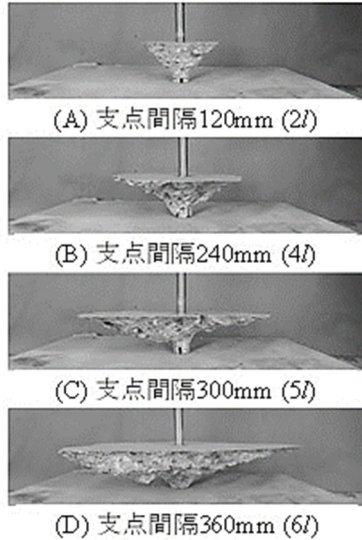
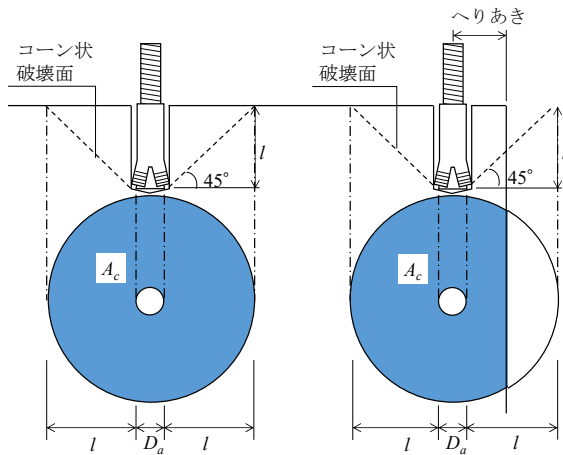


図-5 支点間隔と引張耐力の関係<sup>8)</sup>

式が示されている。なお、金属拡張アンカーでは、母材コンクリートの圧縮強度が大きすぎると拡張が困難になる。そのため、母材コンクリートの設計基準強度について、文献5)では $18\text{N/mm}^2$ 以上(ただし $36\text{N/mm}^2$ 超は要確認)、文献6)では $18\sim 30\text{N/mm}^2$ との記載がある。

本研究では、アンカーの引張耐力は文献7)に示された引張試験方法で評価した。載荷装置の反力台間隔(支点間隔)は、試験結果に影響を及ぼすとされているため、ねじの呼びM16の金属拡張アンカー(スリーブ打込み式)、圧縮強度 $33\text{N/mm}^2$ 程度の母材コンクリートを用いた事前の検討の結果(図-5)より、製造者の示すアンカー埋込み長さ $l$ の4倍以上の支点間隔では、引張耐力に大きな違いがないことを確認した<sup>8)</sup>。この結果も参考に、その後の検討では支点間隔を $6l$ として引張試験を行うこととした。この条件の引張試験の結果では、大多数がコーン状破壊で破壊した。

写真-2 各支点間隔の破壊コーン形状の例<sup>④</sup>

(a) コーンが逸脱しない (b) コーンが逸脱

※ 設計で想定する破壊コーンは、破壊面の始点の位置が文献により異なっている。ここでは、アンカーの下端を破壊面の始点とする考え方<sup>④</sup>に準拠した。

図-6 へりあき小さい場合の $A_c$ の求め方<sup>④</sup>

設計コーン状破壊耐力の計算式は、母材コンクリートが45°のコーン状に破壊することを想定している<sup>⑤,⑥</sup>。ただし、写真-2に示すように支点間隔が4*l*以上の試験条件では、ほとんどの場合、設計で想定する45°のコーンよりも扁平で上部の面積が大きな形状のコーンが形成され破壊した。なお、設計コーン状破壊耐力は安全係数等が考慮されており、それを考慮しない計算値と比べても、ほぼ全ての実験値がそれを上回った。設計計算式は安全側であり、本研究で行った種々の検討では概ね供用中の安全性に懸念が考えられる事項はあまりなかったが、留意が必要な事項については、以降に検討内容を記述する。

### 3.2 へりあきの影響

設計コーン状破壊耐力の計算式<sup>⑤,⑥</sup>は、図-6に示すコーンの有効水平投影面積 $A_c$ の関数である。アンカー設置位置から母材コンクリート端部までの距離(へりあきという)が小さく、設計で想定する45°コーンが端部から逸脱する場合は、図-6(b)に示すように逸脱した部分の有効水平投影面積を減じて計算することとしている。しかし、写真-2に示したように、実際の引張試験ではより面積が大きなコーンで破壊するため、45°コーンが逸脱しない最小のへりあきの場合、へりあきが十分な時とは破壊形態が異なるおそれもある。そこで、へりあきが十分な場合と最小の場合の2ケースで引張試験を行って影響を確認した。また、表-1および写真-3に示す5種類のアンカーを用いて、1ケースあたり各5回試験を行った。

図-7に5種類のアンカーの2つのケースにおける引張試験結果を示す。へりあきが最小の場合は、へりあきが十分な場合と比べて引張耐力が低下した。ただし、試験値はいずれもコーン状破壊耐力の計算値を上回り、引張耐力の面で、設計上の安全性に問題のない結果となった。

表-2に引張試験後の破壊状況の例を示す。へりあきが十分なケースでは、(3)締付け式のみコーン状破壊の他、アンカーが抜けてしまう引抜き破壊となったが、それ以外は全てコーン状破壊であった。一方、へりあきが最小のケースでは、(2)芯棒打込み式の一部と(5)接着系アンカーの一部がコーン状破壊となり、(5)接着系アンカーのコーンは端部で分断された。図-7より、(2)芯棒打込み式の両ケースの差が少ないのに対し、(5)接着系アンカーの両ケースの差が大きいのはコーンが分断されたためと考えられる。また、それ以外の破壊モードは割裂破壊(写真-4に示すひび割れの生じる破壊)であった。割裂破壊は、へりあき小さい場合に生じやすいとされており<sup>⑥</sup>、本試験でも割裂破壊が確認された。

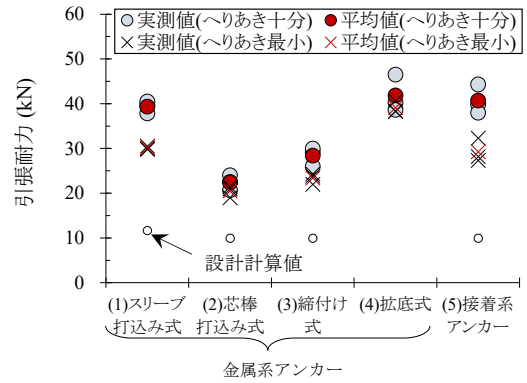
前述したとおり、文献5)、6)では、へりあきが確保されていない場合にそれを考慮した設計コーン状破壊耐力の算出方法が示されているが、試験結果より、割裂破壊等の他の破壊モードが確認されたことから、へりあきはできるだけ埋込み長さ*l*以上確保することが望ましいと考えられる。

表-1 試験に使用したアンカーの種類と概要

アンカーの種類		アンカーの形状			穿孔径(mm)	へりあき最小値(mm)
分類	固着方法	ねじの呼び	外径(mm)	埋込み長さl(mm)		
金属拡張	(1)スリーブ打込み式	M12	17.3	50	18.0	59
	(2)芯棒打込み式		12.0	60	12.5	66
	(3)縮付け式		12.0	60	12.0	66
金属拡張	(4)拡底式		17.5	60	18.0	69
接着系(注入式)	(5)無機系接着剤		12.0	60	16.0	66



写真-3 試験に使用したアンカーの外観



※設計計算式は文献(6)の低減係数を考慮しない値とした  
 ※文献(6)では拡底式の記述がないため、掲載しなかった

図-7 5種類のアンカーの引張耐力

表-2 5種類のアンカーの引張試験による破壊状況の例

	金属系アンカー				接着系アンカー
	(1)スリーブ打込み式	(2)芯棒打込み式	(3)縮付け式	(4)拡底式	(5)無機系接着剤
へりあき十分	コーン状	コーン状	コーン状	コーン状	コーン状
へりあき最小	割裂(ひび割れ)	No. 5 : コーン状	割裂(ひび割れ)	割裂(ひび割れ)	コーン状(分断)

※写真中の赤丸は有効水平投影面積の円を示している



写真-4 割裂破壊の例

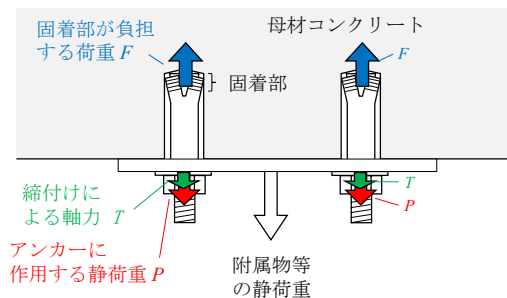


図-8 アンカーに作用する荷重の模式図

### 3.3 ナット締付けによる軸力の挙動

#### 3.3.1 アンカーに作用する軸力の概要

ジェットファンを覆工コンクリートに取り付ける際は、**図-1** に示すように、コンクリートに設置したアンカーにナットを用いて吊り金具を取り付ける。ナット締付けは、トルクレンチを用いてアンカー製造者の示すトルクで行い、締付け力を管理する（トルク管理）。

ナット締付けを行うと、アンカーに軸力（初期軸力）が導入される。アンカーに取付部材を介してジェットファンを取り付けた状態では、**図-8** に示すように、アンカー固着部が負担する荷重と、アンカーに作用する静荷重およびナット締付けによる軸力が釣り合った状態となるが、静荷重が初期軸力を上回るなどの他、何らかの理由で軸力が0となるとナットが座面から離れ、吊り金具等を固定している複数のアンカー間で荷重が適切に分配されないなどの不具合が懸念される。また、トルク管理で導入される軸力にはばらつきが大きいとの指摘<sup>9)</sup>もある。軸力に関する検討事例はあまり例がないことから、軸力に関する設計上の留意点等を確認した。

#### 3.3.2 軸力のばらつき

**写真-5** に示すひずみゲージを埋め込んだ軸力測定用の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式、ねじの呼びM16）を8本設置した**図-9** に示す供試体を作製し、No.3～8の6本について23、45、68N・mのトルクでナットを締め付けた際の初期軸力を測定した。また、初期軸力の測定はナットの弛めと締付けを複数回繰り返して行った。

ナット締付けトルクと初期軸力の関係を**図-10** に示す。傾向として、締付けトルクが大きいほど導入される初期軸力が大きい。同じように施工した場合でも、個々のアンカーによって初期軸力の大きさが異なり得ることが確認された。次に、No.4、6について、10回測定した初期軸力の関係を**図-11** に示すが、同一のアンカーでは、ナット締付けと弛めを繰り返しても、初期軸力のばらつきは**図-10** と比べて小さかった（他のアンカーも同様）。

ナットの締付けトルクは、ねじの摩擦や座面の摩擦に消費され、残りが初期軸力として導入されると考えられる（Motoshの式<sup>10)</sup>）が、座面やねじの摩擦係数が完全に同一にできないことが原因と考えられる。

**写真-1**（吊り金具4つ、吊り金具1つあたりアンカー4本、計16本）の状況を例に安全性を確認すると、仮に大型のジェットファン（大きなもので質量2.3t程度<sup>2)</sup>）を吊り下げていた場合、アンカー1本当たりの負担は1.5kN程度となる。アンカーの軸力が全て今回の実験で最も小さかったNo.4の初期軸力（最小値3.4kN）であった場合で



写真-5 軸力測定用ひずみゲージ埋込みアンカー

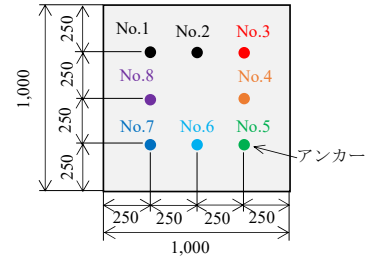


図-9 ひずみゲージ埋込みアンカーを8本設置した供試体

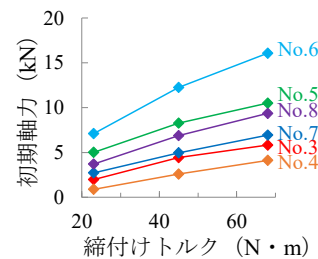


図-10 ナット締付けトルクと初期軸力（平均値）の関係

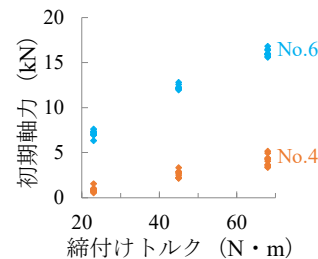


図-11 ナット締付けトルクと10回測定した初期軸力の関係 (No.4とNo.6のみ)

もナットの弛みや浮きは生じないと考えられるが、初期軸力がより小さい場合を考慮し、取付部材やジェットファンを取り付けた際にナットの弛みや浮きがないか、施工時に確認した方が良いと考えられる。

#### 3.3.3 軸力の経時変化

**写真-5** のアンカー7本を用いて、改めて**図-9** と同様の供試体を作製し、No.2～4は通常のナットで、No.5～7は製造者の推奨する弛め止めナットで、製造者の示す68N・mのトルクで締付けを行い、初期軸力を導入して軸力の経時変化を測定した。供試体は室温が変化する環境にあり、アンカーから出力される軸力の値は室温によって変化するため、No.1は軸力を導入せずに基準用とし、各アンカー

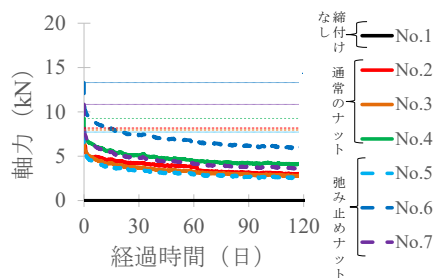


図-12 アンカーに導入された初期軸力の経時変化  
(No. 1 を基準とした場合の値)

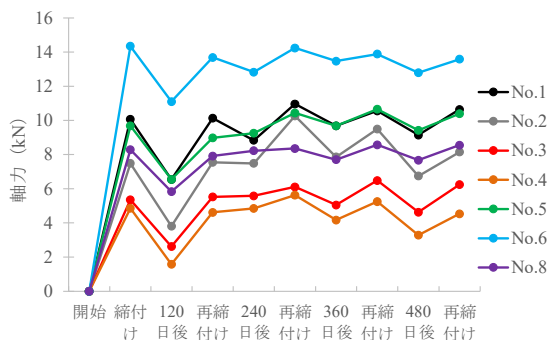


図-13 120日ごとに再締付けを繰り返した場合の  
軸力の経時変化 (No. 7 を基準とした場合の値)

の軸力の大きさは出力値から No.1 の値を除いて求めた。

図-12 に 120 日間の軸力の経時変化を示すが、ナット締付け後まもなく、軸力が初期軸力の値より低下したことを確認した。特に、初期 (3 日程度) に大きく低下し、その後の変化は緩やかとなる傾向を示した。弛み防止ナットを用いた No.5~7 も同様であった。なお、120 日後にナットを観察したところ、弛みや浮きは確認できなかった。同様の実験を恒温恒湿環境で行っても結果は同じだった。また、固着部がすべらない構造である接着系アンカーやコンクリート打設時に設置する先付けアンカーでも確認したが、同様の結果だった。アンカーにはナット締付けによる引張、アンカーが戻ろうとする圧縮が持続的に作用することから、母材コンクリートの微小なクリープ変形などが軸力の低下の原因と推測される。

図-12 では No.5 のアンカーで、120 日後の軸力が 2.5kN 程度と最も小さかったが、写真-1 の状況を例に質量 2.3t 程度のジェットファンを吊り下げた場合の安全性を確認すると、アンカー 1 本当りりの負担は 1.5kN 程度であるため、今回の検討の条件ではナットの弛みや浮きは生じないと考えられた。また、軸力の低下量も徐々に収束する傾向を示していることから、定期点検時にナットの状態を確認すれば良いと考えられる。

軸力は経時的に低下することが分かったが、定期的に所

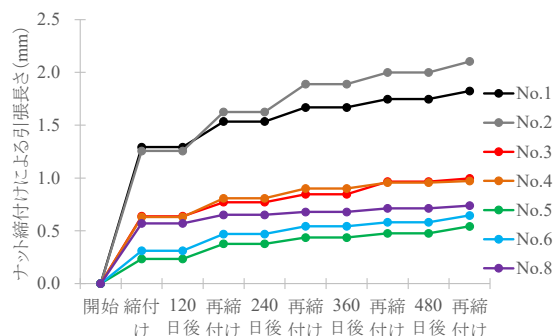


図-14 No. 1~6, 8 のナット締付けによる  
アンカーの引張長さの変化

定のトルクでナットの再締付けを行った場合に問題が生じないか、図-12 の試験後の供試体を用いて確認した。ナット締付け後 120 日ごとに 68N・m のトルクで再締付けを繰り返した場合の軸力の経時変化を図-13 に示すが、いずれのアンカーも 1 回目の再締付け後に概ね初期軸力の値まで軸力が回復した。次の 120 日間 (当初より 240 日後) 以降は、軸力の経時的低下量は減少する傾向が見られた。また、試験に用いたねじの呼び M16 のナットは、1 回転あたり 2mm アンカーを引き伸ばすものであるが、ナット締付け時の回転角からアンカーの引張長さを計算した結果を図-14 に示すが、再締付けを繰り返すごとにアンカーの引張長さは増加するものの、図-13 と同様に徐々に収束する傾向を示した。図-14 では、480 日後の再締付け時点で引張長さが最も大きかった No.2 のアンカーは 2.1mm 程度だが、アンカーの埋込み長さ 60mm に対して小さく引き抜ける懸念はあまりないと考えられる。

### 3.3.4 軸力に関する留意点のまとめ

ナット締付けでアンカーに導入される軸力は、アンカーによって軸力の大きさがばらつくことが分かった。また、軸力は導入後まもなく低下し、低下量は初期に大きくその後緩やかとなること、ナットの再締付けによって概ね初期軸力の値に回復するが、定期的な再締付けを繰り返すと、その後の軸力の低下量や再締付け時のナット回転角・アンカー引張量は徐々に収束する傾向のあることが分かった。

本研究の試験の範囲では、これらの事象によってナットの弛みや浮き、再締付けによるアンカーの引抜けが生じる規模ではなかったが、懸念を完全に否定できないことから、ジェットファン等を取り付けた際や定期点検の際は、安全確認のためにナットの弛みや浮きがないか、合いマークなどを利用して再締付け時のナット回転角が収束するか、確認が必要と考えられる。

#### 4. 施工の不具合がアンカーの引張耐力に及ぼす影響

##### (アンカーの施工上の留意点)

#### 4.1 概要

金属拡張アンカー(スリーブ打込み式)の施工は、主に、穿孔、孔内清掃、アンカーの挿入、スリーブの打込み等の手順により行われる。各作業において留意すべき事項を取りまとめるため、アンカーの室内引張試験を実施し、施工の不具合がその引張耐力に及ぼす影響を評価した。ここでは、代表的な試験結果として、穿孔径及び穿孔深さが引張耐力に及ぼす影響を示す<sup>11)</sup>。

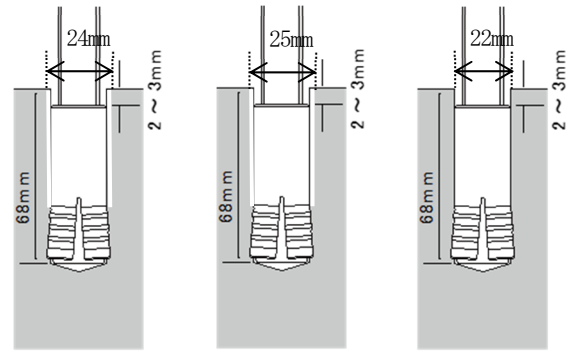
#### 4.2 穿孔径の影響

試験に使用したアンカーは、ねじの呼びがM16の金属拡張アンカー(スリーブ打込み式)で、その外径は21.7mm、メーカーが推奨する標準的な穿孔径は22.5mmである。孔径を22mmとした標準ケースに対し、穿孔径を24mm(標準+2mm)としたケース、穿孔径を25mm(標準+3mm)としたケースについて試験体をそれぞれ3体作製し、引張試験を実施した(図-15)。別途作製した強度管理用供試体(φ100mm×h200mm)の圧縮試験により、引張試験実施時の母材コンクリートの圧縮強度は24.6N/mm<sup>2</sup>であった。

引張試験により得られた荷重-変位曲線を図-16に示す。同図には、標準ケースの代表的な荷重-変位曲線を併記した。また、ケースごとの引張耐力を図-17に示す。同図には、標準ケースの引張耐力(40.3kN)を100%としたときの各ケースの引張耐力(3試験の平均値)の比率を併記した。まず、穿孔径を25mm(標準+3mm)としたケースであるが、荷重がほぼゼロのままアンカーが引き抜けた。アンカーのスリーブと母材コンクリートの間で、摩擦力が確保されなかったものと考えられる。次に、穿孔径を24mm(標準+2mm)としたケースであるが、標準ケースに比較して荷重-変位曲線は不規則な変動を示し、引張耐力は、標準ケースから13%低下した。試験対象としたアンカーは、アンカーのスリーブと母材コンクリートの摩擦力により定着を得る機構となっており、穿孔径が引張耐力や引張時に発生する変位に多大な影響を及ぼすことを確認した。穿孔径が標準値以上とならないよう、確実な施工管理が必要である。

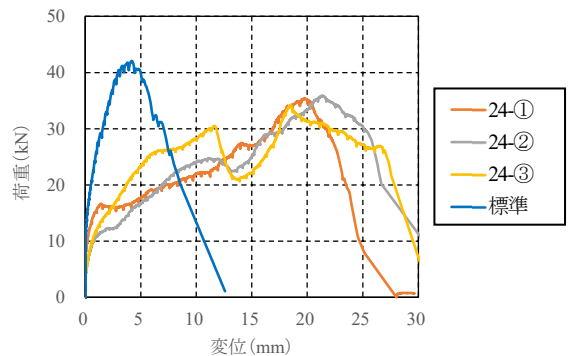
#### 4.3 穿孔深さの影響

試験に使用したアンカーは、M16の金属拡張アンカー(スリーブ打込み式)で、スリーブ長は60mm、メーカーが推奨する標準的な穿孔深さは68mmである。穿孔深さを68mmとした標準ケースに対し、穿孔深さを48mm(標準-20mm)としたケース、穿孔深さを88mm(標準+

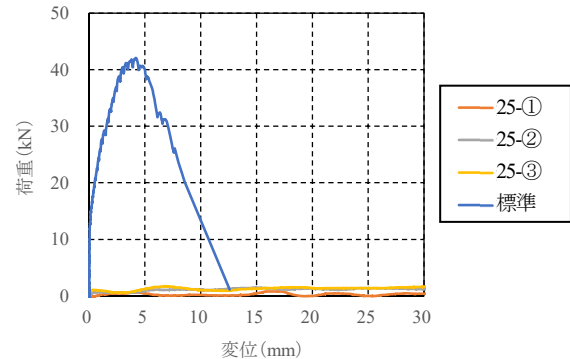


(a) 穿孔径 24mm (標準+2mm) (b) 穿孔径 25mm (標準+3mm) (c) 穿孔径 22mm (標準ケース)

図-15 穿孔径を変化させた引張試験の概要



(a) 穿孔径 24mm (標準+2mm)



(b) 穿孔径 25mm (標準+3mm)

図-16 荷重-変位曲線

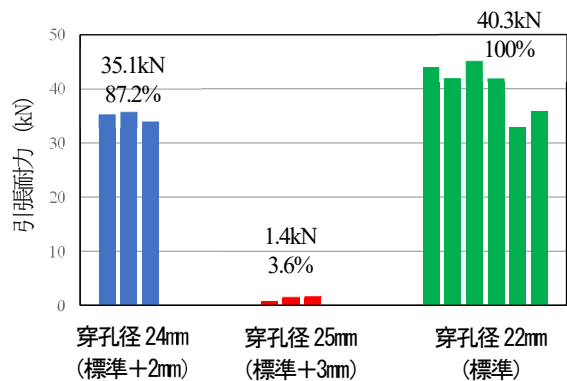


図-17 各試験ケースの引張耐力

20mm) としたケースについて試験体をそれぞれ 4 体作製し、引張試験を実施した(図-18)。別途作製した強度管理用供試体 (φ100mm×h200mm) の圧縮試験により、引張試験実施時の母材コンクリートの圧縮強度は 24.6N/mm<sup>2</sup>であった。

引張試験により得られた荷重-変位曲線を図-19 に示す。同図には、標準ケースの代表的な荷重-変位曲線を併記した。また、ケースごとの引張耐力を図-20 に示す。同図には、標準ケースの引張耐力 (40.3kN) を 100% としたときの各ケースの引張耐力 (4 試験の平均値) の比率を併記した。荷重-変位曲線における勾配は、穿孔深さが短いケース、長いケースともに、標準ケースと比較して大差無いと言える。一方、穿孔深さが浅いケースの引張耐力は標準ケースに比較して 37%低下し、穿孔深さが深いケースの引張耐力は標準ケースを 32%上回った。穿孔深さが深い、つまりアンカーの埋込み長さが長いほど、コーン状破壊面の有効水平投影面積が大きくなり、引張耐力が増加したと考えられた。ただし、穿孔深さを標準よりも深くした場合、スリーブの打込みの精度が低下し、スリーブが十分に拡張されず、母材コンクリートとの定着に不具合が生じる可能性が高まると考えられる。スリーブを母材コンクリートに確実に定着させることを原則とすべきであり、穿孔深さは標準的なものとなるよう、確実な施工管理が必要である。加えて、維持管理段階では、スリーブが母材コンクリートから突出しているアンカーは穿孔深さが浅い可能性が、スリーブが顕著に埋まっているアンカーは打込みの精度が十分でない可能性があるといった点に留意し、点検する必要がある。

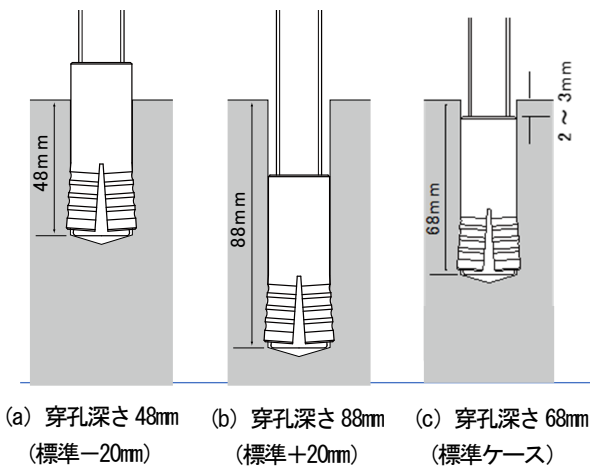
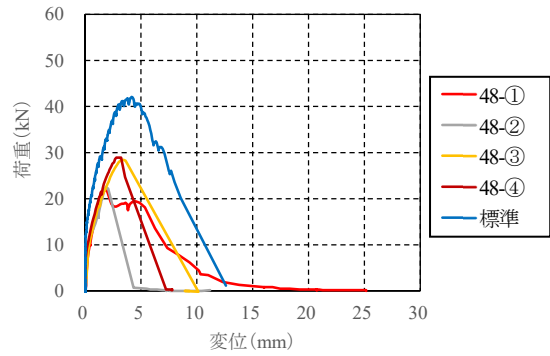
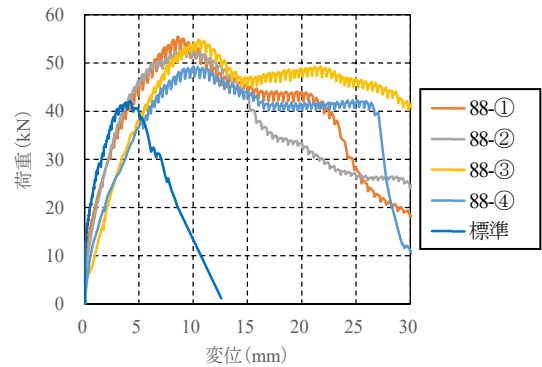


図-18 穿孔深さを变化させた引張試験の概要



(a) 穿孔深さ 48mm (標準-20mm)



(b) 穿孔深さ 88mm (標準+20mm)

図-19 荷重-変位曲線

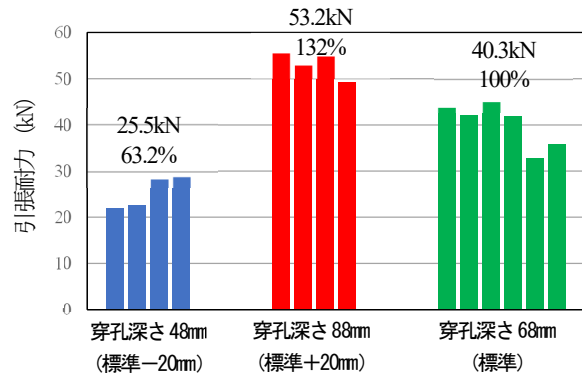


図-20 各試験ケースの引張耐力



5. コンクリートのひび割れがアンカーの引張耐力に及ぼす影響（アンカーの点検上の留意点）

5. 1 概要

母材コンクリートにアンカーを設置する際は、ひび割れ、豆板等の異常のない箇所に設置することが原則である。しかし、供用中に母材コンクリートにひび割れ等の不具合が発生する可能性がある。そこで、供用開始後の不具合として、母材コンクリートのひび割れがアンカーの引張耐力に及ぼす影響を評価した。

5. 2 アンカー設置位置に生じたひび割れの影響

供用中にアンカーの設置位置にひび割れが生じた場合の引張耐力に及ぼす影響を評価するために、表-3 に示すケースで引張試験を行った。試験にはねじの呼びM16の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）を用い、アンカー設置後にセリ矢を用いて所定の幅のひび割れを導入した。引張試験時の母材コンクリートの圧縮強度は 34N/mm<sup>2</sup> 程度であった。

図-21 にひび割れ幅と荷重-変位曲線の関係の例を示す。ひび割れ幅が大きいほど、引張耐力までの曲線の勾配は緩やかとなった。また、全ての試験結果のひび割れ幅と引張耐力の関係を図-22 に示すが、ひび割れ幅が大きいほど、引張耐力が小さくなる傾向があった。

破壊モードはいずれもコーン状破壊であった。写真-5 に母材コンクリートの破壊状況の例を示すが、ひび割れ幅が0.2mm 以下ではコーンがひび割れで分断されなかったが、ひび割れ幅が1.0mm 程度と幅が大きい場合は、コーンが分断され、片側コーンで破壊する例が多かった。幅の大きなひび割れがあると、アンカー固着部と母材コンクリートの摩擦が適切に得られず、母材コンクリートの引張抵抗も減少するため、引張耐力や剛性が低下してしまったと考えられる。

5. 3 ひび割れ発生位置の影響

供用中にアンカーの近傍にひび割れが生じた場合について、ひび割れの位置（アンカーからの距離）が引張耐力に及ぼす影響を評価するために、表-4 に示すケースで引張試験を行った。導入ひび割れ幅は 1.2~1.5mm の範囲とし、その他の試験条件は 5. 2 の試験と同じとした。

図-23 にひび割れまでの距離と荷重-変位曲線の関係の例を示す。ひび割れまでの距離が0mm、つまりアンカー設置位置にひび割れがある場合は、引張耐力までの曲線の勾配は緩やかとなったが、距離が30mm 以上の場合はひび割れがない場合と曲線の勾配はあまり変わらなかった。また、全ての試験結果のひび割れまでの距離と引張耐力の関係を図-24 に示すが、ひび割れがない場合の平均値を

表-3 アンカー設置位置に生じたひび割れ幅の影響に関する引張試験ケース

試験ケース (目標ひび割れ幅)	実ひび割れ幅	試験数
ひび割れなし	—	4
0.2mm 未満	0.1~0.2mm	6
0.5mm	0.4~0.6mm	6
1.0mm	0.9~1.1mm	6
1.5mm	1.3~1.5mm	6

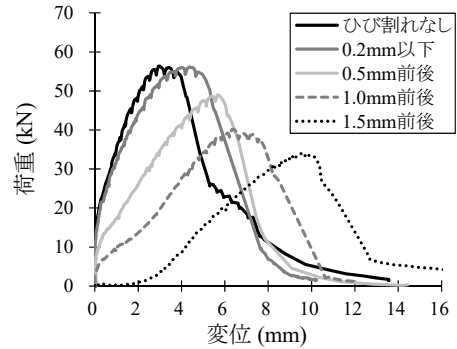


図-21 ひび割れ幅と荷重-変位曲線の関係の例

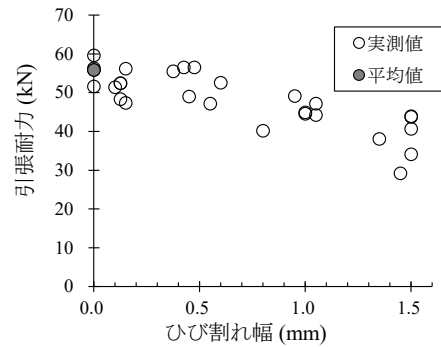


図-22 ひび割れ幅と引張耐力の関係



写真-5 母材コンクリートの破壊状況の例  
(a) ひび割れ幅 0.2mm 以下 (b) ひび割れ幅 1.0mm

表-4 生じたひび割れの位置（アンカーとの距離）の影響に関する引張試験ケース

試験ケース (アンカーとの距離)	試験数
ひび割れなし	4
0mm	6
約30mm	6
約60mm	6

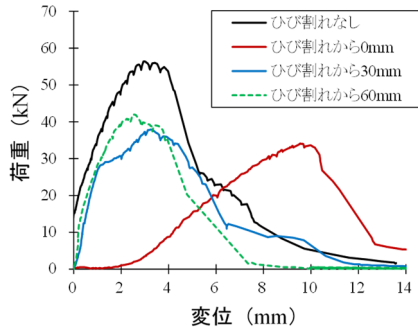


図-23 ひび割れと荷重—変位曲線の関係の例

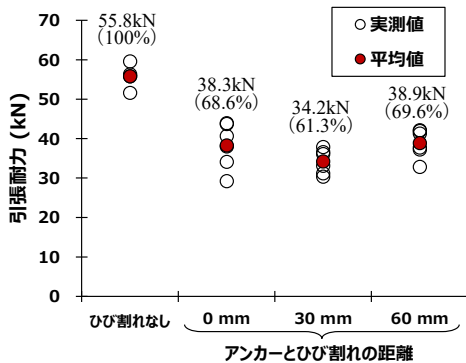
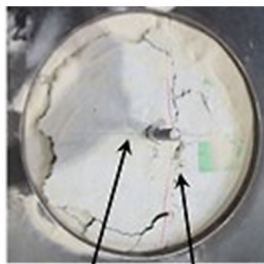


図-24 ひび割れ幅と引張耐力の関係



コーン状破壊 導入したひび割れ

写真-6 ひび割れまでの距離 30mm の場合の母材コンクリートの破壊状況

100%とすると、ひび割れがある場合は距離が 0~60mm の範囲では、60~70%程度まで低下した。破壊モードはいずれもコーン状破壊だったが、ひび割れまでの距離が 30mm の場合の母材コンクリートの破壊状況の例を写真-6 に示すが、ひび割れによってコーンが分断していた。今回用いたアンカーの埋込み長さは 60mm だが、コーンの範囲内にひび割れが生じた場合はコーンが分断され、母材コンクリートの引張抵抗が低下することで、引張耐力の低下を招いたと考えられる。

#### 5. 4 ひび割れに関する留意点のまとめ

本研究における金属拡張アンカー (スリーブ打込み式) を用いた引張試験では、ほとんどがコーン状破壊となったが、供用中に母材コンクリートにひび割れが生じた場合、

コーン範囲内にひび割れが生じるとコーンが分断され、引張耐力が低下することが分かった。また、ひび割れがアンカーの位置に生じると、引張試験時の剛性や引張耐力が低下し、特にひび割れ幅が大きいほど顕著であることが分かった。

いずれも引張耐力が低下することから、付属施設の取付け部の点検においては、アンカー周辺のひび割れの有無について、入念に点検されるべきと考えられる。また、ひび割れ発生が確認された場合は、次章に示すひび割れ補修等の措置を検討する必要があると考えられる。

### 6. 補修・補強工がアンカーの引張耐力に及ぼす影響 (アンカーの措置上の留意点)

#### 6. 1 概要

供用中のトンネルでは、点検及び診断の結果に基づいて措置 (対策と監視) が実施される。対策には、大別して外力対策工とはく落対策工があり、外力対策工はトンネルの構造安定性確保の観点から覆工の耐荷力の向上 (あるいは外力の作用の軽減) を図るもので、はく落対策工は利用者の安全性の確保の観点からコンクリート片の落下を防ぐものである。ここでは、それら双方の目的から現場での適用実績が多い繊維シート接着工に着目し、引張試験を実施した結果及び知見を示す<sup>13)</sup>。

表-5 試験ケース

ケース	ひび割れ	繊維シート	π型変位計の設置	試験数
1	無し	無し	—	—
2	無し	有り	—	3
3	有り	無し	有り	3
			無し	3
4	有り	有り	有り	3
			無し	3

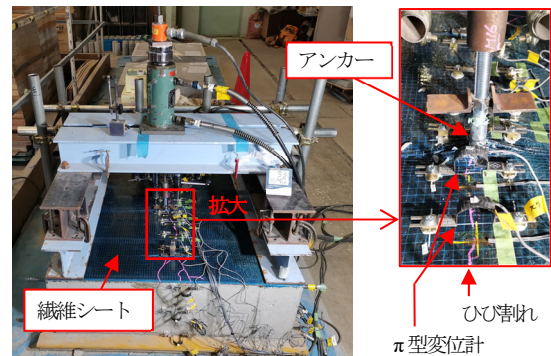


写真-7 試験体の作製完了状況 (ケース4)

### 6. 2 試験ケース及び試験方法

試験ケースを表-5 に示す。使用したアンカーは、M16の金属拡張アンカー（スリーブ打込み式）であり、同表中のケース 1 については、既往の試験結果<sup>11)</sup>及び引張試験実施時の母材コンクリートの圧縮強度(29.2N/mm<sup>2</sup>)から、アンカーの引張耐力を41.9kN程度と推定した。ケース 2 では、ひび割れの無いコンクリートに繊維シートを接着し、引張試験を実施した。ケース 3 及び 4 では、いずれも母材コンクリートにひび割れ（ひび割れ幅 1.5mm）を導入し、アンカーを設置した。ケース 4 では、さらに繊維シートを接着した上で、引張試験を実施した（写真-7 参照）。表-5 中のケース 3-1 と 3-2、またケース 4-1 と 4-2 は、試験の実施時期のみが異なり、試験体作製および引張試験の実施方法は同様とした。

繊維シートの接着に際しては、プライマーや接着剤がアンカーと孔壁の間隙や、ひび割れに浸透することを防止するため、事前にアンカー設置孔およびひび割れの表面部をシリコン樹脂系のシーリング材で間詰めた。その後、プライマーの塗布、パテの塗布、接着剤の塗布を行い、炭素繊維シート（繊維目付 200g/m<sup>2</sup>、引張強度 3,400N/mm<sup>2</sup>、引張弾性率 2.45×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>）を接着した。

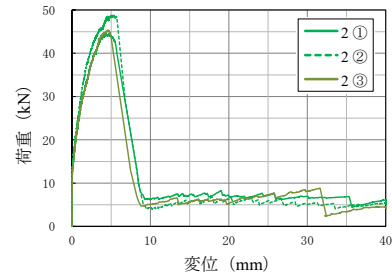
### 6. 3 各試験ケースの引張耐力

引張試験により得られた荷重－変位曲線を図-25 に示す。また、ケースごとの引張耐力を図-26 に示す。同図には、基準となるケース 1 の引張耐力（41.9kN）を 100% としたときの各ケースの引張耐力（3 試験の平均値）の比率を併記した。

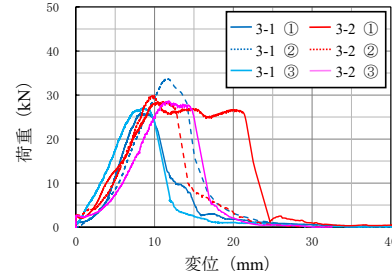
ケース 2 の引張耐力は、ケース 1 の約 1 割増であった。引張試験で生じ得る結果のばらつきを考慮すると、繊維シートの接着により引張耐力は大きく変化しないことが示されたと言える。ひび割れを導入したケース 3（3-1 及び 3-2）の引張耐力は、ケース 1 の 3～4 割減で、前章で示した既往の試験結果<sup>12)</sup>とも整合した。ひび割れ導入後に繊維シートを接着したケース 4-1 の 3 試験の引張耐力は、ケース 1 の 9 割程度となった。一方で、ケース 4-2 は、ケース 4-1 と同様の作業手順で試験を実施したにも関わらず、引張耐力が最も小さかった。

### 6. 4 繊維シート接着工によるひび割れの開口抑制効果

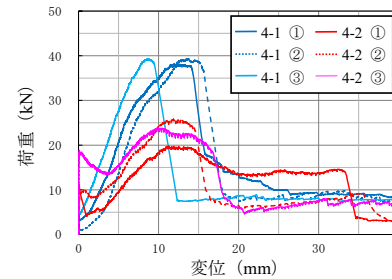
Π型変位計により、ひび割れの開口変位を計測したケース 3-1 と 4-1 の全 6 ケースを対象に、アンカーの最近傍である左右 30mm の位置での開口変位の平均値を算出した。引張荷重との関係を図-27 に示す。同図より、ケース 4-1 では、各荷重段階での開口変位がケース 3-1 の 40%程度



(a) ケース 2



(b) ケース 3



(c) ケース 4

図-25 荷重－変位曲線

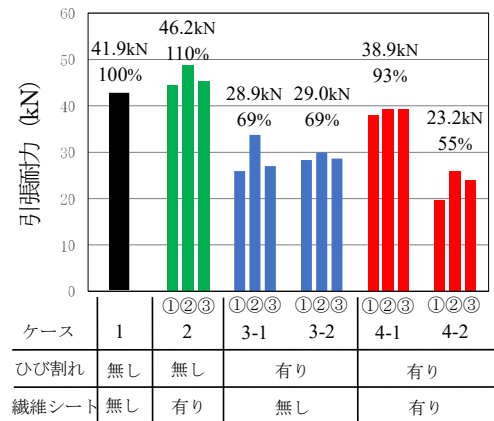


図-26 各試験ケースの引張耐力

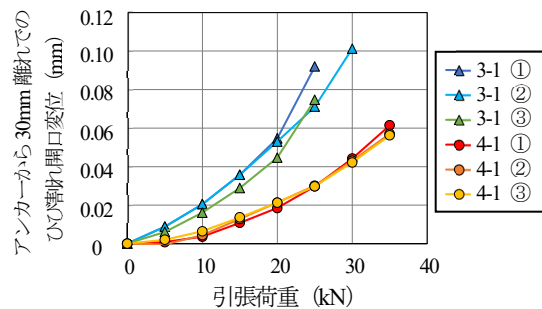


図-27 ひび割れの開口変位と引張荷重の関係

に抑制されていたことが分かる。ケース 4-1 では繊維シート接着工の効果が良好に発揮され、ケース 3 よりもスリーブとコンクリート孔壁間の摩擦力がより高く保持された結果、引張耐力の顕著な低下が抑制されたと考えられた。

### 6. 5 繊維シート接着ケースでの引張耐力の差異に関する考察

ケース 4-1 と 4-2 は、同様の作業手順で試験を実施したにも関わらず、両者の荷重-変位曲線に顕著な差異が生じ、ケース 4-2 の引張耐力はケース 3 よりも小さかった。引張試験後のアンカーの状態を確認したところ、ケース 4-1 では軸部のコーンの先端がスリーブの内側まで潜り込んでスリーブが拡張されていた (写真-8 (a))。これに対し、ケース 4-2 ではコーンの先端はスリーブの外側に留まっており、引張载荷に伴うスリーブの拡張の進行が認められなかった (写真-8 (b))。それに加え、スリーブに付着物が認められ、これは固化したプライマーであった可能性が考えられた。また、図-25 (c) に示した通り、ケース 4-2 の 3 試験では、载荷開始時、ほとんど変位が生じず、荷重が 10~20kN となった際、アンカーが急に抜け出す挙動が認められた。载荷開始時、スリーブはプライマーを介してコンクリートの孔壁に付着した状態にあり、一定の荷重に達した際にその付着が切れたことが推定された。

以上より、繊維シートを接着する際、アンカー設置孔の表面部をシーリング材により間詰めしたが、ケース 4-1 に比較してケース 4-2 ではその処置が十分でなく、アンカーの内部 (軸部とスリーブの隙間) 及び周辺部 (スリーブと孔壁の隙間) がプライマーで充填された可能性が考えられた。スリーブ打込み式のアンカーは、本来、引っ張られることでスリーブの拡張が進み、スリーブとコンクリートの孔壁間の摩擦力が高まると想定される (図-28 (a))。これに対してケース 4-2 では、はじめにスリーブとコンクリートの孔壁間でプライマーの付着切れが生じ、その後は軸部とスリーブが一体となって引っ張られたことが、引張耐力の低下要因となった可能性が考えられた (図-28 (b))。そして、コンクリートが引張抵抗を発揮する面積が比較的小さな状況で破壊に至ったものと考えられた。

以上を踏まえると、実際の現場で繊維シート接着工を施す際も、プライマーや接着剤がアンカーの内部及び周辺部に充填されることのないよう留意が必要であると考えられる。なお、本試験では、アンカーを下向きに設置しており、プライマー等が流下する厳しい条件であったと考えられる。実際の現場では、アンカーは上向きに設置され、繊維シートも天端や肩部に多く接着されるものと想定される。ただし、毛細管現象によりプライマーが重力に逆らっ

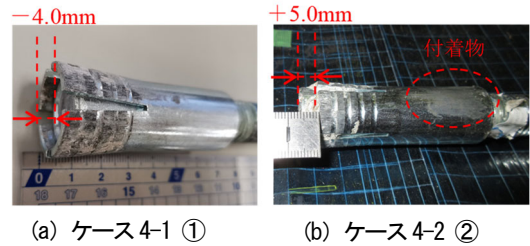


写真-8 引張試験後のアンカーの状態

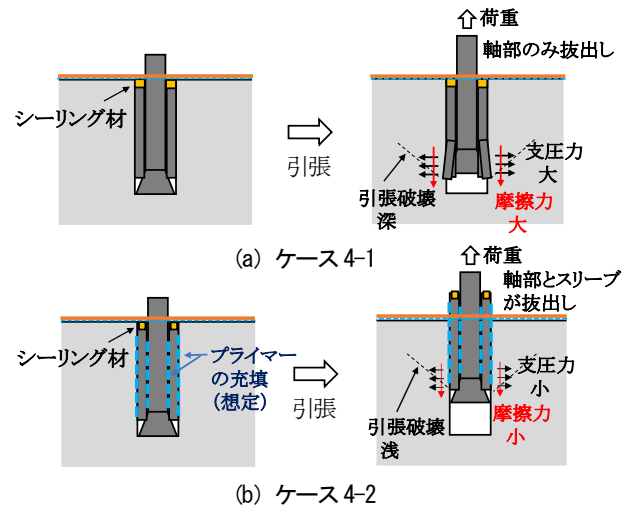


図-28 引張载荷時のアンカー軸部とスリーブの挙動 (想定)

てアンカー周辺部に浸透する可能性も考えられるため、留意が必要と言える。

## 7. 各種環境作用が接着系あと施工アンカーの長期特性に及ぼす影響

### 7. 1 概要

接着系あと施工アンカーは現在ジェットファン取付けには使用されていないが、橋梁の耐震補強や河川構造物等の既設構造物の補強、附属物の取付けなどの用途で既に数多く使われていると共に、今後も需要が見込まれる。しかし、コンクリート内部におけるこれらの長期的な挙動については、十分に解明されていないのが現状である。

そこで、コンクリート内部において接着系あと施工アンカーに影響を及ぼし得る環境作用として「アルカリ」と「持続荷重」に着目し、これらがアンカー接着剤の特性に与える影響について検討した。

### 7. 2 アルカリの影響に関する実験

#### 7.2.1 概要

コンクリート内部の高アルカリ環境下における接着系あと施工アンカーの長期的な挙動については十分に解明されておらず、さらなるデータの充実が必要である。この

ため、接着系アンカーの試験方法の一つである ACI 355.4-11<sup>14)</sup>を参考に、アンカー接着剤のアルカリによる劣化機構や劣化の評価方法について検討した<sup>15), 16)</sup>。当該規格で規定されている接着系アンカーの耐アルカリ性評価方法では、アンカーを設置したコンクリート円柱を所定の厚さにスライスした試験片を用いる。水酸化カリウム (KOH) 水溶液浸せき前後の試験片の押抜試験を実施し、得られたアンカー接着剤とコンクリートとの接着強さを劣化の指標とするものである。

### 7.2.2 実験方法

実験には市販されている「カプセル方式」の製品を4種類、「注入方式 (カートリッジ型)」の製品1種類を用いた (表-6)。カプセル方式の製品は、カプセルをドリルで削孔した孔に挿入した後、回転・打撃を与えて施工する「回転・打撃型」3種類 (不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、ビニルウレタン樹脂) と、ハンマー等でボルトを打込むことでガラスカプセルを破碎し施工する「打込み型」1種類 (不飽和ポリエステル樹脂) である。

表-6 アルカリ浸せき試験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度 (製造メーカーの技術資料より)

製品種別	アンカーのタイプ	接着剤樹脂 <sup>※1</sup>	外径 (mm)	長さ (mm)	アンカー径	ドリル径 (mm)	削孔長 (mm)	最大引張力 (kN)	引張強さ <sup>※2</sup> (MPa)
A	カプセル方式 回転・打撃型	UP	13	100	M12 <sup>※3</sup>	14.5	100	57.4	17.3
B	カプセル方式 回転・打撃型	VE	12.7	100	M12 <sup>※3</sup>	14.5	100	73.1	22.0
C	カプセル方式 回転・打撃型	VU	13.1	127	M12 <sup>※3</sup>	14	110	54.2	14.7
D	カプセル方式 打込み型	UP	13	102	M12 <sup>※4</sup>	15	110	52.7	12.7

※1: UP/不飽和ポリエステル樹脂、VE/ビニルエステル樹脂、VU/ビニルウレタン樹脂  
 ※2: 有効引張長 (削孔長-カット部長) により算出  
 ※3: SUS304 全ねじボルト 先端斜め45°カット  
 ※4: SUS304 全ねじボルト 先端斜めカットなし

表-7 母材コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 A	混和剤 B
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
70	47	163	23.3	87.4	1001	セメント×0.25%	セメント×0.003%

試験片の母材となるコンクリート (φ154×150 mm) は、硬質塩化ビニル管を型枠にして打設した。水セメント比は70%、材齢28日目の圧縮強度は約23 MPaである (表-7)。母材コンクリートへのアルカリ添加による劣化促進効果について検証するため、一部の試験ケースでは、pH 13.2~13.5程度に調製した KOH 水溶液を練混ぜ水として用い母材コンクリートを作製した。

材齢約15週の母材コンクリート上面中央に、製造メーカーが指定する径、長さの孔をハンマードリルで設けてアンカーのカプセルを挿入し、製品A、B、Cについては先端を斜め45°にカットした全ねじボルト (M12) を挿入しながらカプセルに回転・打撃を与え、製品D、Eについては先端が平らな全ねじボルト (M12) にハンマーで打撃を与えながら挿入し、施工した。アンカーの接着剤が完全に

硬化した後、コンクリート円柱を水平方向に型枠ごとスライスし、これを試験片とした (図-29)。試験片はコンクリート円柱の上面近傍を避け、1体につき3枚ずつ採取した。試験片の厚さについて ACI 355.4-11 では13/16±1/8インチ (27~33.3 mm) と規定しているが、本研究ではやや薄い25 mmで試験した。

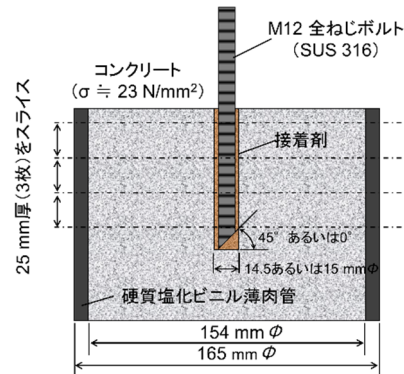


図-29 接着系アンカー設置後のコンクリート断面と試験片採取方法の概略

作製した試験片は、ポリプロピレン製水槽を用い KOH 水溶液中に浸せきした。環境液の濃度は約 0.2 mol/L で pH 13.2~13.5程度となるように調製し、液温は恒温恒湿室内で20°Cあるいは40°C一定で保持した。試験片は、互いに30 mm程度の間隔を保つよう、水槽中に立てて静置した。所定の時間浸せき後に試験片を取り出し、押抜試験により破壊に至るまでの最大荷重を求めた。押抜試験では厚さ25 mm、開口部径16 mmの鋼製反力板で試験片の底部全面を支持し、直径8 mmの治具で試験片上面からアンカーのボルト部分に荷重を加えた。試験速度は1 mm/minとした。20°C、60%RHの空气中に2000時間暴露した試験片についても同様に評価し、これを「未浸せき」のデータとした。

### 7.2.3 実験結果と考察

接着剤 (樹脂) の種類や施工方法の異なる4種の接着系あと施工アンカーについて、40°Cの KOH 水溶液に浸せきした時の、接着強さの経時変化を図-30に示す。これらの結果は、押抜試験によって得られたものである。

いずれの実験ケースにおいても、母材コンクリートには肉眼で確認できるひび割れは生じなかった。浸せきの有無にかかわらずデータのばらつきは大きく、変動係数は製品A、B、C、Dの順にそれぞれ23%、18%、37%、13%となった。いずれの製品においても、浸せきによる破壊モードの変化に明確な傾向は認められなかった。接着強さの平均値に着目すると、4000時間浸せき後には、製品Bを除

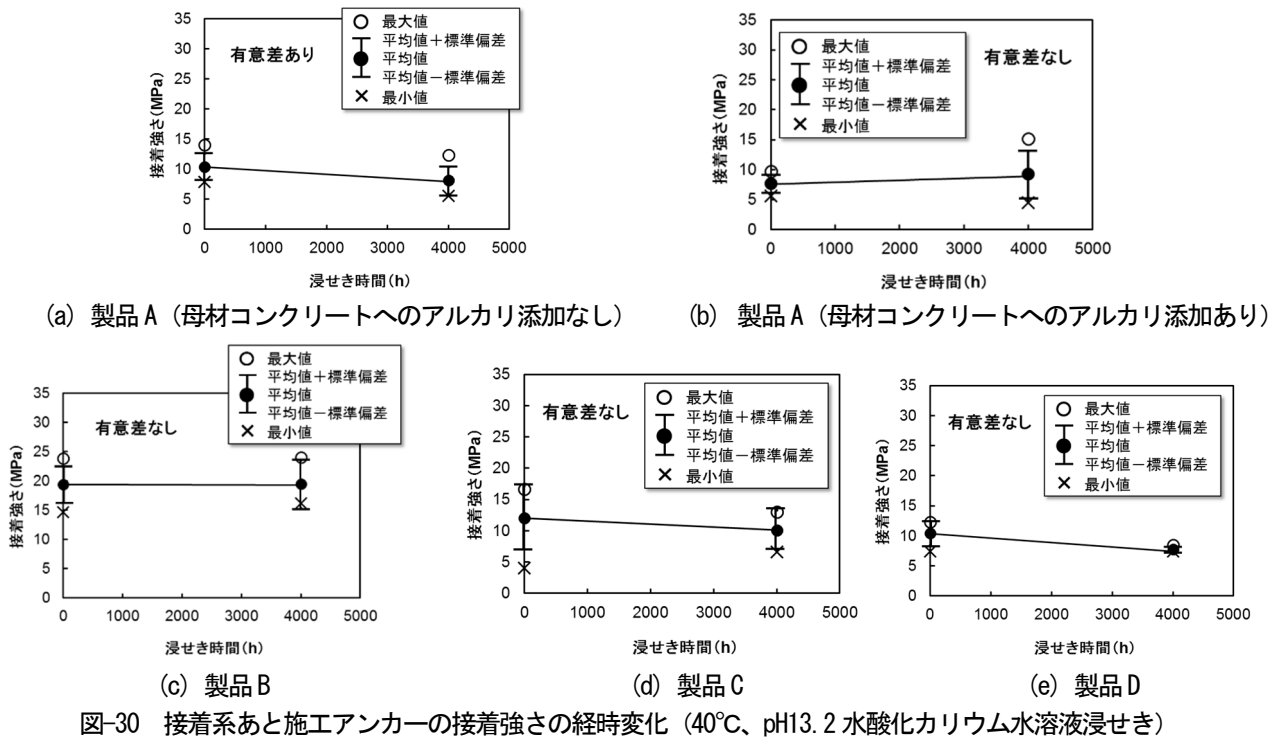


図-30 接着系あと施工アンカーの接着強さの経時変化 (40°C、pH13.2 水酸化カリウム水溶液浸せき)

きいずれもわずかながら低下が見られた。また、母材コンクリートにあらかじめアルカリを添加したケースでは、浸せきにより接着強さがわずかに増加した。

そこで、浸せき前と 4000 時間浸せき後の平均値について、有意水準 5% で F 検定および t 検定を行ったところ、製品 A (アルカリ添加なし) は有意差あり、製品 B、C、D および製品 A (アルカリ添加あり) について有意差は無いとの結果が得られた。

KOH 水溶液浸せきによるアンカー接着剤の劣化の有無を調べるため、押抜試験後の接着剤破断面表面近傍の樹脂について、赤外顕微鏡による化学構造分析を行った。その結果、製品 A (アルカリ添加なし) を除くいずれも、アルカリ浸せきの前後で明確な赤外吸収スペクトルの変化は認められなかった。以上の結果を踏まえると、製品 B、C、D については、実験を行った範囲内ではアルカリによる劣化は生じていないものと考えられる。

一方、製品 A (アルカリ添加なし) については KOH 水溶液浸せき前後において、化学構造の変化を示す赤外吸収スペクトルの変化が認められた。図-31 は 20°C、60%RH の気中または 40°C の KOH 水溶液中で 2000 時間経過後の、接着剤表面の赤外吸収スペクトルを示している。いずれのスペクトルにおいても 1730 cm<sup>-1</sup> 付近に、エステル結合の強い吸収ピークが認められる。これは、不飽和ポリエステル樹脂のスペクトルの特徴の一つである。40°C に浸せきした接着剤のスペクトルでは、1730 cm<sup>-1</sup> 付近の吸収

がやや弱まり、1580 cm<sup>-1</sup> 付近に新たな吸収ピークの出現の兆候が認められた。既往の研究などから、不飽和ポリエステル樹脂に含まれるエステル結合がアルカリ存在下で加水分解しカルボン酸塩を生じた場合に、同様の赤外吸収スペクトルの変化を示すことが明らかとなっている<sup>17),18)</sup>。すなわち、図-31 で示したスペクトルの変化から、40°C の KOH 水溶液に浸せきしたことにより、接着剤表面近傍の樹脂が加水分解を生じていることが示唆された。

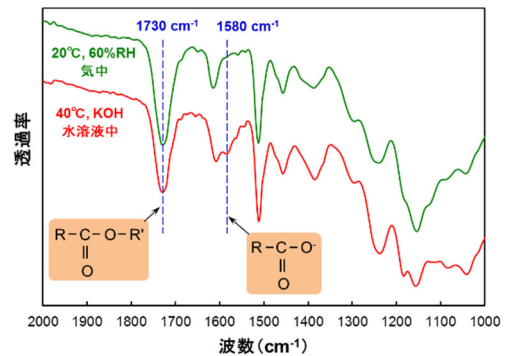


図-31 接着剤表面の典型的な赤外吸収スペクトル (2000 時間経過後)

既往の知見<sup>17),18)</sup>などから、加水分解が進行するほど 1580 cm<sup>-1</sup> 付近のピークは強くなり、逆に 1730 cm<sup>-1</sup> 付近の吸収は弱まるものと考えられるため、これらの 2 つの吸収ピークの比を指標として利用し、製品 A について浸せきによる加水分解の程度を評価した (図-32)。ここでは 1580 cm<sup>-1</sup> 付近 / 1730 cm<sup>-1</sup> 付近の吸収ピーク高さの比

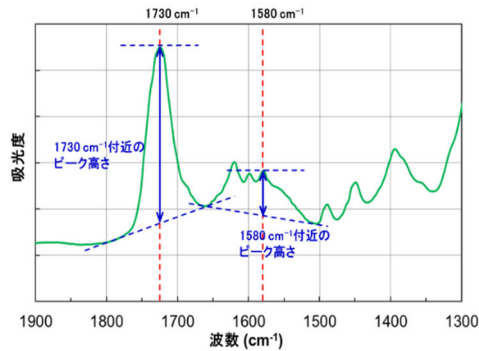
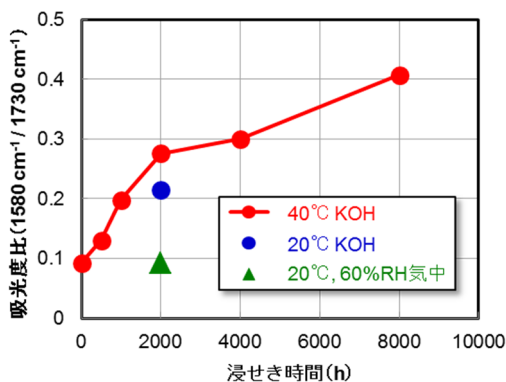


図-32 赤外吸収スペクトルにおけるピーク高さの求め方

図-33 赤外吸収スペクトルにおける吸光度比の経時変化 (1580 cm<sup>-1</sup> 付近 / 1730 cm<sup>-1</sup> 付近)

が大きいほど加水分解が進んでいることとなる。

赤外吸収スペクトルの解析結果を図-33に示す。それぞれのデータは、押抜試験後における接着剤表面の任意の3か所から試料を採取してスペクトル測定を行い、解析して得られた結果の平均値を示している。40°CのKOH水溶液に浸せきした場合に着目すると、浸せき時間の増加に伴い、吸光度比も増加していることがわかる。すなわち、浸せき時間の増加に伴って、樹脂の加水分解の程度が進行する傾向にあることが明らかとなった。また、2000時間経過時点の吸光度比について比較すると、20°C浸せきよりも40°C浸せきの方が大きいことから、環境液の温度が高い方がより促進的に加水分解が進行しているものと考えられる。20°C、60%RH気中に暴露した試験片については、2000時間後においても初期とほぼ同程度の吸光度であることから、加水分解は生じていないものと推察される。

以上の実験結果から、接着系あと施工アンカーの一部の製品では、アルカリ環境下において強度低下を伴うアンカー接着剤の化学的劣化を示すことが明らかとなった。また、劣化の指標として、赤外吸収スペクトルの吸光度比を利用できる可能性が示された。

### 7.3 湿潤環境下での持続荷重の影響に関する実験

#### 7.3.1 概要

接着系あと施工アンカーに持続的な荷重が長時間作用する場合の耐力は、最大耐力に比べて明らかに低下することが知られている<sup>19)</sup>が、これらのデータは十分に蓄積されておらず、適切な設計が行えないのが現状である。特に、母材であるコンクリートに発生したひび割れなどに起因し、コンクリート/アンカーの接着面に水が滞留するような場合、持続荷重と水分との複合的な作用により接着系アンカーの耐久性が低下することが懸念されるが、その挙動については明らかにされていない。

そこで、接着系あと施工アンカーを施工したコンクリート供試体を水中に浸せきし、この状態でアンカーに持続荷重を負荷するクリープ試験を行い、湿潤環境下における接着系アンカーのクリープ挙動について検討した。

#### 7.3.2 実験方法

市販されている不飽和ポリエステル樹脂系のアンカー(表-6の製品A)を試験に供した。試験片の母材となるコンクリートは、「7.2.2 実験方法」と同じものを用いた。このコンクリート円柱に、上記の接着系アンカーをメーカーの指定する方法(削孔径14.5mm、削孔長100mm)で設設し、これを供試体とした(図-34)。

クリープ試験機は、ロードセルによる荷重検出とサーボモータ駆動による張力ロッドの制御とを組み合わせたものである(図-35)。最大荷重は50kN、ウォームジャッキのストロークは100mmとなっている。この試験機には恒温水槽が備わっており、常温~70°Cの範囲で、供試体を一定水温の水中に浸せきしつつ、引張クリープ試験を行うことができる(図-36)。

予備試験において万能試験機を用いアンカーの引張耐力を求めたところ、49.7kNであった。そこでクリープ試験においては、引張耐力の80%(39.8kN)、70%(34.8kN)、60%(29.8kN)の3水準の引張荷重を持続的にアンカーに負荷し、この時のアンカーの変位を測定した。試験機の張力ロッドの変位をアンカーの変位とみなし、これを自動記録した。試験は、供試体を無負荷で所定の水温の水中に1週間浸せきした後に開始した。クリープ試験開始時には、およそ60秒で目標の荷重に達するよう徐々に載荷し、供試体への衝撃を回避した。浸せき水は層内で十分に攪拌されており、水温は25°C~65°Cの範囲で設定した値に保たれている。比較として、供試体を室温(20~35°C程度、温度制御なし)大気中に設置した状態でのクリープ試験も行った。

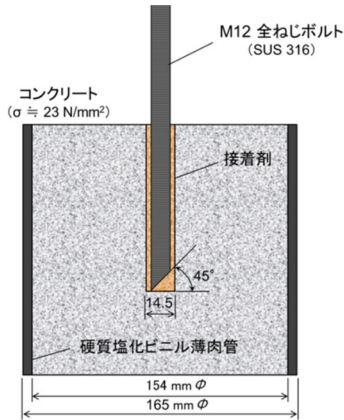


図-34 供試体の概略図

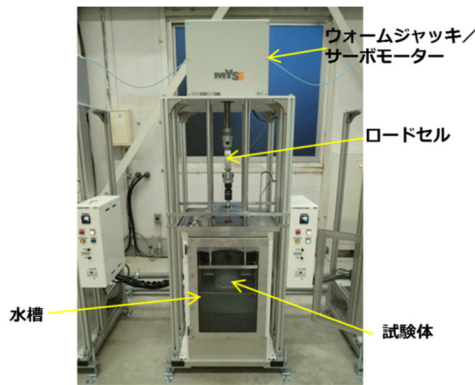


図-35 クリープ試験機の概観

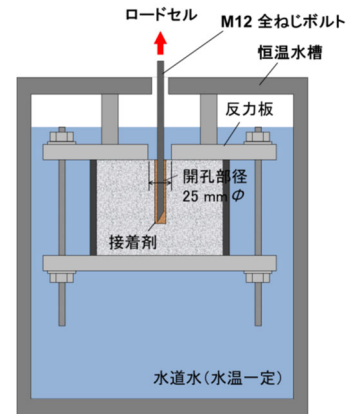
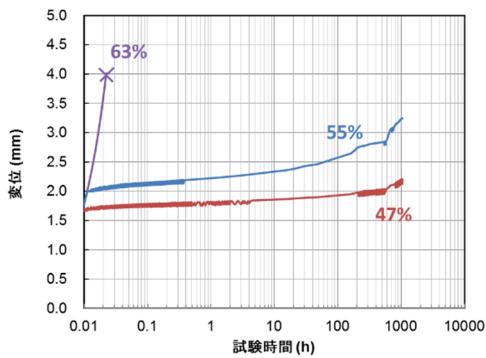
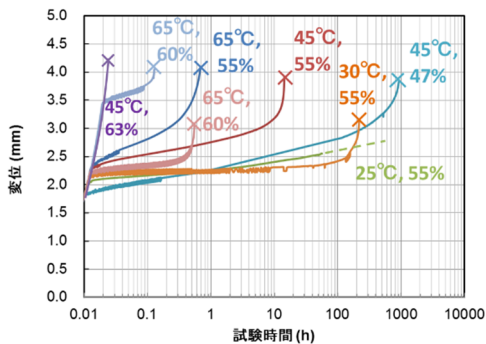


図-36 浸せきクリープ試験の模式図



(a) 室温大気中



(b) 水中

図-37 持続荷重下でのアンカー変位の経時変化

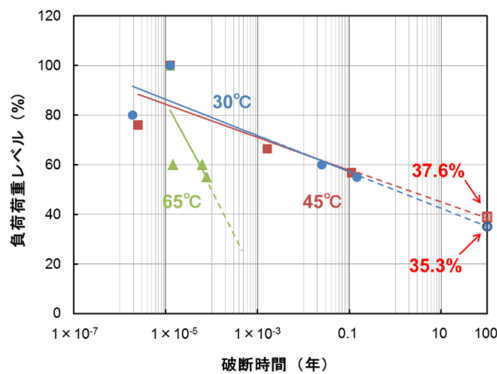


図-38 線形外挿によるクリープ破断寿命の予測 (水中)

### 7.3.3 実験結果と考察

クリープ試験における接着系アンカーの変位の経時変化を図-37に示す。負荷する荷重の増大に伴いアンカーのクリープ変形は速くなり、最大荷重の63%を負荷した試験水準では、試験開始から数分のうちに引抜破壊(付着切れ)に至り、試験が終了した。最大荷重の63%のケースでは、供試体により破壊までの時間に若干の差異があったものの、水中と大気中とで明確な違いは認められなかった。

水中に浸せきし、引張耐力の55%を負荷したケースと比較すると、水温の上昇に伴いクリープ変形が早くなり、65°Cでは試験開始から1時間程度、45°Cでは15時間程度、30°Cでは110時間程度で破壊に至った。一方で、25°Cのケースでは1000時間以降もクリープ変形は緩やかであり、破断には至らなかった。大気中で引張耐力の55%を負荷した結果と、同程度の温度(25°C)で水中で荷重を負荷した結果とを比較すると、載荷の初期に生じた変位は水中が大気中よりも大きく、また変位の経時変化は水中の方がやや早い結果となった。

AASHTO TP 84-11 (2017)では、接着系あと施工アンカーのクリープ破断寿命を予測する方法として、3段階の負荷荷重レベル(100%、80~70%、70~60%)と破断時間との関係から得られる近似直線を外挿することにより、より低い荷重を負荷したときの破断時間求める手順が示されている。この方法に基づき、水中でのクリープ試験結果を整理したグラフを図-38に示す。30°Cおよび45°Cの近似直線には大きな差異は無く、破断時間100年を想定した時の許容負荷荷重レベルはそれぞれ35.3%、37.6%となった。製造メーカーの技術資料によると、試験に用いたアンカーの長期許容引張荷重は接着系あと施工アンカーの設計式<sup>20)</sup>を用いて算定されており、引張耐力のおよそ20%(11.7 kN)に設定されている。すなわち、一般的な



温度条件であれば湿潤環境であっても、100年間でクリープ破断は生じない荷重レベルに設定されていることがわかった。一方、水温 65°C の高温になると、低い負荷荷重でも寿命が極端に短くなることが示され、使用荷重だけでなく、使用温度の許容値についても適切に設定する必要があることを把握した。

## 8. まとめ

本研究では、ジェットファン等のトンネルの付属施設を覆工に取り付けるために使用されるアンカー等の基礎的なデータの取得を目的に、現地計測やアンカーの引張試験等による調査研究を実施した。令和3年度では、これらの研究成果からあと施工アンカー等の設計・施工・維持管理における留意点を取りまとめ、土木研究所資料の原稿を作成した。その概要を以下に示す。

### 【本報告書 2 章】

北海道のトンネル現場にて、質量約 2t のジェットファンを支持する計 6 本のターンバックル (TB) を対象に、ジェットファンの据付け前後や地震発生時の軸力を計測した。

- ・取付部材の設計における軸力の計算値と現地での計測値で乖離が認められたが、設計において確保されている安全率を考慮すると小さな変動幅であると考えられた。
- ・対象トンネル付近での震度 4 の地震発生時、方向安定用 TB で軸力が 0.24kN 変動した。吊り用 TB での軸力変動はさらに小さかった。

### 【本報告書 3 章】

アンカーの設計に関し、特に注意が必要な事項としてへりあきや軸力の経時変化に着目した室内引張試験を実施した。

- ・一般にコーン状破壊の角度として 45° が想定されるが、試験の結果、より扁平で上部の面積が大きなコーンで破壊することがほとんどであった。へりあきはアンカーの埋込み長さ以上確保することが望ましい。
- ・ナット締付けによりアンカーに導入された軸力は、個々のアンカーで大きさが異なったり、経時的に低下したりした。付属施設設置時や点検時にはナットの状態を確認し、再締付けを行う等の措置が必要である。

### 【本報告書 4 章】

アンカーの施工上の不具合が引張耐力に及ぼす影響を室内引張試験により調査した。

- ・穿孔径を標準的な値よりも 2~3mm 過大とした場合、引張耐力が大幅に低下した。
- ・穿孔深さを標準よりも 20mm 浅くした場合、引張耐力

は小さくなり、標準よりも 20mm 深くした場合、引張耐力は大きくなった。ただし、穿孔深さを標準よりも深くした場合、スリーブの打込みの精度が低下し、母材コンクリートとの定着に不具合が生じる可能性が高まると考えられる。

- ・穿孔径、穿孔深さとも、標準的な値となるよう、確実な施工管理が必要である。

### 【本報告書 5 章】

供用中に母材コンクリートにひび割れが生じた場合にアンカーの引張耐力に及ぼす影響を室内引張試験により調査した。

- ・想定されるコーン状破壊の範囲内にひび割れが生じた場合、コーンが分断され、引張耐力が低下した。
- ・ひび割れがアンカーの位置に生じると、引張試験時の剛性や引張耐力が低下した。特にひび割れ幅が大きいほどコーンが分断しやすく、顕著だった。
- ・付属施設取付け部の点検においては、アンカーのみならず、その周辺の母材コンクリートのひび割れの有無及びその状態についても入念に点検することが重要である。

### 【本報告書 6 章】

アンカーによる取付け部近傍への繊維シート接着工を再現した室内引張試験を実施した。

- ・ひび割れ導入後に繊維シートを接着した試験では、繊維シート未接着に対し、引張耐力が向上したケースと、低下したケースが認められた。引張耐力が低下したケースでは、プライマーがアンカーの内部及び周辺部に充填され、引張載荷時のスリーブの拡張を阻害した可能性が考えられた。繊維シート接着時は、プライマーや接着剤がアンカーの内部及び周辺部に浸透することの無いよう、シーリング材で間詰めする等の配慮が必要である。

### 【本報告書 7 章】

コンクリート内部において接着系あと施工アンカーに影響を及ぼし得る環境作用として「アルカリ」と「持続荷重」に着目し、これらがアンカー接着剤の特性に与える影響について検討した。

- ・水酸化カリウム水溶液中での浸せき試験では、実験に供した一部の製品で、強度低下を伴うアンカー接着剤の化学的劣化が認められた。また、劣化の指標として、赤外吸収スペクトルの吸光度比を利用できる可能性が示された。
- ・湿潤環境下でのクリープ試験では、高温、短時間の実験結果にもとづき低温、長時間の寿命予測ができる可能性が示された。水温 65°C の高温になると、低い負荷

荷重でも寿命が極端に短くなることが示され、使用荷重だけでなく、使用温度の許容値についても適切に設定する必要があることを把握した。

以上、多数実施したアンカーの室内引張試験では、実験設備の仕様の都合上、ジェットファンの取付けに用いられる実際のアンカーよりも一回りサイズの小さなアンカーを多用した。試験結果の傾向は、アンカーのサイズによらず同様であると考えられるが、本研究の成果を現場で活用する上で留意が必要であると考えられる。

本研究で得られた知見の最大化を図り、道路利用者の安全・安心の向上に貢献する所存である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局 国道・技術課：道路トンネル定期点検要領 平成31年3月、pp.2-3、2019.3
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説 平成20年改訂版、pp.117~144、2008.10
- 3) 原翔平、日下敦、小出孝明、砂金伸治：トンネル換気用ジェットファン吊金具の軸力計測に関する一考察、トンネル工学報告集、Vol.28、I-51、pp.1~6、2018.11
- 4) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課：機械工事共通仕様書（案）、pp.226~228、2021.3
- 5) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案）、コンクリートライブラリー160、pp.44~72、2022.1
- 6) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010年改訂版、pp.318~328、2010.11
- 7) 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー標準試験法・同解説、pp.18~23、1987
- 8) 中村英佑、栗原勇樹、古賀裕久：金属系あと施工アンカーの引張耐力に関する基礎的研究、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第17巻、pp.69~72、2017.10
- 9) 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー点検・診断要領（案）—取付物固定用—、p.付録7-3、2019
- 10) N. Motosh: Development of Design Charts for Bolts Preloaded up to the Plastic Range, Journal of Engineering for Industry, ASTM(The American Society of Mechanical Engineers), Volume 98, Issue.3, pp.849~851, 1976.8
- 11) 日下敦、小出孝明、砂金伸治：トンネル内の金属系あと施工アンカーの引抜き耐力に関する基礎的実験、トンネル工学報告集、Vol.27、I-46、pp.1~5、2017.11
- 12) 中村英佑、日下敦、古賀裕久：あと施工アンカーの耐荷力の低下要因に関する基礎的考察、土木技術資料、Vol.60、No.8、pp.24-27、2018
- 13) 小泉悠、日下敦、巽義知：繊維シート接着工があと施工アンカーの引抜き耐力に及ぼす影響に関する載荷実験、トンネル工学報告集、Vol.31、I-18、pp.1~7、2021.11
- 14) ACI 355.4-11: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 2011
- 15) 富山禎仁、西崎 到：接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性評価方法に関する検討、土木学会論文集A1、Vol.72、No.5、pp.46-55、2016
- 16) 富山禎仁、西崎 到：接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性評価方法に関する検討、複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集、第11回、pp.296-303、2015
- 17) Chin, J. W., Aouadi, K., Haight, M. R., Hughes, W. L. and Nguyen, T.: Effects of water, salt solution and simulated concrete pore solution on the properties of composite matrix resins used in civil engineering applications, Polymer Composites, Vol. 22, Issue 2, pp. 282-298, 2001
- 18) 富山禎仁、久保内昌敏、仙北谷英貴、津田 健：高分子系材料の腐食検知をめざした赤外線透過ファイバセンサの特性評価、強化プラスチック、Vol.49、No.6、pp.258-264、2003
- 19) R. A. Cook, E. P. Douglas and T. M. Davis, "Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions", NCHRP Report 639, Transportation Research Board, 2009
- 20) 国土交通省：あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針、62 p.、2006