

コンクリート舗装の維持修繕工法の 改善に関する共同研究報告書

I 「既往の維持修繕工法の改善」編

2019年3月

国立研究開発法人土木研究所

学校法人東京農業大学

独立行政法人石川工業高等専門学校

学校法人北海道科学大学

一般社団法人セメント協会

Copyright © (2019) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

コンクリート舗装の維持修繕工法の 改善に関する共同研究報告書

I 「既往の維持修繕工法の改善」編

(国研) 土木研究所 つくば中央研究所 道路技術研究グループ (舗装)

グループ長	辻 保人
上席研究員	藪 雅行
主任研究員	岩永 真和
交流研究員	内田 雅隆

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地保全技術研究グループ (寒地道路保全)

上席研究員	丸山 記美雄
研究員	上野 千草

(学) 東京農業大学

教授	小梁川 雅
----	-------

(独) 国立高等専門学校機構 石川工業高等専門学校

教授	西澤 辰男
----	-------

(学) 北海道科学大学

教授	亀山 修一
----	-------

(一社) セメント協会 研究所 コンクリート研究グループ

グループリーダー	吉本 徹
----------	------

要 旨 :

本共同研究では、コンクリート舗装の維持修繕工法の改善を目的に、3つのWGを設置し検討を実施しており、本報告書は、その中のひとつのWGである「既往の維持修繕工法の改善」にて実施した結果を取りまとめたものである。

コンクリート舗装の維持管理手法は、舗装点検要領では構造的な特徴から目地部に着目した点検を実施することとされており、目地部管理の重要性が指摘されている。

そこで、本研究では、コンクリート舗装版の高耐久性を発揮させるため既往の維持修繕工法の改善を目的に、コンクリート舗装の供用調査による各性能の把握、損傷要因の調査、目地部の健全性を評価する非破壊診断手法の検討、寒冷地における凍上対策及び各修繕工法の効果の確認と課題を抽出した。

キーワード：コンクリート舗装，維持修繕工法，目地部，診断方法，非破壊検査，凍上

目 次

1.	はじめに	1
1.1	背景と研究目的	1
1.2	共同研究体制	2
1.3	本報告書の構成	3
2.	供用中のコンクリート舗装の調査	6
2.1	平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査	7
2.2	国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析	20
3.	コンクリート舗装の非破壊診断手法に関する検討	75
3.1	コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発	76
3.2	目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討	90
3.3	MMS を用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討	110
3.4	動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping) を用いた国道におけるコンクリート版下の健全性評価	113
3.5	コンクリート舗装の非破壊検査手法と課題	123
4.	積雪寒冷地における凍上対策に関する検討	124
5.	既往の維持修繕工法の改善に関する検討	136
6.	まとめと今後の課題	148
	付録	152
付録 1	「2.1 平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査」測定データ	154
付録 2	「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」測定データ	193
付録 3	「3.2.2 漏洩磁束法によるダウエルバー破断検知に関する実験的検討」測定データ	205

1 はじめに

1.1 背景と研究目的

高度経済成長期以降に建設された社会インフラの老朽化が進行する中で、財政難により維持管理費用の縮減が望まれている。舗装分野においては、維持管理費用の縮減の一つの方策として、高い耐久性が期待されるコンクリート舗装の適所への積極的な活用が挙げられる¹⁾。

コンクリート舗装の積極的活用を促進するため、土木研究所内ではこれまでに「コンクリート舗装の構造設計の高度化に関する研究」、「セメントコンクリート舗装の適用性に関する研究」に取り組み、コンクリート舗装版の構造設計の検証と高度化及び構造細目の有効性の検証、コンクリート舗装の適用範囲拡大するために、盛土区間、地下横断構造物区間と供用性の調査を実施し、コンクリート舗装の課題解決に向けた研究開発を実施してきた。

一方で、道路管理者からコンクリート舗装を採用するにあたり、破損した場合の維持管理に関する懸念が指摘されており、コンクリート舗装の普及を妨げる要因の一つに考えられる。

コンクリート舗装の維持管理手法は、平成 28 年 10 月に策定された舗装点検要領²⁾では、コンクリート舗装の構造的な特徴から、目地部に着目した点検を実施することとされた。コンクリート舗装の目地部の破損は、目地材飛散、目地部の角欠けなどに代表されるが、これらの軽微な段階での損傷を見逃し、あるいは発見しても適切な処置が行われない場合、部分打替えやアンダーシーリングの必要性が明らかに生じるまで劣化が進行し、結果的に修繕コストが増大する可能性がある。また、コンクリート舗装の修繕工法は提案されているものの、同一路線や同一損傷に対する各修繕工法の効果を検証した事例は見当たらない。

このような背景のもと、本研究では、コンクリート舗装版の高耐久性を発揮させるため既往の維持修繕工法の改善を目的に、コンクリート舗装の供用調査による各性能の把握、損傷要因の調査、目地部における非破壊診断手法の検討、寒冷地における凍上対策及び各修繕工法の効果の比較・検証と課題の抽出を実施した。

なお、本研究は、「コンクリート舗装の維持修繕工法の改善に関する共同研究」の中の一つの WG「既往の維持修繕工法の改善（修繕工法 WG）」で実施したものである。

1.2 共同研究体制

共同研究は、修繕工法WG、維持工法WG、早期交通開放WGの3WGを設置し、2016年3月～2019年3月まで実施した。本WGである修繕工法WGの参加者を表-1.2.1に示す。

表-1.2.1 共同研究参加者（修繕工法WG）

機 関	氏 名	所属・役職	参加期間
(国研)土木 研究所	久保 和幸	近畿地方整備局大阪国道事務所長 (元土木研究所 道路技術研究グループ)	2016.3～16.3
	藪 雅行	道路技術研究グループ 舗装チーム 上席研究員	2016.4～19.3
	渡邊 一弘	国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路基盤研究室長 (元土木研究所 道路技術研究グループ)	2016.3～18.3
	岩永 真和	道路技術研究グループ 舗装チーム 主任研究員	2016.3～19.3
	若林 由弥	国土交通省 大臣官房 技術調査課 建設システム管理企画室 (元土木研究所 道路技術研究グループ)	2016.3～18.3
	高木 亮一	(株)安藤・間 (元土木研究所 交流研究員)	2016.3～16.3
	松本 健一	(株)太平洋コンサルタント (元土木研究所 交流研究員)	2016.4～17.3
	内田 雅隆	道路技術研究グループ 舗装チーム 交流研究員	2017.4～19.3
	木村 孝司	元寒地保全技術研究グループ (寒地道路保全) 上席研究員	2016.3～18.3
	丸山 記美雄	寒地保全技術研究グループ (寒地道路保全) 上席研究員	2016.3～19.3
	上野 千草	寒地保全技術研究グループ (寒地道路保全) 研究員	2016.3～19.3
(学)東京農業 大学	小梁川 雅	地域環境科学部 生産環境工学科 教授	2016.3～19.3
石川工業高等 専門学校	西澤 辰男	環境都市工学科 教授	2016.3～19.3
(学)北海道 科学大学	亀山 修一	工学部 都市環境学科 教授	2016.3～19.3
(一社)セメン ト協会	佐藤 智泰	研究所 コンクリート研究グループ グループリーダー	2016.3～17.3
	吉本 徹	普及部門リーダー (需要開拓、普及活動担当) 研究所 コンクリート研究グループ グループリーダー	2016.3～17.3 2017.3～19.3
オブザーバー			
機 関	氏 名	所属・役職	参加期間
大成ロテック (株)	城本 政一	技術研究所 課長	2016.3～19.3
	澤口 実	課長代理	2016.3～19.3

(2019年3月現在)

1.3 本報告書の構成

本報告書の構成概要を表-1.3.1に示す。

表-1.3.1 本報告書の構成概要

工程	本報告書項目
設計	<div data-bbox="836 434 1433 584" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>4 積雪寒冷地における凍上対策に関する検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・凍上の実態調査 ・既存の設計法の問題点を抽出し、設計面からの改善方法を提案 </div>
実態調査	<div data-bbox="268 537 826 667" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>2.1 平泉 BP コンクリート舗装の追跡調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・供用 9、16、18 年での追跡調査 ・鉄網有無の比較、高い盛土区間での検証 </div> <div data-bbox="464 680 1171 797" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・損傷メカニズム推定のための詳細調査 ・損傷したコンクリート舗装の材料分析 </div>
診断手法の検討	<div data-bbox="268 833 352 869" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">目地部</div> <div data-bbox="268 882 751 1128" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>3.1 コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・FWD から測定したたわみと 3DFEM に基づいた構造モデルによって目地部の劣化過程を推定する健全度評価手法の検討 </div> <div data-bbox="783 864 1382 1010" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>3.2 目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・漏洩磁束法によるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討 </div> <div data-bbox="783 1048 1382 1167" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>3.3 MMS を用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・MMS による段差評価に関する検討 </div>
	<div data-bbox="268 1196 320 1232" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">版下</div> <div data-bbox="347 1211 1190 1323" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>3.4 動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping) を用いた国道におけるコンクリート版下の健全性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・DTW による国道における版下の損傷検出に関する適用性の評価 </div>
維持修繕工法の改善	<div data-bbox="347 1357 1059 1442" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>5 既往の維持修繕工法に関する検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・各修繕工法の効果の確認と課題の抽出 </div>

2章では、「平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査結果」「国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」について記載した。

「平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査結果」では、コンクリート舗装の設計期間は20年で設計される中、当該路線は供用18年を迎え、損傷が顕在化することが予想される。そのため、コンクリート舗装の供用による性能曲線を把握することを目的に、各種調査を実施した。また、当該路線は、試験的に鉄網有無の工区を設けていることから、鉄網の効果についても検証した。

「国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」では、国道のコンクリート舗装において、大型車両通行時に振動が発生する不具合が生じた。当該道路の供用年数は約50年経過しており、これまでアンダーシーリング工法やアスファルトにおけるオーバーレイ工法の修繕がなされている。1950～1960年頃はコンクリート舗装が道路延長の約30%を占めており、今後、当該路線と同様の事例が生じることが予想される。そのため、今後、同様の事例が生じた際のモデルケースとなるよう、損傷メカニズムの推定及び補修計画を立案することを目的に詳細調査を実施し、修繕計画を立案した。

3章では、「コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発」、「目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討」、「MMSを用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討」、「動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping)を用いた国道におけるコンクリート版下の健全性評価」、「コンクリート舗装の非破壊検査手法と課題」について記載した。

「コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発」では、3次元有限要素法(3DFEM)を用いたコンクリート舗装目地部の構造モデルによる逆解析によって、目地部の健全度を評価する方法を検討した。

「目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討」では、目地部の荷重伝達性能に大きく影響を与えるダウエルバーの健全性を非破壊検査で評価することを目的に、鉄筋コンクリート(RC)、プレストレストコンクリート(PC)分野で用いられている既存の非破壊検査技術を用いて評価を行い、コンクリート舗装への適用性について検討した。

「MMSを用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討」では、目地部に生じる段差を対象に、ネットワークレベルでの広域での診断を目的に、交通規制を要せずに効率的かつより精緻に測定できる可能性のあるMMS(Mobile Mapping System)に着目し、従来の測定方法と比較し、精度の確認を実施した。

「動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping)を用いた国道におけるコンクリート版下の健全性評価」では、コンクリート舗装版下の損傷の代表として、空洞を検出する方法について検討を行った。検討の具体的方法は、FWD試験装置で0.5mピッチで測定したコンクリート版の D_0 たわみ曲線を用い空洞が存在するコンクリート版を検出できるのか検証を行った。

「コンクリート舗装の非破壊検査手法と課題」では、各非破壊検査手法について診断可否や診断精度を検討した。

4章では、「積雪寒冷地における凍上対策に関する検討」について記載した。

積雪寒冷地におけるコンクリート舗装の課題である「凍上等の影響による構造的な破損」について、既設

舗装調査を行い、既存の設計法の問題点を抽出し、改善方法を検討した。

5章では、「**既往の維持修繕工法の改善に関する検討**」について記載した。

コンクリート舗装を修繕する場合、現場によっては、ライフサイクルコストや交通規制の可否などにより、目的に適した修繕工法が採用できない場合も考えられ、同一損傷における各修繕工法の効果を把握しておくことは、修繕工法を採用する上で極めて重要である。そこで、「**2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析**」で検討した国道において、各種の修繕工法の実施及び追跡調査を実施し、各修繕工法の効果の確認と課題の整理を実施した。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会道路分科会・建議（中間取りまとめ）：道が変わる、道を変える，平成24年6月
- 2) 国土交通省 道路局：舗装点検要領，平成28年10月

2. 供用中のコンクリート舗装の調査

本章では供用中のコンクリート舗装の調査を実施し、その結果を取り纏めた。

「2.1 平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査」

コンクリート舗装の各性能の経時変化を把握し、損傷メカニズムの解明に繋げることを目的に平泉バイパスにおいて供用16年、18年目の調査を行い、調査結果をまとめた。

一般的にコンクリート舗装は設計期間を20年とし設計されているなかで、平泉バイパスはまもなく設計期間を迎える。また、平泉バイパスでは、鉄網の効果を把握するため、試験的に鉄網設置区間、未設置区間を設けていることから、鉄網の効果についても確認した。

「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」

国道において供用後アスファルトによりオーバーレイされたコンポジット舗装にて、コンクリート舗装の目地上に発生するリフレクションクラックにより大型車両走行時に振動が発生する損傷が確認された。よってこの損傷メカニズムの推定し、補修計画を立案するために詳細調査を実施した。さらに、詳細調査を通して既存の評価方法における課題や、目地部における材料（コンクリート、ダウエルバー）性状についても確認した。

2.1 平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査

2.1.1 調査概要

(1) 調査対象

調査は、岩手県西磐井郡平泉町平泉地内の国道4号平泉バイパスで実施した。平泉バイパスは、平成11年に施工されたコンクリート舗装である。調査場所を図-2.1.1、調査工区を図-2.1.2、工区割を図-2.1.3に示す。

平泉バイパスは、施工方法として「スリップフォーム工法」を採用した技術活用パイロット事業対象工事である。当工事は盛土が10年以上の工区と盛土の新しい工区があり、10年以上の盛土工区を2および3工区とし、新しく盛土した工区を1および4工区としている。スリップフォーム工法は、基本的には鉄網を設置しない構造であるが、新しく盛土した1、4工区では将来の沈下等を考慮し鉄網を用いている。また、2工区では同一路床条件での鉄網の効果を検討するため、鉄網有り区間と鉄網無し区間を設けている¹⁾。

また、本調査区間の一部は、一関遊水地堤防と併設する構造であり、図-2.1.3に示す通り工区によっては最大で14mの盛土高さを有する構造となっている。図-2.1.4に標準断面を示す。



図-2.1.1 調査場所 (Google Map に追記)

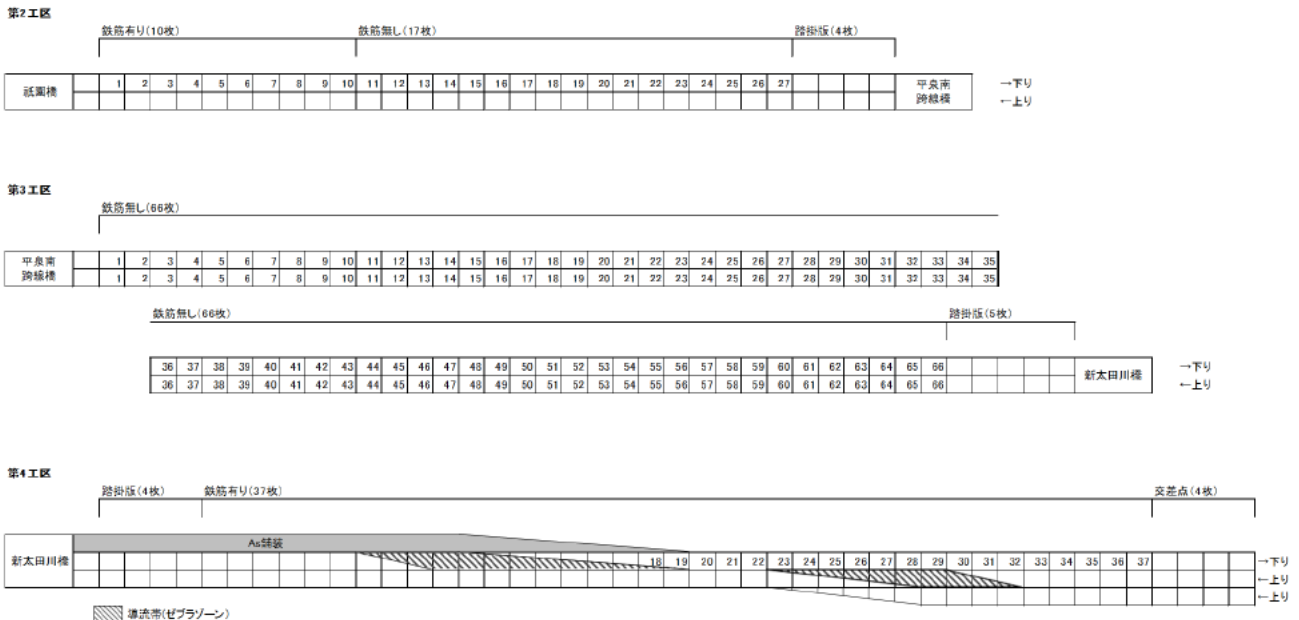


図-2.1.2 調査工区

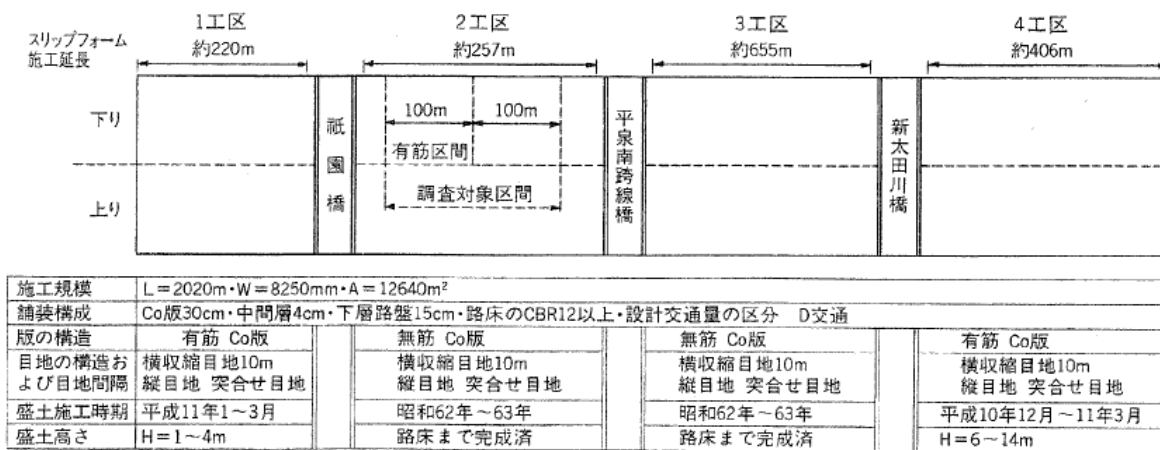


図-2.1.3 工区割

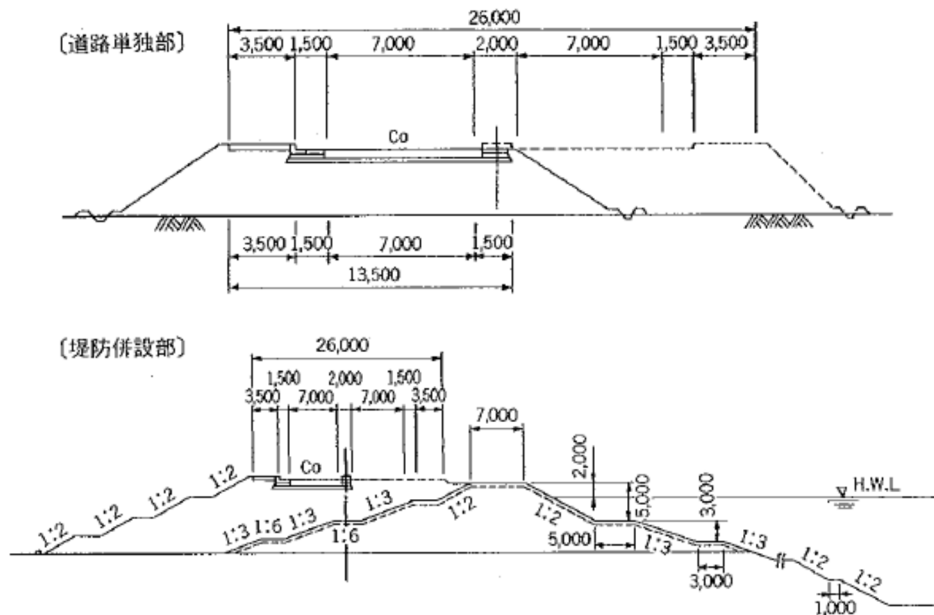


図-2.1.4 標準断面

調査は、平成27年度、平成29年度に実施した。表-2.1.1に調査日を示す。

表-2.1.1 調査実施日

調査年度	調査日
平成27年度	平成27年11月18～20日
	平成28年2月24～26日
平成29年度	平成29年11月21日
	平成30年2月26日

(2) 調査項目、調査方法

調査年度ごとの調査工区、調査項目を表-2.1.2 に示す。

表-2.1.2 調査年、調査項目及び調査工区

調査年度	調査項目	2工区（下り）	3工区（上り）	3工区（下り）	4工区（下り）
H20年度 (供用9年)	FWD	●	—	●	●
	ひび割れ	●	—	●	●
	すべり抵抗性、 きめ深さ	●	—	●	—
H27年度 (供用16年)	FWD	●	●	●	●
	ひび割れ	●	●	●	●
	すべり抵抗性、 きめ深さ	●	—	●	—
H29年度 (供用18年)	FWD	●	●	●	●
	ひび割れ	●	●	●	●
	すべり抵抗性、 きめ深さ	●	—	●	—

1) FWDによるたわみ量の調査（版央、目地部、横断ひび割れ部）

FWD（載荷荷重：98kN）を用いてたわみ量を測定した。平成27年度の測定は静的データ、平成29年度の測定は、静的データと動的データを同時に取得した。測定回数は4回（1回目は予備的な載荷）とし、2～4回目の3回のデータの平均値をたわみ量として採用した。個々の測定箇所では、 D_0 たわみの最大値と最小値の差が最小値の10%以内となるように確認し、10%以上となる場合は再測定を実施した。

載荷位置は図-2.1.5に示すとおり、各コンクリート版について、2～3箇所を実施した。なお、横断ひび割れ部および目地縁部では、横ひび割れおよび目地部に載荷板外縁部が接するように載荷板を設置し測定した。

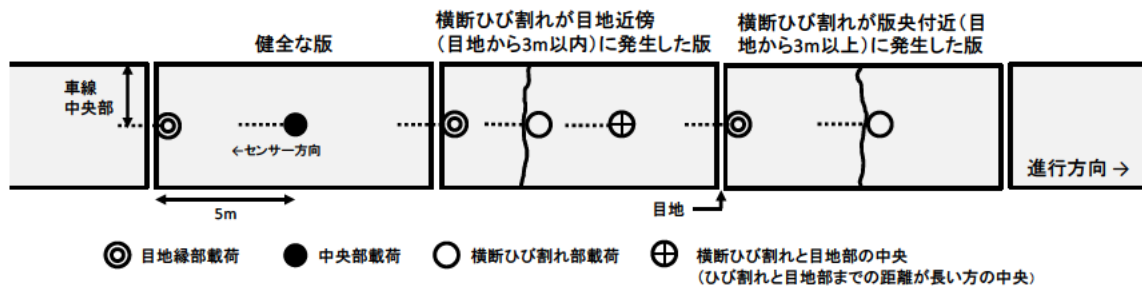


図-2.1.5 FWD 載荷箇所

2) コンクリート版のひび割れ

コンクリート版に生じたひび割れを版毎に調査した。調査の方法は、「舗装調査・試験法便覧（平成 19 年 6 月、(社) 日本道路協会）」(S029)の「(1) スケッチによる方法」³⁾に準拠し、ひび割れの形状、位置に加えて、ひび割れ幅についてもスケッチを実施した。また、目地部において角欠けが発生している場合は、角欠けについてもスケッチを実施した。

3) すべり抵抗性、きめ深さ

すべり抵抗性は、「舗装調査・試験法便覧 S021-3 (回転式すべり抵抗測定器による動的摩擦係数の測定方法)」³⁾、きめ深さは、「舗装調査・試験法便覧 S022-3T (回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法)」³⁾に準拠し、実施した。すべり抵抗、きめ深さの測定箇所を図-2.1.6 に示す。

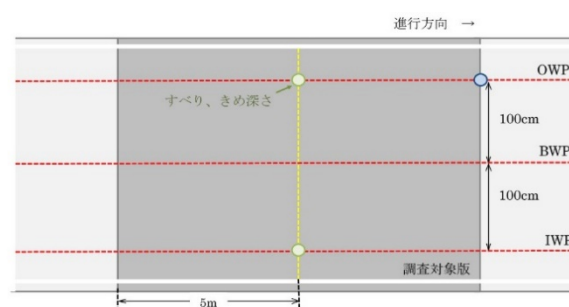


図-2.1.6 測定箇所

2.1.2 調査結果

(1) FWDによるたわみ量の経年調査結果

1) 版央での D_0 たわみ量の経年変化

版央での D_0 たわみ量の測定結果を図-2.1.7～図-2.1.10に示す。

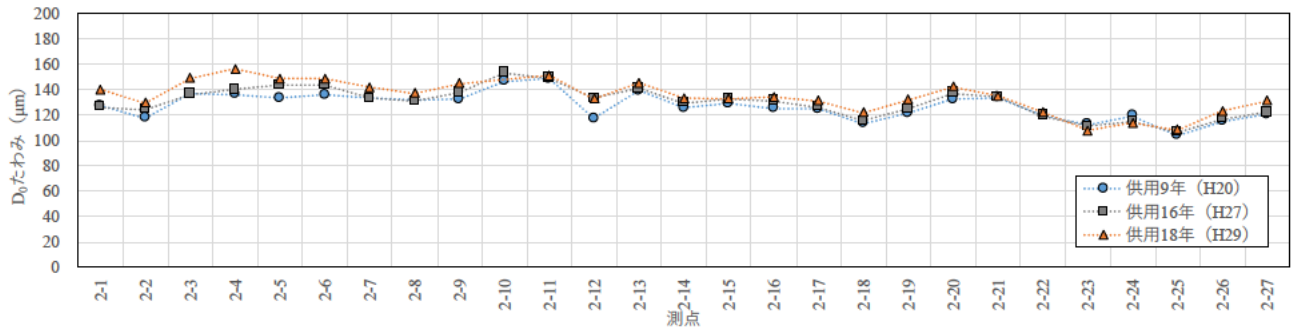


図-2.1.7 版央での D_0 たわみ量の測定結果【2工区（下り）】

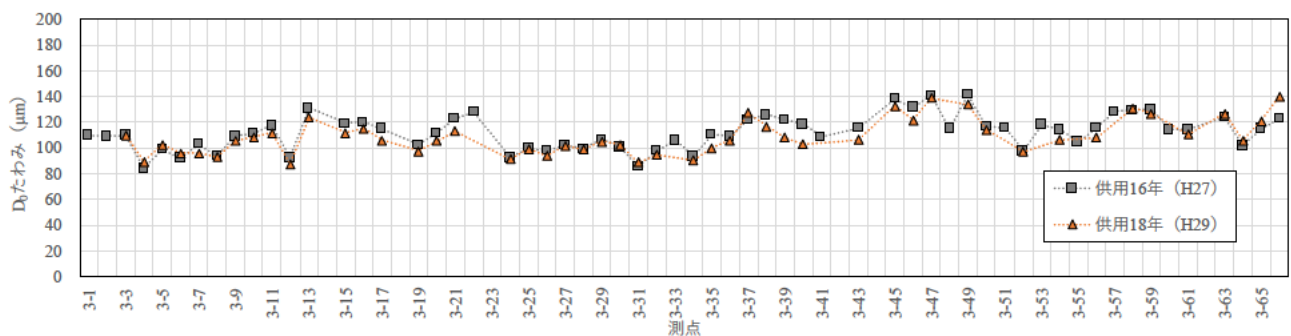


図-2.1.8 版央での D_0 たわみ量の測定結果【3工区（上り）】

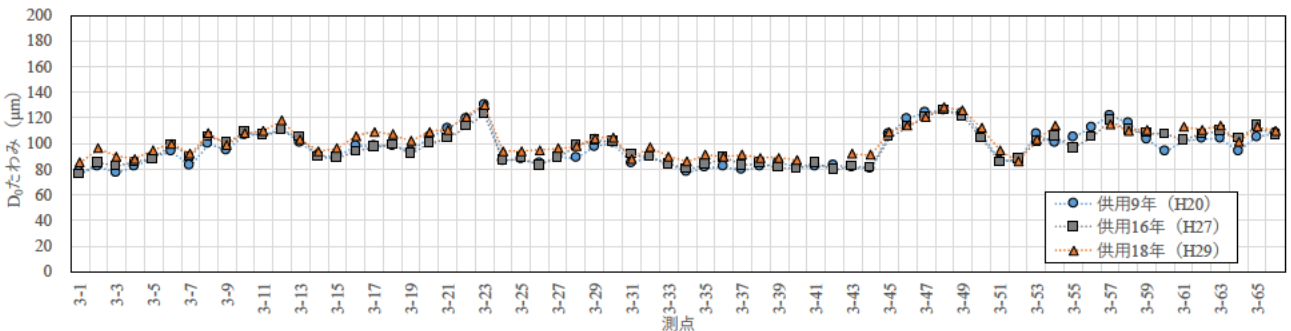


図-2.1.9 版央での D_0 たわみ量の測定結果【3工区（下り）】

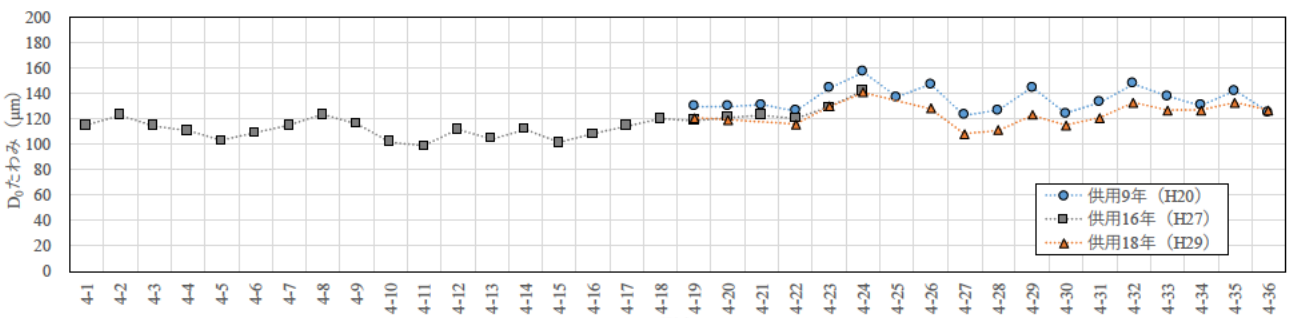


図-2.1.10 版央での D_0 たわみ量の測定結果【4工区（下り）】

表-2.1.3に各工区の測定年ごとの平均値を示す。

表-2.1.3 各工区の平均値（版央での D_0 たわみ）

測定工区	測定年度		
	供用9年（H20）	供用16年（H27）	供用18年（H29）
第2工区（下り）	127	130	134
第3工区（上り）	—	112	109
第3工区（下り）	104	97	102
第4工区（下り）	135	115 ^{※1)}	124

※1) 第4工区（下り）のH27年度の測定は、他年度と測定した版が異なる。

版央での平均 D_0 たわみは、第2工区（下り）では130 μm 程度、第3工区（上り）では110 μm 程度、第3工区（下り）では100 μm 程度、第4工区（下り）では115～135 μm 程度を示した。経年による大きな変化は確認できなかったことから、版央では良好な構造性能を示し、健全性を維持していると推察できる。

2) 目地部での D_0 たわみ量の経年変化

目地部での D_0 たわみ量の測定結果を図-2.1.11～図-2.1.14に示す。

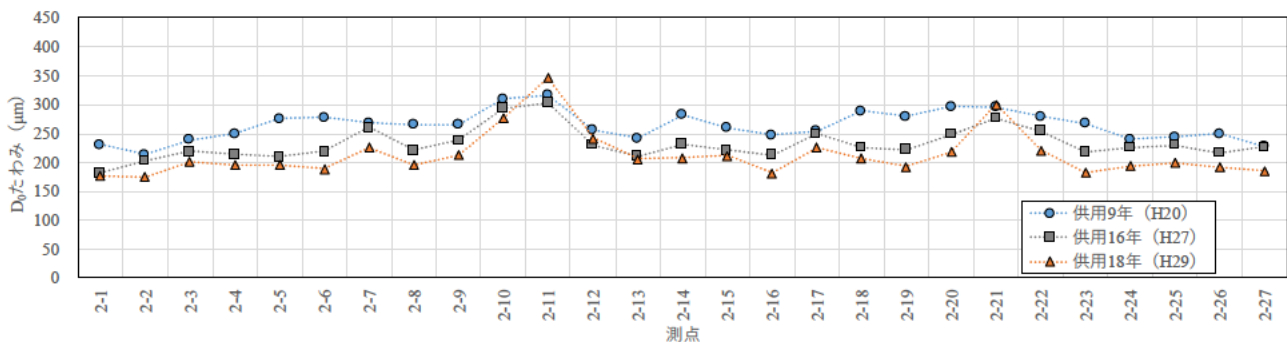


図-2.1.11 目地部での D_0 たわみ量の測定結果【2工区（下り）】

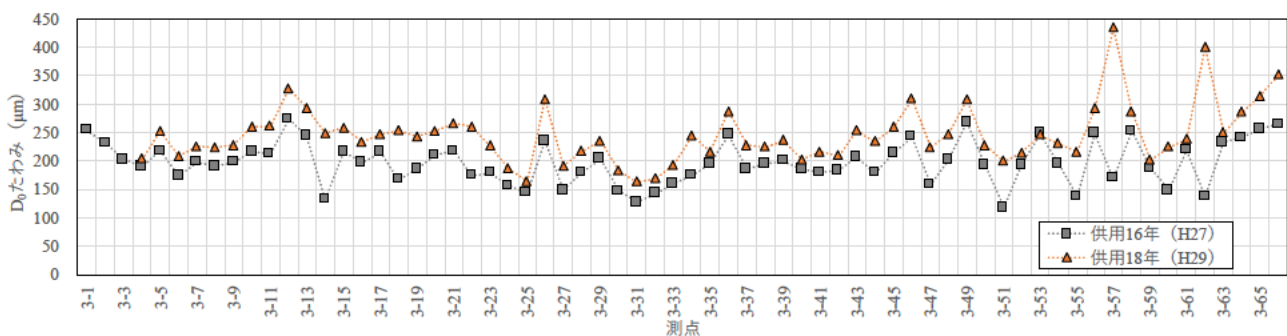


図-2.1.12 目地部での D_0 たわみ量の測定結果【3工区（上り）】

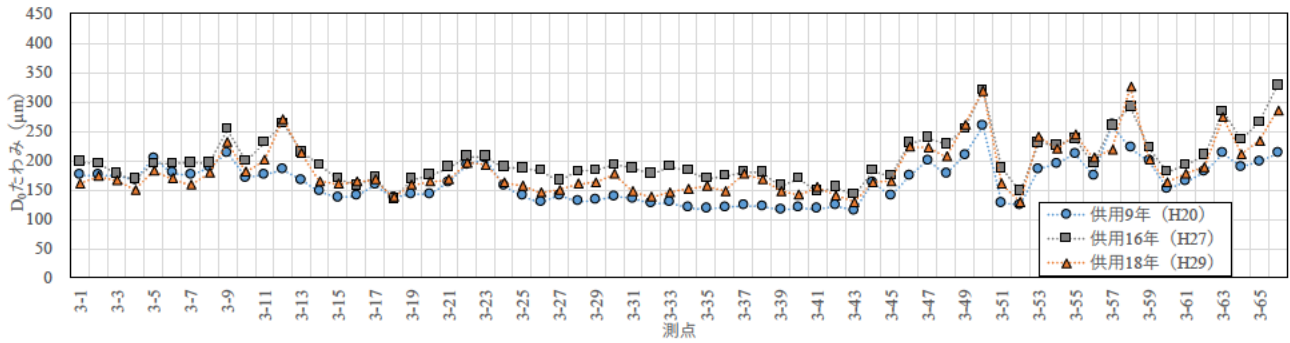


図-2.1.13 目地部での D_0 たわみ量の測定結果【3工区（下り）】

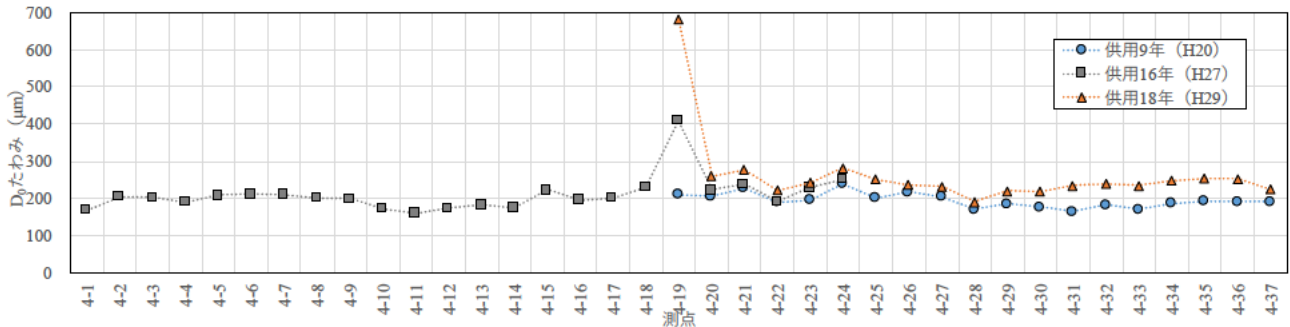


図-2.1.14 目地部での D_0 たわみ量の測定結果【4工区（下り）】

表-2.1.4 に各工区の測定年ごとの平均値を示す。

表-2.1.4 各工区の平均値（目地部での D_0 たわみ）

測定工区	測定年度		
	供用9年 (H20)	供用16年 (H27)	供用18年 (H29)
第2工区（下り）	264	232	213
第3工区（上り）	—	197	246
第3工区（下り）	163	200	185
第4工区（下り）	195	210 ^{※1)}	263

※1) 第4工区（下り）のH27年度の測定は、他年度と測定した版が異なる。

目地部の平均 D_0 たわみは、供用により第2工区（下り）では50 μm 程度の減少、第3工区（上り）では50 μm 程度の増加、第3工区（下り）では20 μm 程度の増加、第4工区（下り）では60 μm 程度の増加を示した。測定工区により異なる傾向を示したが、第2工区（下り）以外の工区では概ね増加傾向が確認され、若干構造性能の低下を示した。

3) 目地部での荷重伝達率の経年変化

目地部での荷重伝達率の測定結果を図-2.1.15～図-2.1.18に示す。なお、荷重伝達率 (E_{ff}) はFWDを用い98kN 載荷時に測定された D_0 たわみ量および D_{300} たわみ量から式-2.1) により算出した。

$$E_{ff} = 2 \times D_{300} / (D_0 + D_{300}) \times 100 (\%) \quad \dots \text{式-2.1)}$$

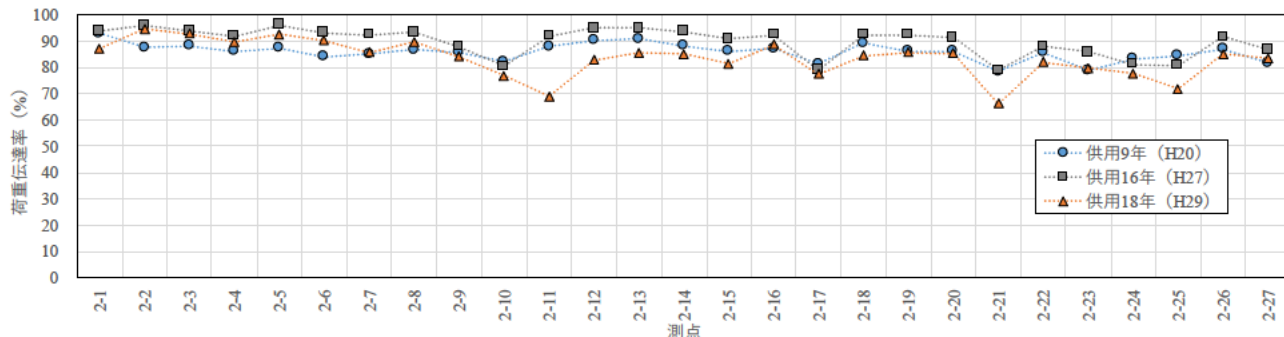


図-2.1.15 目地部での荷重伝達率の測定結果【2工区（下り）】

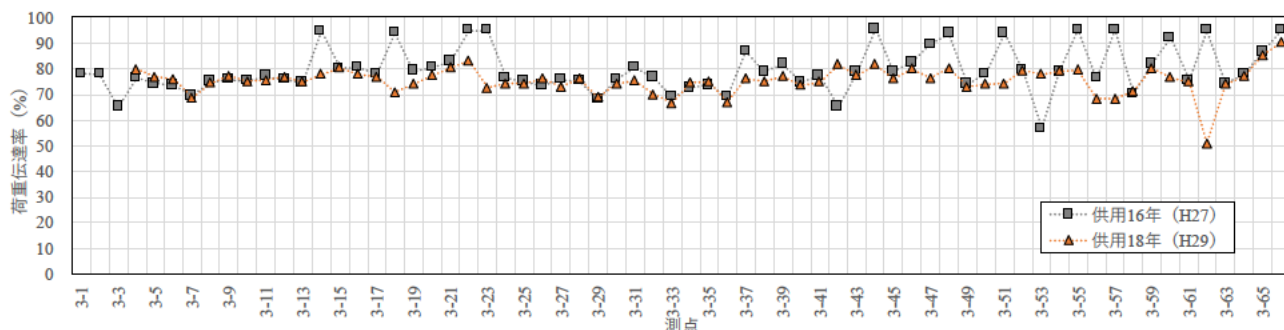


図-2.1.16 目地部での荷重伝達率の測定結果【3工区（上り）】

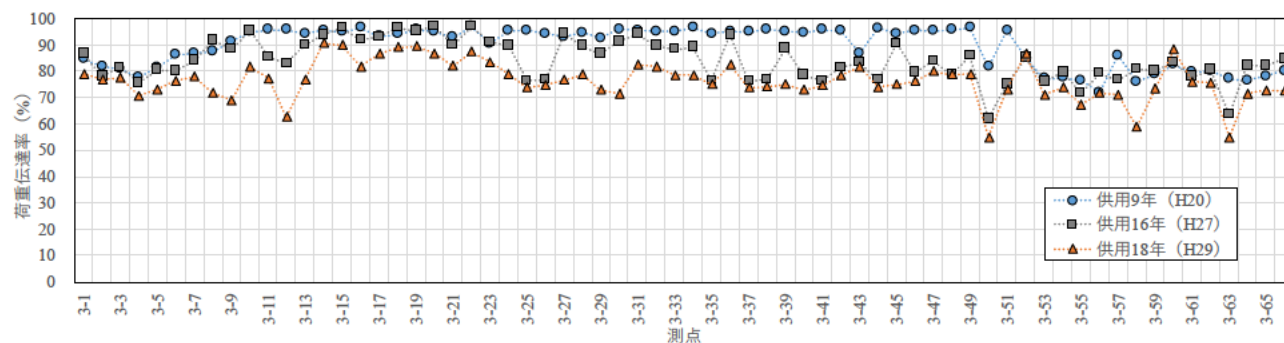


図-2.1.17 目地部での荷重伝達率の測定結果【3工区（下り）】

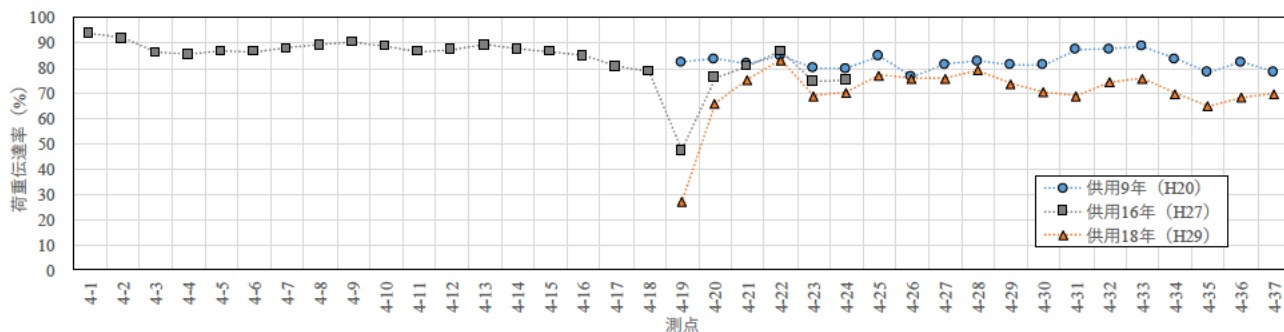


図-2.1.18 目地部での荷重伝達率の測定結果【4工区（下り）】

表-2.1.5 に各工区の測定年ごとの平均値を示す。

表-2.1.5 各工区の平均値（目地部での荷重伝達率）

測定工区	測定年度		
	供用9年（H20）	供用16年（H27）	供用18年（H29）
第2工区（下り）	85.9	89.8	83.5
第3工区（上り）	—	79.6	75.5
第3工区（下り）	89.5	84.2	76.5
第4工区（下り）	83.8	82.6 ^{※1)}	70.4

※1) 第4工区（下り）のH27年度の測定は、他年度と測定した版が異なる。

各工区の平均荷重伝達率は、供用18年で第2工区（下り）では83.5%、第3工区（上り）では75.5%、第3工区（下り）では76.5%、第4工区（下り）では70.4%を示し、全体的に低下傾向にあった。荷重伝達率は、80%以上で良好、65%未満で不十分²⁾と評価されている。供用18年において、第2工区（下り）では、良好を示したが、残りの工区では80%以下を示し、目地部から劣化が進行している傾向にあった。

第3工区（下り）、第4工区（下り）における荷重伝達率が65%未満を示した目地部の荷重伝達率の経時変化を図-2.1.19に示す。測定時期が3回のため不明瞭な部分もあるが、多くの目地部で経年に伴い緩やかに減少傾向を示したのに対し、4工区（下り）No.19では急激な荷重伝達率の低下を示したことから、荷重伝達率がある程度低下している場合、急激な荷重伝達性能の低下に陥る可能性があることを示唆している。

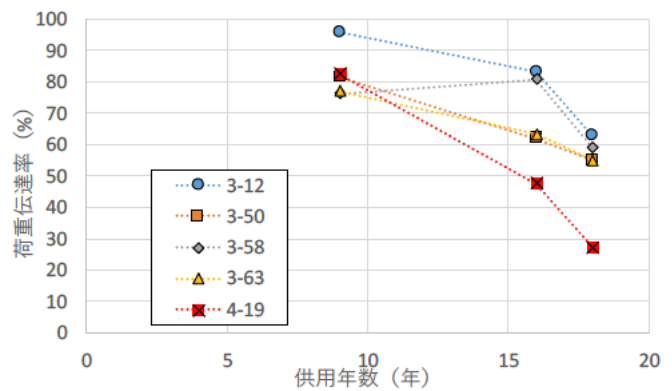


図-2.1.19 65%未満を示した目地部の荷重伝達率の経時変化【第3工区（下り）、第4工区（下り）】

(2) コンクリート版のひび割れ度の経時変化

供用 16 年、18 年でのひび割れ度の経時変化を表-2.1.6 に示す。

表-2.1.6 ひび割れ度の経時変化

工区	版 No.	ひび割れ位置* (目地からの距離)	供用 16 年 (H27)		供用 18 年 (H29)	
			ひび割れ長さ	ひび割れ度 (cm/m ²)	ひび割れ長さ***	ひび割れ度 (cm/m ²) ***
2 工区 (下り)	10	5.80m	190cm	4.2	190cm	4.2
3 工区 (下り)	37	9.32m	168cm	3.7	68cm	1.5
	41	4.44m	300cm	6.7	300cm	6.7
	42	6.18m	450cm	10.0	450cm	10.0
	47	8.65m	135cm	3.0	135cm	3.0
	48	0m 9.07m	106cm 93cm	4.4	106cm 130cm 45cm	6.2
	49	0m 8.55m 9.56m	60cm 145cm 44.1cm	5.5	80cm 152cm 44.1cm	6.1
	50	0m	142cm 75cm	4.8	148cm 75cm	5.0
	54	0m	62cm	1.4	63cm	1.4
	55	4.23m	450cm	10.0	450cm	10.0
	56	3.41m	372cm	8.3	400cm	8.9
	57	3.91m	25cm	0.6	25cm	0.6
	60	5.06m	285cm	6.3	360cm	8.0
	62	8.8m 9.63m	120cm 37cm	3.5	120cm 37cm	3.5
	63	0m	40cm	0.9	64cm	1.4
平均	—	—	—	4.9	—	5.1

※目地から縦ひび割れが発生していた場合、ひび割れ位置を 0m と記載した。

※※青字：ひび割れ及びひび割れ度が増加した箇所、赤字：ひび割れ及びひび割れ度が減少した箇所。

2 工区 (下り)、3 工区 (下り) での平均ひび割れ度は供用 16 年で 4.9cm/m²、供用 18 年で 5.1cm/m² を示し、若干の増加傾向を示した。2 ヶ年の比較の結果、3 工区 (下り) では、ひび割れの伸長により、ひび割れ度の上昇が見られた。

(3) すべり抵抗性の経時変化

動的摩擦係数、平均プロファイラ深さの経時変化を表-2.1.7に示す。

表-2.1.7 動的摩擦係数、平均プロファイラ深さの経時変化

		動的摩擦係数 μ_{60}			平均プロファイラ深さ MPD(mm)		
		供用 9 年 (H20)	供用 16 年 (H27)	供用 18 年 (H29)	供用 9 年 (H20)	供用 16 年 (H27)	供用 18 年 (H29)
第 2 工区 下り	OWP	0.51	0.47	0.46	0.45	0.39	0.40
	OWP	0.53	0.50	0.49	0.28	0.38	0.36
第 3 工区 下り	BWP	0.62	0.58	0.54	—	0.34	0.38
	IWP	—	0.55	0.51	—	0.37	0.39

供用に伴い動的摩擦係数 (μ_{60}) は若干低下する傾向にあり供用 18 年で 0.46~0.51 を示したが、要補修の目安である 0.25 は満足していた。また、測定箇所での動的摩擦係数を比較すると、OWP、IWP、BWP の順に高い傾向を示した。以上より、車両の供用により若干すべり抵抗は低下する傾向にあったが、供用初期に適切なすべり抵抗性が確保されている場合、供用 18 年でも大きな性能低下は確認されず、良好なすべり抵抗性を示した。

2.1.3 鉄網の有無による比較

鉄網は、コンクリート舗装版に発生するひび割れの拡大を抑制することを目的に、設置されている。しかし、鉄網を設置することで施工の煩雑さが増えることや、その効果に関しても不明な点⁴⁾、⁵⁾ が指摘されている。

そこで、鉄網設置による効果を確認するため、鉄網設置工区と未設置工区でのひび割れ測定結果を表-2.1.8、FWD による D_0 たわみ量測定結果を表-2.1.9 に示す。なお、測定結果は供用 18 年 (H29 測定) での結果を用いた。

表-2.1.8 鉄網有無の比較 (ひび割れ)

鉄網の有無	工区	盛土 施工 時期	平均ひび割れ度 (cm/m^2) ^{※1}	平均ひび割れ幅 (mm) ^{※1}	ひび割れ発生舗装版 の割合 ^{※3}
有	第 2 工区下り (鉄網有部分)	S63	6.8	0.45	1/10 (10%)
	第 4 工区下り	H11	6.1	0.29 ^{※2}	5/19 (26.3%)
	平均	—	6.5	0.37	(18.2%)
無	第 2 工区下り (鉄網無部分)	S63	—	—	0/17 (0%)
	第 3 工区上り	S63	6.4	0.47	24/63 (38.1%)
	第 3 工区下り	S63	4.9	0.32	15/66 (24.2%)
	平均	—	5.7	0.40	(20.8%)

※1：対象版におけるひび割れ発生を確認した版のひび割れ度、ひび割れ幅を平均した。

※2：版 No.37 (ひび割れ幅 10mm 補修済み) は除外した。

※3：(ひび割れ発生を確認した舗装版の数) / (調査した舗装版の数)。なお、角欠け発生は除く。

対象コンクリート舗装版に発生した平均ひび割れ幅を比較すると、鉄網設置工区では 0.37mm、鉄網未設置工区では 0.40mm を示し、明確な傾向は確認できなかった。平均ひび割れ度、ひび割れ発生舗装版数も同様の傾向であった。

表-2.1.9 鉄網有無の比較 (FWD)

鉄網の有無	工区	盛土 施工 時期	平均版央 D_0 たわみ (μm) ^{※4)}	平均
有	第2工区下り (鉄網有部分)	S63	143.9	133.9
	第4工区下り	H11	123.8	
無	第2工区下り (鉄網無部分)	S63	129.2	113.4
	第3工区上り	S63	108.7	
	第3工区下り	S63	102.4	

※4：対象版の結果を平均した。

平均版央 D_0 たわみを比較すると、鉄網設置工区では 133.9 μm 、鉄網未設置工区では 113.4 μm を示し鉄網未設置工区の方が若干低いたわみ量を示した。但し、工区ごとの影響を含むこと、 D_0 たわみが良好な値を示していることを考慮すると、供用 18 年までの調査結果では、鉄網設置による明確な傾向は確認できなかった、と推察できる。

2.1.4 盛土区間へのコンクリート舗装への適用性について

コンクリート舗装は高い剛性がある故に圧密沈下が発生する可能性のある軟弱地盤上や盛土部等へは適さないとの指摘も存在する。平泉バイパスは、図-2.1.3 及び図-2.1.4 に示す通り、最大 14m の比較的高い盛土高さを有している工区がある。本調査区間では、比較対象がないため、盛土高さによる各調査結果の比較はできないが、本調査では、盛土に起因すると考えられるコンクリート舗装の損傷は確認できなかった。

2.1.4 まとめ（平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査）

供用 16 年、18 年での平泉バイパスのコンクリート舗装を調査した結果、以下のことが分かった。

- ・ FWD による構造評価から、供用に伴い版央の D_0 たわみ量に大きな変化は確認できなかった。一方で、目地部の荷重伝達率は供用に伴い全体的には若干低下する傾向にあった。中でも荷重伝達率低下が進行している目地部では、急激に荷重伝達率が低下し、コンクリート版同士の一体性が失われる可能性があることが示唆された。
- ・ ひび割れ測定結果では、供用に伴いひび割れ度は若干の増加傾向を示した。
- ・ すべり抵抗性の測定結果から、供用により若干すべり抵抗は低下する傾向にあったが、供用初期に適切なすべり抵抗性が確保されている場合、供用 18 年でも大きな性能低下は確認されず、良好なすべり抵抗性を示した。
- ・ コンクリート舗装版の鉄網設置有無での、ひび割れ度、ひび割れ幅を比較したところ、鉄網有無による明確な傾向は確認できなかった。
- ・ 最大で 14m の盛土高さを有している区間があるが、本調査では、盛土に起因すると考えられるコンクリート舗装の損傷は確認できなかった。

参考文献

- 1) 小松ほか：コンクリート舗装の合理化施工 国道 4 号・平泉バイパスのスリップフォーム工法，セメント・コンクリート，No.638，pp.14-21，2000 年
- 2) 公益社団法人日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013，平成 25 年 11 月
- 3) 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，平成 19 年 6 月
- 4) 吉本ほか：普通コンクリート舗装の鉄網に関する一検討，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集，V-132，pp.261-262，2009 年
- 5) 吉本ほか：コンクリート舗装の鉄網の効果について，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集，V-321，pp.641-642，2011 年

2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析

2.2.1 調査概要

(1) 調査対象

直轄国道において、大型車両通行時に周囲へ影響を与える振動が発生したため、国道事務所より損傷要因及び対策について土木研究所へ技術相談があった。そこで土木研究所では、国道事務所と連携し、損傷メカニズムを推定し補修計画を立案することを目的に、調査を実施した。本調査を通して、得られた結果及び結果から推定された損傷状態、材料性状について記載する。なお、「2.2.2 調査結果」内の「(1) 目視によるコンクリート版の状態確認」「(2) コア削孔によるコンクリート版下の調査結果」「(3) ウォータージェットによる開削調査結果」「(4) FWD による目地部の構造調査結果」は国道事務所が現地で実施し、土木研究所では、そのデータをご提供頂き、その他の結果と併せて取り纏めた。

調査を実施した国道の舗装断面を図-2.2.1に示す。本国道は大規模な工業、住宅団地の進出に伴う交通量の増加に対応するため、普通コンクリート舗装にて整備され、1963年に供用開始した。その後大型車両通行の増加により、供用開始後数年でコンクリート版が損傷し、アスファルト舗装によるオーバーレイが実施された。しかし、リフレクションクラックの発生などのコンクリート版に損傷が発生し、その後もアスファルト系材料によるアンダーシーリングによる補修、区間によっては複数回アスファルトオーバーレイが実施され、現在は排水性舗装によるオーバーレイとなっている。

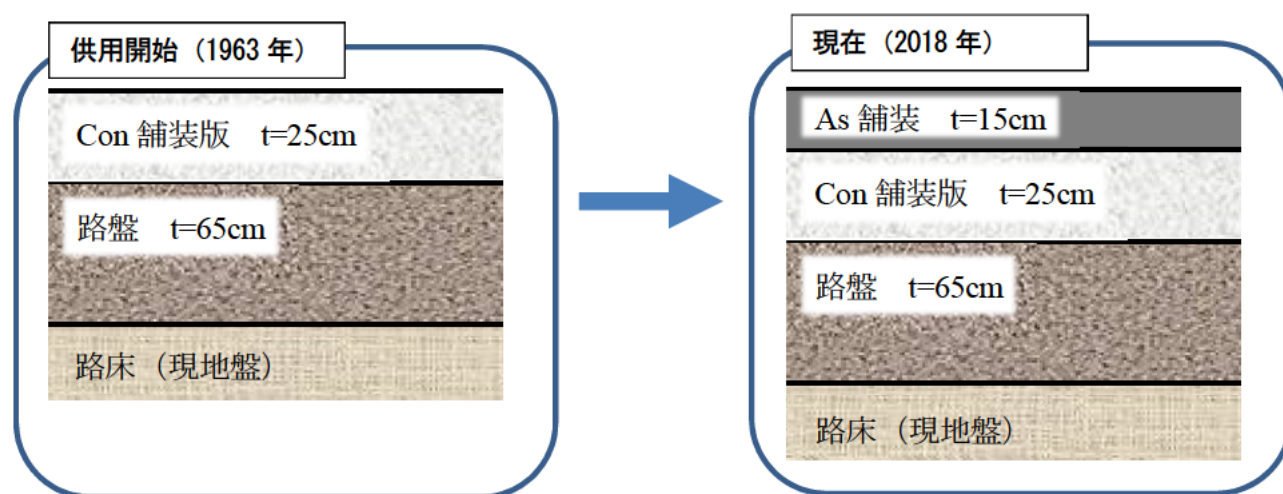


図-2.2.1 舗装断面

(2) 調査概要

現地調査は路線全体の損傷傾向の把握及び優先的に補修する箇所を選定するための広域調査と、損傷メカニズムの推定、及び補修方法を立案するための詳細調査を実施した。さらに、材料劣化を把握するため一部コンクリート版を切出し、コンクリートとダウエルバーの材料分析を実施した。本報告では、詳細調査及び材料分析結果について記載する。

詳細調査箇所を図-2.2.2、調査項目を表-2.2.1に示す。

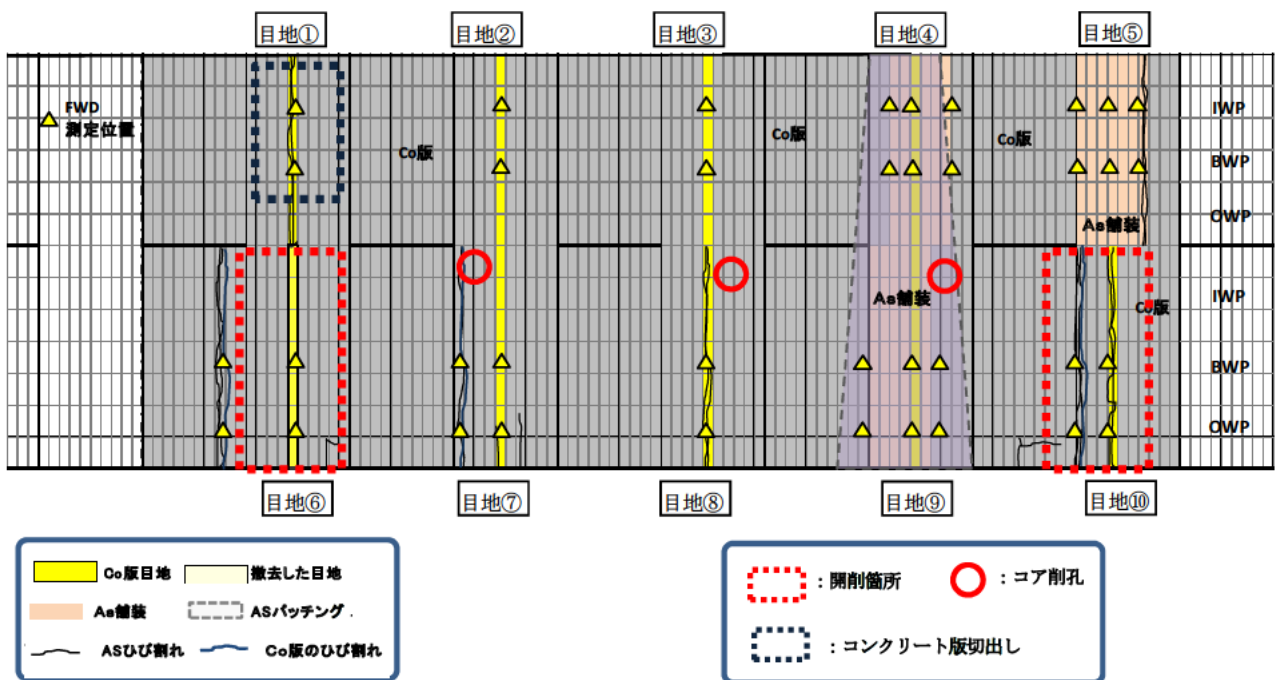


図-2.2.2 調査箇所

表-2.2.1 調査項目（詳細調査）

調査項目	調査方法
コンクリート版の状態確認	目視により、ひび割れ状況、目地部の状態を確認した。
コンクリート版のコア削孔	コアを削孔し、アンダーシーリングの有無を確認した。
ダウエルバーの状況把握	ウォータージェットによりコンクリート舗装版を開削し、ダウエルバーの状態を確認した。
コンクリート版の荷重伝達率	FWDにより測定したたわみ量を用いて荷重伝達率を算出した。
コンクリートの材料分析	コンクリートの材料性状を確認するため、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度、配合強度、塩化物含有量、中性化深さを測定した。
ダウエルバーの破面観察	ダウエルバーの破断要因を推定するため、破面観察、断面観察、ビッカース硬度、化学成分分析を実施した。

(3) 材料試験用試料採取

材料としての劣化を把握するため、目地①（f地区）からコンクリート版を切出し、コンクリート及びダウエルバーの材料分析を実施した。なお、ダウエルバーの材料分析は同一国道の別の地区であるO地区から採取したダウエルバーでも実施した。

切り出したコンクリート版の現地の状況を写真-2.2.1、ダウエルバーの採取箇所を写真-2.2.2、切り出したコンクリート版を写真-2.2.3に示す。



写真-2.2.1 コンクリート版の切出し箇所 (目地①)

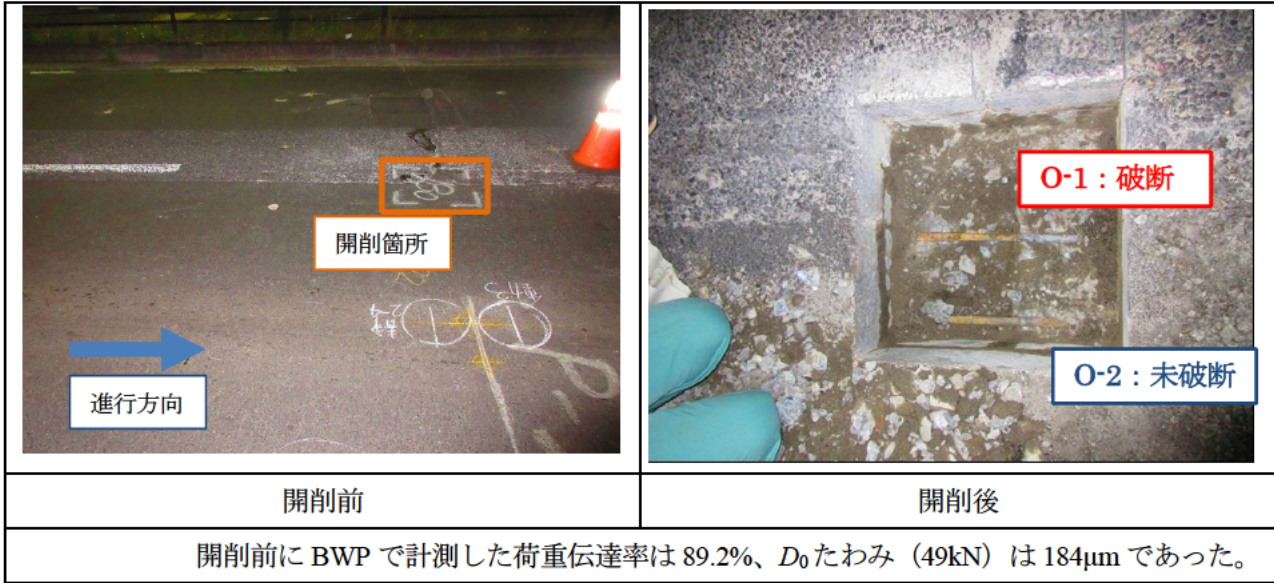
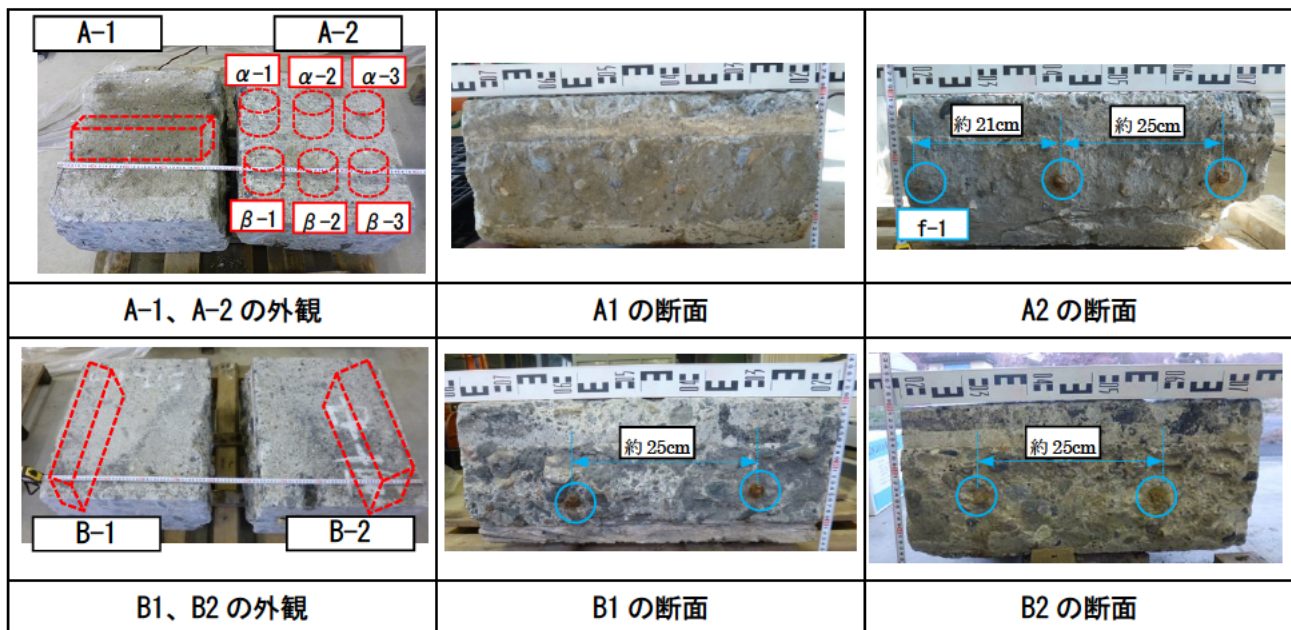


写真-2.2.2 ダウエルバー採取箇所 (0 地区)



※○：ダウエルバー、

※ ：曲げ強度用試験体採取位置、：コア供試体採取位置

写真-2.2.3 切出したコンクリート版と試料採取位置

コンクリートコアは、 α 、 β ともに末尾の数字が増えるにつれ、目地から離れた位置で採取した。コンクリート版厚は25cm、ダウエルバーの直径は約19mm、ダウエルバー間隔は20～25cmであった。本国道は1963年供用開始であるため、1955年版のセメントコンクリート舗装要綱に基づき、設計されていると考えると、コンクリート版厚、ダウエルバーの直径、間隔は当時の設計条件と一致する。参考までに、セメント舗装要綱に示される収縮目地の変遷を表-2.2.2に示す。

表-2.2.2 収縮目地構造の変遷

セメントコンクリート 舗装要綱 発刊年度	収縮目地			
	ダウエルバー			目地間隔
	径 (mm)	長さ (cm)	設置間隔 (cm)	
1955 (S30)	ϕ 19	40~60	20~40 を標準	4.0~6.0m
1964 (S39)	ϕ 16 (版厚 20cm) ϕ 19 (版厚 23,25cm)	60	最大 40	6~10m 鉄網ない場合は 5m 以下
1972 (S47)	ϕ 25	70	最大 40	7.5、8、10m を標準
1984 (S59)	ϕ 25	70	最大 40	版厚 25cm 未満：8m 版厚 25cm 以上：10m

切出しコンクリート版から採取した分析用コンクリート供試体を写真-2.2.4～写真-2.2.5、分析用ダウエルバーを写真-2.2.6～写真-2.2.7に示す。

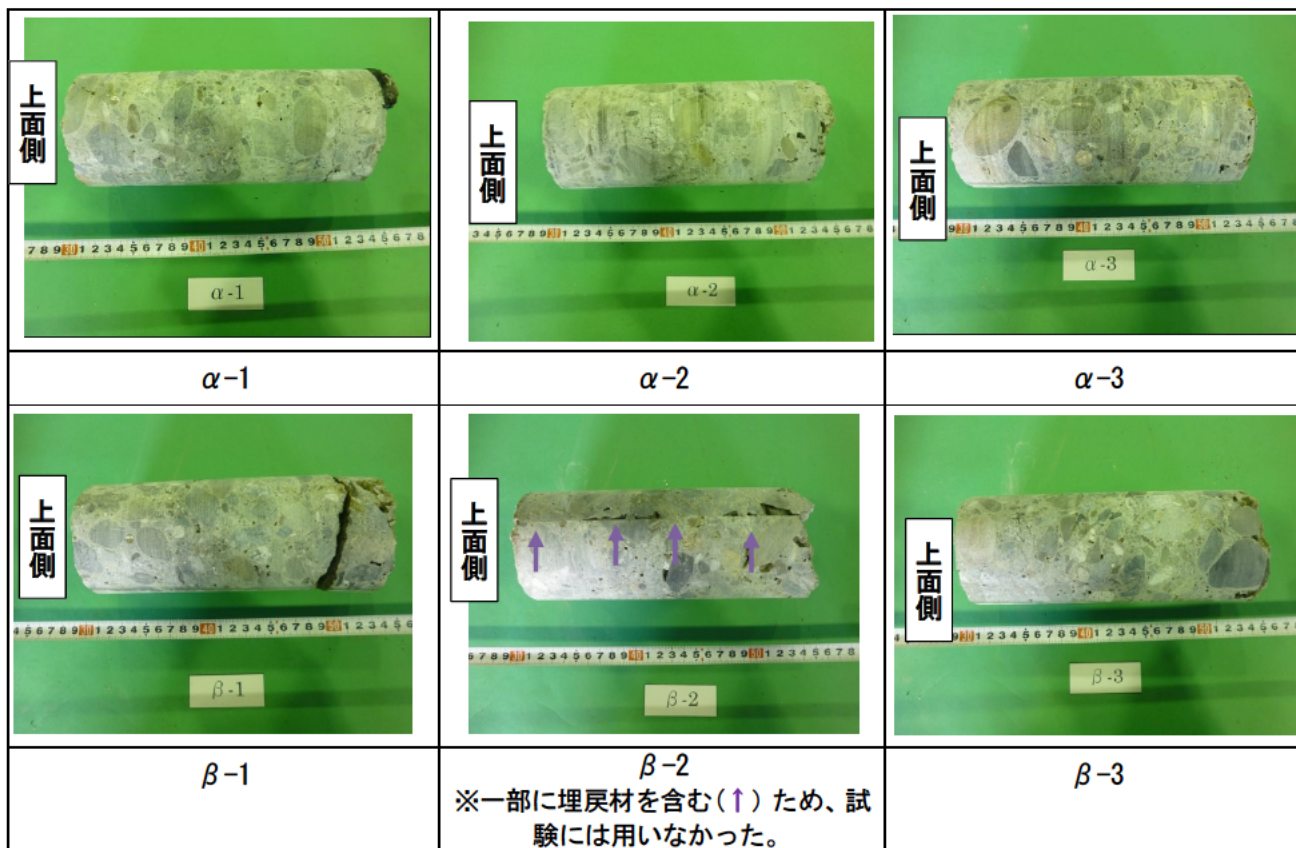


写真-2.2.4 採取したコンクリートコア供試体

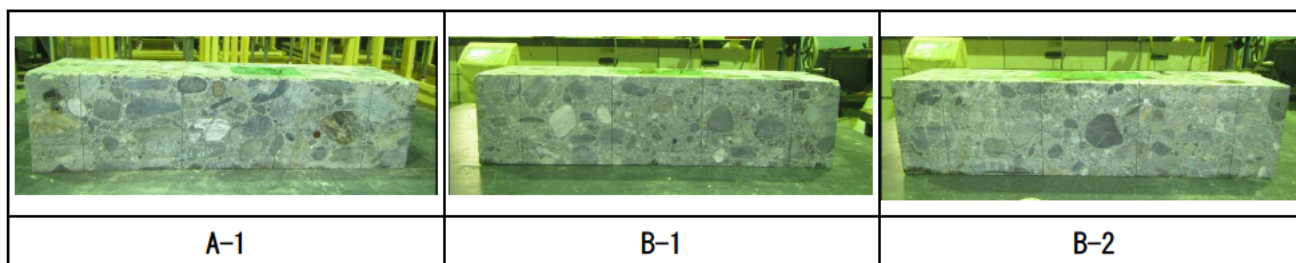


写真-2.2.5 採取したコンクリート供試体（曲げ強度用）

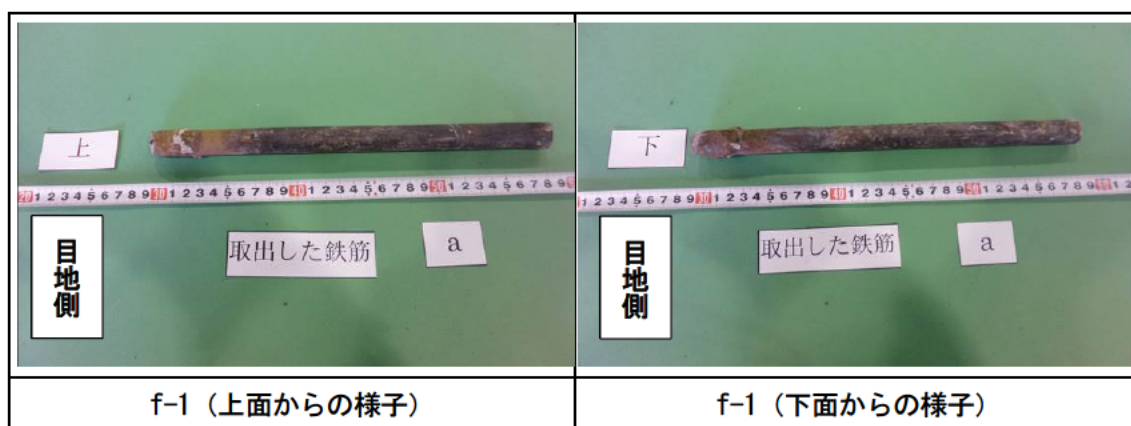


写真-2.2.6 採取したダウエルバー

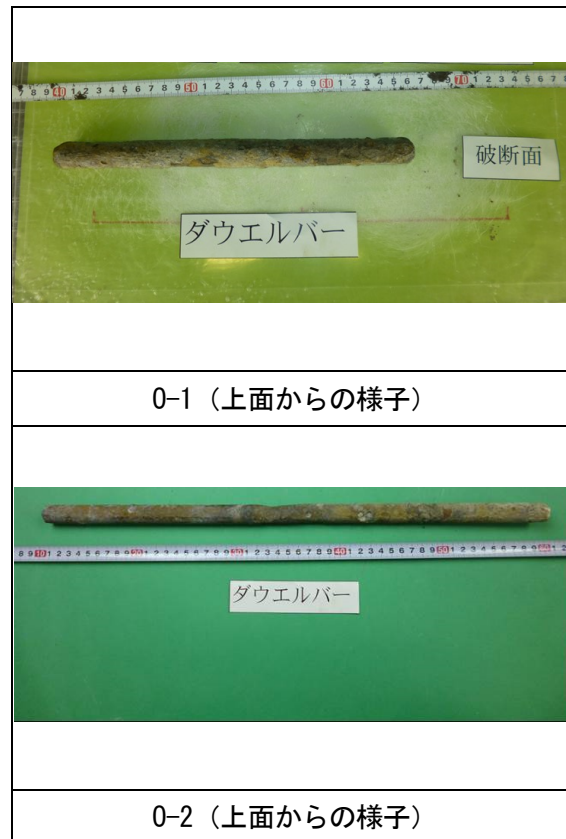


写真-2.2.7 採取したダウエルバー (0 地区)

(4) 試験・分析項目

採取したコンクリート供試体に対する試験項目を表-2.2.3 に示す。

表-2.2.3 試験項目 (コンクリート)

試験項目	試験方法	供試体							
		A-1	B-1	B-2	α -1	α -2	α -3	β -1	β -3
曲げ強度試験	JIS A 1106	●	●	●	—	—	—	—	—
圧縮強度試験	JIS A 1107	—	—	—	●	●	●	—	—
静弾性係数試験	JIS A 1149	—	—	—	●	●	●	—	—
中性化深さの測定	JIS A 1152	—	—	—	●	●	●	—	—
塩化物含有量試験	JIS A 1154	—	—	—	●	●	—	—	—
配合推定	セメント協会法	—	—	—	—	—	—	●	●

曲げ強度試験は、「JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じ、実施した。なお、本供試体は粗骨材の最大寸法が 40mm 程度であるため、断面の 1 辺の長さは 150mm、長さは 530mm を基本とするが、切出しコンクリート版の大きさから採取が困難であったため、供試体の大きさは、100×100×400 (mm) とした。

圧縮強度試験、静弾性係数試験は「JIS A 1107 コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」、「JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じ実施した。なお、本供試体は粗骨材の最大寸法が 40mm 程度であるため、直径の長さは 120mm を基本とするが、切出しコンクリート版の大きさから必要な試料数の採取が困難であったため、供試体の直径は 100mm とした。また、供試体内にダウエルバー、チェアなどの比較的大きな鋼材が含まれている場合は、供試体の高さ/直径比が 1.0 以上になる範囲で鋼材部分を避けた。

中性化深さの測定は、「JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じ実施した。

塩化物含有量試験は、「JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じ実施した。なお、試料は 20mm 幅で深度 140mm までの 7 層スライスし、採取した。

配合推定は、「セメント協会 コンクリート専門委員会報告 F18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」¹⁾に記載された方法に準じ、実施した。

ダウエルバーの分析項目を表-2.2.4 に示す。

表-2.2.4 試験項目 (ダウエルバー)

試験項目	試料名		
	f-1	O-1	O-2
外観観察	●	●	●
破面観察	●	●	—
断面観察	●	●	●
ビッカース硬さ	●	●	●
化学成分分析	●	●	●

f-1 は破断要因の推定することを目的に分析を実施した。

O-1 と O-2 は採取箇所が近傍にも関わらず、O-1 は破断、O-2 は未破断であった。そこで、O-1 の破断要因の推定に加え、O-1 と O-2 の両試料の分析結果を比較することで、両試料が破断、未破断であった理由についても考察することを目的に実施した。

外観観察は、受領時における試料の状況を目視観察し、試料における特徴的な点（発錆状況、破面状態、試料外観、腐食による減肉状況など）について観察した。

破面観察は、ダウエルバーの破面形態を把握するため、マイクロスコープ、SEM（走査型電子顕微鏡）を用いて破面観察を実施した。また、必要に応じて EDX（エネルギー分散型 X 線分析装置）を用いて破面の付着物などについて定性分析を実施した。状況に応じて、薬品を用い除錆処理を実施した。

断面観察は、組織の変形や変化、破断に起因する特異物の有無、腐食による減肉程度、き裂の有無、組織の健全性を確認するため、径方向断面について金属顕微鏡または光学顕微鏡を用いて観察した。

化学成分の分析は、ダウエルバーの化学組成を確認するため、C,Si,Mn,P,S の計 5 元素と必要に応じてそ

の他の元素の成分分析を実施した。

ビッカース硬さ試験は、「JIS Z 2244 ビッカース硬さ試験-試験方法」に拠り、腐食が軽微な箇所において Hv10 で表面直下 1mm から 1mm ピッチにて直径方向に測定を実施した。

2.2.2 調査結果

(1) 目視によるコンクリート版の状態確認

目視によるコンクリート版の確認結果を図-2.2.3、横目地状況の写真-2.2.8～写真-2.2.9、縦目地の状況を写真-2.2.10～写真-2.2.11、版央の状況を写真-2.2.12～写真-2.2.13に示す。

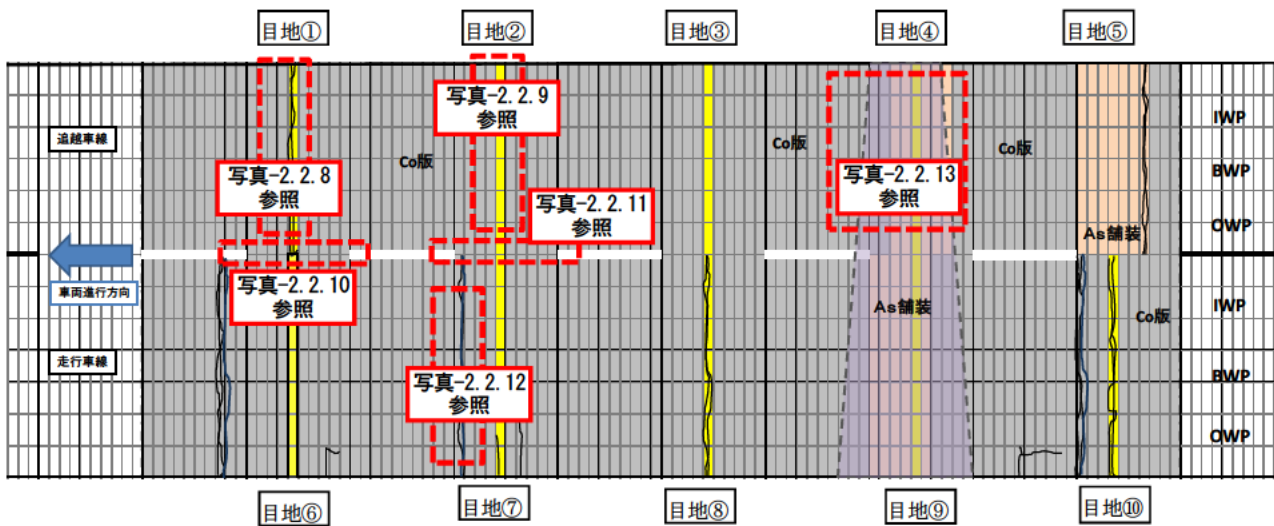


図-2.2.3 目視観察によるコンクリート舗装版の状態確認結果

【横目地】

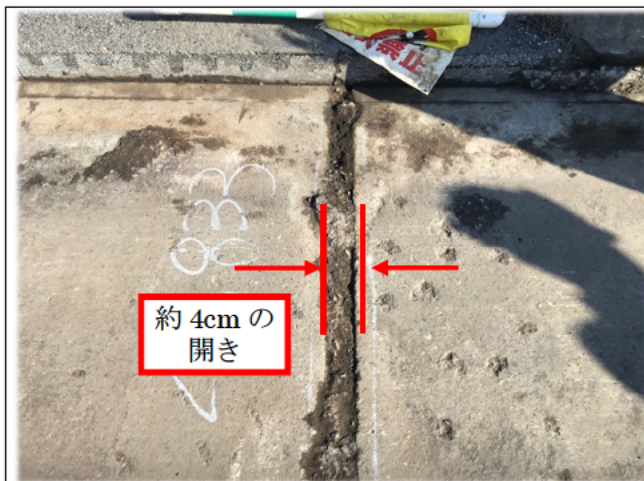


写真-2.2.8 横目地の開き (目地①)

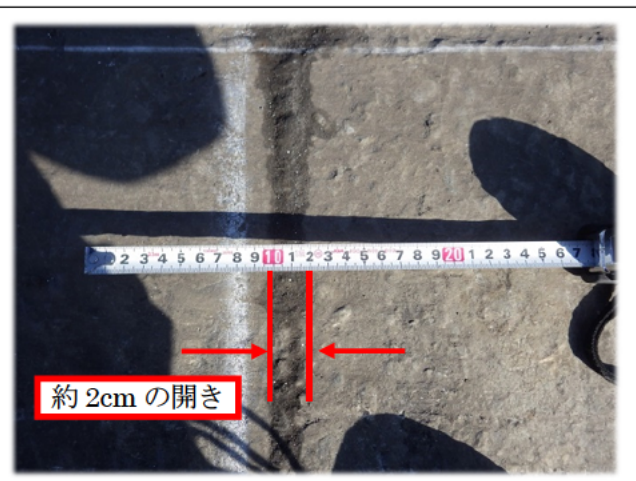


写真-2.2.9 横目地の開き (目地②)

ひび割れの発生が確認できなかった目地②(写真-2.2.9)では、目地部の開きは約2cmであったのに対し、重度のリフレクションクラックが発生している目地①(写真-2.2.8)では、目地部の開きは約4cmであった。

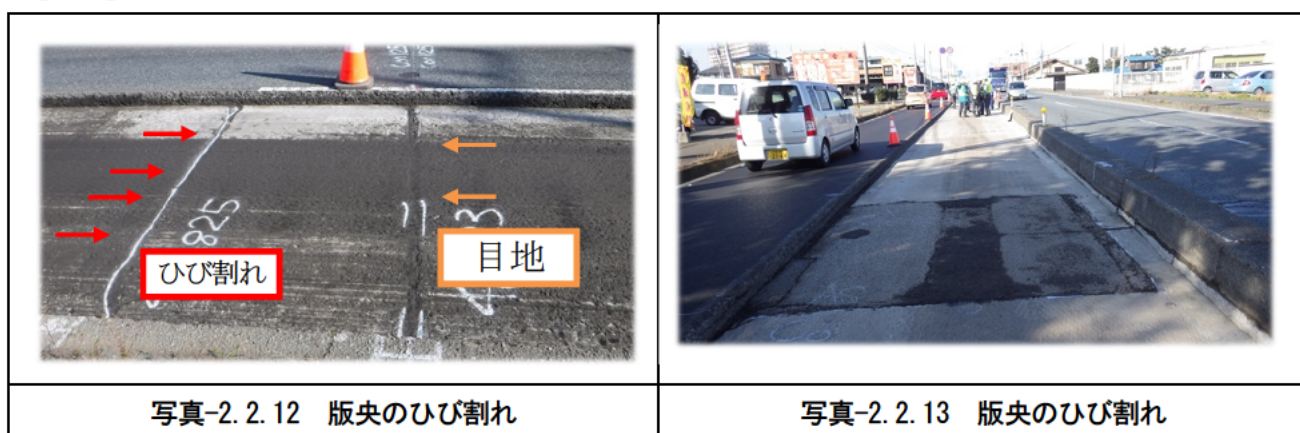
【縦目地】



縦目地の開きは約 2cm であり、タイバーは設置されていなかった。

横目地が約 4cm 開いた理由の一つとして、タイバーが設置されていないため、コンクリート版が移動し、横目地の開きが拡大した可能性が考えられる。

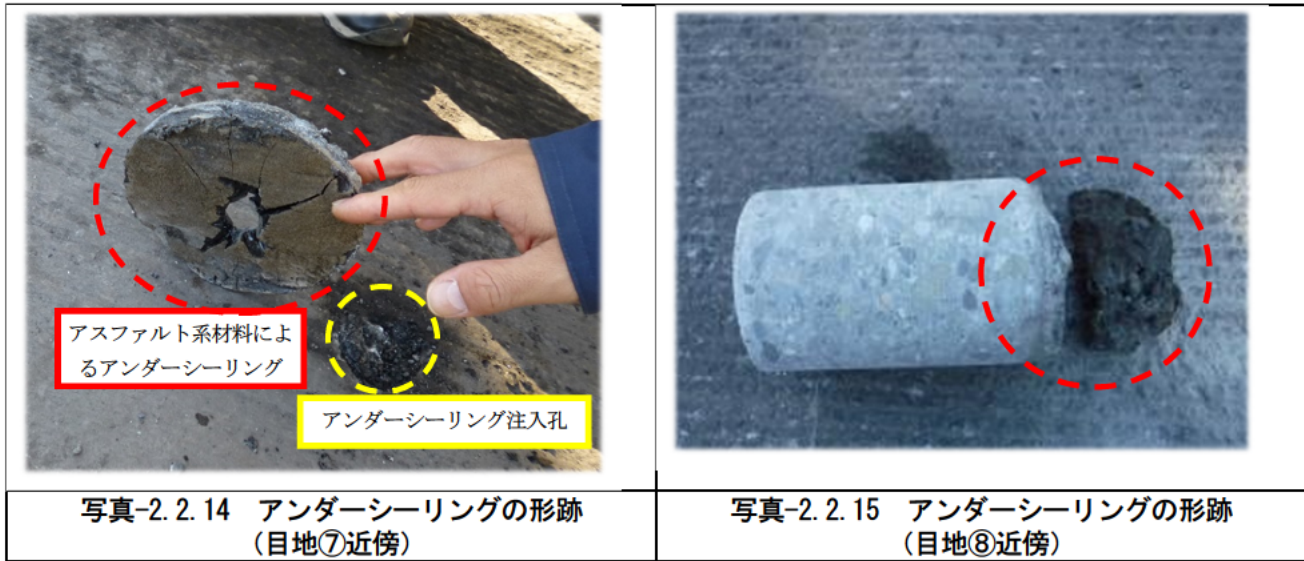
【版央】



コンクリート舗装版の目地部だけでなく版央にもひび割れが発生していた。さらにアスファルト舗装による打替え部分では、コンクリート舗装版とアスファルト舗装の境界でのひび割れの発生も確認された。

(2) コア削孔によるコンクリート版下の調査結果

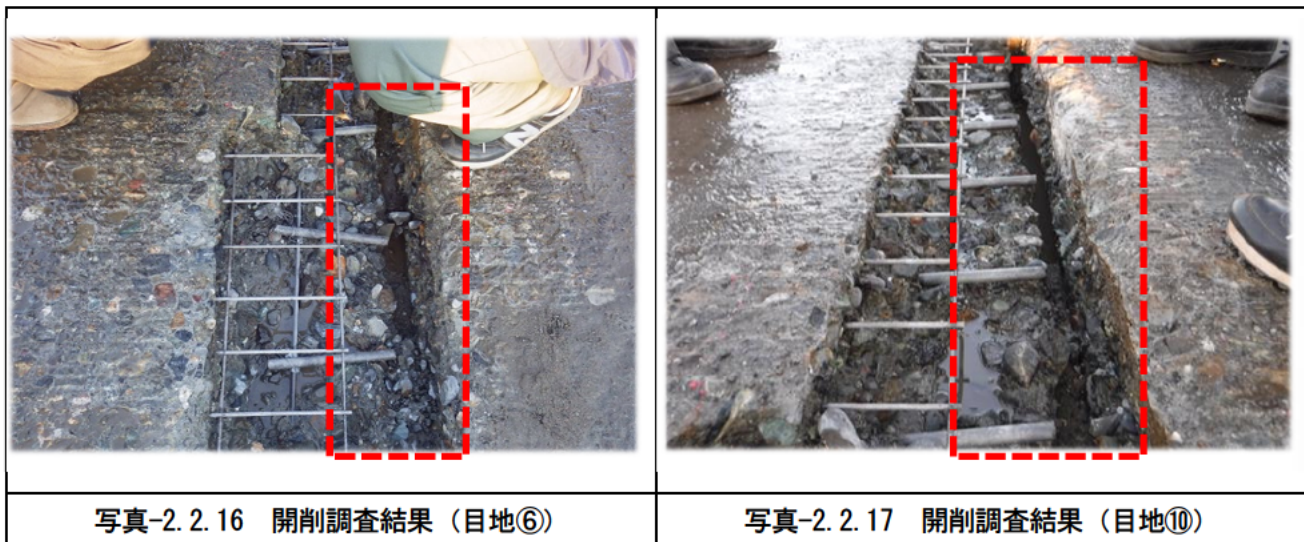
コア削孔による空洞調査の状況を写真-2.2.14～写真-2.2.15に示す。



コア削孔調査の結果、採取したコアにはアスファルト系材料が付着していたことから、過去にアスファルト系材料を用いたアンダーシーリング工法により補修された可能性が考えられる。

(3) ウォータージェットによる開削調査結果

ウォータージェットによる開削調査結果を写真-2.2.16～写真-2.2.17に示す。



2 箇所の目地で開削調査を実施した結果、いずれの目地においてもダウエルバーの破断が確認された。ダウエルバーは、目地部に発生する応力とたわみを隣接するコンクリート舗装版に負担させることにより低減させるため設置しているが、破断したため目地部の荷重伝達性能が低下し、大型車両通行時に振動が発生した可能性が高い結果であった。

(4) FWD による目地部の構造調査結果

FWD を用いたたわみ測定による目地部の評価は、図-2.2.4 に示す評価フローが現在広く用いられている³⁾。49kN 荷重により載荷した場合の D_0 たわみが $400\mu\text{m}$ 以上の場合空洞の可能性あり、98kN 荷重により載荷した D_0 たわみ量および D_{300} たわみ量からの式) 2.2.1 により算出した荷重伝達率 E_{ff} が 65%未満の場合荷重伝達性能は不十分と評価される。

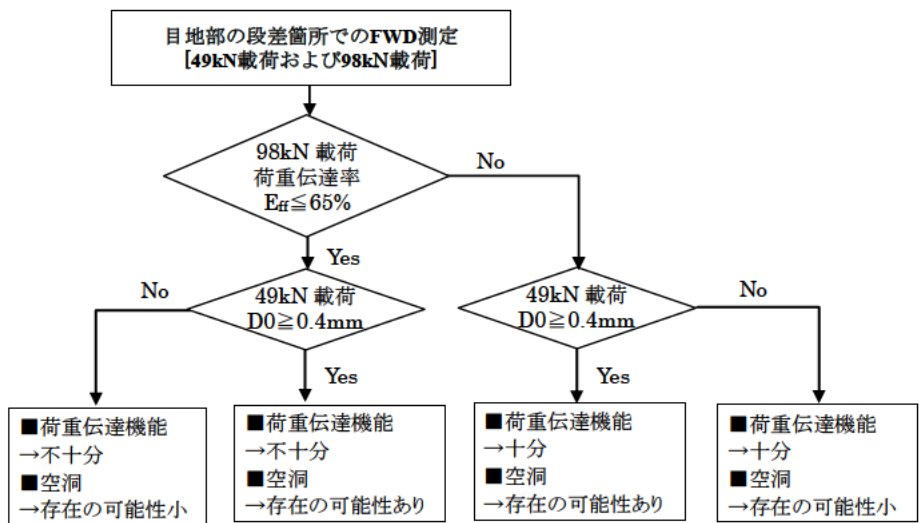


図-2.2.4 目地部の評価フロー

$$E_{ff} = \frac{D_{300}}{(D_0 + D_{300})/2} \times 100(\%) \quad \dots \text{式) 2.2.1}$$

FWD による測定結果を図-2.2.5 に示す。なお、測定箇所はBWPである。

49kN による D_0 たわみ量は、全ての測定箇所で $400\mu\text{m}$ 以下を示し、空洞の可能性は小さい評価であり、アンダーシーリングの形跡が確認されたコア削孔調査結果と一致する結果であった。

一方で、荷重伝達率は全ての測定箇所で 65%以上を示し、荷重伝達性能は、有効もしくは十分との評価であったが、ダウエルバーの破断が確認された開削調査の結果とは合致しない結果であった。

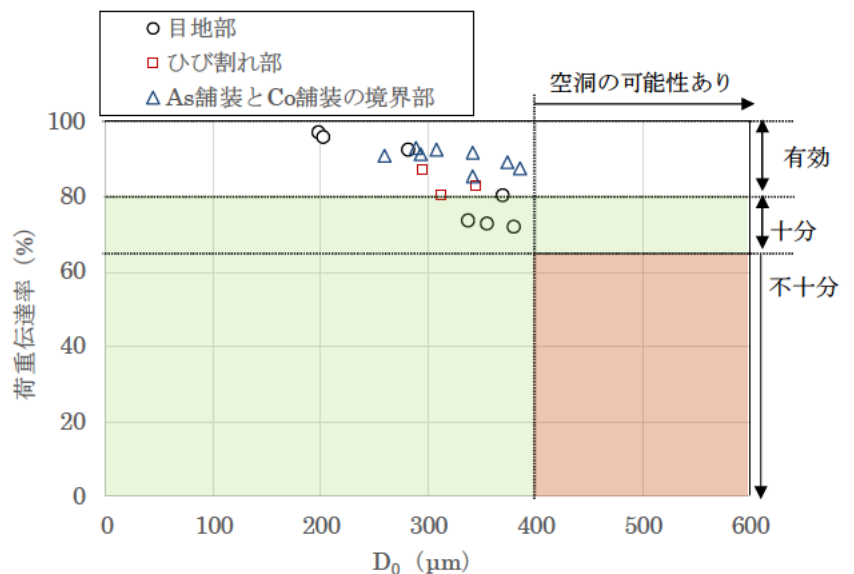


図-2.2.5 FWD 測定結果

FWD による荷重伝達率が 65%以上にも関わらず、ダウエルバーの破断が確認されたことから、従来の評価方法では目地構造の劣化を正しく判定できない危険性が示唆された。

(5) コンクリートの材料分析結果

1) 強度試験（曲げ強度試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験）

曲げ強度試験結果を表-2.2.5、圧縮強度試験、静弾性係数試験結果を表-2.2.6に示す。

表-2.2.5 曲げ強度試験結果

供試体名称	破断面の平均幅 (mm)	破断面の平均高さ (mm)	スパン (mm)	最大荷重 (kN)	曲げ強度	
					(N/mm ²)	平均
A-1	99.2	100.9	300.0	21.4	6.36	6.44
B-1	99.0	102.4	300.0	24.0	6.95	
B-2	100.6	101.5	300.0	20.8	6.01	

表-2.2.6 圧縮強度試験、静弾性係数試験結果

供試体名称	見掛けの密度 (g/cm ³)	圧縮強度		静弾性係数	
		(N/mm ²)	平均	(kN/mm ²)	平均
α-1	2.47	73.3	65.9	41.3	41.5
α-2	2.46	57.4		41.2	
α-3	2.46	67.0		42.0	

曲げ強度試験結果は、全ての供試体で 6N/mm² を超えており、平均 6.44N/mm² であった。本曲げ強度試験で用いた供試体寸法は、100×100×400 (mm) である。既往の検討²⁾ では、曲げ強度試験では、寸法効果により、100×100×400 (mm) は 150×150×530 (mm) に比べ、7%程度曲げ強度が低下することが指摘されている。寸法効果の影響を考慮しても、本結果は 5.99 (=6.44×0.93) N/mm² となり、設計値 4.5N/mm² を上回っていることから、必要な曲げ強度性能を有していると判断できる。

圧縮強度試験結果は平均で 65.9N/mm²、静弾性係数試験結果は平均で 41.5kN/mm² を示し、非常に高い値を示した。また、α-1、α-2、α-3 と順に目地から離れるように試料採取しているが、採取位置による明確な傾向は確認できなかった。さらに本結果を土木学会「コンクリート標準示方書」に示される一般的な圧縮強度、静弾性係数の標準値に照らし合わせた結果を図-2.2.6に示す。圧縮強度に対し、静弾性係数は若干高い傾向を示したものの、性能の低下は確認されなかった。

以上より、コンクリート舗装版としては構造的損傷が確認されたが、コンクリート材料としては非常に良好な強度性能を示した。

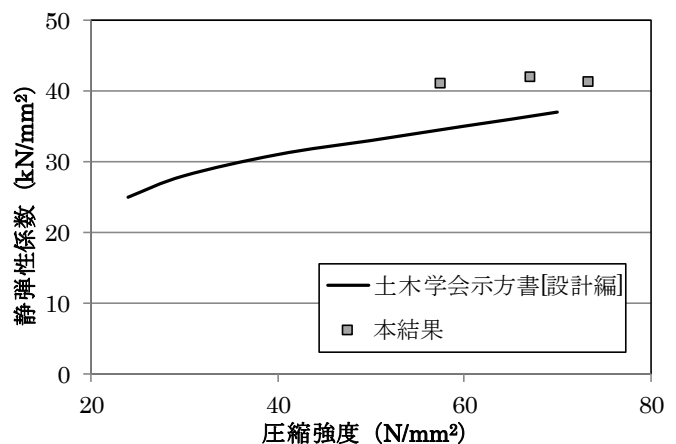


図-2.2.6 圧縮強度と静弾性係数の関係

2) 中性化深さ、塩化物含有量試験

ダウエルバーに対する腐食環境性を把握するため、コンクリートの中性化深さ、塩化物含有量を測定した。中性化深さ測定結果を表-2.2.7、塩化物含有量試験結果を図-2.2.7に示す。

表-2.2.7 中性化深さ測定結果

供試体名称	平均中性化深さ (mm)
α-1	0.3
α-2	0.2
α-3	0.4

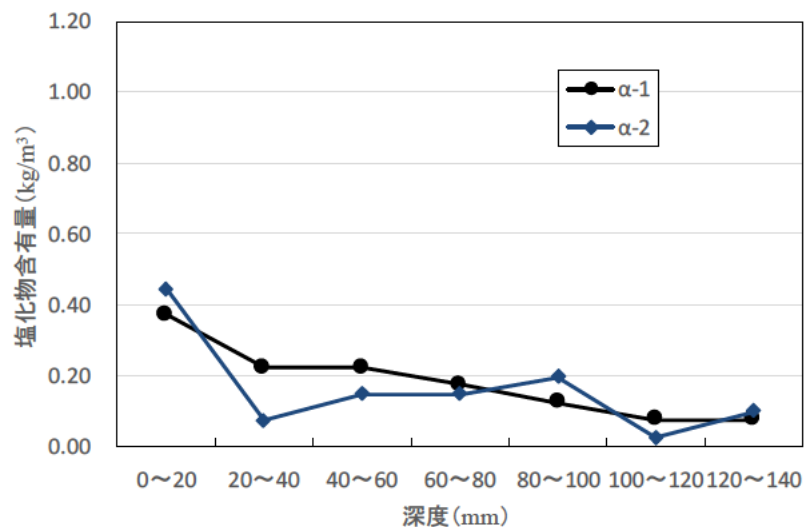


図-2.2.7 塩化物含有量試験結果

中性化深さ測定結果は 0.2~0.4mm であり、中性化深さはわずかであった。高い圧縮強度結果が示す通り硬化体の緻密化とアスファルトによるオーバーレイ補修により二酸化炭素の浸透が極端に低減されたと考えられる。

塩化物含有量試験結果は、内在塩分の目安となる深い層では 0.1kg/m³程度であるのに対し、表層では 0.4kg/m³程度を示し、表層の方が若干高い塩化物含有量を示したことから路面に凍結防止剤散布の可能性が考えらる。しかし、腐食発錆限界塩化物イオン濃度（標準として 1.2kg/m³）よりはるかに低い値であった。

以上の結果から、コンクリート中のダウエルバーに対する腐食環境性は極めて低い結果であった。

3) 配合推定結果

表-2.2.8 に配合推定結果を示す。

表-2.2.8 配合推定結果

供試体 名称	化学分析値			単位量の推定			
	Ig.loss(600°C) (%)	不溶残分 (%)	CaO (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
					W	C	骨材
β-1	3.5	80.3	8.1	30	88	296	2109
β-2	3.3	81.6	7.5	30	81	270	2123

配合推定の結果は、水セメント比は 30%、単位水量は 81~88kg/m³、単位セメント量は 270~296kg/m³ であった。参考までに、表-2.2.9 に昭和 40 年代に国道へ使われたコンクリート配合の一例³⁾を示す。

表-2.2.9 昭和 40 代に国道へ使われたコンクリート配合の一例³⁾

名称	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	混和剤
20号 八王子	30	1~3	-	44	36	136	310	704	1287(碎石)	使用せず
4号 瀬沼	40	2.5±1	3.5±1	39	30	116	300	594	1353(碎石)	
17号 高崎	40	2.5以下	-	45	32	145	320	634	1348	使用せず
41号 宮崎	40	2.0±1	-	45	31	144	320	608	1364	使用せず
1号 西湘	40	2.5以下	-	44	34	128	290	662	1327	
4号 滝沢	40	2.5±1	4±1	43	38	128	300	740	1236(碎石)	
22号 春日井	40	2.5以下	3~5	44	36	133	299	681	1245	
1号 枚方	40	2.5以下	-	44	34	140	320	663	1310	使用せず
6号 水戸	40	1.5±0.5	-	41	31	119	290	615	1375	

表-2.2.9 と比較すると、本推定結果は単位骨材量が高く、単位水量が低く、水セメント比が低い傾向を示した。

水セメント比、単位水量が低く推定された要因として、配合推定における水中、表乾質量を測定する際に、コンクリートコア内が緻密で、水がコンクリートコア内まで浸透せず水中、表乾質量が低くなり、単位水量が低く推定され、その結果水セメント比を小さく見積もった可能性が考えられる。

以上の結果から、比較的水セメント比の小さいコンクリートが用いられ、供用に伴い緻密なコンクリートとなった可能性が高い、と考えられる。

(6) ダウエルバーの材料分析結果

1) 「試料：f-1」の分析結果

①外観観察

外観の様子を写真-2.2.18～写真-2.2.19に示す。供試材には全体的に錆が認められた。特に破損部近傍においては錆が茶や白の層状であり、その表面は凹凸を呈していた。また、破損部近傍において供試材の変形や欠損は認められなかった。破面は主に軸方向に対し垂直な方向であったが、側面と同様に全面に錆びが認められ丸みを帯びており、特徴的な破壊形態は観察されなかった。

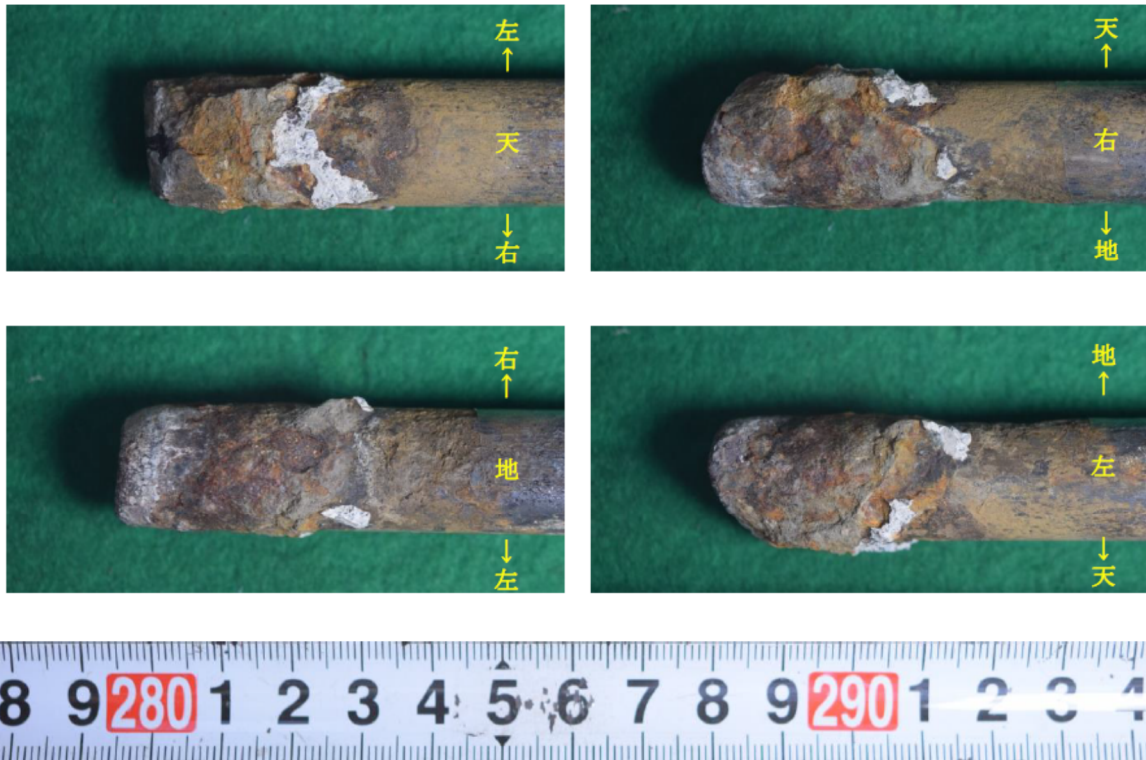


写真-2.2.18 外観の様子（破面側面：4方向より）



写真-2.2.19 破面外観

②断面観察

破面を含む径方向断面について、光学顕微鏡を用いて組織観察を実施した。断面組織観察位置を写真-2.2.20 に示す。

マクロ組織観察結果を写真-2.2.21 に、マクロ写真中に示す M1～M3 部のミクロ組織観察結果を写真-2.2.22～写真-2.2.24 に示す。M1 および M3 は破面の端部、M2 は中央近傍部である。破面、側面ともに全体的に錆の層が認められ、減肉（細径化）している様子が観察された。組織はフェライト+パーライトを呈しており、均一であった。破損部近傍において組織の変形は認められず、また、起点となりうるような大型介在物等、特異点は観察されなかった。

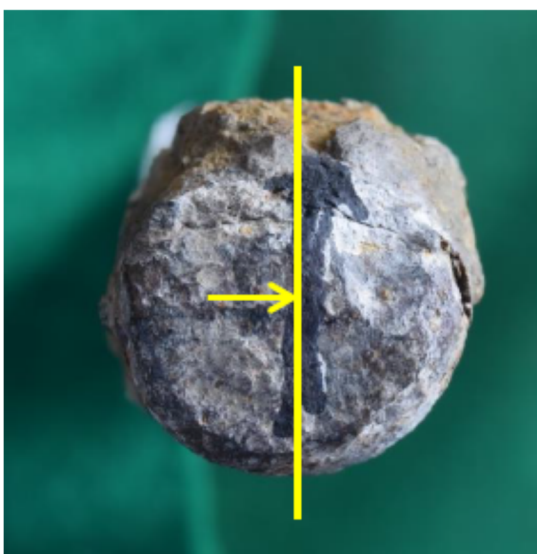


写真-2.2.20 断面組織観察位置及び方向

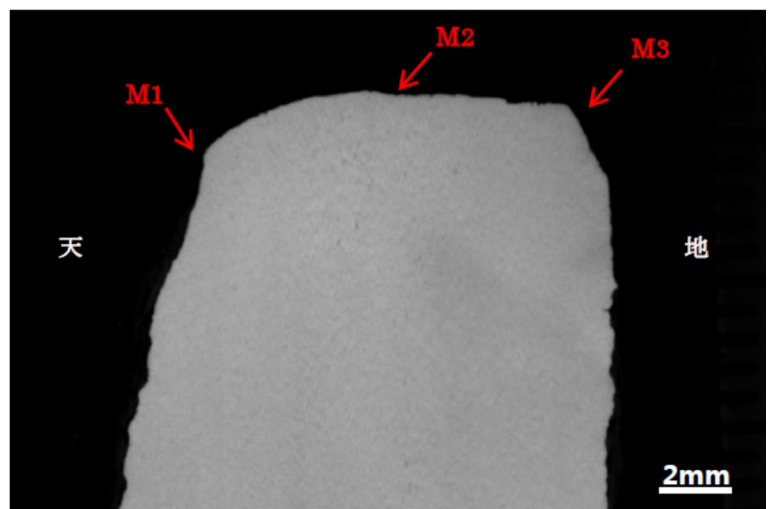


写真-2.2.21 マクロ組織観察結果

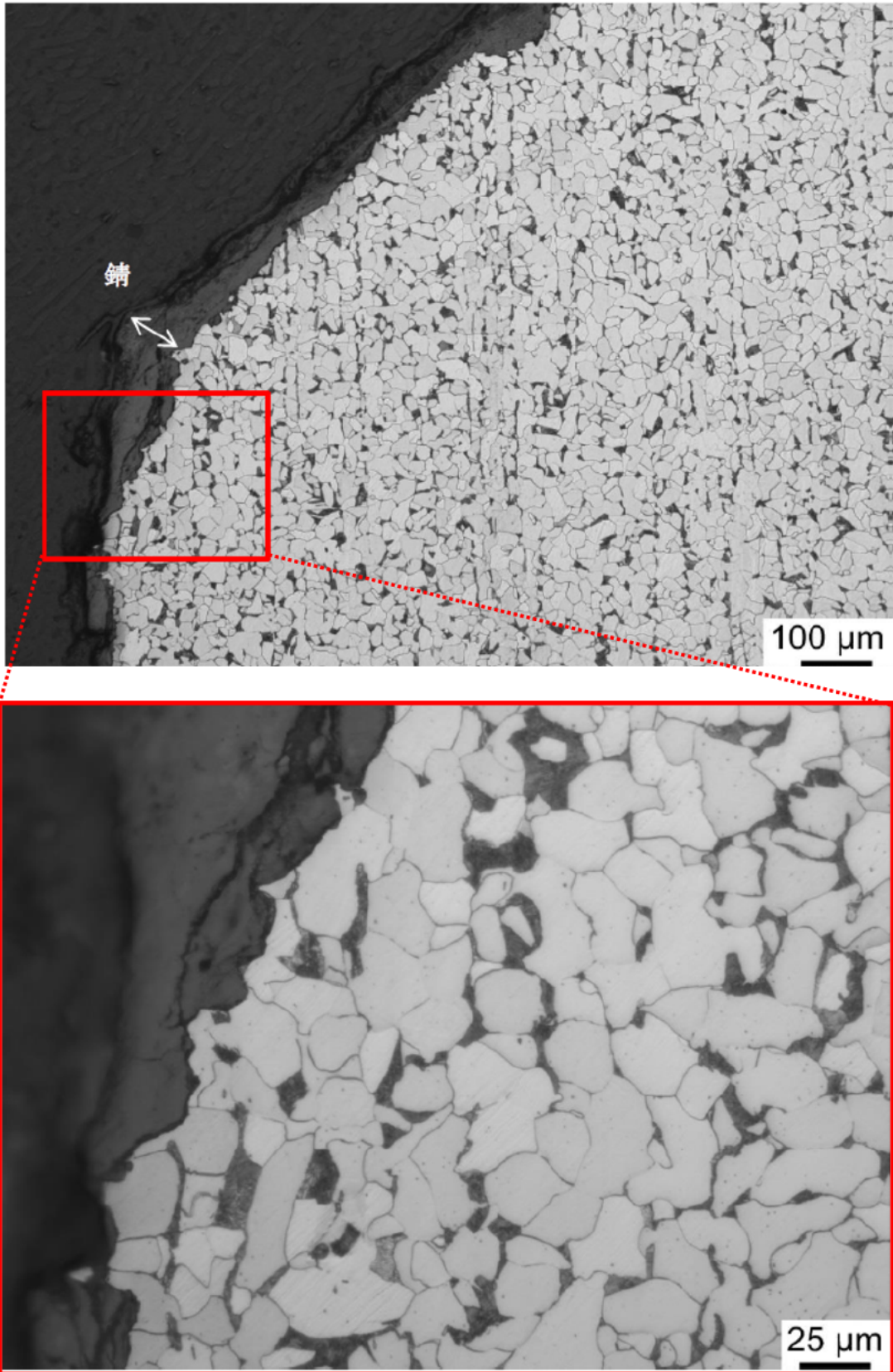


写真-2.2.22 ミクロ観察結果 (M1 部)

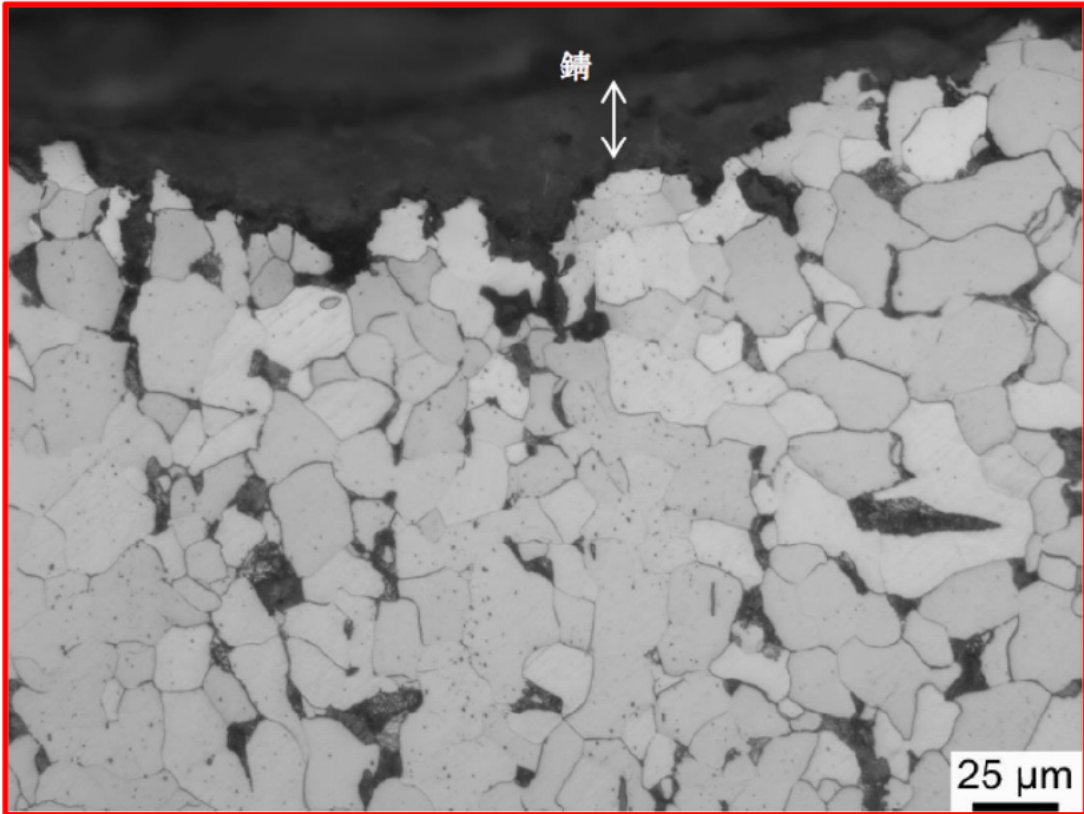
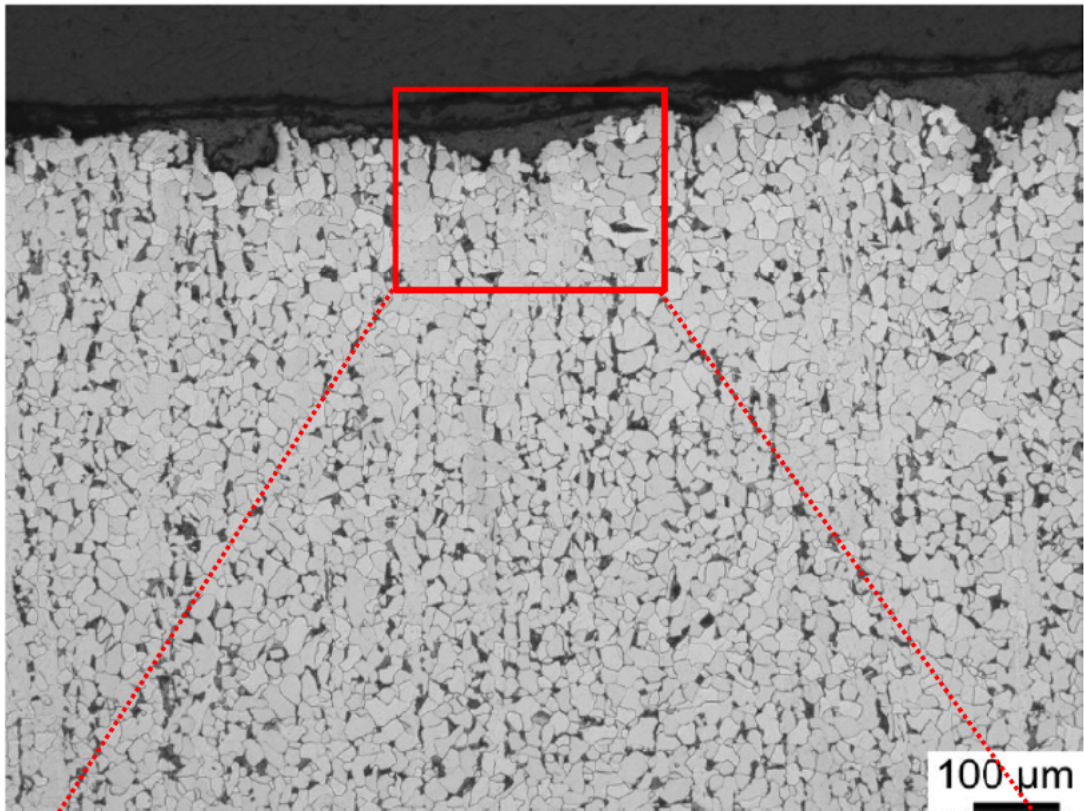


写真-2.2.23 ミクロ観察結果 (M2部)

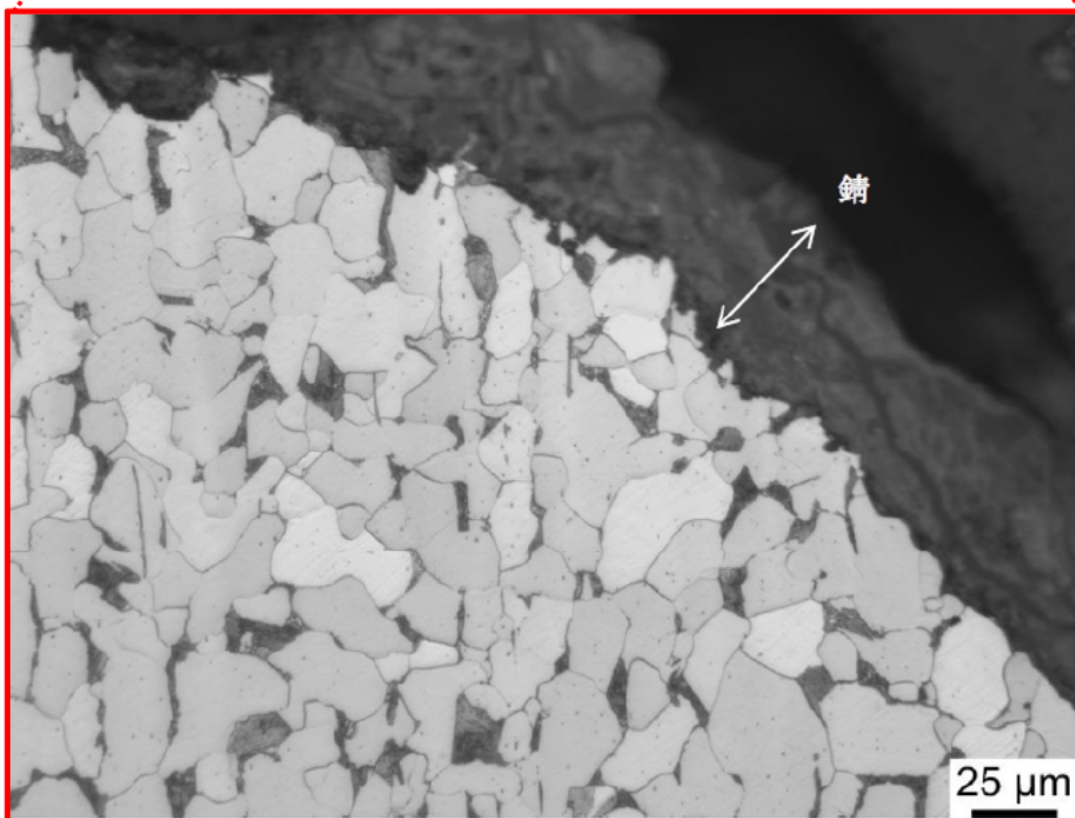
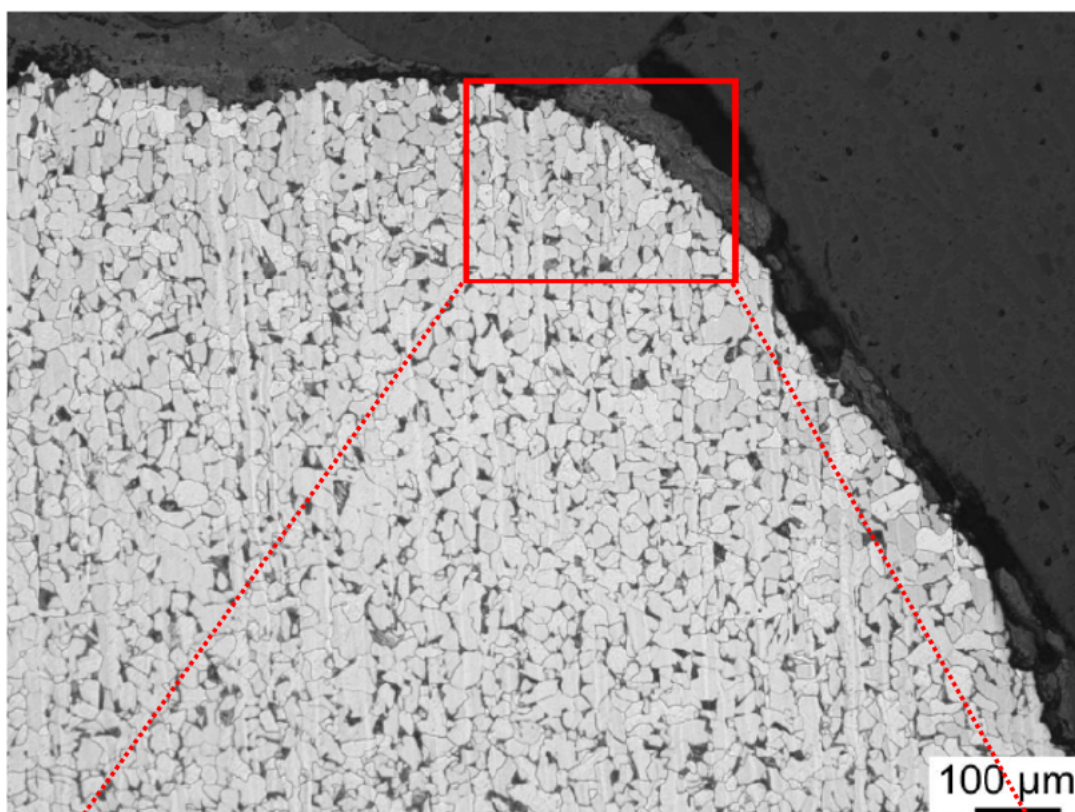


写真-2.2.24 ミクロ組織観察結果 (M3 部)

③破面形態観察

供試材の破面について、SEM（Scanning Electron Microscope：走査型電子顕微鏡）による破面形態観察を実施した。前処理として、除錆および洗浄処理を施した。

破面 SEM 観察位置を写真-2.2.25 に、写真-2.2.25 中の S1～S3 部の SEM 観察結果を写真-2.2.26～写真-2.2.28 に示す。破面には前処理で除去できず残存した強固な錆が散見された。全面的に細かい凹凸が観察され、腐食によりオリジナルの破面形態が失われていると考えられる。また、全面的に腐食ピットが観察されたが、S2 部では腐食ピットの集中している部位が観察された。

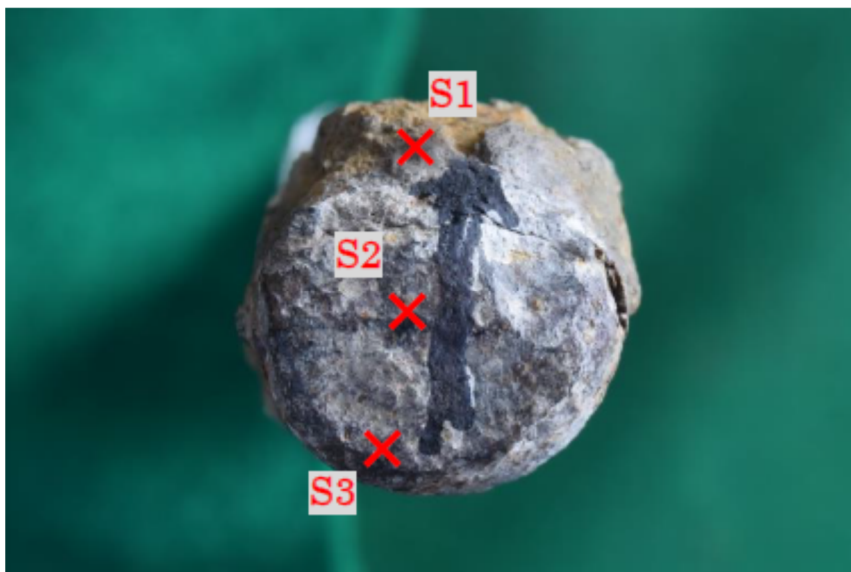


写真-2.2.25 破面 SEM 観察位置

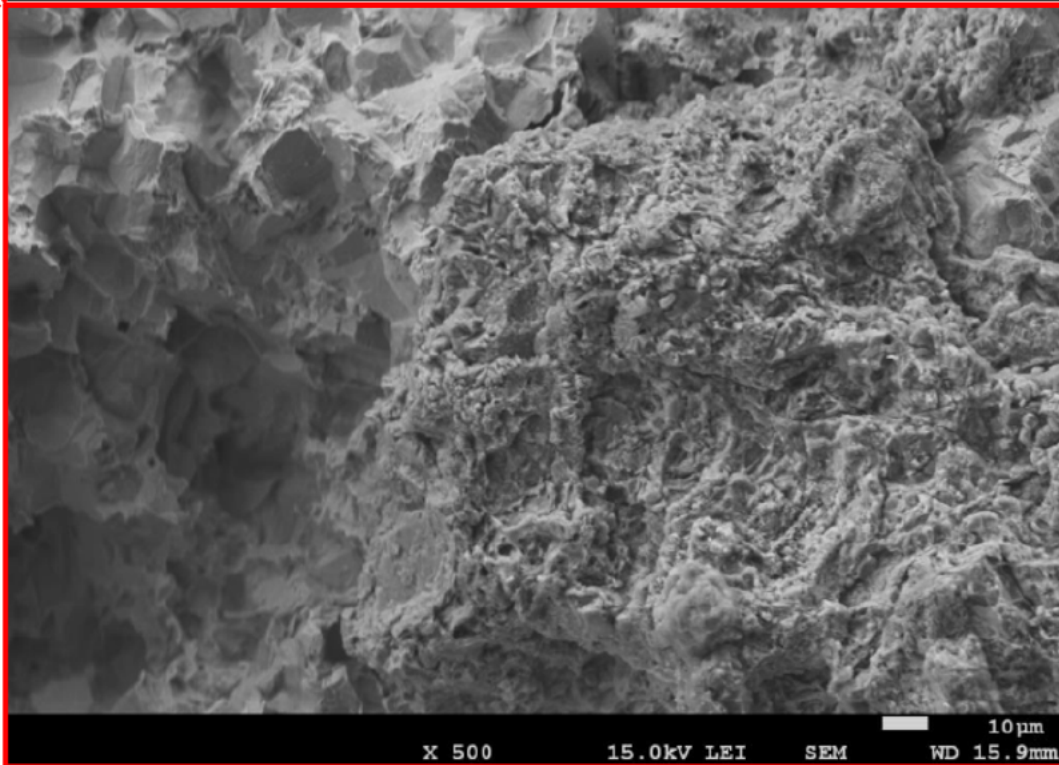
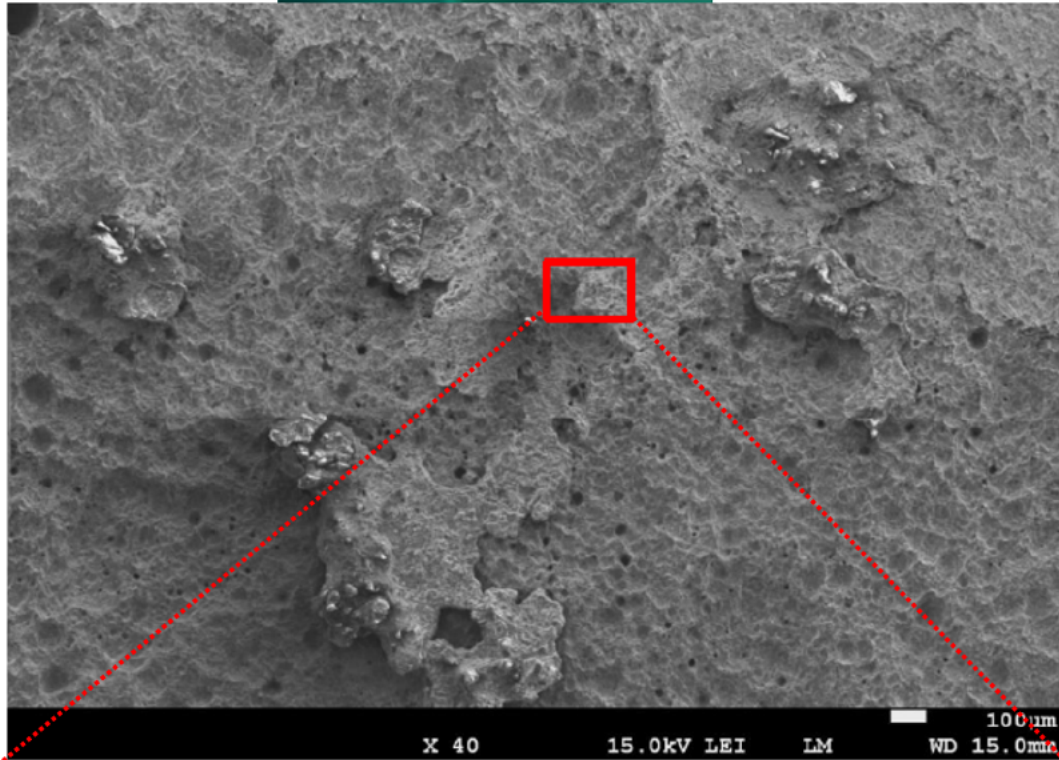


写真-2.2.26 破面 SEM 観察結果 (S1 部)

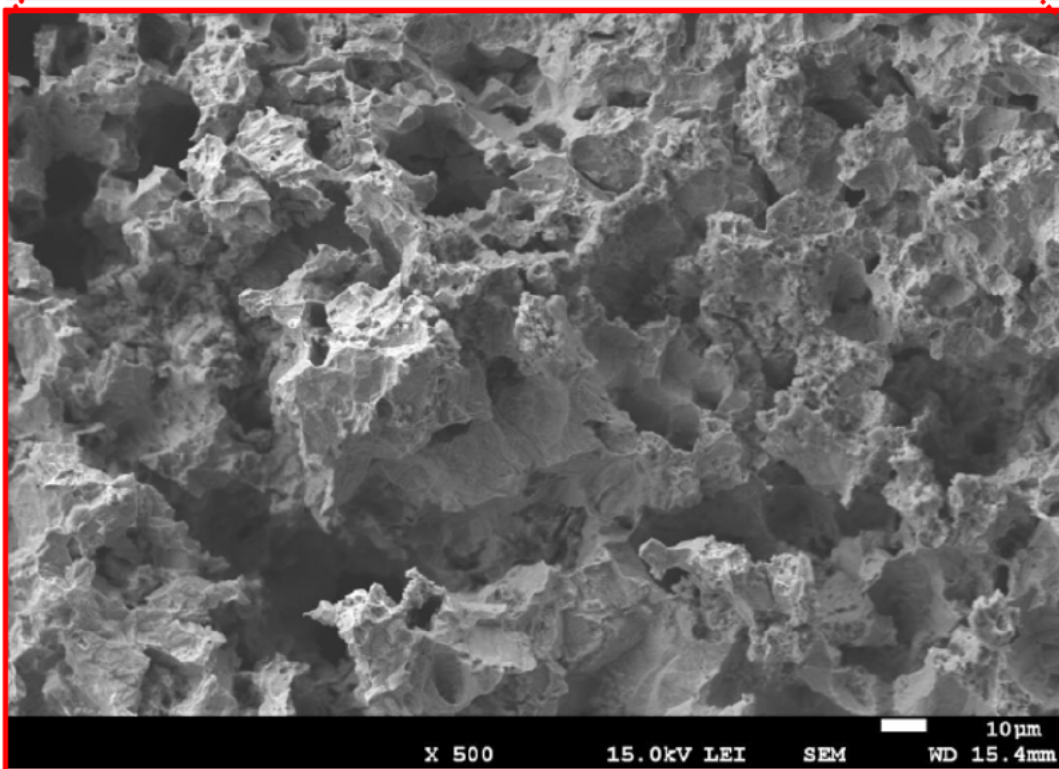
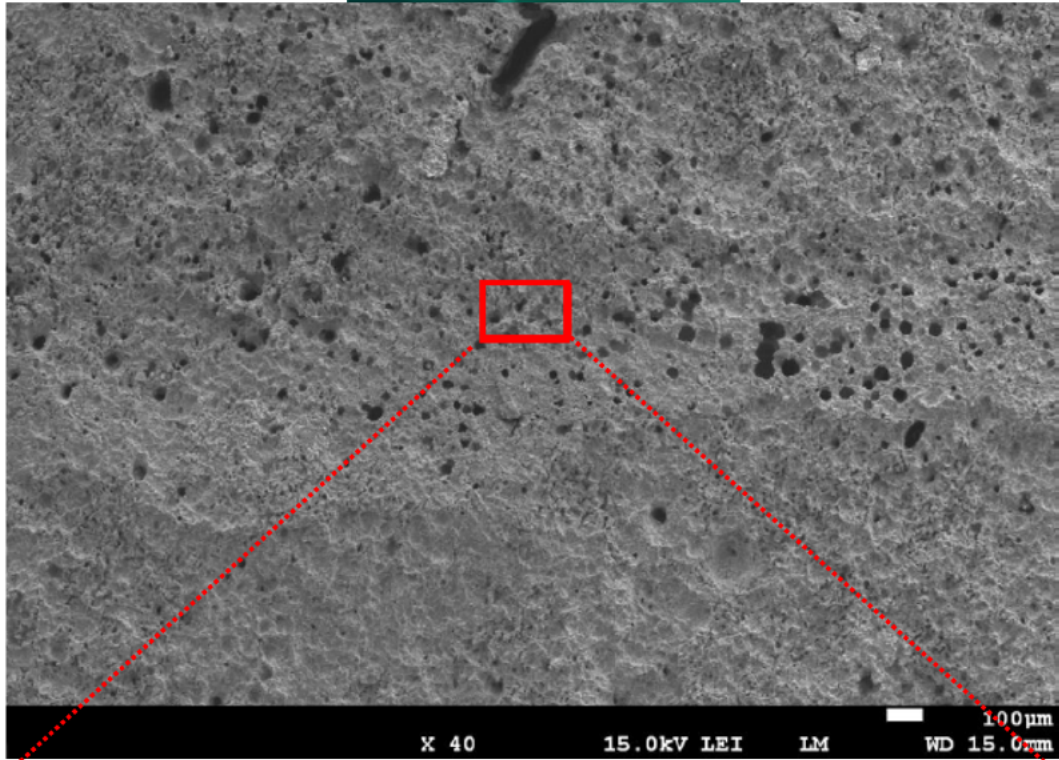


写真-2.2.27 破面 SEM 観察結果 (S2 部)

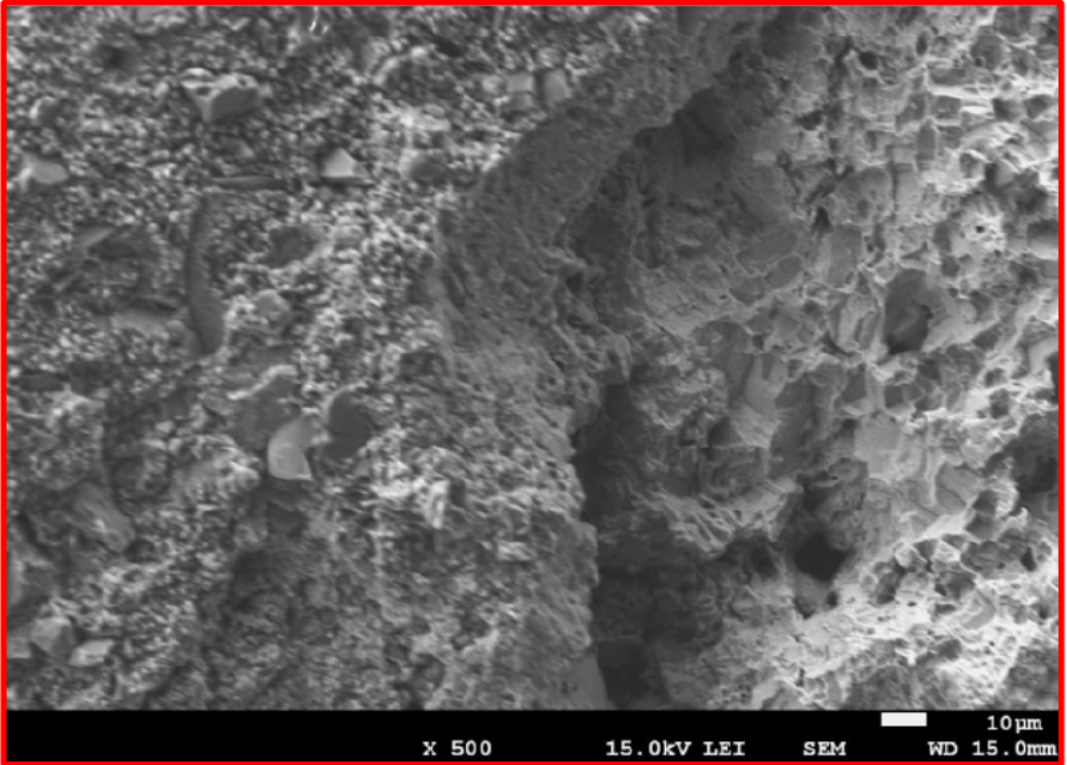
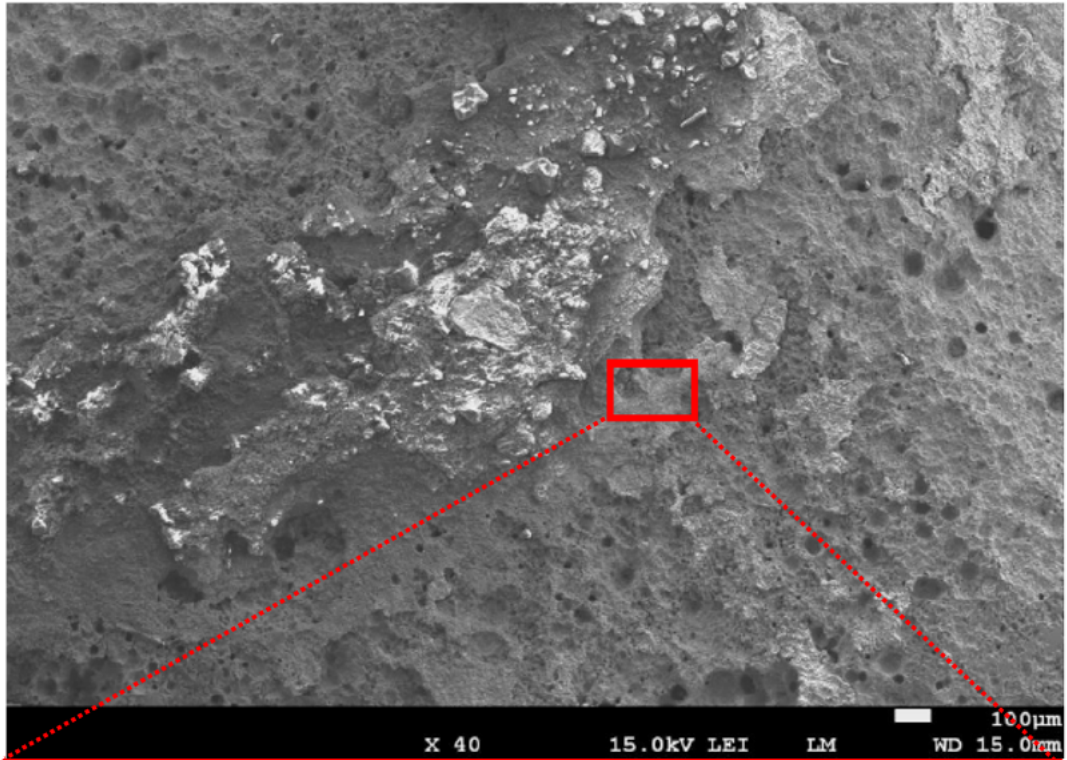


写真-2.2.28 破面 SEM 観察結果 (S3 部)

④ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験結果を図-2.2.8 に示す。

ビッカース硬さ値は126～133HVであり、径方向にはほぼ均一であった。ビッカース硬さ結果よりダウエルバーの引張強度を換算すると、390～430MPa程度と推定された。現在のダウエルバーは、SR235が一般的に用いられており⁴⁾、本国道で用いられたダウエルバーは、現在用いられているダウエルバーと同等の強度と推定される。

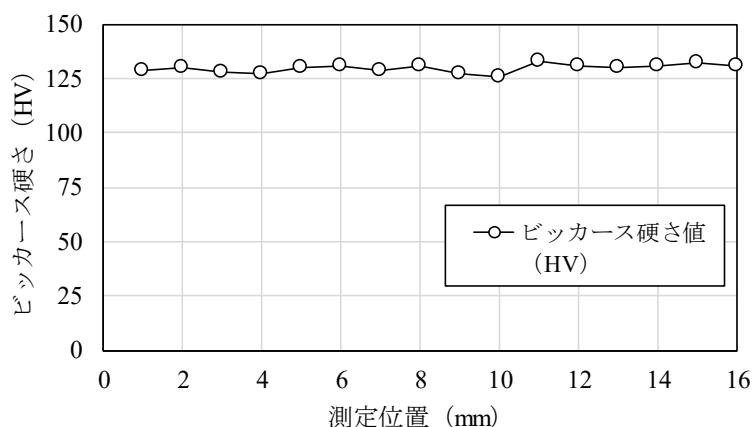


図-2.2.8 ビッカース硬さ分布図

⑤化学成分分析

化学成分分析の結果を表-2.2.10 に示す。表-2.2.10 には参考として、コンクリート用棒鋼の代表としてSR235、SR295、SD295A 及びSD345 の規格値を併記した。

表-2.2.10 化学成分分析結果

		C	Si	Mn	P	S
分析値		0.13	0.17	0.46	0.025	0.035
参 考	SR235、SR295、 SD295A 規格値	—	—	—	≦0.050	≦0.050
	SD345 規格値	≦0.27	≦0.55	≦1.60	≦0.040	≦0.040
	S10C 規格値	0.08～0.13	0.15～0.35	0.30～0.60	≦0.030	≦0.035
	S12C 規格値	0.10～0.15	0.15～0.35	0.30～0.60	≦0.030	≦0.035
	S15C 規格値	0.13～0.18	0.15～0.35	0.30～0.60	≦0.030	≦0.035

(単位：mass%)

本ダウエルバーの分析値は、いずれの規格値も満足していた。また、5 元素の分析値は炭素鋼として一般的であり、たとえばS10C、S12C、S15C等に相当すると考えられる。

⑥破断要因の推定

ダウエルバーの調査の結果、組織は全体的にフェライト+パーライト組織を呈しており、大型介在物や、組織劣化などの特異点は観察されなかった。ビッカース硬さ値は126～133HVでほぼ均一であり、化学成分も鉄筋コンクリート用棒鋼の材質として一般的であると考えられる。

破面近傍は腐食が著しく、オリジナルの破面形態は観察されなかったが、腐食によるき裂進展の痕跡（微視き裂、分岐き裂等、起点となりうるような孔食等）は観察されなかった。また、錆の簡易分析の結果、FeおよびOが主として検出されたことから錆は酸化鉄であり、腐食性元素等は認められなかった。これらより、き裂進行中、または破断後に腐食環境であった可能性が考えられるが、腐食は今回の破損の直接要因ではないと考えられる。

本検討でのダウエルバーは、マクロ的にもミクロ的にも変形が認められなかったことから、変形が少ない破壊形態である「疲労」または「脆性破壊」により破断したものと推定される。本材料は、強度が390～430MPa程度と換算されたことから遅れ破壊感受性は低く、その他の環境による脆化現象等も想定されにくいことから、疲労破壊により破断した可能性が高いと考えられる。

2) 「試料：0-1、0-2」の分析結果

①外観観察

0-1の外観観察の様子を写真-2.2.29に示す。

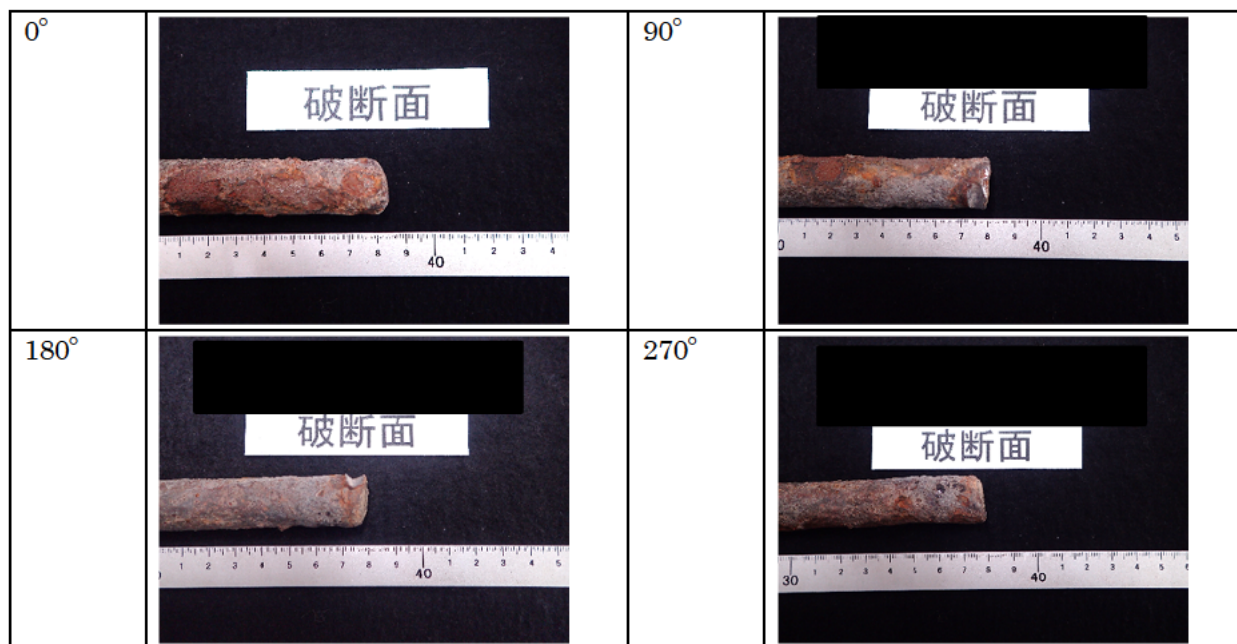


写真-2.2.29 外観観察の様子 (0-1)

全体的に腐食を生じており、特に天側に赤錆や減肉が集中していた。破断部周辺において、曲がりやくびれなどの明らかな変形を示す箇所は認められなかったが、破面は丸みを帯びており、錆や土壌の付着が認められる。破面の付近には外傷痕と思われる凹みが認められる。この部分と破面の隣接は認められないことから、破壊への関与はなかったと考えられる。

0-2の外観観察の様子を写真-2.2.30に示す。

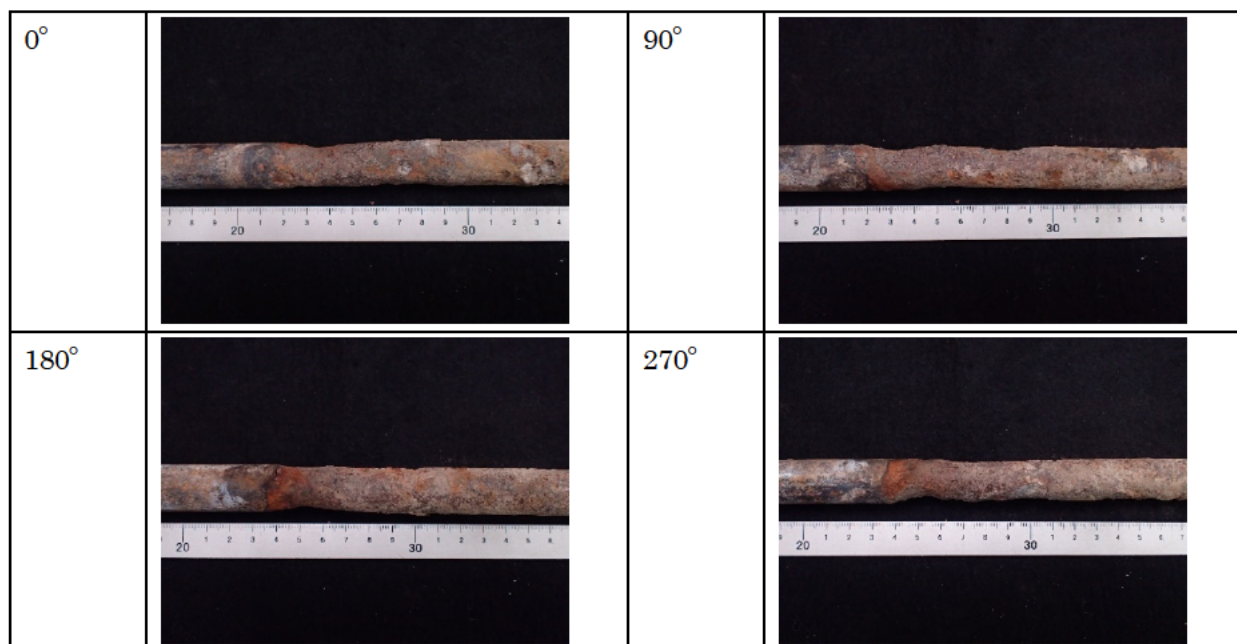


写真-2.2.30 外観観察の様子 (0-2)

全体的に腐食しているが、特に天側に赤錆が集中した様子である。一方、地側の腐食はコンクリートの付着のない範囲に限定されている。天側に向かってなだらかな曲げ変形が生じている。この変形は腐食が明らかな領域において認められる。減肉は比較的広い範囲に認められる。また、天地面における減肉の程度には差異があり、天側の減肉が顕著と言える。地側の減肉部において軸方向に垂直な開口部が認められる。

②破面観察

O-1の破面マクロ観察結果を写真-2.2.31に示す。

破面は軸に対して垂直に近い角度に形成されており、丸みを帯びているものの、比較的平滑な様相である。除錆前の破面は全体的に腐食生成物や土壌の付着が認められ、全体的に強固な黒錆に覆われていたため、除錆後も黒錆が残存したままである。除錆後の破面には破壊の起点や破壊の進行方向などを示す模様は認められなかった。破断部近傍の表面には幅をもった開口部が複数箇所形成されていた。

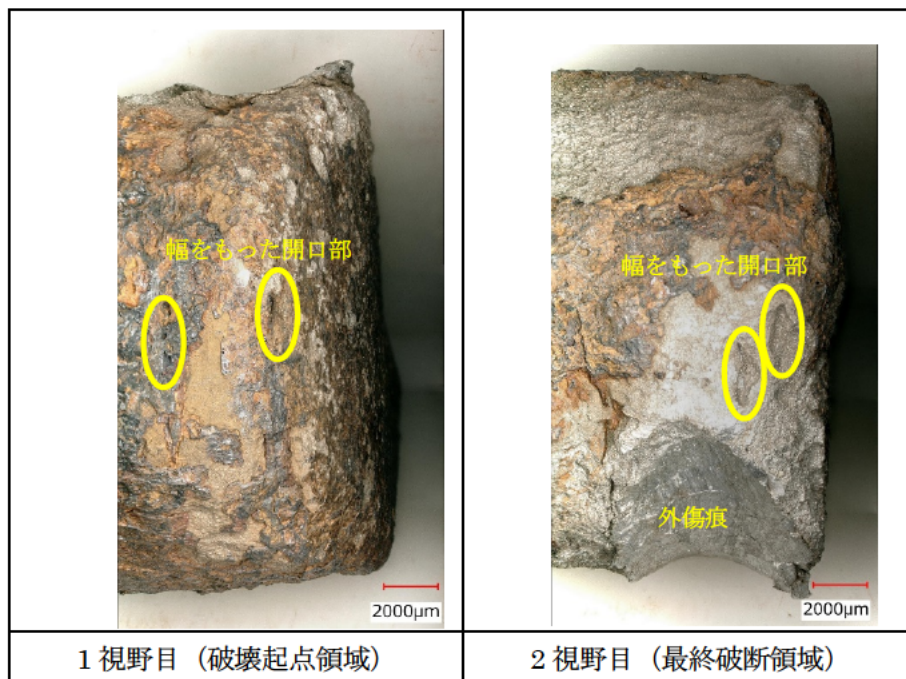
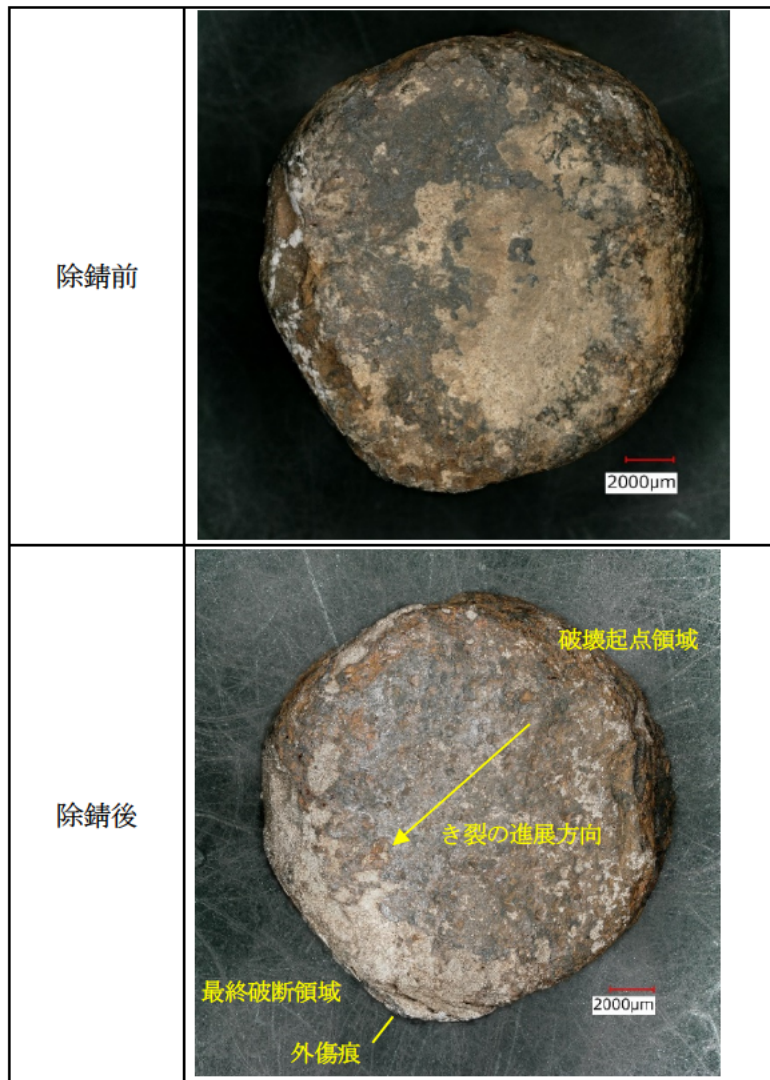


写真-2. 2. 31 マイクロスコープによる破面観察結果 (0-1)

O-1 の除錆前の SEM-EDX 定性分析結果を図-2.2.9 に示す。

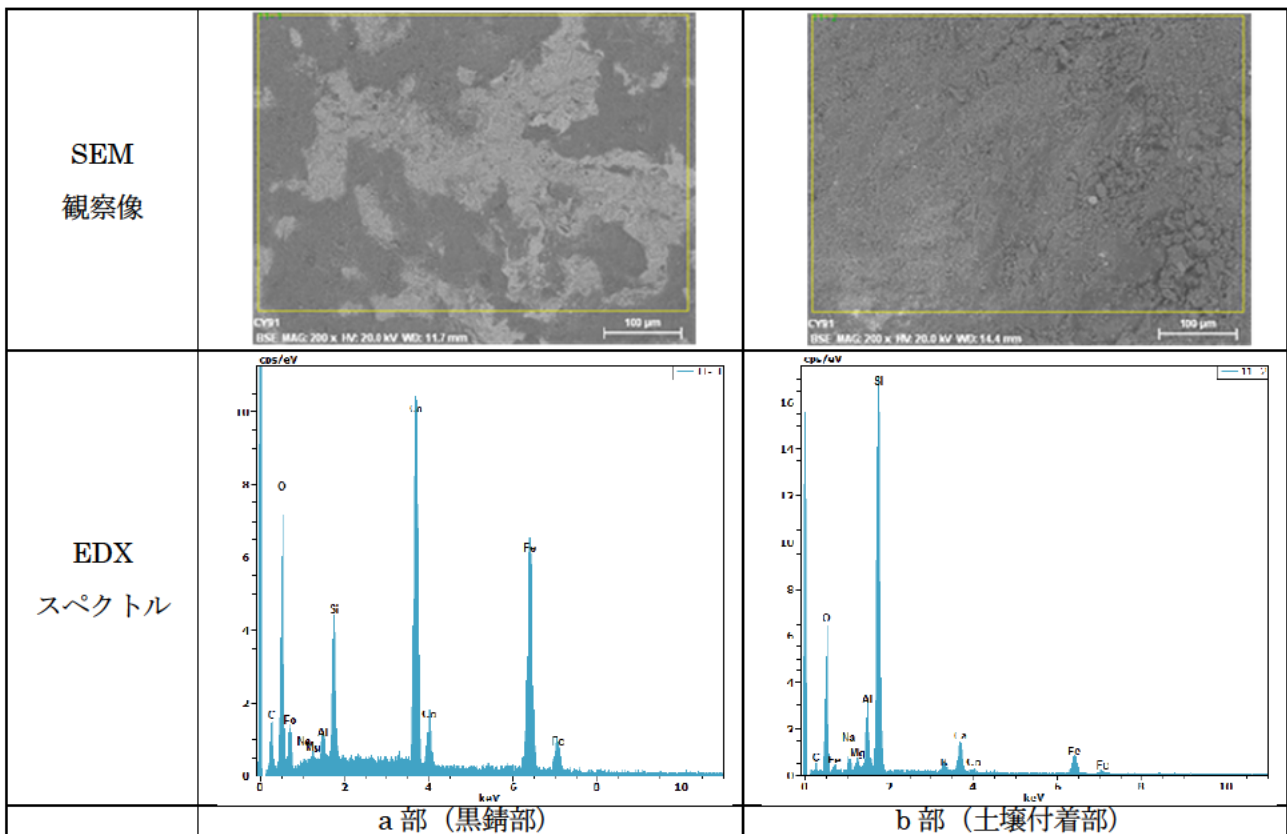


図-2.2.9 除錆前の SEM-EDX 定性分析結果 (0-1)

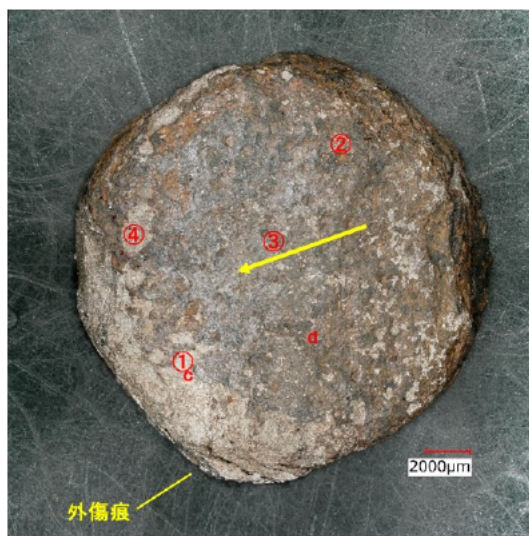
破面の各部位より検出された成分を以下に示す。

○黒錆部 (a 部) : Ca,O,Fe,Si,C,Al,Na,Mg

○土壌付着部 (b 部) : Si,O,Al,Ca,Fe,Na,Mg,C

対象部位より、腐食性元素の検出は認められなかった。上記成分のうち、Fe は素材、O は腐食生成物あるいは土壌、Ca,Si,Al,Mg は土壌に由来するものと考えられる。Na,K は塩基性物質に由来する成分の可能性が考えられる。

O-1 の SEM-EDS による観察位置を写真-2. 2. 32、SEM による破面観察の結果を写真-2. 2. 33～写真 2. 2. 34 に示す。



※図中矢印は推定される破壊の進行方向を示す

写真-2. 2. 32 SEM-EDS 観察位置 (0-1)

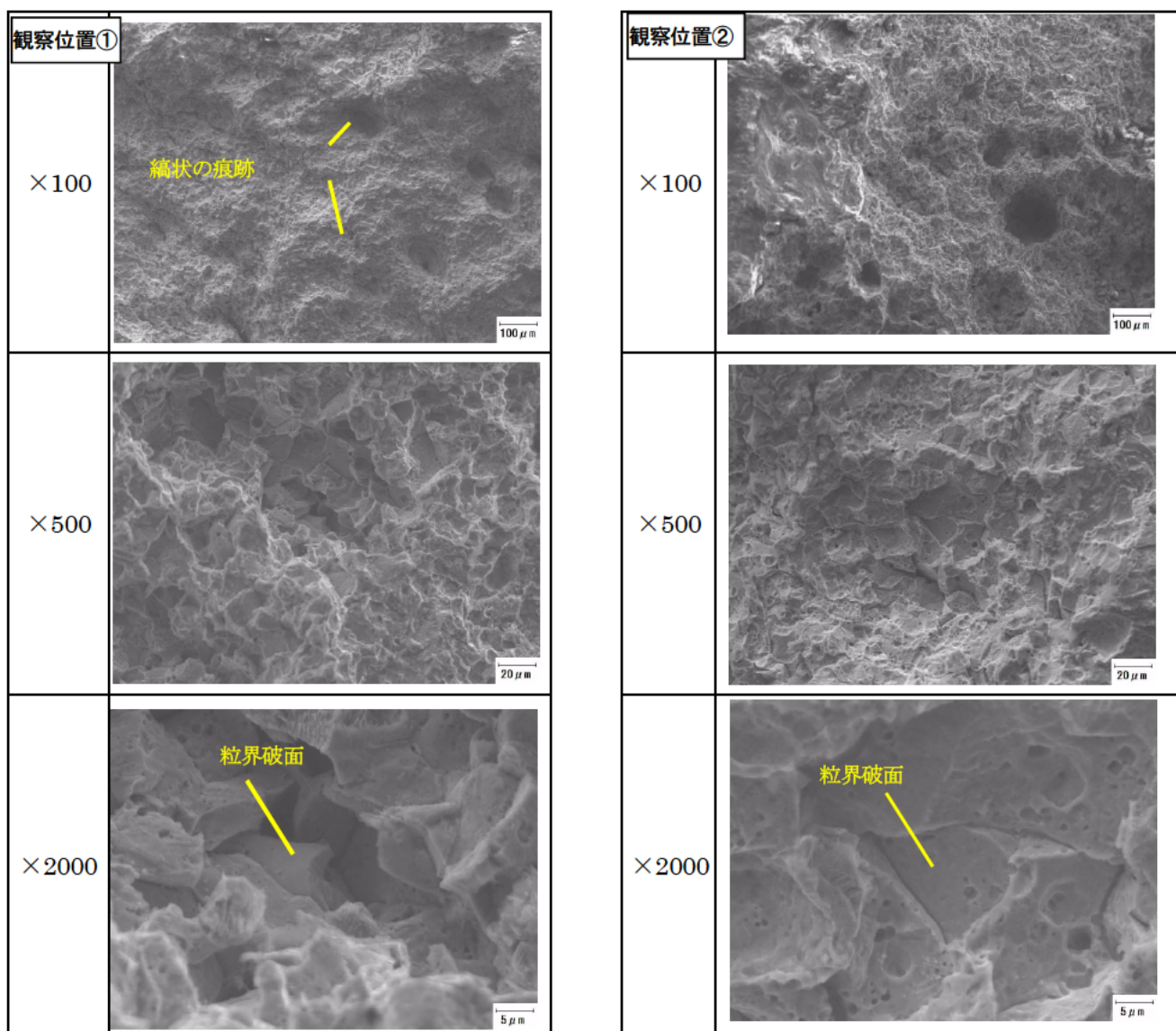


写真-2. 2. 33 SEM 破面観察結果①(0-1)

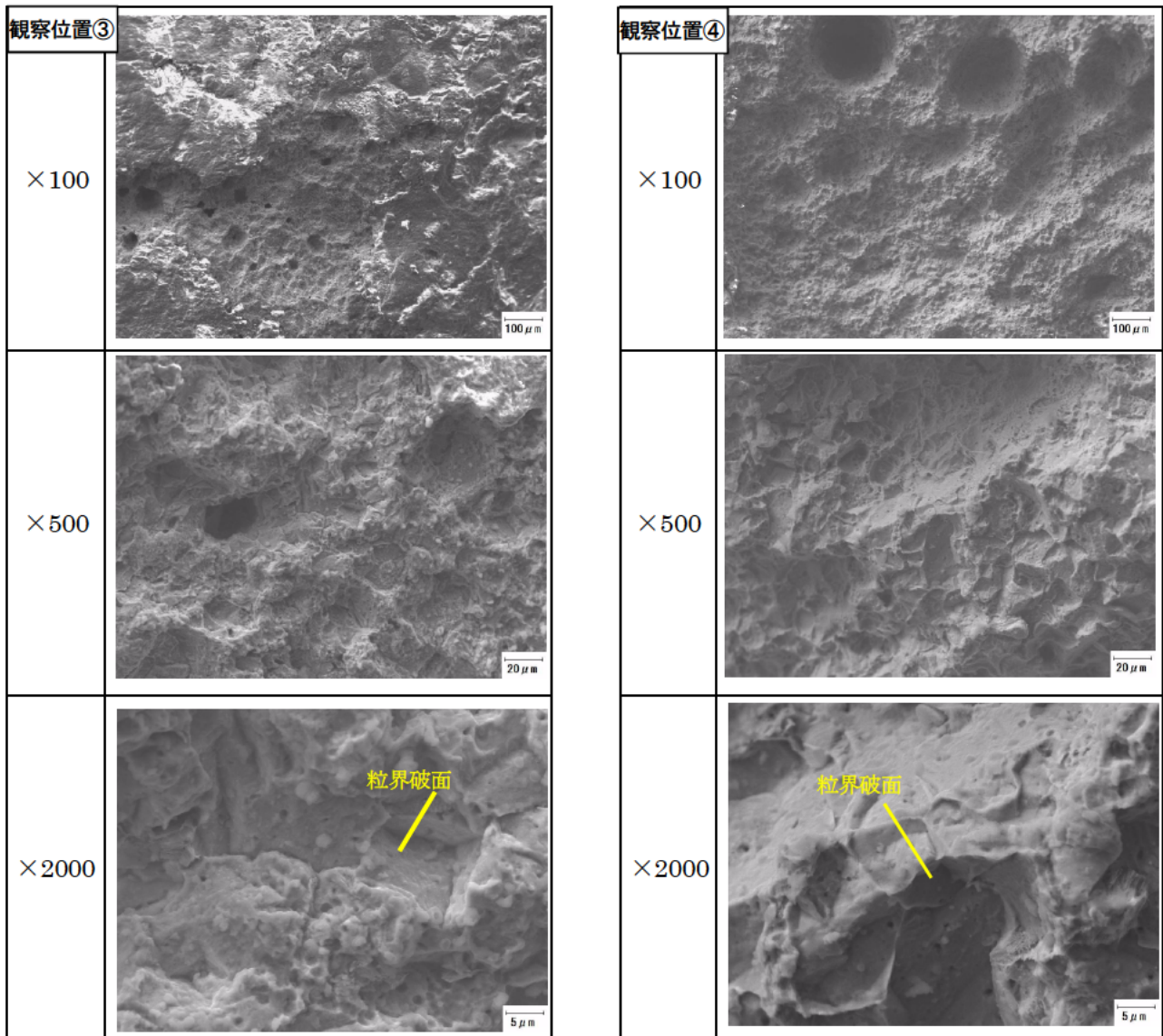


写真-2. 2. 34 SEM 破面観察結果②(O-1)

破面は腐食ピットに粒界破面が混在した様相を示す箇所が多くあった。観察位置①における 100 倍の観察像には、規則性をもった縞状の様相が観察できる。観察位置①、②における 500～2000 倍の観察像においては粒界破面の中に奥行きのある間隙が認められる。

O-1 の除錆後の EDX 定性分析結果を図-2. 2. 10 に示す。

破面の各部位より検出された主な成分を以下に示す。

○素地部 (c 部) : Fe,C,O,Cu,S,Si,Cr,Cl

○黒錆部 (d 部) : Fe,O,Si,Cl,C,Cr,Cu,S

腐食性元素である S,Cl が検出された。ただし、Cl については除錆に使用した塩酸に由来するものと考えられる。上記成分のうち、Fe は素材、O は腐食生成物あるいは土壌、Si は土壌などに由来するものと考えられる。Cu,Cr は由来が不明だが、素材の不純物として含まれる元素の可能性はある。

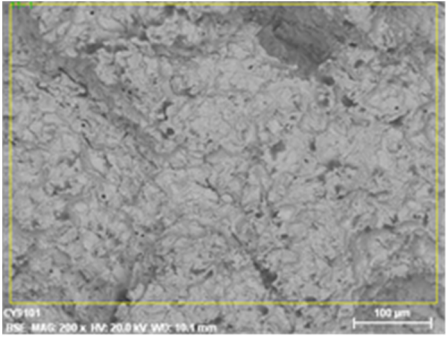
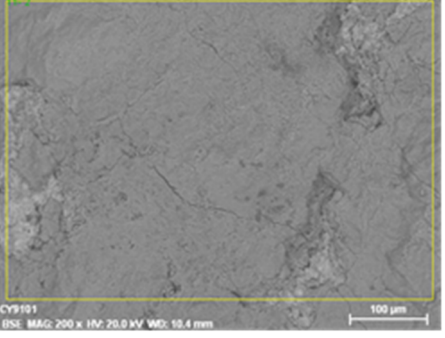
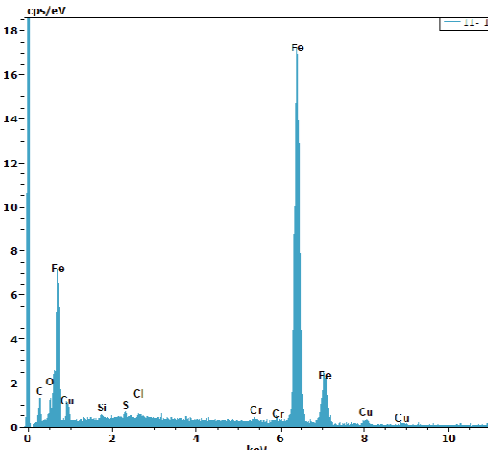
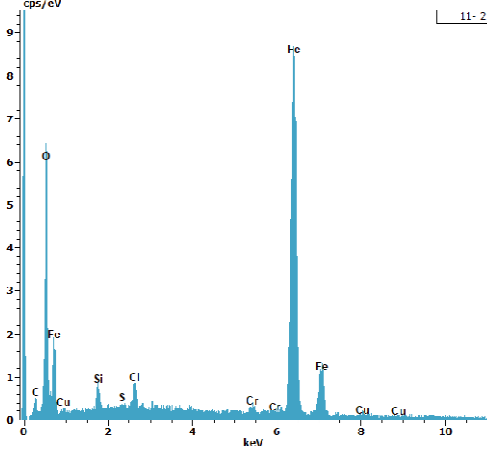
<p>SEM 観察像</p>		
<p>EDX スペクトル</p>		
<p>観察位置</p>	<p>C (素地部)</p>	<p>d (黒錆部)</p>

図-2.2.10 除錆後のEDX定性分析結果(0-1)

③径方向の断面観察

O-1 の断面組織観察結果を写真-2.2.35～写真 2.2.38 に示す。

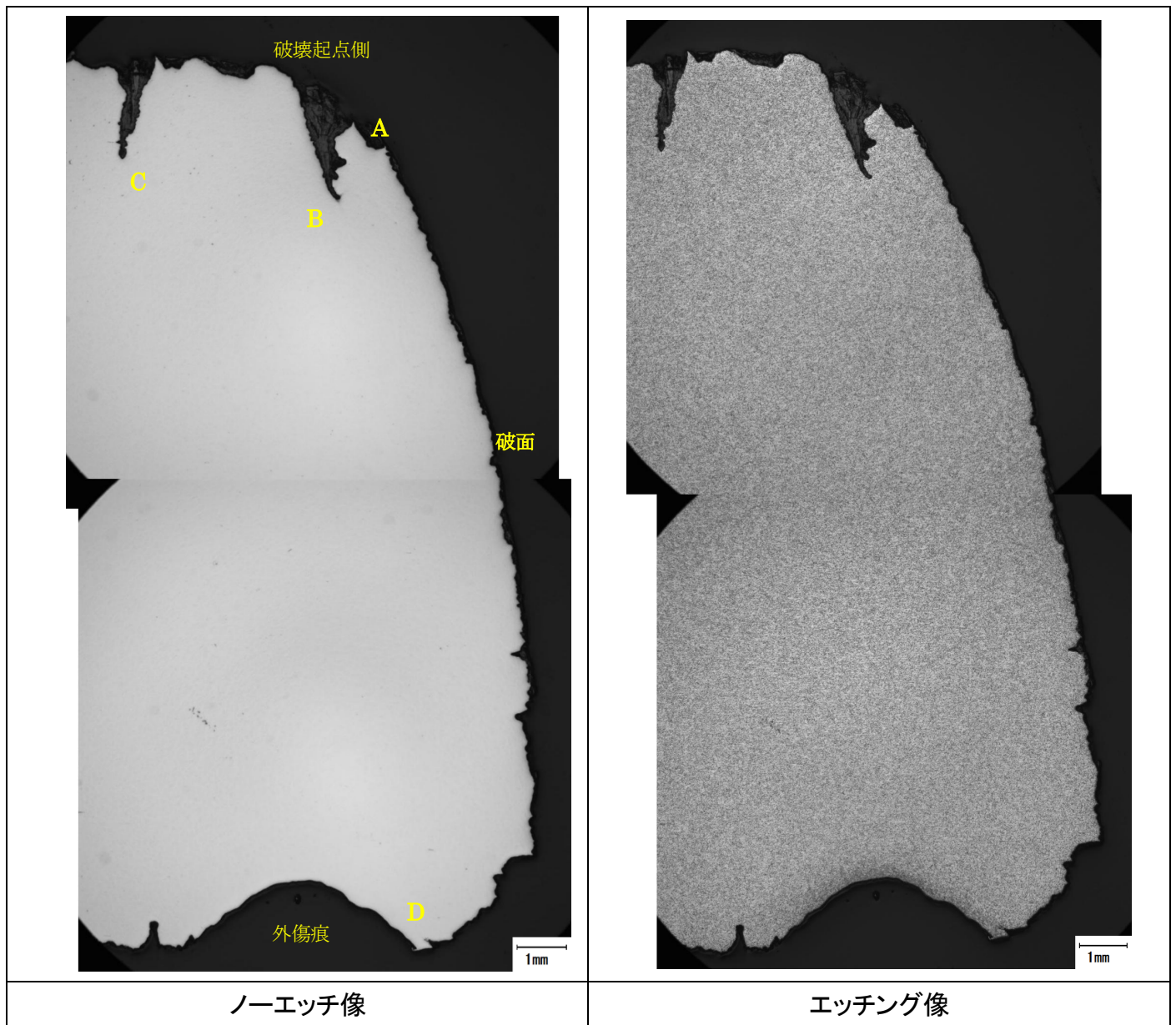


写真-2.2.35 断面観察結果 (0-1)

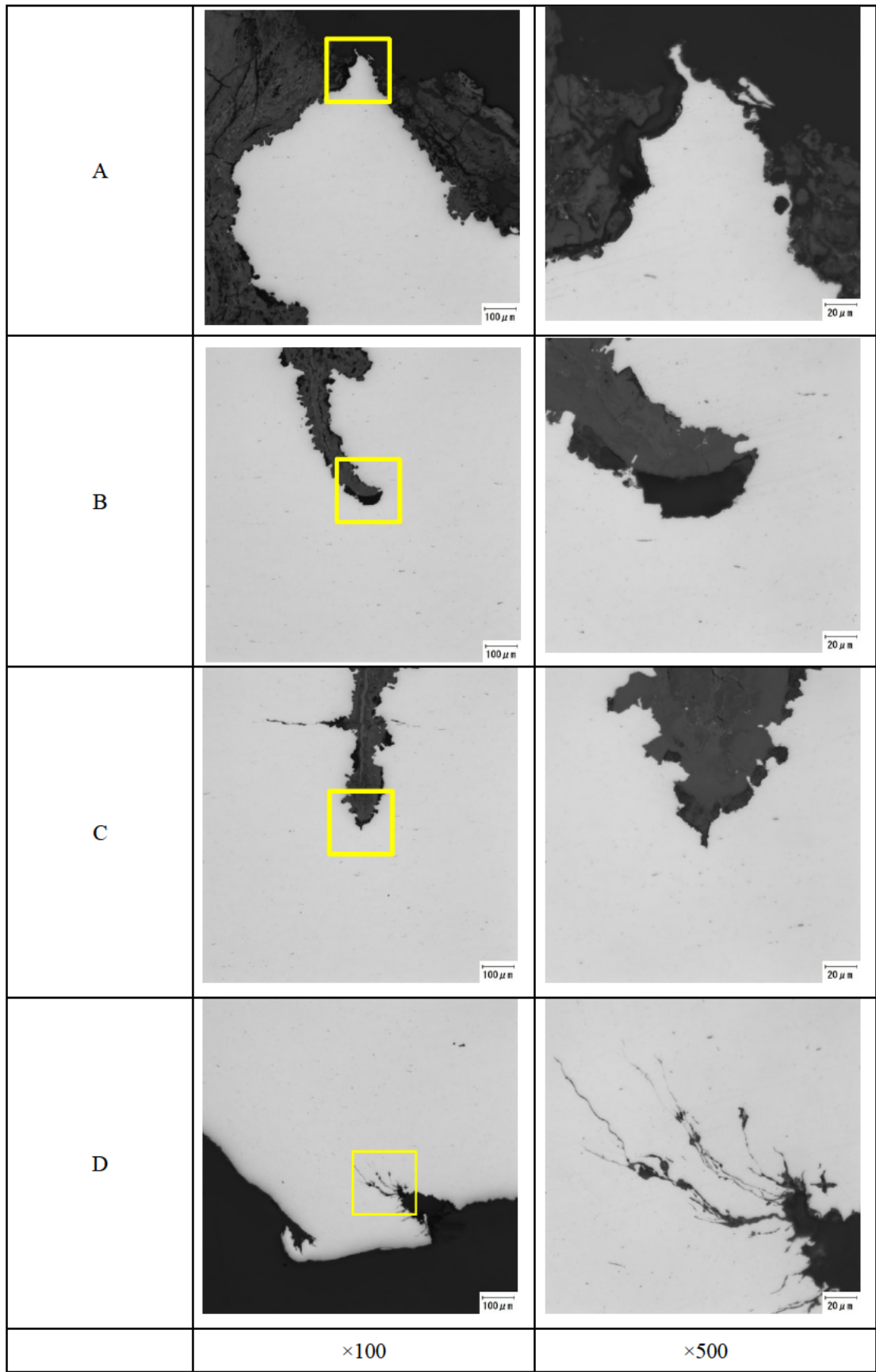


写真-2. 2. 36 断面観察結果 ノーエッチ像 (0-1)

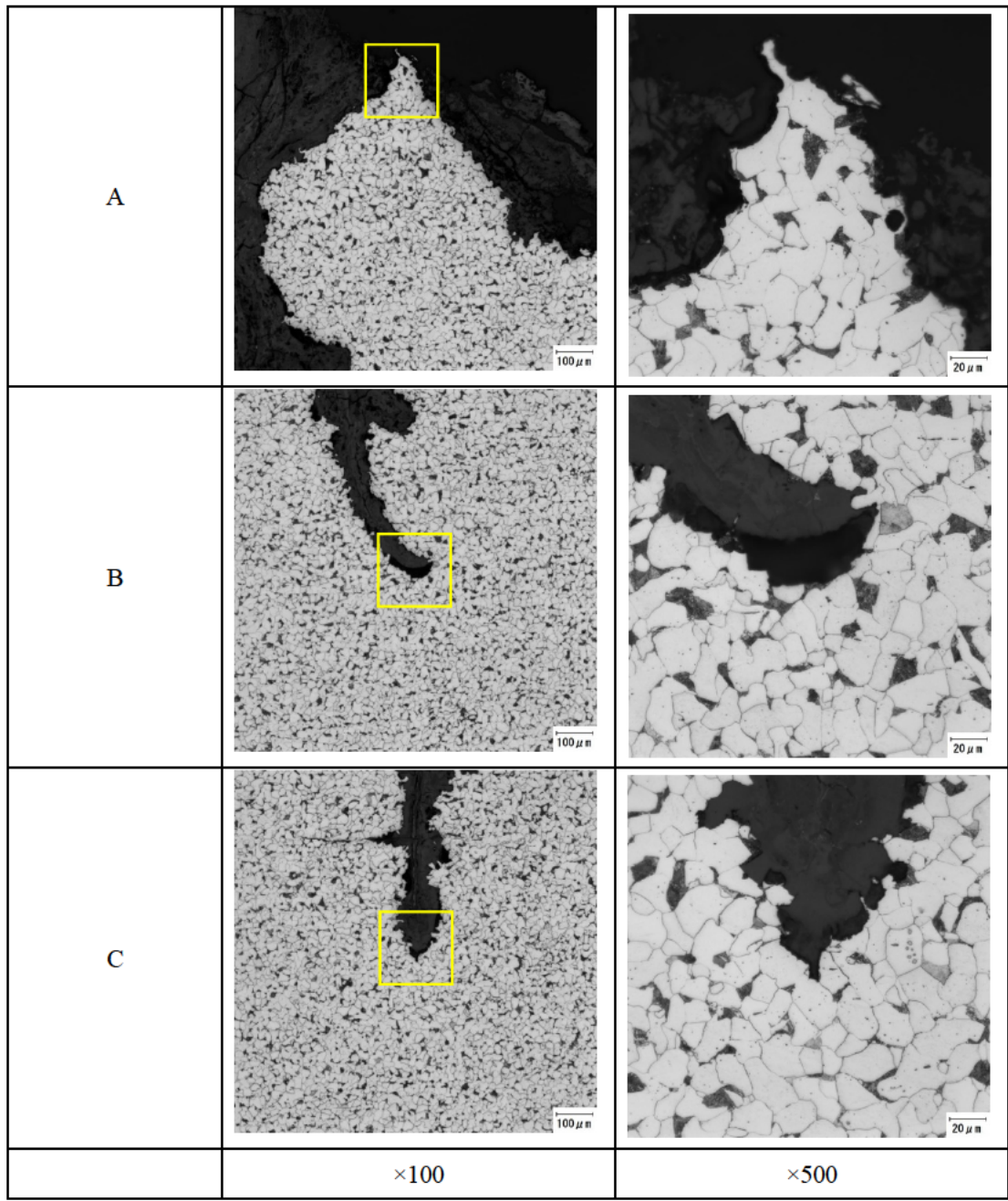


写真-2.2.37 断面観察結果 エッチング像① (0-1)

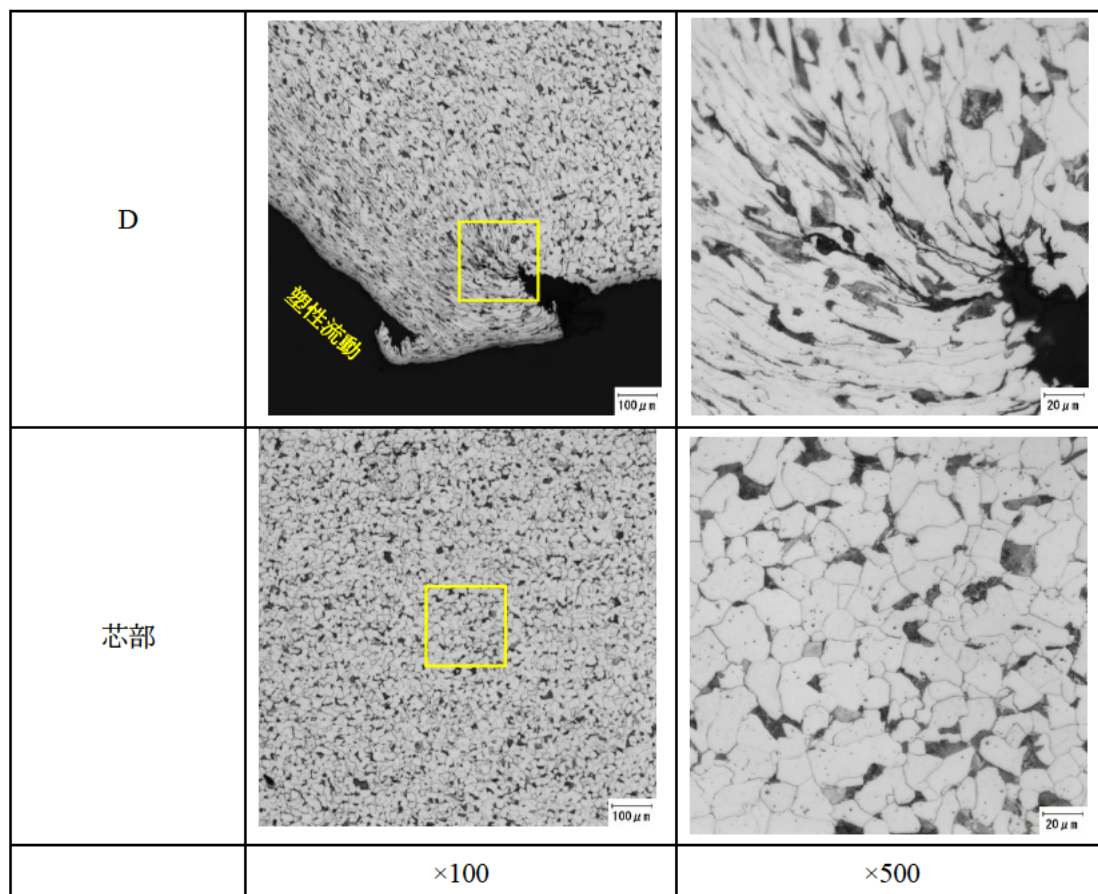


写真-2.2.38 断面観察結果 エッチング像② (0-1)

破面を形成した主き裂は、軸方向に対して垂直に近い角度で円弧状に進展していた。破断部の周辺には幅をもったき裂の様相が複数箇所に認められ、き裂の進行方向は巨視的にはいずれも軸に対して垂直である。また、この内部には腐食生成物が詰まっており、素地の壁面には結晶粒界様相も認められる。D 部には樹枝状の微小なき裂が認められる。当該領域はき裂の進行方向に沿って組織が展伸した様子を示しており、近傍の外傷痕の影響を受けているものと考えられる。また、破断部周辺の明らかな組織変化は認められず、素地はフェライト-パーライト組織が形成されていた。

O-2 の断面観察試料採取位置を写真-2.2.39、断面観察の観察位置を写真-2.2.40 に、断面観察結果を写真-2.2.41～写真-2.2.45 に示す。



写真-2.2.39 断面観察用試料採取位置 (0-2)

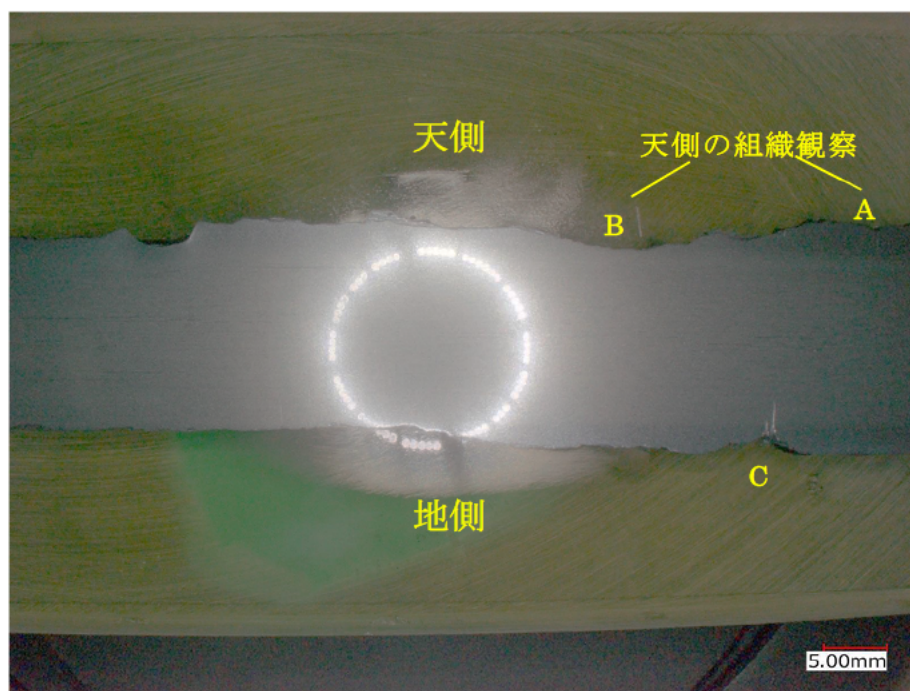


写真-2.2.40 断面観察の観察位置 (0-2)

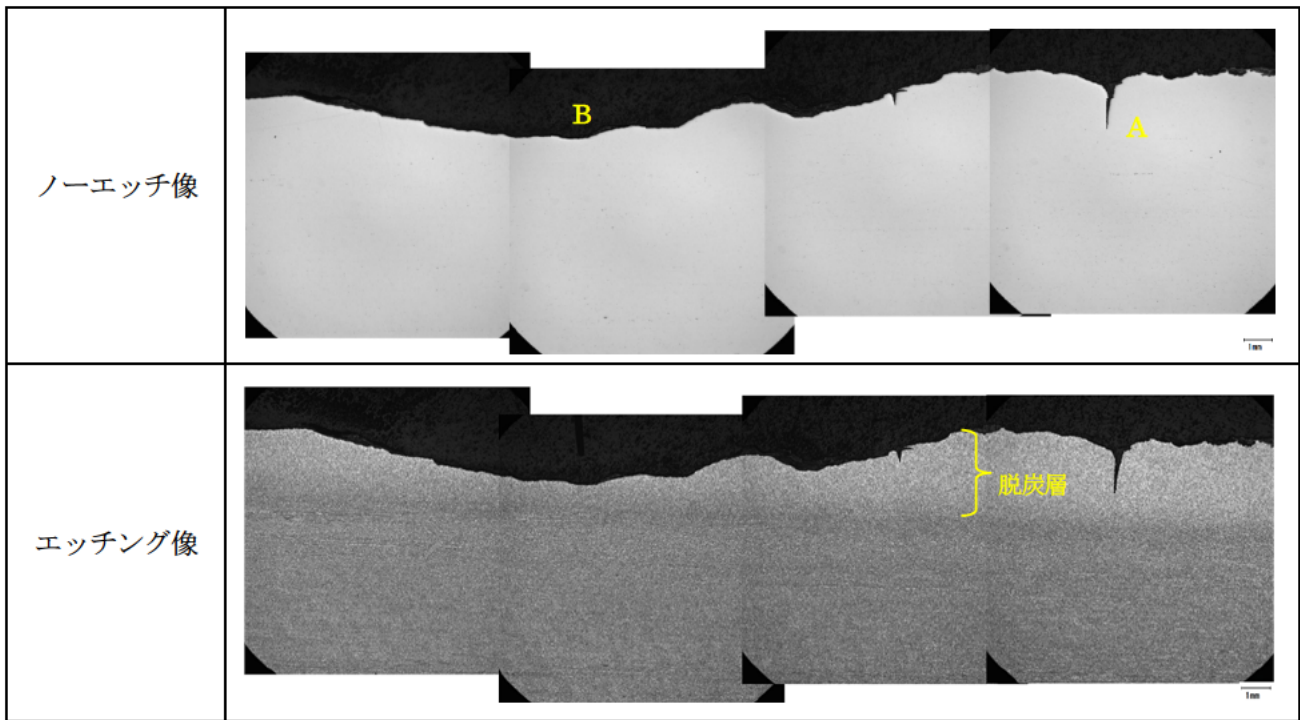


写真-2.2.41 断面観察結果（天側）(0-2)

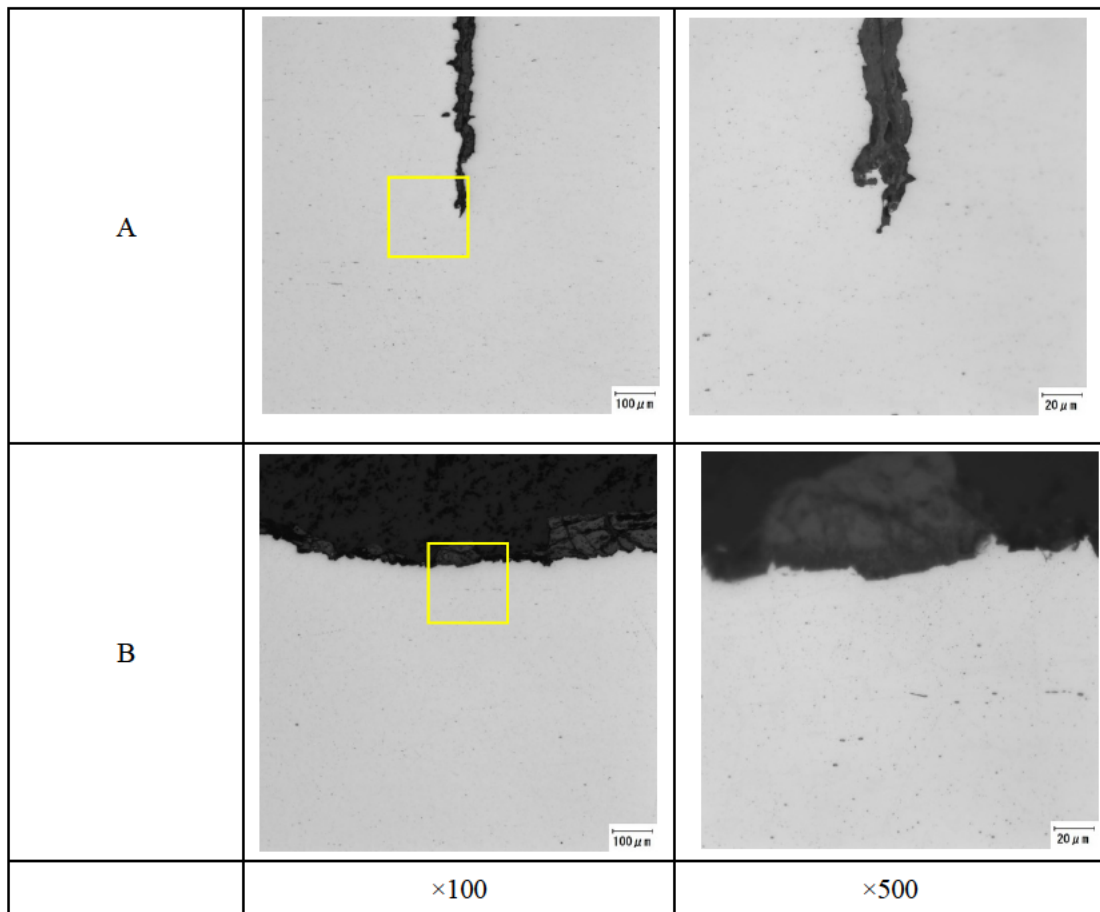


写真-2.2.42 断面観察結果（天側 ノーエッチ像）(0-2)

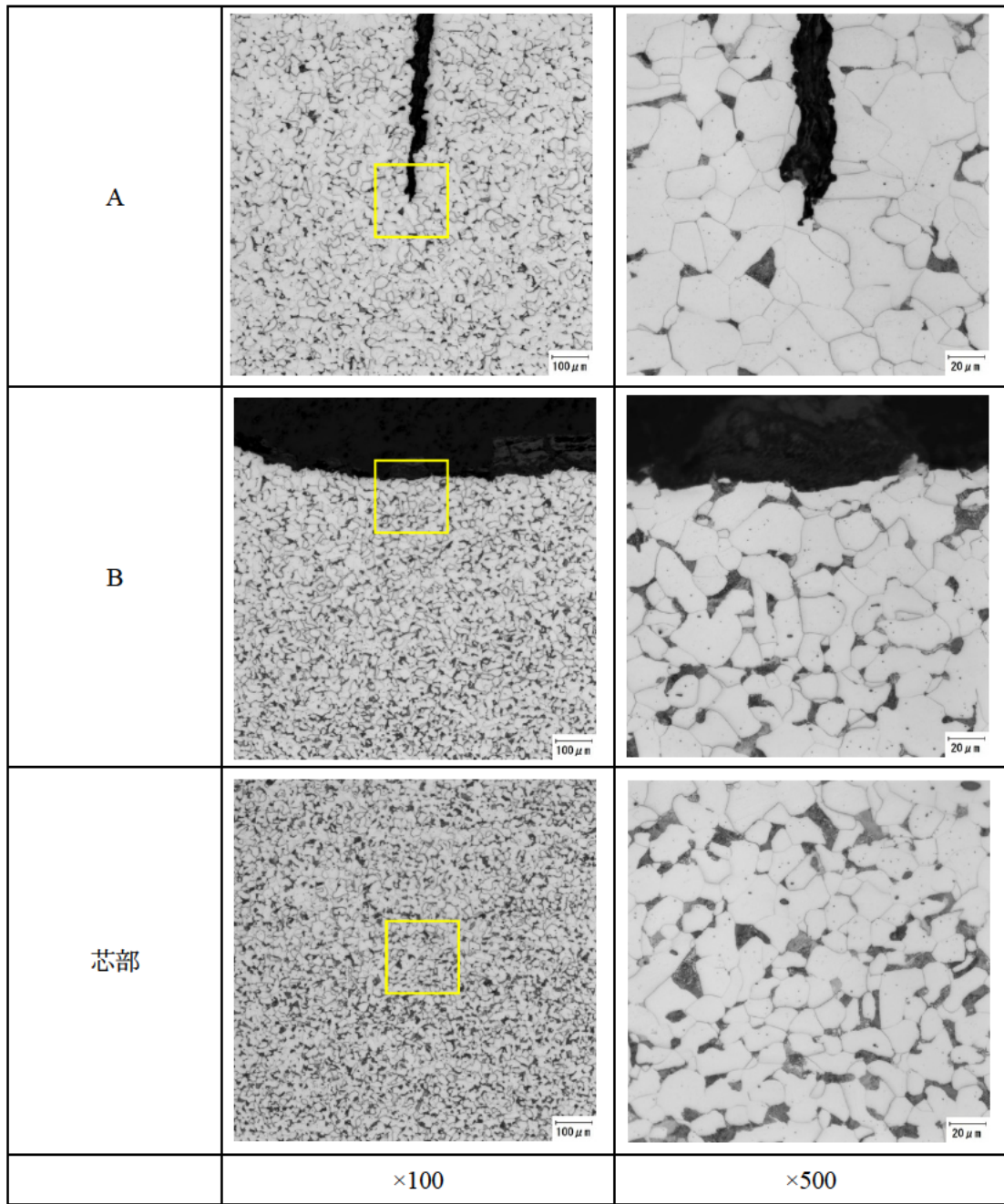


写真-2.2.43 断面観察結果（天側 エッチング像）(0-2)

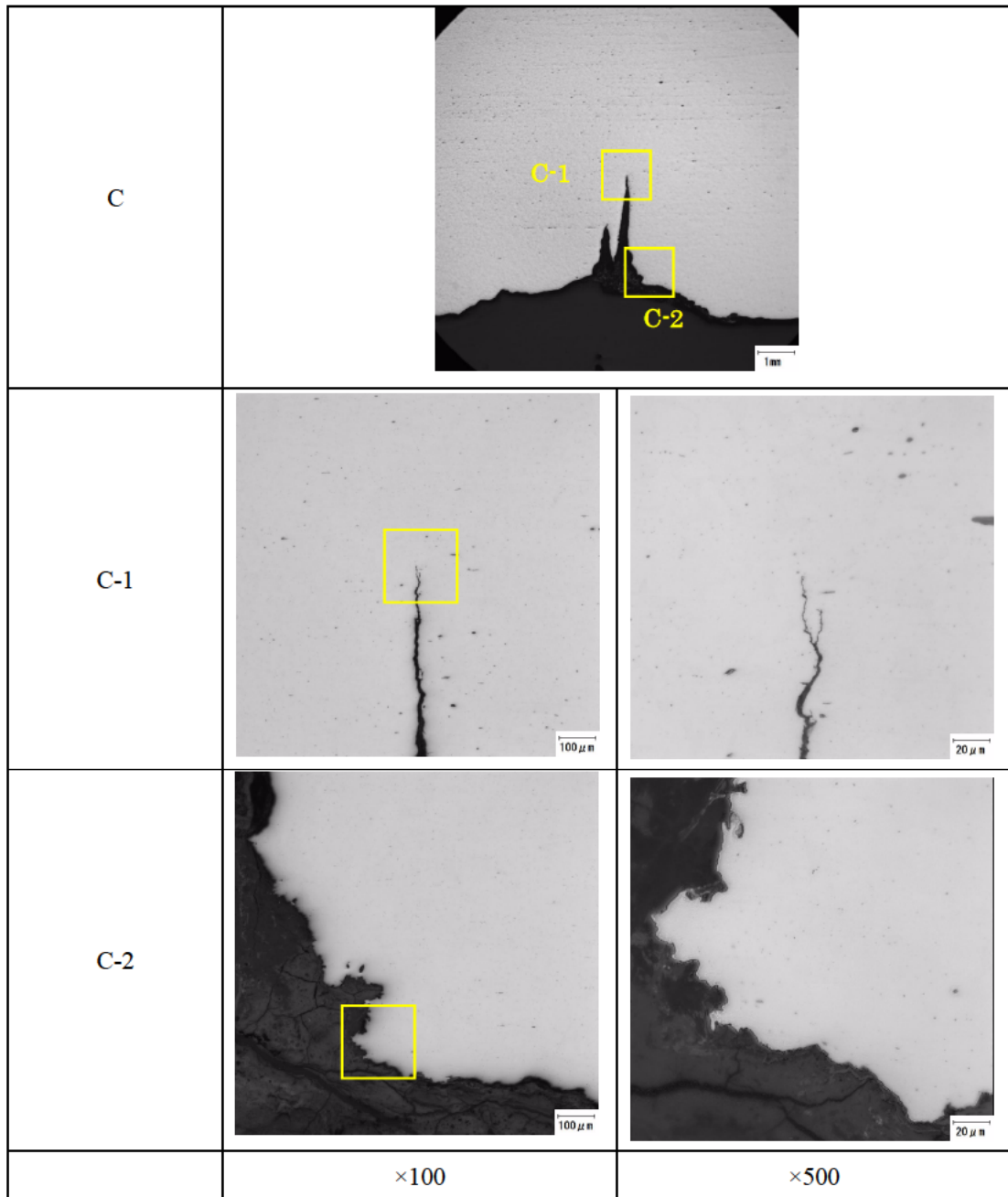


写真-2.2.44 断面観察結果（地側 ノーエッチ像）(0-2)

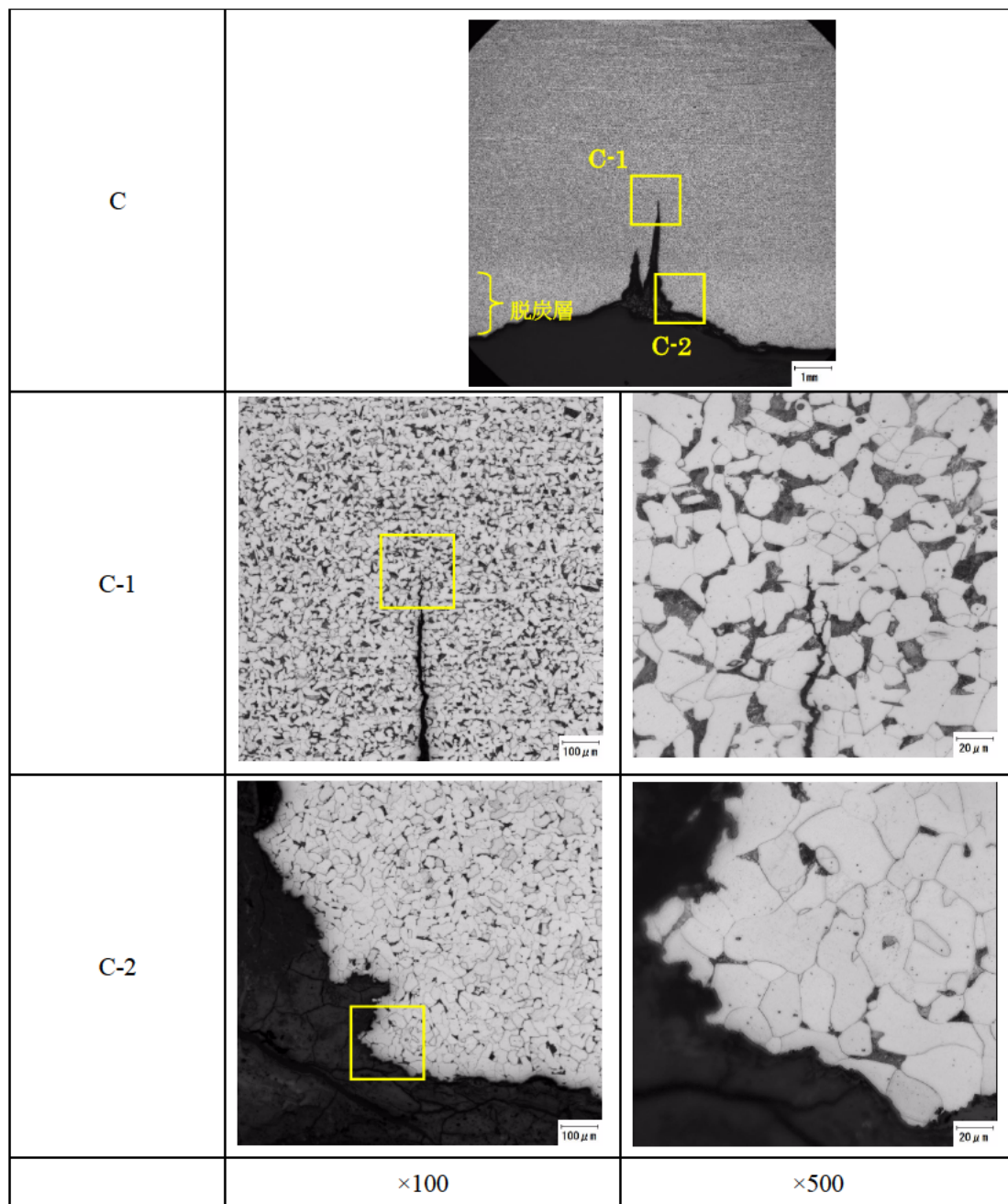


写真-2.2.45 断面観察結果（地側 エッチング像）(0-2)

減肉部の端部とその付近にき裂の様相が認められる。A 部のき裂の内部には腐食生成物が詰まっている。地側にも天側と同様のき裂が認められる。き裂は軸に垂直に進展しており、先端には枝分かれした様子が認められる。表層には深さ 2mm 程度の脱炭層（フェライト率の多い白色組織）が生成されている。素地はフェライト-パーライト組織である。表層と内部の組織を比較すると、フェライト粒径やパーライト組織の比率に差異が認められる。

O-2 の断面試料における EDX 分析位置を写真-2.2.46、分析結果を図-2.2.11～図-2.2.13 に示す。

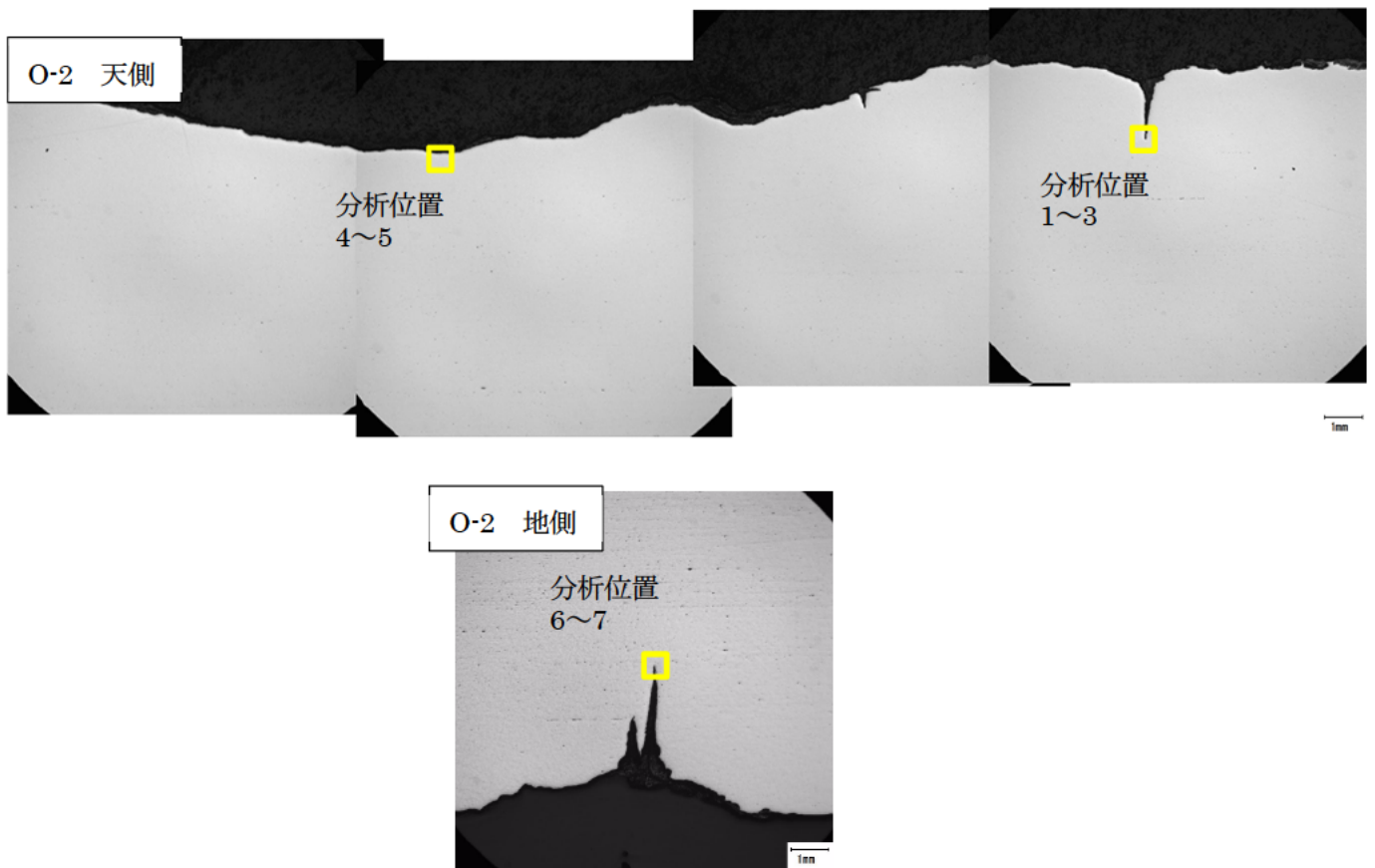


写真-2.2.46 EDX 分析位置 (O-2)

き裂の底部からは腐食性元素である S, Cl が検出されている。き裂内部の腐食生成物からは腐食性元素である S が検出されている。素地からは主成分である Fe が検出されている。また、C は蒸着物質に由来するものと考えられる。減肉部の腐食生成物からは腐食性元素である S が検出されている。地側から発生したき裂の先端領域からは腐食性元素である S が検出されている。き裂付近の介在物からは素材に由来する Fe のほか、Mn、S、Si、O などが検出されている。

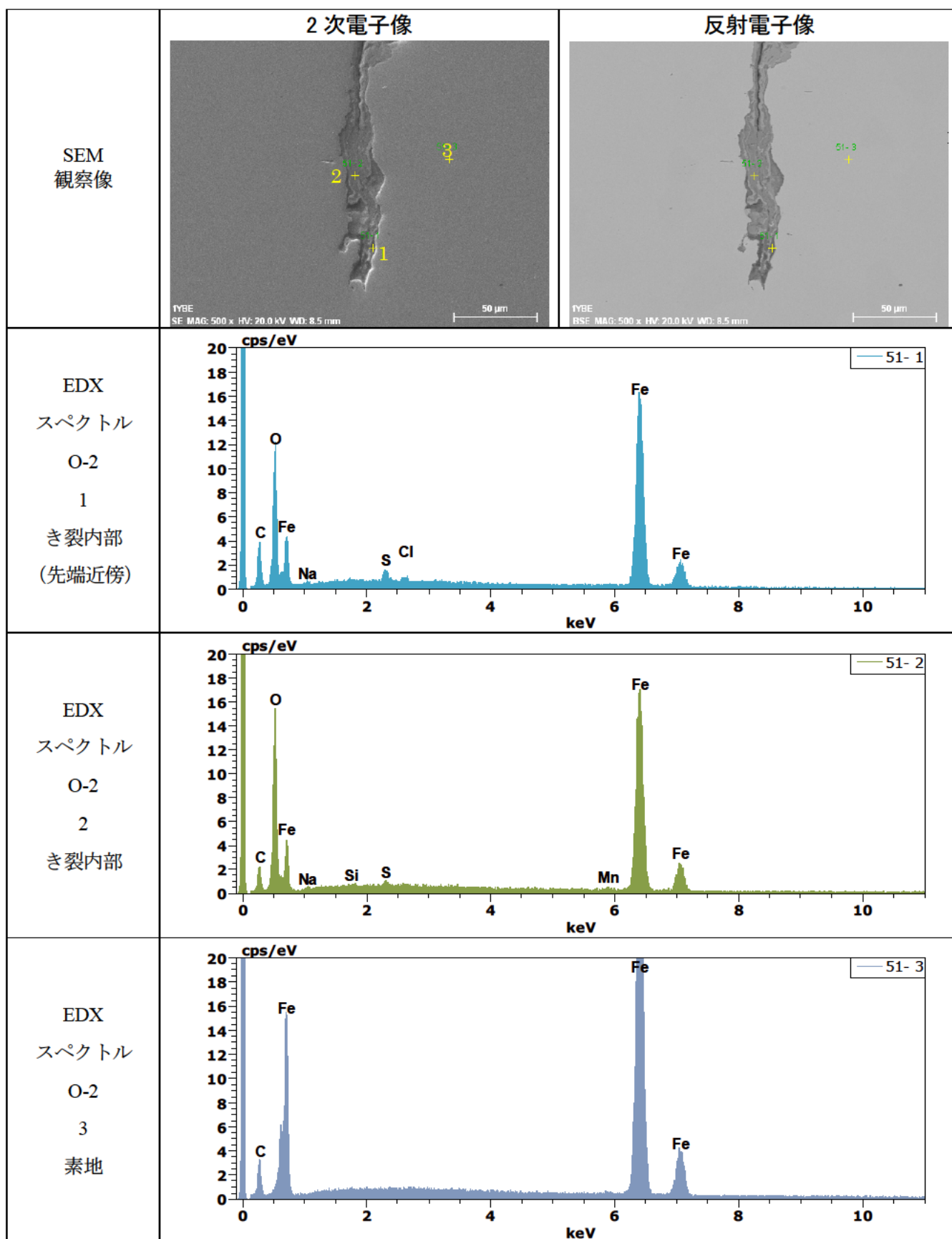


図-2.2.11 EDX 定性分析結果 (分析位置 1~3) (O-2)

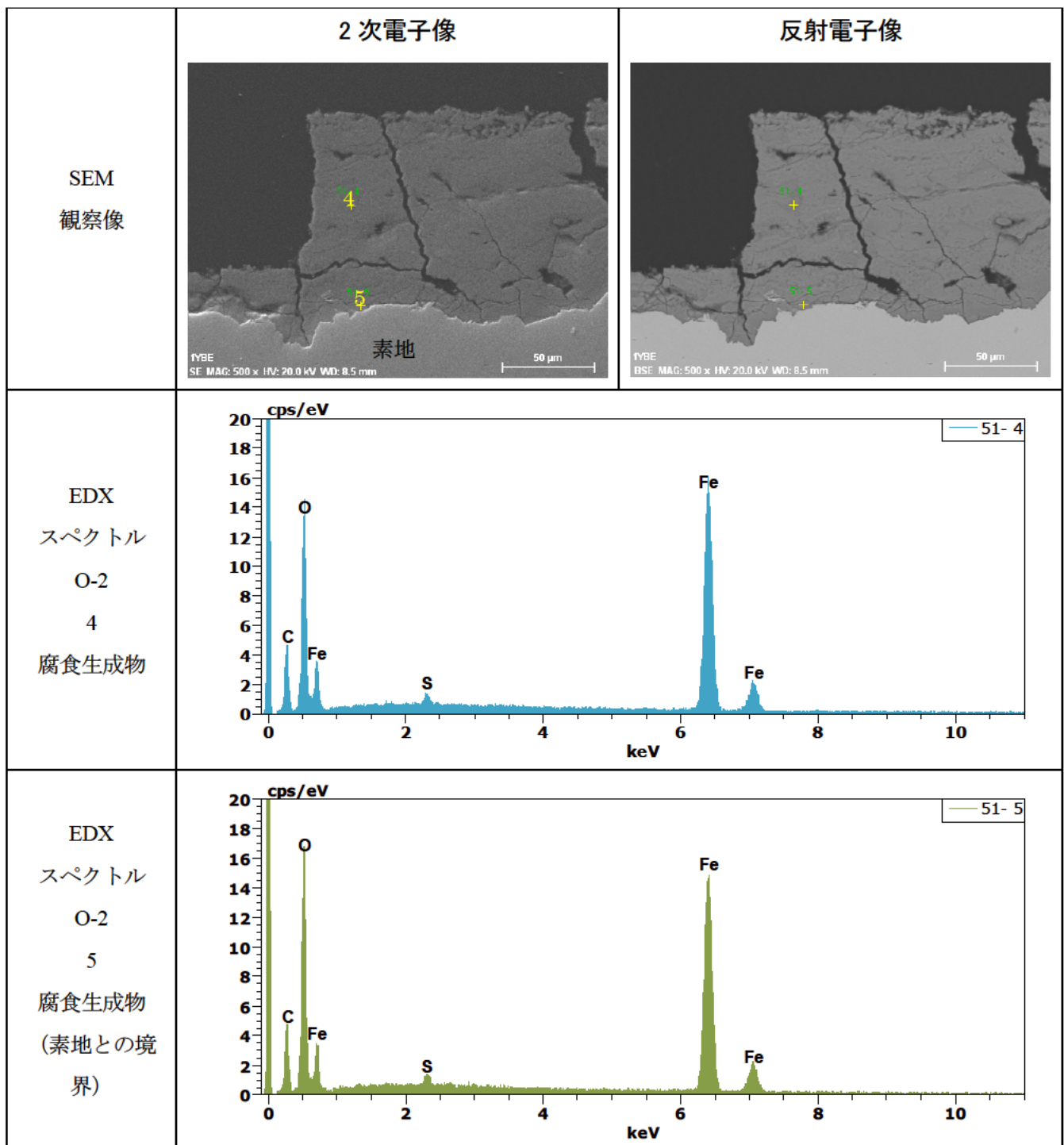


図-2.2.12 EDX 定性分析結果 (分析位置 4、5) (O-2)

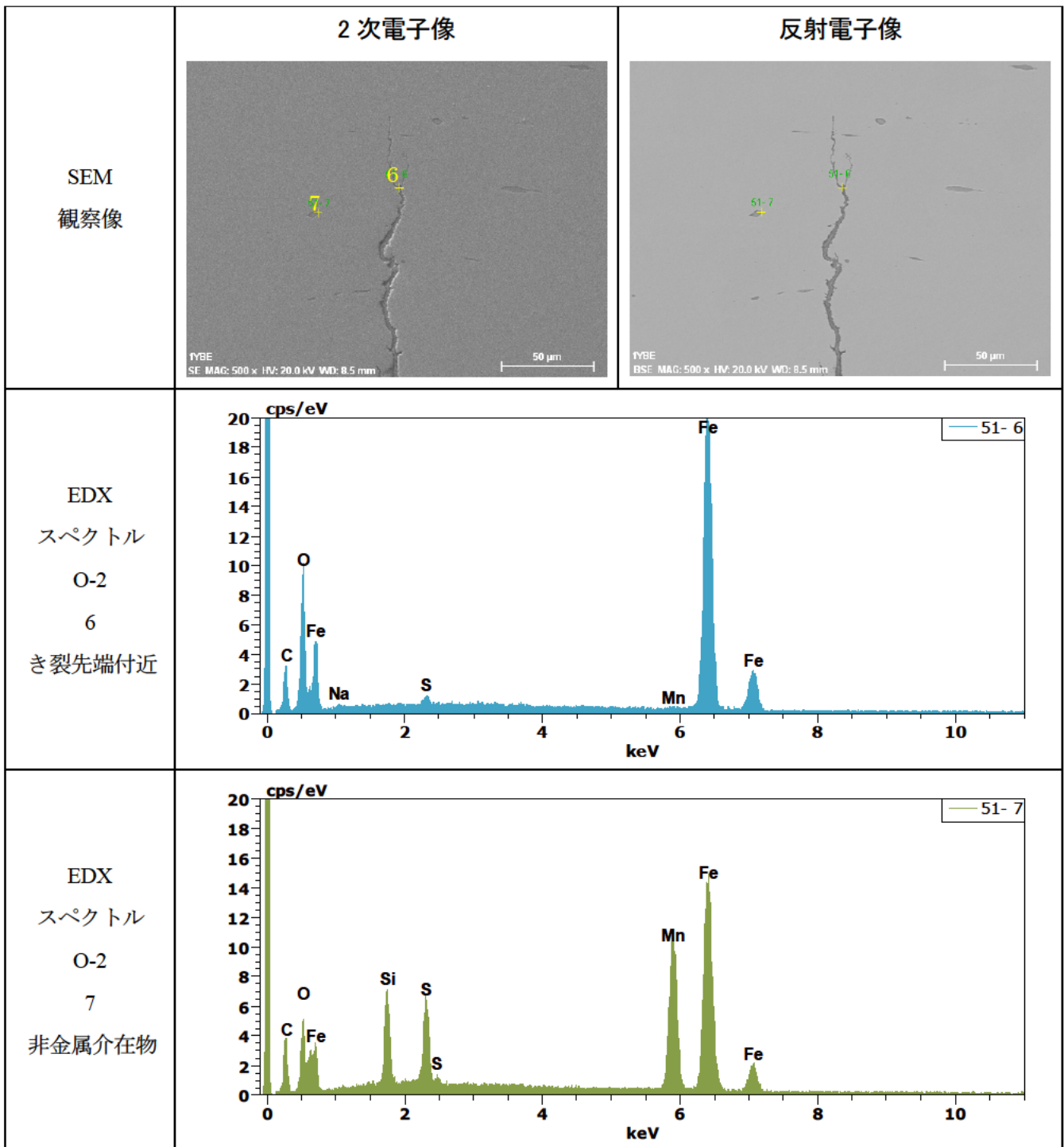


図-2. 2. 13 EDX 定性分析結果 (分析位置 6、7) (O-2)

④化学成分分析

O-1、O-2 の化学成分分析結果を表-2.2.11 に示す。

表-2.2.11 化学成分分析結果 (mass%)

試料名	C	Si	Mn	P	S
O-1	0.13	0.18	0.38	0.040	0.022
O-2	0.19	<0.01	0.40	0.041	0.047
SR235 SR295	—	—	—	0.050 以下	0.050 以下

試料名	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Sol-Al	N	B
O-1	0.40	0.31	0.25	0.06	0.004	<0.001	<0.001	<0.003	0.0110	0.0002
O-2	0.08	0.02	0.04	0.01	0.001	<0.001	<0.001	<0.003	0.0017	<0.0001

O-1、O-2 共に、SR235、SR295 の JIS 規格を満足していた。但し、O-1、O-2 では組成が異なる傾向を示した。

⑤ビッカース硬さ試験結果

O-1、O-2 のビッカース硬さ試験結果を表-2.2.12、図-2.2.14 に示す。

表-2.2.12 ビッカース硬さ試験結果

	測定位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O-1	硬度値	144	142	142	143	143	141	143	144	144	143
O-2	硬度値	89	92	111	115	113	121	118	121	121	118
	測定位置	11	12	13	14	15	16	17	18	平均値	引張強さ 換算値※ (MPa)
O-1	硬度値	144	143	144	144	144	142	142	143	143	460
O-2	硬度値	118	118	118	114	111	93	88	89	109	385 以下

※SAE J 417 換算表による

O-1 のビッカース硬さは 140Hv 近辺の値で表面から中心部まで均質な硬さの推移状況を示している。

O-2 のビッカース硬さは 90~120Hv 近辺までの値で推移し、O-1 より強度(硬さ)の低い材料と言える。本供試材には表層の顕著な軟化勾配が認められる。表層の硬さは中心部と比べると 30 ポイント以上の低下が認められる。

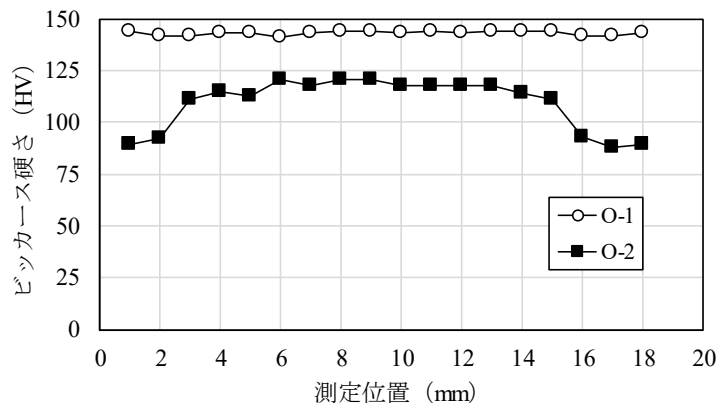


図-2.2.14 ビッカース硬さ分布図 (O-1、O-2)

⑥分析結果のまとめ、破断要因の推定及び考察

O-1、O-2 の分析結果のまとめを以下に記載する。

【O-1】

- ・外観上は全体的に腐食の様相を呈しているが、破断部周辺のみが顕著な減肉を生じた様子は認められなかった。
 - ・巨視的な破断部は丸みを帯びているが、破面は比較的平滑であり、軸に対しほぼ垂直に形成されていた。
 - ・微視的な破面形態は、腐食ピットと粒界破面の混在様相だが、一部に縞状の痕跡が認められた。
 - ・素地の代表組織はフェライトパーライトであり、破断部周辺の明らかな組織変化は認められなかった。
- また、破断部付近には腐食生成物の詰まったき裂が複数形成されていた。
- ・化学成分は SR235 と SR295 の JIS 規格を満足していたが、同目地内の O-2 とは組成が異なっていた。
 - ・硬さは 140Hv 近辺で表面から内部まで均質な推移状況を示していた。

【O-2】

- ・外観上は全体的に腐食しているが、天側に赤錆が集中した様子を示していた。
 - ・腐食の集中した範囲において、天側になだらかな曲げ変形を伴った様子を示していた。
 - ・減肉は目地部における広い範囲に認められた。また、減肉は特に天側に顕著であった。
 - ・天側の減肉部からは腐食性元素である S や Cl が検出された。
 - ・減肉部における端部には腐食生成物が詰まったき裂が複数認められた。
 - ・天側に認められたき裂の底部からは腐食性元素である S や Cl が検出された。
 - ・地側に認められたき裂の底部からは腐食性元素である S が検出された。
 - ・素地の代表組織はフェライトパーライト組織である。また、表層の組織は内部に比べて白く変化している。
- ・化学成分は SR235 と SR295 の JIS 規格を満足していたが、同目地内の O-1 とは組成が異なっていた。
- ・断面硬さは 90～120Hv の値で推移しており、O-1 より強度（硬さ）の低い材料といえる。また、表層と内部の硬度差があり、表層の硬さは内部と比較すると 30 ポイント以上の低下が認められた。

以上の分析結果を基に、O-1 に関しては破断要因の推定、O-2 に関しては未破断であった要因について考察した。

【O-1 の破断要因の推定】

破断部の特徴から、本供試材は孔食を起点とした繰返しの両振り曲げにより疲労破壊が発生・進展し、最終的に破断に至ったと考えられる。破壊の起点は、表面に同様のき裂様相が認められた 45° 位置と思われ、繰返し負荷の方向についても同様の角度であったと推察される。

【O-2 の特徴と O-1 との比較】

腐食が特に天側において顕著なため、天側が強い腐食環境下におかれていたものと考えられる。また、減

肉部近傍の複数箇所にき裂の様相が認められ、き裂内部の腐食生成物から腐食性元素である S や Cl が検出されたことから、これらの成分を由来とした腐食性イオンが破壊に関与していたと考えられる。また、き裂は天地を問わず形成されていることから、当該位置には両振りの曲げ応力が作用しており、今後の継続使用で破断に至っていた可能性が示唆される。表層には製造工程で発生していたと思われる脱炭層が生成しており、疲労強度が低下していたと考えられる。

O-1 と比較すると、O-2 は化学組成、金属組織、強度などの特性が異なる製品であった。相対的に強度の高い（＝疲労強度の高い）O-1 が早期破断に至ったことは、使用中における腐食環境や負荷応力などの外的要因に関する条件の差異があったためと考えられる。

(7) 調査結果のまとめ

1) 現地調査による損傷状態の推定

調査結果から、舗装版の損傷状態を推定した結果を図-2.2.15に示す。

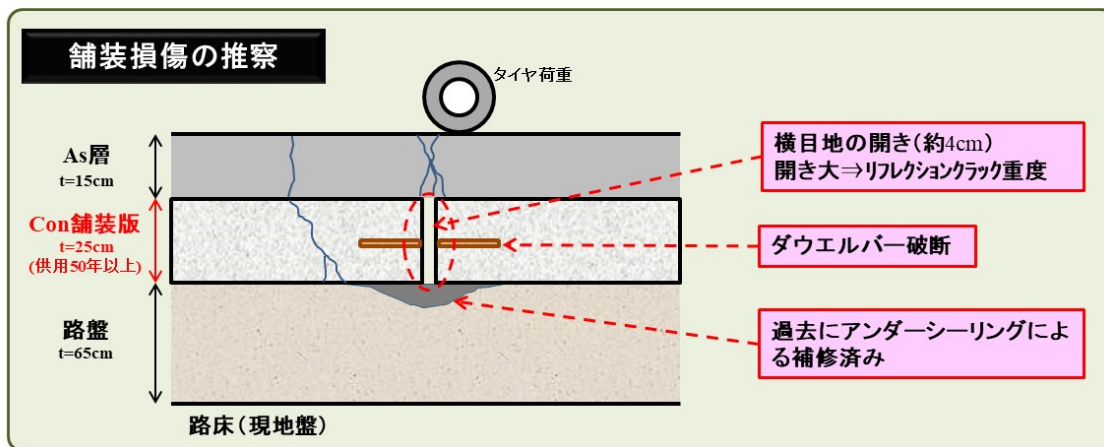


図-2.2.15 損傷状態の推定結果

過去に実施されたアンダーシーリングによりコンクリート版下に空洞はないものの、ダウエルバーの破断により荷重伝達性能は発揮されず、また横目地が開き、開きが大きい箇所では重度のリフレクションクラックが発生し、振動の発生に繋がった、と推察できる。

2) コンクリート材料分析結果のまとめ

コンクリート舗装版から切出したコンクリートの材料分析を実施した結果、以下のことがわかった。

- ・曲げ強度試験の結果、設計基準強度である 4.5kN/mm^2 を満たし、十分な曲げ強度性能を有していると判断できる。また、圧縮強度試験、静弾性係数試験の結果から、若干静弾性係数が高い傾向を示したものの、良好な強度性能を示した。
- ・ダウエルバーに対する腐食環境性を把握するため、コンクリートの中性化深さ、塩化物含有量を測定した結果、中性化深さ、塩化物含有量ともに低く、コンクリート中のダウエルバーに対する腐食環境性は極めて低い結果であった。
- ・供用によりコンクリート舗装版としては構造的損傷が確認されたが、供用55年を経てもコンクリート材料としては非常に良好な材料性能を示した。

3) ダウエルバー分析のまとめ

ダウエルバーを分析した結果、組織は全体的にフェライト+パーライト組織を呈しており、化学成分も鉄筋コンクリート用棒鋼の材質として一般的であると考えられる。

「f-1」では、破断部に変形が認められなかったことから疲労による破壊の可能性、「O-1」では破断部の特徴から孔食を起点とした両振り曲げによる疲労による破壊と推定された。

また、「O-1」と同一目地内のダウエルバー「O-2」は、未破断であったものの減肉部近傍の複数箇所でき

裂の様相が認められ、き裂は天地を問わず形成されていたことから、今後の継続使用で破断に至っていた可能性が示唆される。

2.2.3 考察

(1) 調査結果を踏まえた補修方針

本国道は、過去の補修としてアンダーシーリングが実施されていたものの、ダウエルバーの破断により荷重伝達性能が低下し、大型車両通行に伴い、振動の発生に繋がった、と判断した。一方で、コンクリートは緻密な硬化体を形成し、供用 55 年を経ても、所定の性能を満たし、良好であったことから、既存のコンクリート版を可能な限り活用し、目地部の荷重伝達性能を回復することで、ライフサイクルコストを抑えることが可能と考えられる。

したがって、後述の「5. 既往の維持修繕工法の改善に関する検討」にて詳細は記述するが、ライフサイクルコストを低減させ、コンクリート舗装の特徴を最大限活かせるように、既存のコンクリート版を可能な限り活用するよう補修を実施した。

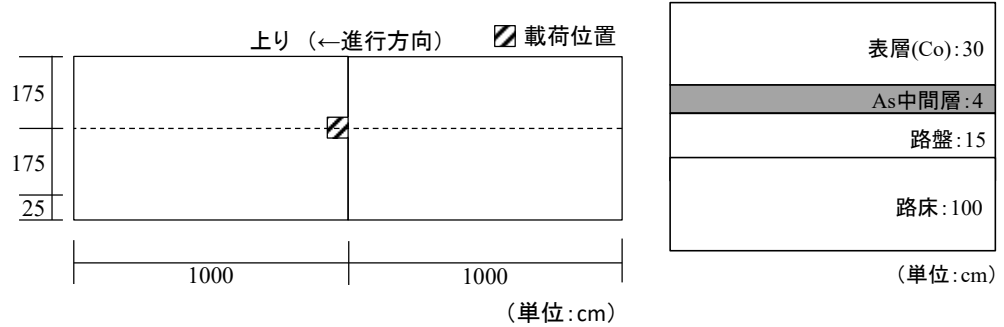
(2) 有限要素法を用いた目地部評価方法に関する検討

ダウエルバーが破断しているにも関わらず、FWDにより算出した荷重伝達率は65%を超え、既存の評価フローでは誤った診断をする可能性があることが判明した。そこで、ここでは、有限要素法(以下、FEM)を用いて、様々な状態のコンクリート舗装に対してFWDによる荷重を実施した際に生じるたわみ量を計算し、荷重伝達率や D_0 たわみ量がどのように変化するかに着目して分析を行うことで、従来の評価方法が妥当であるか検証した。

1) 計算条件

図-2.2.16にFEMの計算に使用したコンクリート舗装版のモデル、表-2.2.13に設定条件を示す。各層の厚さは実際に供用されているコンクリート舗装の断面構成を適用した。また、載荷荷重は98kNとした。

このモデルに対し、表-2.2.14に示すような条件で計算をおこなった。図-2.2.17に示すように、コンクリート版の弾性係数を変化させる範囲は載荷側の350mmの区間とし、空洞は目地を起点とし、載荷側へ進行するものとした。



(a) コンクリート版の形状と載荷位置

(b) 舗装断面

図-2.2.16 コンクリート舗装モデル

表-2.2.13 モデルの基本条件

項目		入力値など
コンクリートの弾性係数(MN/m ²)		35,000
As 中間層の弾性係数(MN/m ²)		5,000
路盤の弾性係数(MN/m ²)		300
路床の弾性係数(MN/m ²)		120
ダウエルバー	直径(cm)	2.5
	長さ(cm)	70
	間隔(mm)	(150)+200+300+8@400+300+200+(150)

表-2.2.14 計算パターン

項目	パラメータ	
	初期値	変化させる値
横断目地付近のコンクリートの弾性係数 (MN/m ²)	35,000	20,000, 5,000
路床の弾性係数 (MN/m ²)	120	60, 240
ダウエルバーの有無	有	無
空洞の範囲 (cm)	0	5, 20, 35

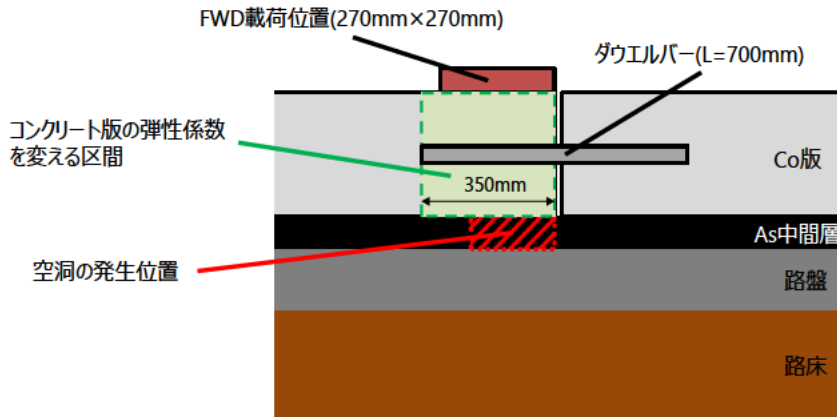


図-2.2.17 パラメータを変化させる範囲

2) 計算結果

目地部近傍のコンクリート版の弾性係数が変化した場合の計算結果を図-2.2.18に示す。荷重側のコンクリート版の目地部近傍が疲労して弾性係数が低下すると、 D_0 たわみ量が増加し、荷重伝達率が低下する傾向にあることが分かる。

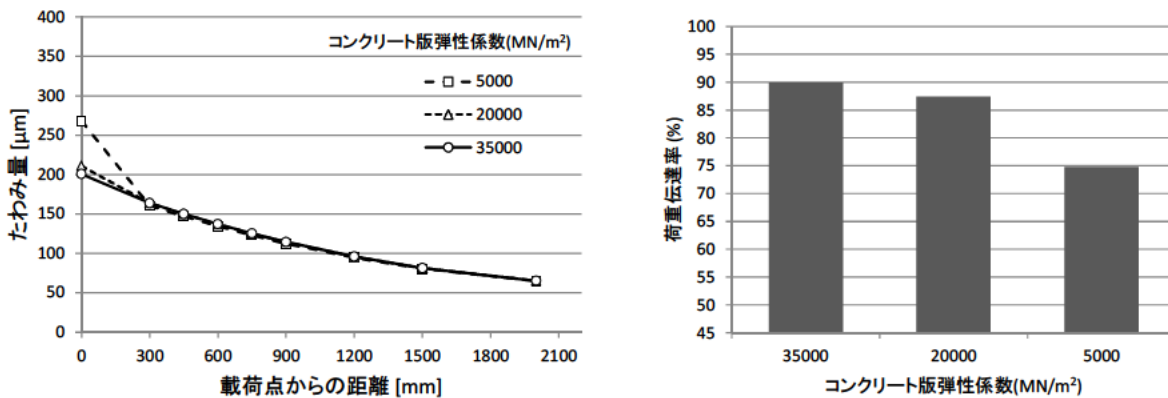


図-2.2.18 計算結果(コンクリート版弾性係数、ダウエルバー有)

路床の弾性係数が変化した場合の計算結果を図-2.2.19に示す。路床の弾性係数が低い場合は D_0 から D_{2000} までの全てのたわみ量が大きくなり、荷重伝達率は高くなる事が分かる。

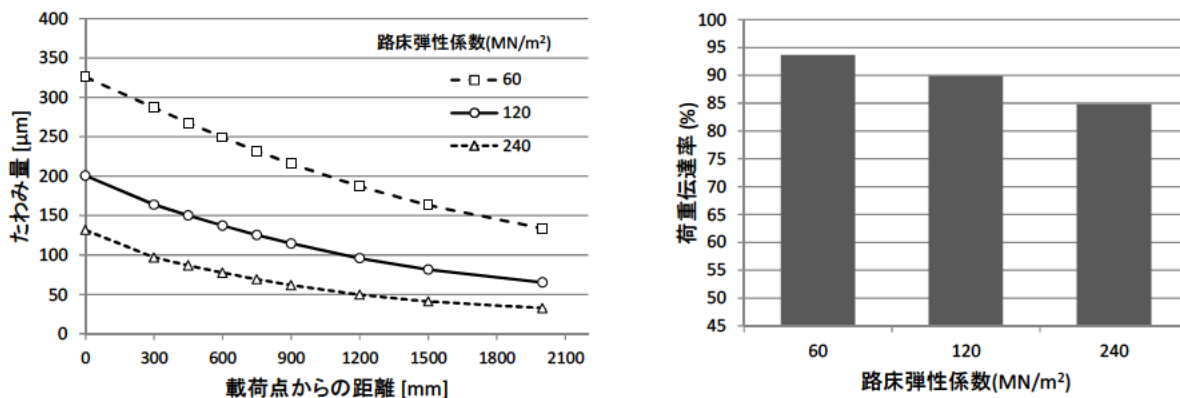


図-2.2.19 計算結果(路床弾性係数、ダウエルバー有)

ダウエルバーがあり、空洞がある場合の計算結果を図-2.2.20、ダウエルバーがなく、空洞がある場合の計算結果を図-2.2.21に示す。図-2.2.20より、ダウエルバーが有る場合は、空洞の大きさに関わらず、たわみ量や荷重伝達率には大きな変化がないことが分かる。一方で、図-2.2.21をみると、ダウエルバーが無い場合には、空洞の大きさが大きいほど D_0 たわみ量が大きくなり、荷重伝達率が低下することが分かる。また、ダウエルバーがない図-2.2.21では、空洞が存在しない場合においても、図-2.2.20に比べ荷重伝達率は大きく低下していることが分かる。

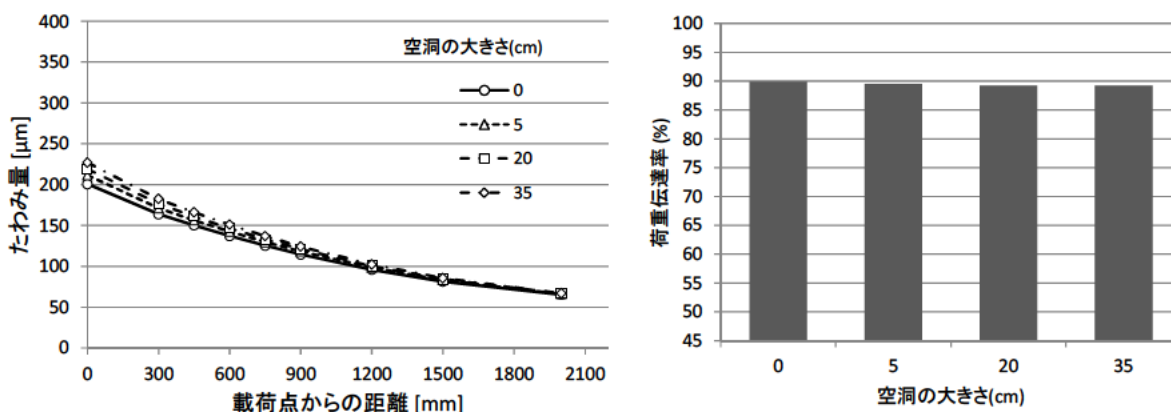


図-2.2.20 計算結果(空洞の大きさ、ダウエルバー有)

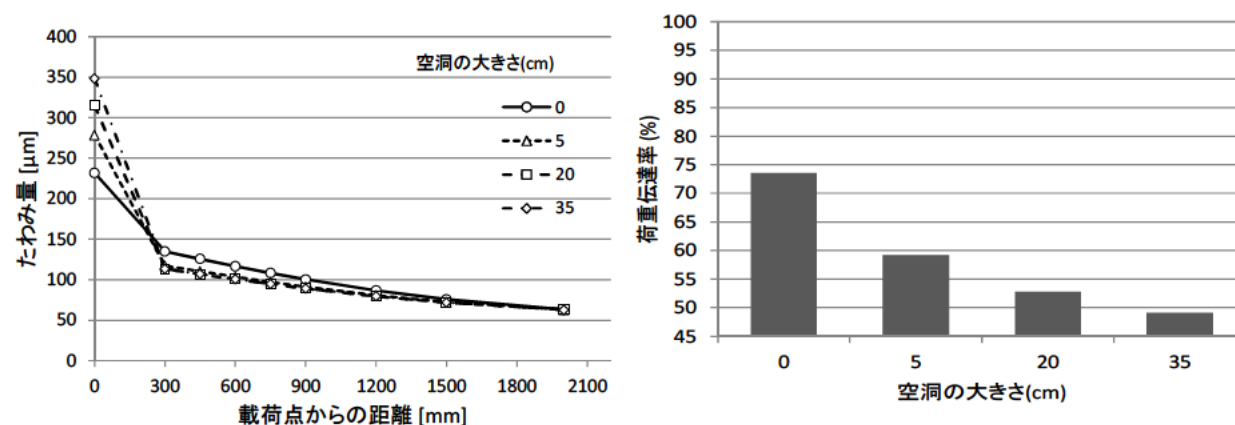


図-2.2.21 計算結果(空洞の大きさ、ダウエルバー無)

続いて、路床の弾性係数が荷重伝達率に与える影響を確認するため、ダウエルバーがないケースで、 60MN/m^2 から 240MN/m^2 まで 5MN/m^2 間隔で路床弾性係数を変化させた際のたわみ量を計算した結果を図-2.2.22に示す。

計算結果から、路床弾性係数

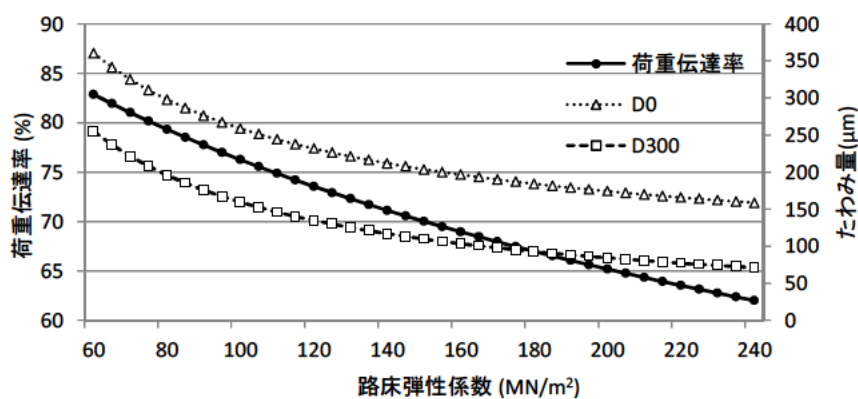


図-2.2.22 路床弾性係数と荷重伝達率(ダウエルバー無)

が大きくなるほど荷重伝達率は低下する傾向にあること、弾性係数が小さい場合には、ダウエルバーがないにも関わらず、荷重伝達率が大きくなってしまふことが分かる。これは、路床の弾性係数が低い場合に D_0 たわみ量と D_{300} たわみ量がともに大きくなり、相対的な比率である荷重伝達率 E_{ff} が小さくなるためと考えられる。特に、路床弾性係数が 200MN/m^2 以下の場合には荷重伝達率が 65% を超えるため、従来の評価手法では荷重伝達性能が十分にあると判断されてしまふ可能性があると考えられる。

3) まとめ

以上より、FEM による計算結果をまとめると、以下のようなことがいえる。

- ・ダウエルバーの有る場合と無い場合では荷重伝達率に明確な差がみられるが、ダウエルバーの有無にかかわらず、コンクリート版や路床の支持力によって荷重伝達率は変化する。したがって、荷重伝達率によって荷重伝達機能の有無を評価できないケースがある。
- ・ダウエルバーが存在する場合、例え空洞があってもたわみ量に大きな変化はない。そのため、単純に D_0 たわみ量のみで空洞の有無を評価できないケースがある。

参考文献

- 1) 社団法人セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，1967年9月
- 2) 国立研究開発法人土木研究所ほか：骨材資源を有効活用した舗装用コンクリートの耐久性確保に関する共同研究報告書—各種骨材の舗装コンクリートへの適用性(3)舗装コンクリートの施工性、走行安全性および耐久性試験—，共同研究報告書第477号，p112，2016年1月
- 3) 社団法人セメント協会：舗装技術専門委員会報告 R-28 一般国道49号（津川町栄山地区）コンクリート舗装調査結果—既設版の調査結果および修繕後のコンクリート版の供用10年調査結果—，2011年4月
- 4) 公益社団法人日本道路協会：コンクリート舗装ガイドブック2016，平成28年3月

3. コンクリート舗装の非破壊診断手法に関する検討

本章では、非破壊によるコンクリート舗装の目地部と版下の健全性を診断する手法について検討した。

「2. 供用中のコンクリート舗装の調査」の結果より、普通コンクリート舗装では目地部から劣化が進行しやすい傾向にあることを再確認した。コンクリート舗装の目地部は、浸水による目地金物の破断が原因で荷重伝達性能が低下する等、構造上の弱点になると考えられており、目地部の状態を評価する手法を確立することは喫緊の課題であるといえる。また、「舗装点検要領」¹⁾においても、コンクリート舗装の管理においては、コンクリート舗装の破壊メカニズムから目地部の管理の重要性が指摘されている。このような背景のもと、コンクリート舗装の目地部における健全性診断手法及び、コンクリート舗装の健全性に大きく影響を与える舗装版下の健全性診断方法として以下に示す4項目について検討した。

「3.1 コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発」

3次元有限要素法（以下「3DFEM」という。）に基づいた構造モデルによって、FWD たわみから目地部の劣化過程を推定する診断方法を検討した。

「3.2 目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討」

将来的には非破壊調査により目地部の健全性を評価することを目標に、ダウエルバー健全性の評価方法について基礎的検討を実施した。

RC、PC 構造物中の鋼材の評価に適用されている既存の非破壊検査技術を調査し、適用の可能性のある非破壊調査技術を用いて、コンクリート舗装中の目地部のダウエルバーの健全性（破断の有無）の評価及び適用性について基礎的検討を行った。

「3.3 MMS を用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討」

交通規制を要せずに効率的かつ、より精緻に段差を定量的に評価できる可能性のある技術の1つとして、MMS（Mobile Mapping System）に着目し、既存調査方法である路面プロファイラとMMSから算出した段差の比較を行い、測定精度の確認を行った。

「3.4 動的時間伸縮法（Dynamic Time Warping）を用いた国道におけるコンクリート健全性評価」

コンクリート舗装版下の健全性を評価するため、FWDにより測定したD₀たわみ曲線を用い、動的時間伸縮法（Dynamic Time Warping：以下DTW）を用いコンクリート舗装版下の空洞検出について実道での適用性について検討した。

「3.5 コンクリート舗装の非破壊検査手法と課題」では、「3.1」～「3.4」で検討した非破壊検査断手法について、今後コンクリート舗装の診断に適用するための課題を抽出した。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：舗装点検要領，平成28年10月

3.1 コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発

3.1.1 はじめに

コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べ、温度変化や荷重作用に対する抵抗力が高く耐久性に優れており、ライフサイクルコストの観点から有利であると考えられているが、国内における普及率は高くない¹⁾。その要因の1つとして、供用中のコンクリート舗装に対して、構造的な健全性を定量的に評価する手法が明確に定まっておらず、維持管理が困難であることがあげられる。特に、コンクリート舗装の目地部は、浸水による目地金物の破断などが原因で荷重伝達性能が低下するなど、構造上の弱点になると考えられており²⁾、目地部の状態を評価する手法を確立することは喫緊の課題である。

わが国のコンクリート舗装の横目地の基本的な構造を図-3.1.1に示す³⁾。目地の荷重伝達能力を高めるために、コンクリート版の厚さ半分の位置に直径25mm長さ700mmの鋼棒を挿入する。鋼棒は中央部分に防食用のペイントを施し、半分はコンクリートとの付着をなくすためにアスファルトを塗布している。鋼棒は特殊なチェアで支えられている。コンクリート版打設後適切な時期に表面からコンクリート版の厚さの1/3程度の深さにカッティングし、ひび割れを誘導する。カットされた溝にはシールをして路面からの水の浸入を防ぐ。

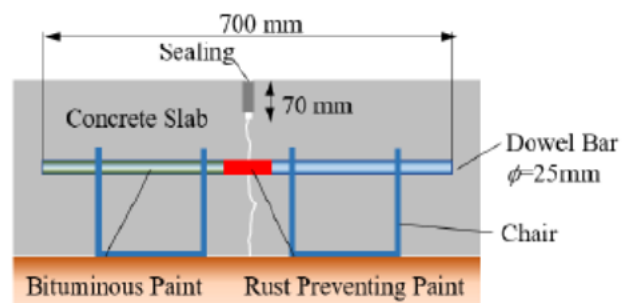


図-3.1.1 コンクリート舗装横目地の構造³⁾

目地部の健全度を非破壊で評価する方法としては、FWD (Falling Weight Deflectometer)によって計測されたたわみを用いるのが一般的である。この測定では、図-3.1.2に示すように、目地を挟んでセンサーを配置したわみを計測する。荷重中心からそれぞれのセンサー位置までの距離をd(mm)としたとき、そのセンサーによって計測されたたわみ量を D_d と表わす。目地を挟んでのたわみの差が大きいほど、荷重伝達能力が低いと判断される⁴⁾。

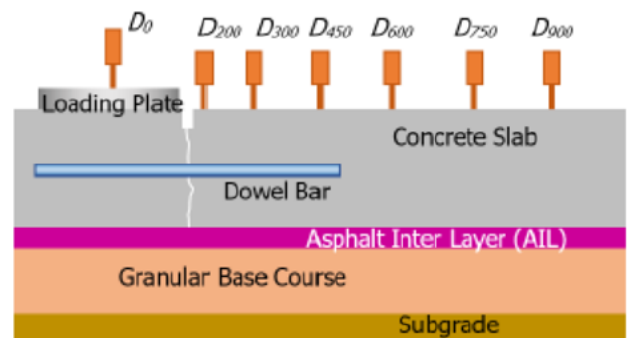


図-3.1.2 FWDによる目地部のたわみ測定⁴⁾

目地部評価方法の具体的な例として現在広く用いられているフローを図-3.1.3に示す。このフローでは、FWDによる49kN 載荷時の荷重直下のたわみ量 D_0 から目地直下の空洞の有無を判定するとともに、98kN 載荷時の D_0 および D_{300} から荷重伝達率 E_f を式) 3.1.1で算出し、目地部の健全性評価を行っている。

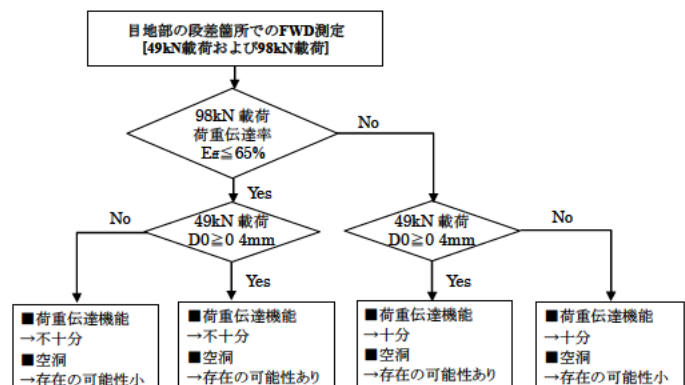


図-3.1.3 FWDによる目地部のたわみ計測

$$E_{ff} = \frac{D_{300}}{(D_0 + D_{300})/2} \times 100(\%) \quad \cdots\text{式) 3.1.1}$$

しかしながら、このフローにおける判定値は現場における少ないケースのデータを元に経験的に定められたものであり、理論的な検証が十分に行われていない。本研究では、3次元有限要素法(3DFEM)を用いたコンクリート舗装目地部の構造モデルによる逆解析によって、目地部の健全度を評価する方法を開発した。この逆解析では、目地部の劣化過程をいくつかの段階に単純化した構造モデルを用いる。このような劣化構造モデルを用いて、コンクリート版、アスファルト中間層、路盤、路床の弾性係数を乱数にて発生させ、これら弾性係数の組合せごとに FWD たわみに相当するたわみを計算する。計算 FWD たわみと測定された FWD たわみに一致する弾性係数の組合せを求めるという単純な逆解析法を用いる。

この方法によれば目地部各層の弾性係数ばかりでなく、どの段階の劣化過程にあるかを判定するので、その補修方法を決定するための重要な情報を得ることができる。本論文では、このような考え方に基づいた逆解析法の具体的な手順を示し、15年にわたって供用された平泉バイパスのコンクリート舗装の FWD 調査結果を用いて、本手法の妥当性を検証する。

3.1.2 平泉コンクリート舗装の FWD 測定

(1) 舗装構造

本研究の対象として FWD 測定を経年に行った舗装は、岩手県西磐井郡平泉町平泉地内一般国道 4 号平泉バイパス (全長 2020m) のコンクリート舗装である。この舗装の設計条件は路床の設計 CBR が 12%、交通区分は N7 交通である。舗装構成はコンクリート版 30cm、中間層(再生密粒) 4cm、路盤(RC-40) 15cm である。横目地間隔は 10m、長さ 700mm、直径 25mm のダウエルバーが 400mm 間隔で配置されている。1999 年に施工され、2000 年から供用を開始し、その後継続的な供用性調査が行われている⁵⁾。FWD 調査は、施工直後の 1999 年、2008 年および 2015 年に実施された。

(2) FWD 測定方法

FWD 測定におけるセンサー配置は図-3.1.2 と同様であり、荷重は 98kN とした。1999 年の測定は、FWD 試験方法を確立するための基礎的データを集めるために行ったもので、50 か所の目地部で FWD たわみを計測した⁶⁾。2008 年の測定は 141 か所で、2015 年では 2020m の区間すべての 207 か所の目地部で測定を行った。すべての計測において、KUAB 社製の複重錘式载荷装置を搭載した FWD が使用され、測定は昼間に行われた。それぞれの測定における時期及び温度を表-3.1.1 にまとめた。2008 年の測定時の気温および路面温度が他の年よりもやや高い。

表-3.1.1 FWD 測定概要

	1999	2008	2015
測定数	50	141	207
測定月	6	10	11
平均気温 (°C)	6.5	16.9	6.1
平均路面温度 (°C)	7.2	14.8	7.5

(3) 測定結果

3 回の測定において共通して測定した 50 測点の D_0 および E_{ff} の変化を図-3.1.4 に示す。1999 年測定では、多くの測点において D_0 は小さく、 E_{ff} は高い。2008 年測定では、 D_0 はあまり変化がないが、 E_{ff} はやや低くな

っている。2015年測定では、 D_0 が全体的に増加し E_{ff} は減少して 65%を下回る測点が表れている。そのような測点であっても、49kN 荷重で 0.4mm、あるいは 98kN で 0.8mm を上回るような大きな D_0 は生じていない。したがって、図-3.1.3によれば、この区間において荷重伝達機能は不十分であるが空洞は存在しないと判定される。2015年における調査においては、目地に大きな段差は生じておらず、路面および路肩に路盤エロージョンによる細粒分の流出はなかった。

それぞれの測定時の全測点に対する D_0 と E_{ff} の統計量を表-3.1.2にまとめた。 D_0 は全体的に増加しており、 E_{ff} は減少していることが分かる。当然のことながら、両者の標準偏差は供用前の1999年が最も小さい。供用年数が経過するほど E_{ff} の標準偏差は増加し、最大値と最小値の幅も拡大している。2015年では全部の横目地を調査したが、その場合でも最大たわみは 0.41mm であり、空洞は存在しないと判定される。

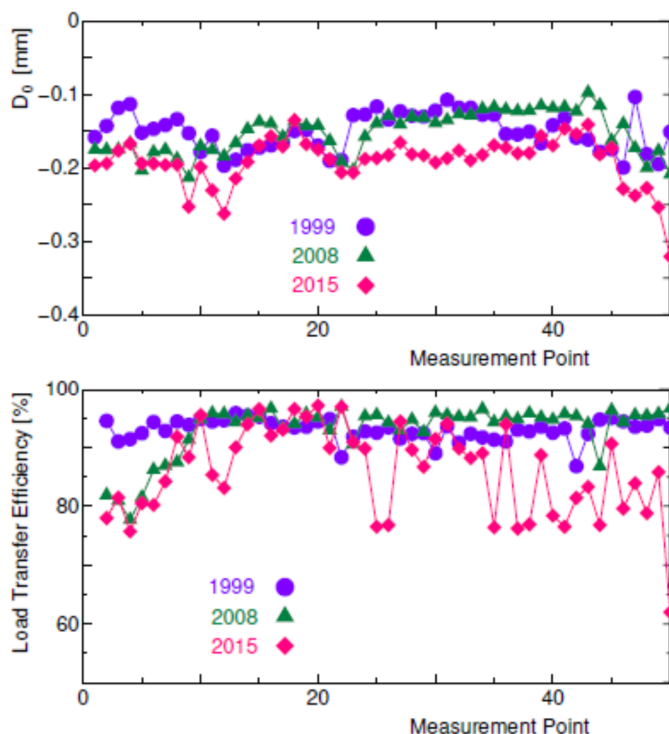


図-3.1.4 D_0 および E_{ff} の測定年による変化

表-3.1.2 D_0 と E_{ff} の統計量

		1999	2008	2015
D_0 (mm)	測定数	50	141	207
	平均値	0.157	0.192	0.206
	標準偏差	0.023	0.052	0.039
	最大値	0.205	0.316	0.410
	最小値	0.103	0.097	0.117
E_{ff} (%)	平均値	93.1	87.4	83.1
	標準偏差	2.1	6.8	8.3
	最大値	97.6	96.9	97.1
	最小値	85.4	70.9	47.6

3.1.3 劣化過程を考慮した逆解析

(1) 横目地の劣化過程

これまでの調査によれば、コンクリート舗装横目地部は以下のような劣化過程をたどると考えられる^{7),8)}。目地のシールは比較的早く喪失し、目地からの水によりダウエルバーが腐食、最終的には破断する。荷重伝達機能が失われるとたわみが増加して路盤の塑性変形を促し、コンクリート版と路盤の間に空洞が形成される。さらに水の浸入による路盤のエロージョンにより、そのような空洞が拡大されていく。これによって、目地部の路盤の支持がなくなり、荷重によるコンクリート版のたわみや応力が増加する。路盤の損傷やコンクリート版の疲労が加速して、最終的にコンクリート版にひび割れが発生する。本研究ではこのような状況を踏まえて、目地部の劣化過程を以下の5段階に単純化した。

Stage1a, b, c : ダウエルバーが健全な状態。ただし、(a)ひび割れが入る前、(b)入った後、(c)さらに長期的なコンクリート版の収縮によってひび割れが開いて、かみ合わせが無くなった場合に分ける。

空洞はない。

Stage3 : ダウエルバーが破断し、ひび割れのかみ合わせは無い。ただし、路盤の空洞はない。

Stage4 : ダウエルバーが破断し、ひび割れのかみ合わせは無い。わずかな路盤の空洞が発生している。

Stage5 : ダウエルバーが破断し、ひび割れのかみ合わせは無い。かなり路盤の空洞が発生している。

これらの段階を3次元有限要素法(3DFEM)による劣化構造モデルとして構築する。

(2) 基本的な考え方

逆解析の方法としては Gauss-Newton 法による最適化手法がある。この方法は計算 FWD たわみを測定 FWD たわみに一致するように、弾性係数をわずかに変化させながら順解析を繰り返す⁹⁾。3DFEM による目地部のモデルではコンクリート版と路盤の非線形なはがれの現象を考慮しなければならないため、1 回の順解析だけでも多くの時間を要する。このような順解析を繰り返す最適化手法では、1 つの FWD たわみを逆解析するのに相当の時間を要することになる。

そこで、本研究では次のような簡単な逆解析法を用いることとした。まず、各層の弾性係数値をランダムに発生させ、数多くの弾性係数の組合せを求める。それぞれ弾性係数の組合せを用いて、Stage ごとに FWD たわみに相当するたわみを計算で求め、これを計算 FWD たわみとする。この作業によって、Stage、各層の弾性係数、および計算 FWD たわみから成るデータベースを作成する。たわみデータベースの中から目地における測定 FWD たわみに最も近い計算 FWD たわみを探し出し、その計算 FWD たわみに対応した各層弾性係数および Stage を逆解析結果として出力する。その方法の概要を図-3.1.5 に示す。この方法では計算 FWD たわみのデータベース作成にかなりの時間を要するが、最適化法に比べて逆解析のプロセス自体は単純かつ高速である。したがって、舗装構成が同一区間の大量の FWD たわみを逆解析する際には、効率的な方法といえる。

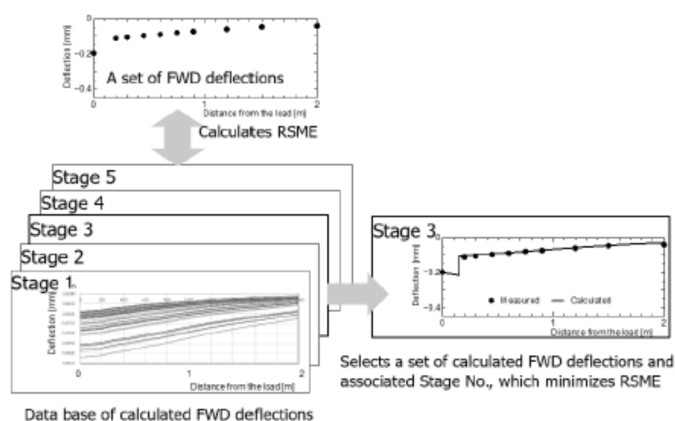


図-3.1.5 たわみデータベースを用いた逆解析手法

3.1.4 劣化構造モデルとデータベースによる逆解析

(1) 3DFEM による劣化構造モデル

コンクリート舗装目地部の Stage ごとの構造モデルを構築する。本研究では、舗装構造解析用 3DFEM パッケージ Pave3D を用いて図-3.1.6 のようなコンクリート舗装の構造モデルを構築した^{10)、11)、12)}。目地間隔が 10m なので、幅 4m、長さ 10m、厚さ 300mm のコンクリート版 2 枚をダウエルバーのある横目地で連結した構造を想定した。路床の深さは 5m とした。構造の対称性を考慮して、右半分のみ要素分割した。対称面では面内変形は自由、面直角方向変位を拘束した。路床下面のすべての変位は拘束とした。コンクリート版

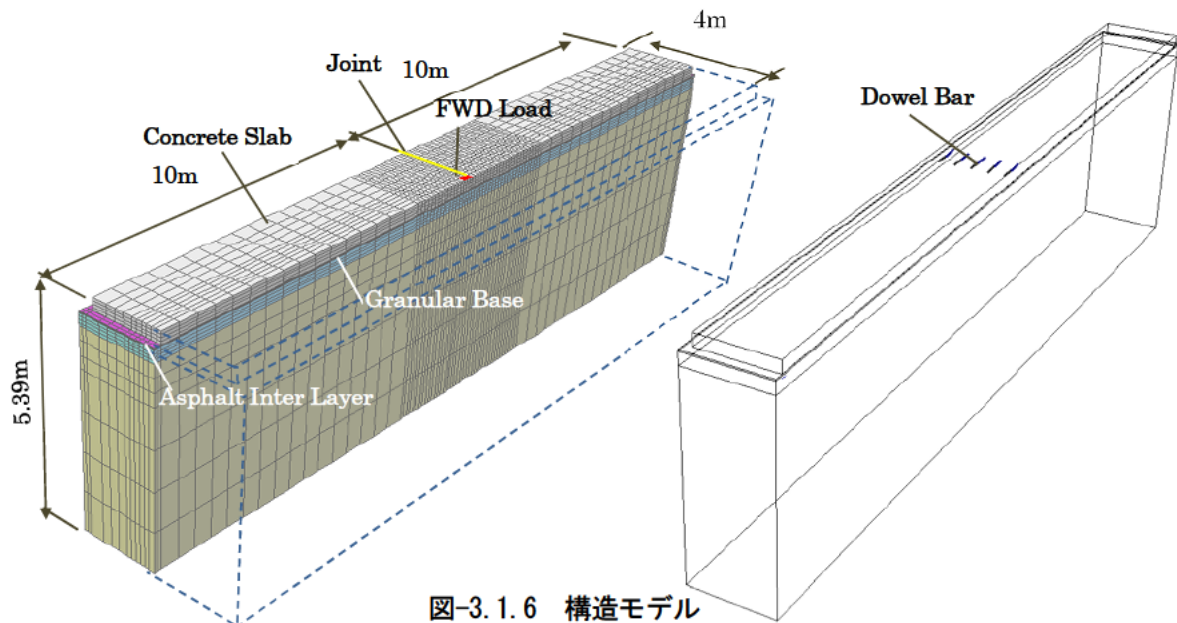


図-3.1.6 構造モデル

とアスファルト中間層の間には境界面要素を挿入し、ここでは水平方向の荷重伝達はなく、鉛直方向のみに荷重が伝達させるようにばね定数を設定した。コンクリート版と路盤の間がはがれた場合には鉛直ばねを 0 とした。目地部には直径 25mm、長さ 700mm のダウエルバー要素を 400mm 間隔で版厚中央に配置した。また、目地ひび割れでの荷重伝達は境界面要素でモデル化し、目地の開きによる荷重伝達の変化をばね定数の値で表現した。境界面要素では、境界面に平行なばねと垂直なばねがあり、それぞれに値を別個に設定できるが、単純化のためすべてのばね係数を同じとした。横目地中央部に FWD 荷重に相当する荷重 98kN の半分を 300×150 mm の矩形等分布荷重として作用させた。各層の弾性係数は後に述べる方法によってランダムに生成した。

本研究で想定した具体的な劣化過程モデルを図-3.1.7 に示す。この図に基づいて、以下のような形でモデル化した。

Stage1a、b、c：ダウエルバーが健全な状態。

境界面要素のばね係数が 10^4GPa/m 以上になると境界面要素の両側の変位が同じになりひび割れが無い場合(a)と同じとなる。 10^1GPa/m ではかみ合わせが無い場合との中間的な状況(b)になる¹³⁾。

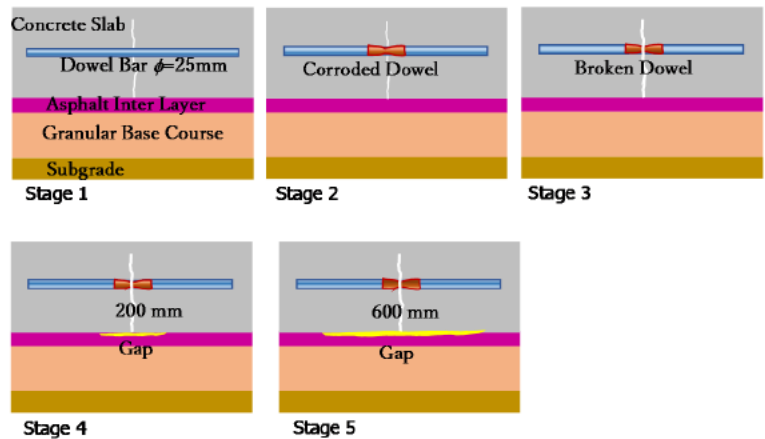


図-3.1.7 想定した目地の劣化モデル

長期的にひび割れ幅は広がっていき、最終的にかみ合わせが無くなった場合(c)のばね係数は 0 とした。
Stage2：ダウエルバーが腐食した状態。ダウエルバーの径を 17mm とし、かみ合わせは無いので境界面要素のばね係数は 0 とした。

Stage3：ダウエルバーが破断した状態。ダウエルバー要素を取り除き、境界面要素のばね係数を 0 とした。

Stage4：ダウエルバーが破断し、わずかな路盤の空洞が発生している状態。ダウエルバー要素を取り除く。

路盤の空洞範囲を目地を中心に 200mm とし、その部分のコンクリート版と路盤の間の境界面要素のす

すべてのばね係数を 0 とした。

Stage5 : ダウエルバーが破断し、かなり路盤の空洞が発生している状態。Stage4 と同じ条件で、路盤の空洞範囲を 600mm とした。

これらの条件での構造パラメータを Stage ごとにまとめると表-3.1.3 のようになる。

(2) データベースの構築

劣化構造モデルを用いて、FWD 荷重が作用した時の FWD センサー位置のたわみを計算する。そ

の際、コンクリート版、アスファルト中間層、粒状路盤および路床の弾性係数を次式によってランダムに生成する。

$$E_i = \text{RND}_i \times (E_{\max,i} - E_{\min,i}) + E_{\min,i} \quad \cdots \text{式} 3.1.2$$

ここに、 RND_i は 0 から 1 の間の乱数、 E_i はランダムに生成された弾性係数、 $E_{\max,i}$ は弾性係数の範囲の上限、 $E_{\min,i}$ は弾性係数の範囲の下限を表わす。なお、添え字 i は各層(0:コンクリート版、1:アスファルト中間層、2:粒状路盤、3:路床)を表わす。計算に用いた具体的な弾性係数の範囲などを表-3.1.4 にまとめた。

式)3.1.2 によって生成された各層弾性係数の組合せを用いて、Stage に対応した劣化構造モデルで FWD たわみを計算し、それらをデータベースに蓄積しておく。データベースの項目は、各層の弾性係数 E_i 、($i=1, \dots, 4$)、計算 FWD たわみ D_0 、 D_{200} 、

D_{300} 、 D_{450} 、 D_{600} 、 D_{750} 、 D_{900} 、 D_{1200} 、 D_{1500} 、 D_{2000} 、および Stage である。

(3) 逆解析の手順

データベースを用いて、各層の弾性係数および Stage を以下のように求める。まず、目地で実測された FWD たわみと計算された FWD たわみとから次式で示す重み付き 2 乗誤差によって両者の一致度を評価する。

$$w\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (D_j - d_j)^2} \quad \cdots \text{式} 3.1.3$$

$$w_j = \frac{D_j^2}{A}, \quad A = \sum_{j=1}^m D_j^2$$

ここに、 D_j および d_j は測定 FWD たわみおよび計算 FWD たわみを示す。 m はセンサーの数である。式)3.1.3 の形から分かるように、荷重に近いたわみが一致するほど $w\text{RMSE}$ は小さくなる。計算 FWD たわみの

表-3.1.3 各ステージを特性づける材料定数

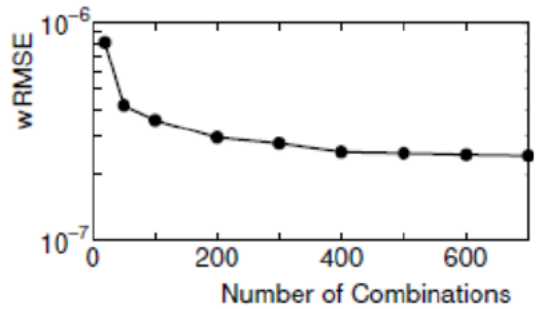
Stage	横目地ひび割れ ばね係数 (GPa/m)	ダウエルバー の径 (mm)	空洞の 範囲 (mm)
1a	10000	25	0
1b	10	25	0
1c	0	25	0
2	0	17	0
3	0	-	0
4	0	-	200
5	0	-	600

表-3.1.4 舗装各層の材料定数及び厚さ

層	弾性係数 (MPa)		ポアソン 比	厚さ (mm)
	下限	上限		
コンクリート版	25000	40000	0.2	300
中間層	1000	15000	0.35	40
粒状路盤	500	5000	0.35	150
路床	50	800	0.4	5000

中から、wRMSE が最小となるものを抽出する。そのたわみを計算するために用いた弾性係数の組合せおよび Stage が逆解析結果となる。

問題となるのは、データベースの規模、すなわち各層の弾性係数の組合せ数である。非線形な問題を含む 3DFEM 解析の場合、1つの計算に多少の時間を要するので、その規模は最低限に抑えたい。そこで、2015年の1区間66点の実測データを用いてデータベースの規模と逆解析結果での平均 wRMSE の関係を調べた。図-3.1.8は、各 Stage の弾性係数の組合せ数を 20 から 700 まで変えたときの、平均 wRMSE の値の変化を示している。図より、組合せ数が 400



を超えると、平均 wRMSE の値にほとんど変化はないことが分かる。図-3.1.9は弾性係数の組合せ数が 20 組および 500 組の時の 66 点の E_{ff} を実測値と計算値を比較したものである。図より、20 組では実測値と計算値では違いがみられるが、500 組では両者は良く一致していることが分かる。図-3.1.10は、組合せ数による精度を定量的に評価したものである。決定係数は、20 組で 0.82、200 組で 0.95、500 組で 0.97、700 組で 0.97 であり、500 組以上では変化がない。以上の結果より、本研究では各 Stage での組合せの数を 500 組とした。

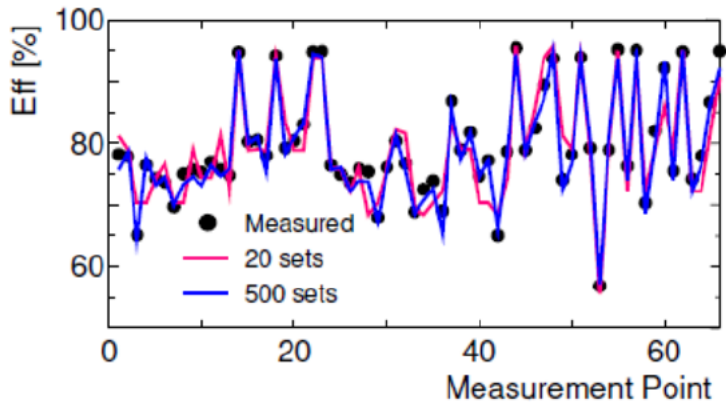


図-3.1.9 組合せ数ごとの E_{ff} の実測値と計算値の比較

逆解析における7つの劣化構造モデルの必要性を示すために、1つだけの劣化構造モデルを使って逆解析を行った結果を図-3.1.11に示す。ここでは、健全でかつ目地のひび割れが非常に狭い場合の Stage1a、広い場合の Stage1c、ダウエルバーが切断された場合の Stage3、および空洞範囲が 600mm の Stage5 の逆解析による E_{ff} を比較した。それぞれの Stage だけで正確に

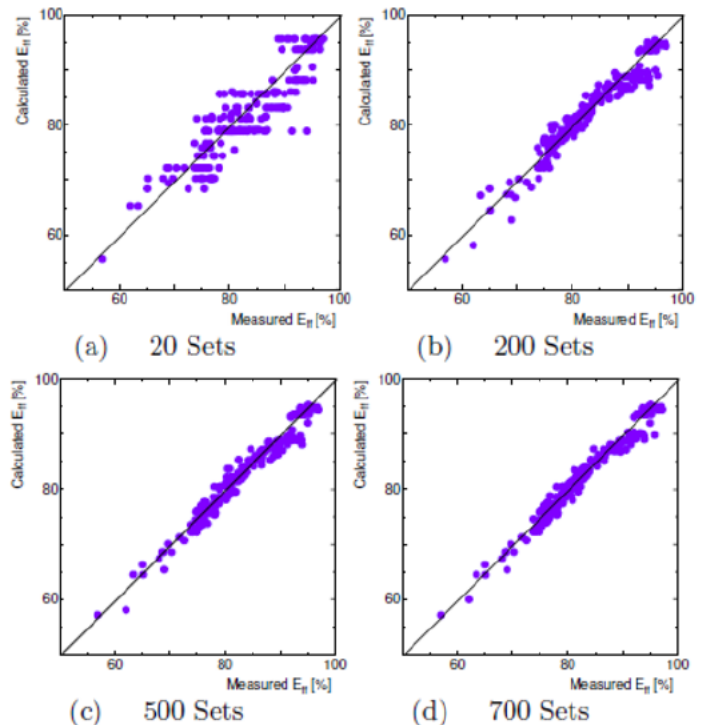


図-3.1.10 組合せ数ごとの E_{ff} の精度

逆解析される E_{ff} の範囲は狭く、すべての測点の E_{ff} を推定するためには7つの Stage の劣化構造モデルが必要なことが分かる。

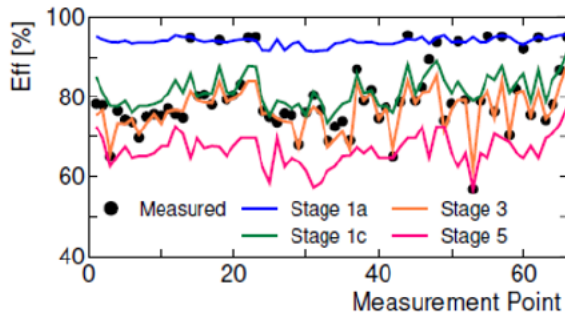


図-3.1.11 Stage ごとの E_{ff} の
実測値と計算値の比較

図-3.1.12 は、500組で計算されたそれぞれの Stage における代表的な実測および計算たわみ曲線を比較した結果である。たわみ曲線自体も非常によく一致している。

Stage に対応した劣化構造モデルの数は7個すべて必要なことから、計算 FWD たわみの組合せの総数、すなわちデータベースの総レコード数は3500となる。このデータベースを構築には、高性能のパーソナルコンピュータで数週間を要した。

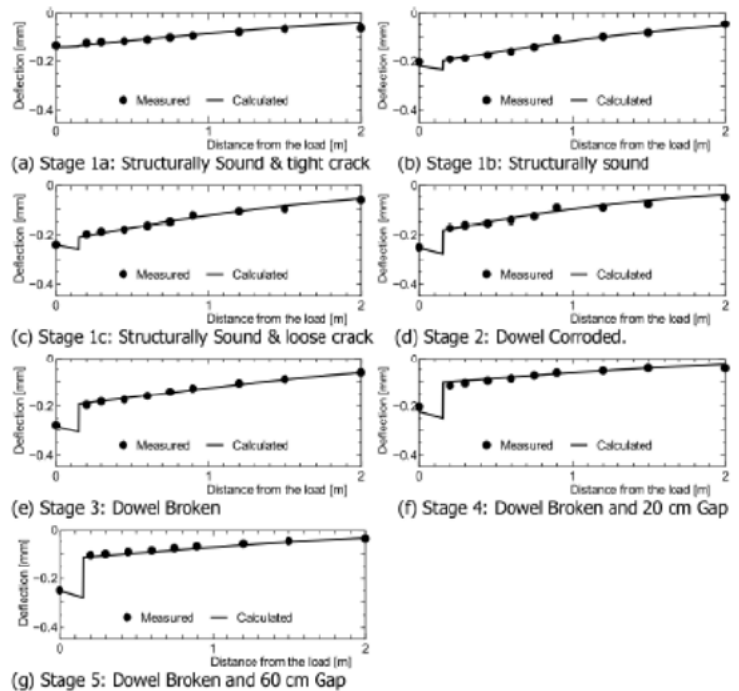


図-3.1.12 Stage ごとのたわみ形状の比較

3.1.5 逆解析結果

(1) 弾性係数の経年変化

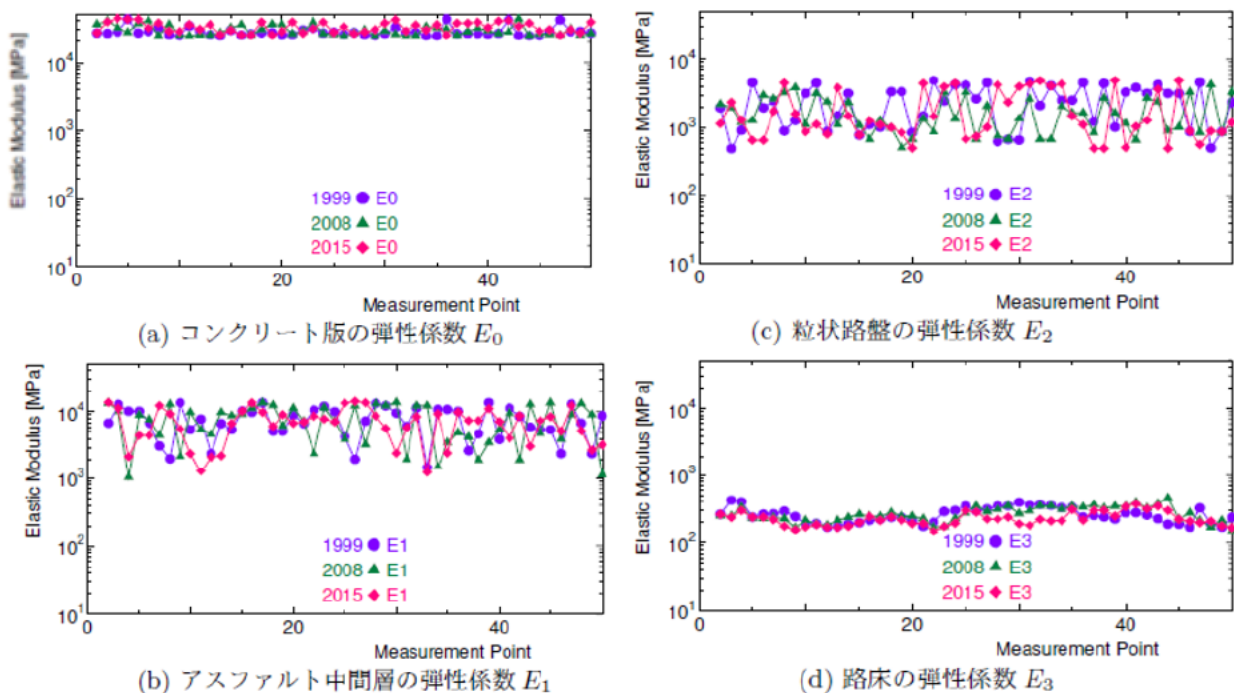


図-3.1.13 逆解析された弾性係数の経年変化

図-3.1.13は、3回のFWD測定で共通する区間の逆解析弾性係数の経年変化を示している。この図からは、各層の弾性係数に大きな経年変化は見られない。アスファルト中間層と粒状路盤の弾性係数は、表-3.1.4で設定した上限値と下限値の間で変動している。

各層の弾性係数の統計量を各年ごとにまとめたものが、表-3.1.5である。アスファルト中間層と粒状路盤の変動係数はコンクリート版や路床のそれに比べて大きい。コンクリート版の弾性係数はわずかに増加しているが、その他の層の弾性係数には経年による一定の傾向はみられない。全体として、各層の弾性係数の統計量には経年による大きな変動はない。したがって、目地のたわみや荷重伝達率の経年変化は、各層の弾性係数の変化によるものではないと考えられる。

表-3.1.5 各層の弾性係数 (MPa) の変化

	E ₀	E ₁	E ₂	E ₃
1999				
平均	29122.6	7076.7	2202.3	262.2
標準偏差	4363.7	3793.8	1575.2	68.4
変動係数	0.15	0.54	0.72	0.26
2008				
平均	30262.2	8454.6	1740.5	269.1
標準偏差	5074.2	3999.4	1137.8	67.1
変動係数	0.17	0.47	0.65	0.25
2015				
平均	33356.3	6349.1	2106.7	229.4
標準偏差	5704.6	3879.8	1437.3	55.9
変動係数	0.17	0.61	0.68	0.24

(2) Stage の経年変化

図-3.1.14は、D₀を計算値と実測値で比較したものであるが、逆解析で判明したStageごとに色分けし、D₀とStageの関係を見ている。たわみによって逆解析したので、測定たわみと計算たわみはよく一致している。初期の健全なStageではD₀が小さく、劣化が進んだStageではD₀が大きくなると予想していたが、対角線上に各Stageの色が散らばっており、そのような傾向はみられない。

図-3.1.15は、Stageごとに色分けしてE_{ff}を計算値と実測値で比較したものである。この場合、初期のStageではE_{ff}が高く、Stageが進むとE_{ff}が小さくなる傾向がみられる。しかしながら、Stage2と3は重なる部分が

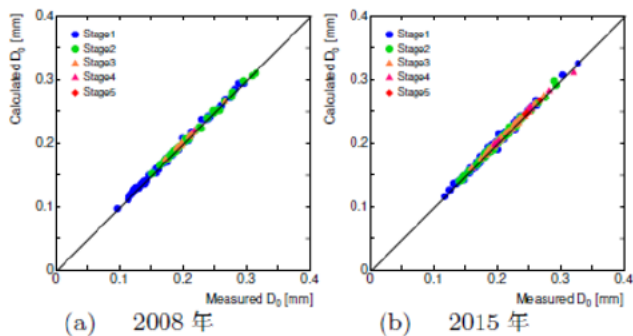


図-3.1.14 D₀の実測値と計算値の比較

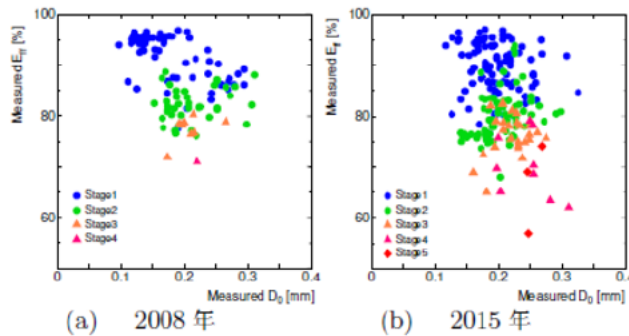


図-3.1.16 実測値によるD₀とE_{ff}の関係

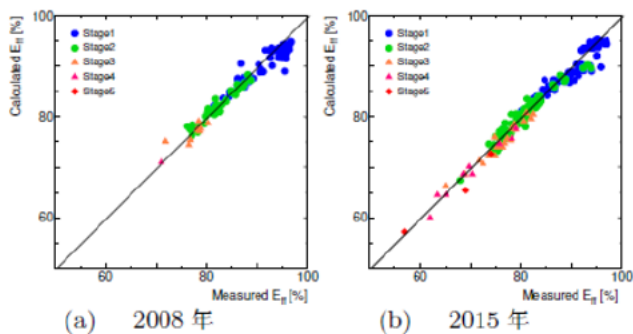


図-3.1.15 E_{ff}の実測値と計算値の比較

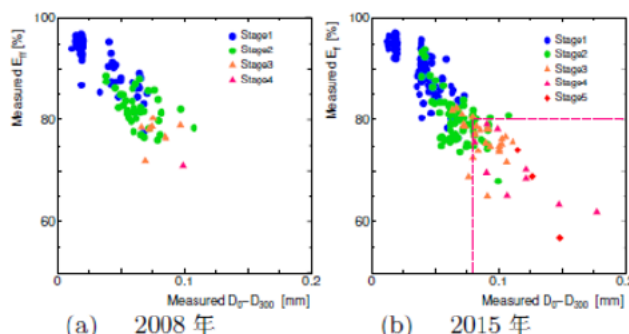


図-3.1.17 実測値によるD₀-D₃₀₀とE_{ff}の関係

多く、両者の境目は判然としない。したがって、 E_{ff} だけで各 Stage の境界を判別することは難しい。

D_0 と E_{ff} の関係を調べてみたものが、図-3.1.16 である。 D_0 と Stage の間に明確な関係が無いため点が横に分散して各 Stage の境界が見やすくなり、少なくとも、Stage 1 と Stage 4 および 5 は E_{ff} だけで区別ができる。すなわち、 E_{ff} が 80% 以上であれば空洞がある可能性は低く、70% 以下だとその可能性は非常に高くなる。また、 E_{ff} だけでは Stage 2 と 3 を区別することは難しいこともわかる。

そこで、 D_0-D_{300} と E_{ff} の関係を調べたものが、図-3.1.17 である。全体としては D_0-D_{300} が大きいほど E_{ff} が低くなるという当然の結果であるが、劣化が進んだ Stage の点が他の点と離れてくる。例えば、2015 年には、おおよそ D_0 が 0.08mm 以上かつ E_{ff} が 80% 以下の範囲に、Stage 3、4、および 5 のほとんどの点が入っている。すなわち、これらの点ではダウエルバーが切断されている可能性が高いといえる。ただし、このような判定はこの平泉のコンクリート舗装でいえることであり、一般性は無いことに注意したい。

表-3.1.6 は Stage の割合の経年変化をまとめたものである。施工当初はすべての目地において Stage 1 で健全であり、9 年後ではそれが 66%、15 年後には 46% にまで減少する。空洞が存在する Stage 4 および 5 の割合は、9 年後では 1% に満たないが、15 年後には 6% 程度になり、ダウエルバー切断の Stage 3 まで含めると 20% 近くまで増加する。このように本手法によれば、FWD 試験の結果に基づいて目地の劣化が進行していく様子を定量的に表現することが可能となる。

表-3.1.6 各ステージの個所数の変化

Stage	1999		2008		2015	
	個所数	比率	個所数	比率	個所数	比率
1	50	100	93	66.0	95	45.9
2	0	0	39	27.7	74	35.7
3	0	0	8	5.7	25	12.1
4	0	0	1	0.7	10	4.8
5	0	0	0	0	3	1.4
計	50	100	141	100	207	100

3.1.6 応力解析

コンクリート舗装の維持管理においては、劣化過程の中でどの段階でどのような補修を行うべきかを判断する必要がある。コンクリート舗装の最終的な破壊は荷重および温度応力による疲労ひび割れであるので³⁾、⁴⁾、それぞれの Stage における応力に着目する必要がある。そこで、本研究で提案した逆解析法によって判定されたコンクリート舗装横目地部の劣化過程が正しいと仮定し、各 Stage のコンクリート版の曲げ応力を計算した。

(1) 応力の経年変化

図-3.1.18 は横目地縁部に 98kN の FWD 荷重が作用した場合の荷重直下のコンクリート版下面に生ずる最大応力の経年変化を見たものである。施工当初の 1999 年ではほとんどの目地においておおよそ 1MPa 程度であるが、4 か所 1.5MPa となる箇所がみられる。9 年後の 2008 年では、そのような箇所が増え、2015

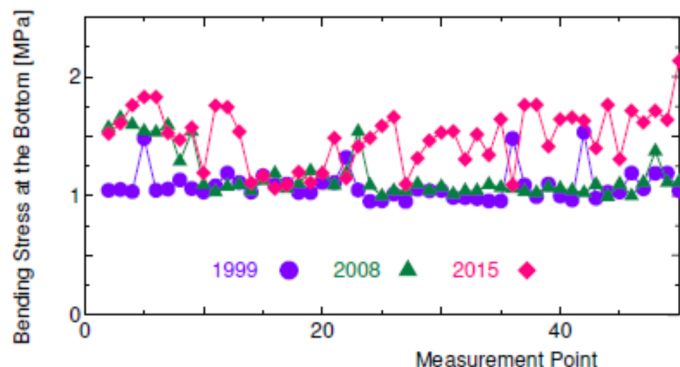


図-3.1.18 コンクリート版応力の経年変化

年では半分以上が 1.5MPa になっている。全体的な傾向をまとめたものが、表-3.1.7 である。応力の平均値は 1999 年の 1.108MPa から 2015 年の 1.498MPa に、標準偏差は 0.129MPa から 0.221MPa に増加している。このような応力の増加は、 D_0 の増加や E_{ff} の減少と連動していると考えられる。

表-3.1.7 コンクリート版応力の統計量の経年変化

	1999	2008	2015
平均 (MPa)	1.108	1.185	1.498
標準偏差 (MPa)	0.129	0.205	0.221
変動係数	0.116	0.173	0.147

(2) FWD たわみとの応力の関係

このような応力が FWD たわみとどのような関係にあるかについて、回帰分析によって検討した。以下のような線形回帰モデルを仮定した。

$$y_i = a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + u_i \quad \text{式 3.1.4}$$

ここに、 y_i は目的変数の応力値、 x_{1i} および x_{2i} は説明変数で D_0 あるいは E_{ff} 、 a_0 、 a_1 および a_2 は回帰係数、 u_i は誤差である。

説明変数として D_0 のみとした単回帰分析を行った結果を図-3.1.19 に示す。 D_0 が大きいと応力も大きくなる傾向がみられるが、あまり明確ではない。図中の直線は回帰式であるが、測定年によって異なる。回帰式によって推定した応力と FEM による応力を比較したものが図-3.1.20 である。必ずしも精度が良いとはいえない。

次に E_{ff} を説明変数として単回帰分析を行った結果を図-3.1.21 に示す。 E_{ff} が低いと応力が大きくなる傾向があるが、 E_{ff} の変動幅に比べて応力のそれが小さく回帰式としては良いものは得られていない。やはり回帰式は測定年によって異なる。回帰式によって推定した応力と FEM による応力を比較したものが図-3.1.22

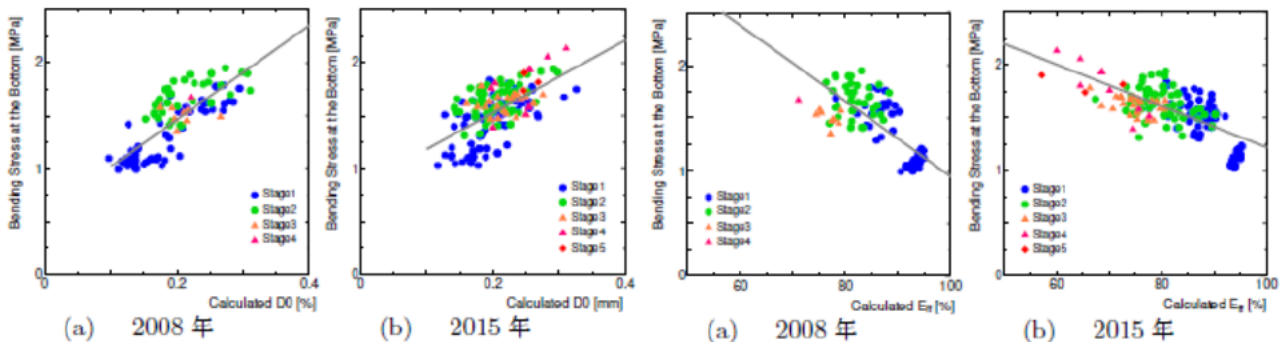


図-3.1.19 D_0 とコンクリート版応力の関係

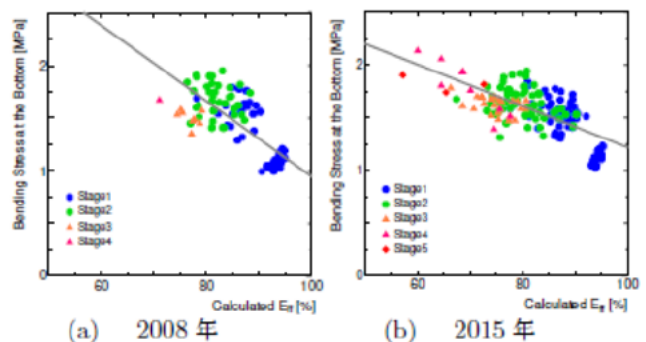


図-3.1.21 E_{ff} とコンクリート版応力の関係

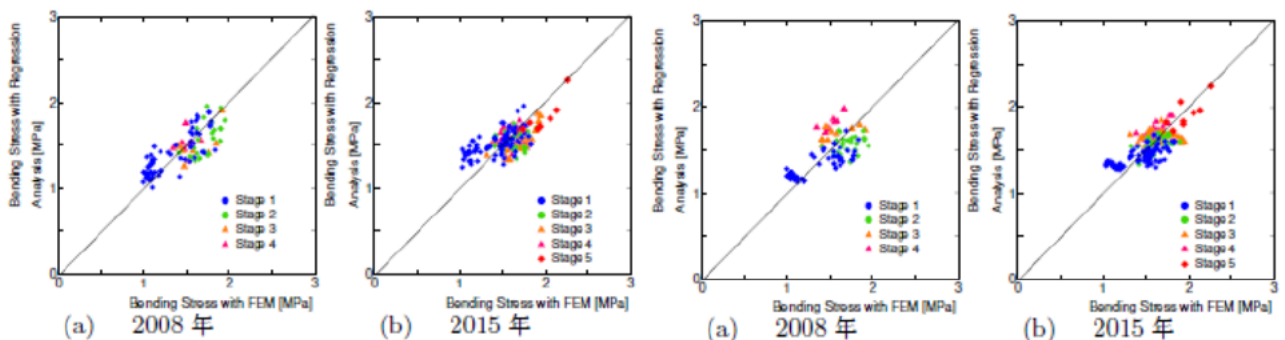


図-3.1.20 D_0 による単回帰分析の精度

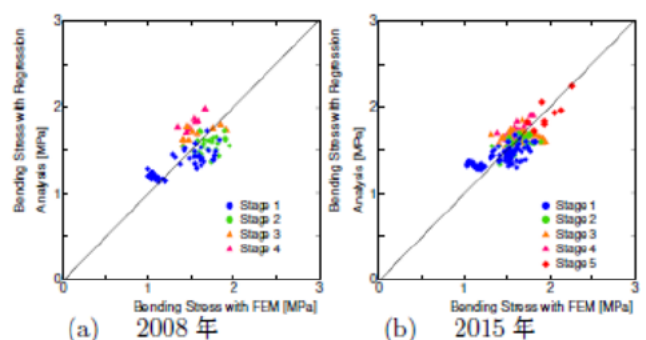


図-3.1.22 E_{ff} による単回帰分析の精度

である。 D_0 の場合と同様の精度である。

これら単回帰分析の回帰係数および決定係数 R^2 をまとめたものが表-3.1.8 である。この表では、2008 年と 2015 年の 2 回にわたる測定結果をすべてまとめて回帰した結果を All の列に示した。いずれも決定係数は高くなく、異なる測定年のデータをまとめた All でも良い結果にはならない。以上の結果より、 E_{ff} や D_0 単独では応力の推定は難しいといえる。

そこで、 E_{ff} や D_0 の両方を説明変数として重回帰分析を行った。その回帰分析による精度を示したものが図-3.1.23 である。 E_{ff} や D_0 単独で回帰したものより改善されている。そのことは、重回帰分析の結果をまとめた表-3.1.9 からいえる。各測定年ごとの決定係数は 0.69 以上であるが、全部のデータで解析を行うとやや精度は落ちる。以上の結果より、FWD たわみと応力には弱い相関関係がみられるが、FWD たわみから直接コンクリート版の応力を推定することは困難であるといえる。これは個々の目地における各層の弾性係数や劣化 Stage が異なることによるものであり、自然な結果といえる。したがって、コンクリート版の応力は逆解析された Stage に対応した劣化構造モデルによって直接計算する必要がある。

3.1.7 結論

本研究では、コンクリート舗装横目地の健全度を評価するために、目地の劣化過程を 3DFEM でモデル化した劣化構造モデルによって逆解析を行う方法を開発した。この方法では、劣化過程を 5 つの Stage に分け、健全、ダウエルバー腐食、ダウエルバー切断、ダウエルバー切断+わずかな空洞、ダウエルバー切断+大きな空洞の順番で劣化していくと仮定し、それぞれについて具体的な 3DFEM による劣化構造モデルを作成した。逆解析には、各 Stage ごとにあらかじめランダムに生成した舗装各層の弾性係数によるたわみのデータベースを作成しておき、FWD で測定したたわみと一致した弾性係数と Stage の組み合わせを求める単純な方法を採用した。開発した方法を平泉バイパスのコンクリート舗装における FWD 測定結果に適用した結果以下のような知見を得た。

1. 3 回にわたる FWD 調査結果より、供用年数とともに目地部の D_0 は増加し E_{ff} は減少する傾向がみられたが、従来の健全度による判定方法によれば空洞は無いとされた。
2. 適切なデータベースの規模を設定することにより、逆解析結果によるたわみは測定値と高い精度で一致することを確認した。

表-3.1.8 D_0 あるいは E_{ff} による回帰分析結果

	2008	2015	All
D_0			
a_0	0.575	0.845	0.522
a_1	4.45	3.42	4.72
R^2	0.63	0.37	0.56
E_{ff}			
a_0	4.53	3.19	3.20
a_1	-0.0358	-0.0197	-0.0197
R^2	0.55	0.54	0.32

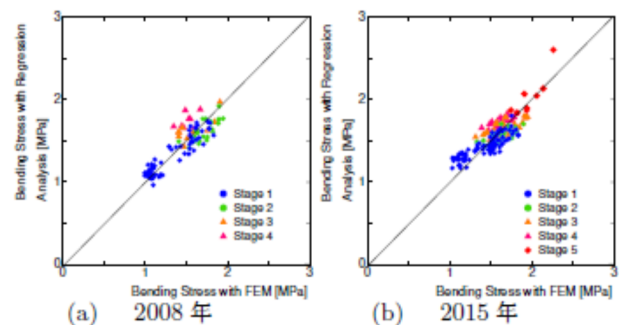


図-3.1.23 重回帰分析の精度

表-3.1.9 D_0 と E_{ff} による回帰分析結果

	2008	2015	All
a_0	2.83	2.41	1.85
a_1	-0.0233	-0.0161	-0.0139
a_2	3.20	2.33	4.02
R^2	0.81	0.69	0.70

3. 逆解析された各層の弾性係数のうち、アスファルト中間層と粒状路盤は区間内で設定した下限値と上限値の間で大きく変動した。
4. 区間の平均的な弾性係数は経年的に大きな変化はなかったことから、 D_0 や E_{ff} の経年的な変化は弾性係数によるものではないと推定される。
5. 同じ施工区間の目地において、供用した年数が進むにつれ劣化が進行していく割合を定量的に表現することに成功した。
6. D_0 や E_{ff} から目地部の Stage を個別に判定することは困難であるが、健全な Stage1 とダウエルバーが切断されて空洞がある Stage4、5 の区別は可能である。
7. D_0 や E_{ff} とコンクリート版の曲げ応力には弱い相関関係がみられるが、前者から後者を推定するような回帰式を得ることは難しく、劣化構造モデルによる応力解析が必要である。

これらの知見を検証するためには、逆解析によって決定された劣化過程を実際のコンクリート舗装横目地において確認しなければならない。また、構造の異なるコンクリート舗装目地部での適用事例を積み上げていく必要がある。このような検討の過程で、想定したモデルと異なる事例、例えば空洞の範囲や位置、ダウエルバーは健全でも空洞があるなどが発見された場合には、対応する劣化構造モデルを追加していくことが可能である。いずれにしても、目地損傷の実情を調査し、劣化構造モデルの精度を上げていくことが今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 舗装設計施工小委員会：コンクリート舗装ガイドブック 2016, (公社)日本道路協会, 2016.3
- 2) 国土交通省：舗装点検要領, 2016.
- 3) 土木学会舗装工学委員会：舗装標準示方書 2014 制定, (公社)土木学会, 2015.
- 4) 土木学会舗装工学委員会：FWD および小型 FWD 運用の手引き, 舗装工学ライブラリー2, (社)土木学会, 2002.
- 5) 独立行政法人土木研究所, NPO 法人舗装診断研究会：長期供用されたコンクリート舗装の調査業務報告書, 2008.
- 6) FWD 研究会コンクリート WG：1999 年度 FWD に関する研究, FWD 研究会, pp.208-226, 1999.12
- 7) 飯島尚, 窪田一夫：矢板バイパスにおけるコンクリート試験舗装の供用性の評価, 土木学会論文集, 第 366 号/V-4, pp. 65-74, 1986.
- 8) 舗装の耐久性向上に関する検討委員会：平成 7 年度舗装の耐久性に関する検討 委員会報告書, (財)高速道路調査会, pp. 131-145, 1996.
- 9) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之：舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法, 土木学会論文集, 第 420 号/V-13, pp.107-114, 1990.
- 10) 西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発, 土木学会舗装工学論文集, Vol. 5, pp. 112-121, 2000.
- 11) 西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装横目地におけるダウエルバーモデル, 土木学会論文

集, No.683/V-52, pp.145-156, 2001.

12) (一社)セメント協会 : JCA Pavé 3D 舗装構造解析 3次元有限要素法プログラム、
<http://www.jcassoc.or.jp/tokusetsu/jcapave3d/>

13) 西澤辰男, 福田正, 松野三朗 : コンクリート舗装版の横目地における力学的挙動の解析, 土木学会論文
集, 第 378 号/V-6, pp.185-193, 1987.

14) 土木学会舗装工学委員会 : 舗装工学の基礎, 舗装工学ライブラリー7, (公社)土木学会, 2012.

3.2 目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討

3.2.1 既存の目地部評価方法の課題と検討した非破壊診断技術

(1) 既存の目地部評価方法の課題

コンクリート舗装における目地部の評価手法は、FWD により測定したたわみから算出した荷重伝達率が用いられている。これはコンクリート舗装版同士の一様性を、FWD による載荷点直下のたわみと目地を挟み 30cm 離れた箇所のたわみを測定することで間接的に評価する手法である。しかし、若林ら¹⁾の検討では、路盤や路床の支持力が低下している場合、ダウエルバーが破断している場合でも荷重伝達率を高く見積もり、従来の FWD を用いた荷重伝達率のみの評価では誤った判断をしてしまう危険性を指摘している。また、「2.2 国道におけるコンクリート舗装の事例の分析」に示した通り、直轄国道の調査では、ダウエルバーが破断しているにも関わらず、65%以上の荷重伝達率を示した事例も確認された。そこで本検討では、荷重伝達機能に大きく影響を与えるダウエルバー破断を検知することを目標に、既存の非破壊検査技術の調査を行った。

(2) RC、PC 構造物の鉄筋・鋼材破断に関連する非破壊検査技術

RC、PC 構造物の鉄筋・鋼材破断に関する既存の非破壊検査技術を調査し、ダウエルバーの破断検知への可能性を調査した。表-3.2.1 に調査した非破壊検査技術を示す。

表-3.2.1 各非破壊検査技術と測定原理及び結果の一例

	①電磁波レーダー法 ²⁾	②X線透過撮影法 ³⁾	③漏洩磁束法 ⁵⁾
原理			
結果の一例			

① 電磁波レーダー法^{2)、3)}

電磁波レーダー法は、コンクリート内へ電磁波を放射するとその電磁波がコンクリートと電氣的性質の異なる物体 (ex., 鉄筋、埋設管、空洞等) との境界面で反射するため、それを受信し伝播時間や距離を計測することにより、位置を特定する技術である。取り扱いが比較的簡単、かつ短時間で広範囲な調査が可能であるため、鉄筋探査など広く用いられている手法である。この原理を利用し各事象で反射強度が異なることに着目し⁴⁾、舗装の空洞探査の実用化、床版砂利化の検知、鉄筋の腐食の有無などへの活用が検討されている。よって、ダウエルバー破断による反射強度の差異に着目することで、検知手法としての可能性が考えられる。

② X線透過撮影法³⁾

X線透過撮影法は、一方から X線を照射し対向する裏面にフィルムを配置し透過像を撮影することにより、内部の様子をほぼ実態に近い状態で確認できる技術である。これは、X線フィルムは透過してきた X線の強さに応じて黒化し、また X線の減弱量は物質の密度に比例するため、コンクリートより密度の高い鉄筋の像は白く、空洞及びひび割れの像は黒く写し出されるためである。

しかし、コンクリート舗装版は路床の上に構築されるため、対象物の裏面にフィルムを配置することは困難であることから、現状では本手法のダウエルバーの破断検知への活用は困難と判断した。

③ 漏洩磁束法⁵⁾

漏洩磁束法は、鋼材が強磁性体であることを利用し、コンクリート表面から専用の磁石ユニットで内部の鋼材を着磁し、計測した磁束密度波形から鋼材破断の有無とその位置を判断する技術である。国内のコンクリートの分野では、電柱の鉄筋破断への検知手法、高

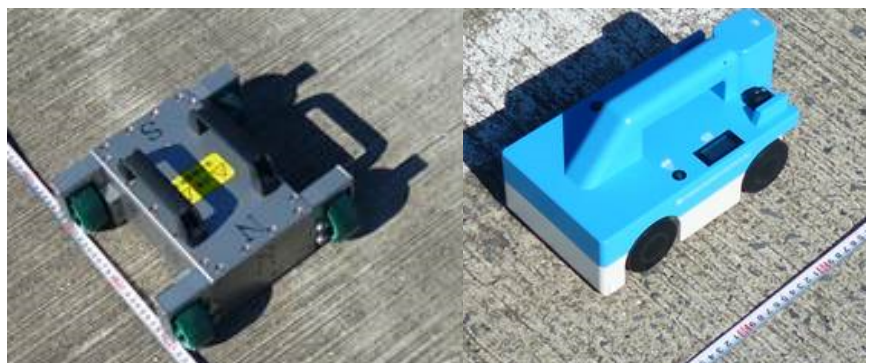


写真-3.2.1 磁石ユニット

写真-3.2.2 磁気計測ユニット

速道路株式会社の調査要領⁶⁾にも記載されている PC 鋼材の破断検知手法として用いられている。

漏洩磁束法で用いる検査装置は、鋼材を長手方向に磁化するための永久磁石を内蔵した磁石ユニット (写真-3.2.1)、コンクリート表面の磁束密度を測定する磁気計測ユニット (写真-3.2.2) 及び測定データを表示、保存する PC から構成される。漏洩磁束法の破断検知可能範囲は、PC 鋼より線を用いた既往の検討の結果⁷⁾では、全ての鋼より線が破断した場合、かぶりが 160~190mm 程度でも破断検知を確認している。

以上の調査結果より、本検討では漏洩磁束法を今後の検証対象とし、ダウエルバーの破断を検知可能か、また可能な場合は適用範囲を検討した。

3.2.2 漏洩磁束法によるダウエルバー破断検知に関する実験的検討

(1) 実験概要

1) 用いた供試体

供試体は、ダウエルバー破断の検知可否及び適用範囲などを検討するためのダウエルバーの破断を模擬した供試体と実道での測定を想定した舗装走行実験場内のコンクリート舗装版を用いた。

①供試体

ダウエルバー破断を模擬した供試体は、ダウエルバーを切断し、その隙間を設けることでダウエルバーの破断を模擬した。ダウエルバー破断を模擬した供試体の検討項目を表-3.2.2、供試体の形状を図-3.2.1～図-3.2.2に示す。

表-3.2.2 供試体の検討項目

記号	検討項目			供試体寸法 (cm) (縦×横×厚さ)
	ダウエルバーの状態	模擬破断部の隙間 (mm)	芯かぶり (cm)	
S-25	健全	—	12.5	100×40×25
B0-25	破断	0		
B5-25		5		
B10-25		10		
B0-30	破断	0	15	100×40×30
B5-30		5		

コンクリート供試体の厚さは、コンクリート舗装の標準的版厚を模擬し 25、30cm とし、供試体の幅は、標準的なダウエルバー設置間隔である 40cm とした。

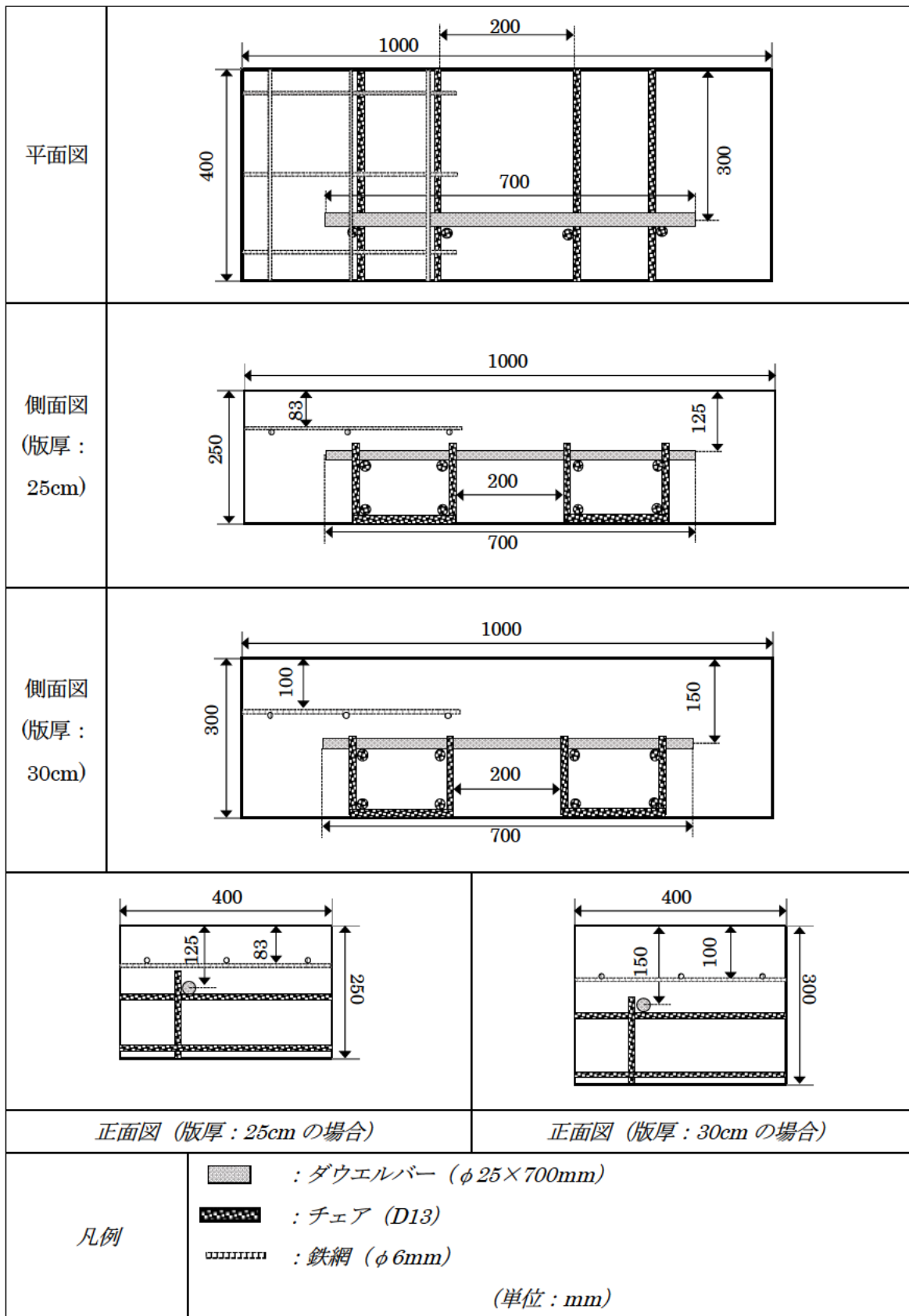
ダウエルバーの破断を模擬するため、写真-3.2.3に示すようにダウエルバー間に 0、5、10mm の隙間を設けた。隙間は透明フィルムで覆い、水やコンクリートが滞留しないようにした。漏洩磁束法に対する鉄網の影響を把握するため、供試体片側のみに鉄網を配置した。ダウエルバー、チェア、鉄網の配置状況を写真-3.2.4に示す。コンクリートは、JIS A 5308「舗装-4.5-6.5-20N」（標準養生 28 日での曲げ強度：5.76N/mm²）を用いた。



写真-3.2.3 模擬破断部の隙間

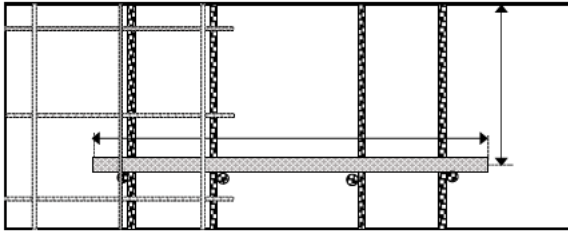
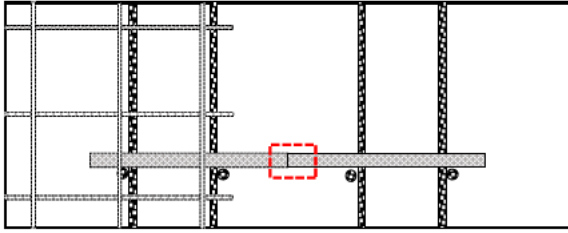
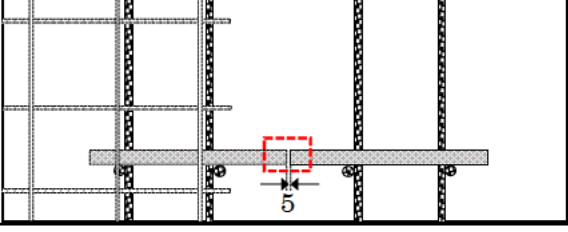
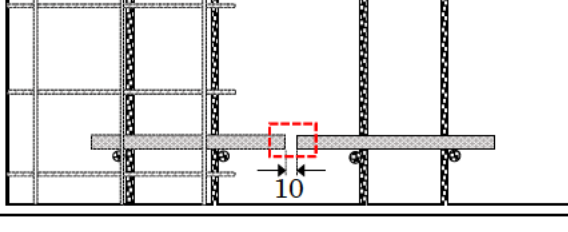


写真-3.2.4 ダウエルバー、チェア、鉄網の配置状況



図一

3.2.1 供試体の形状

記号	供試体概要	ダウエルバーの状態
S-25		健全
B0-25 B0-30		破断 隙間：0mm
B5-25 B5-30		破断 隙間：5mm
B10-25		破断 隙間：10mm


 : 模擬破断部 (単位: mm)

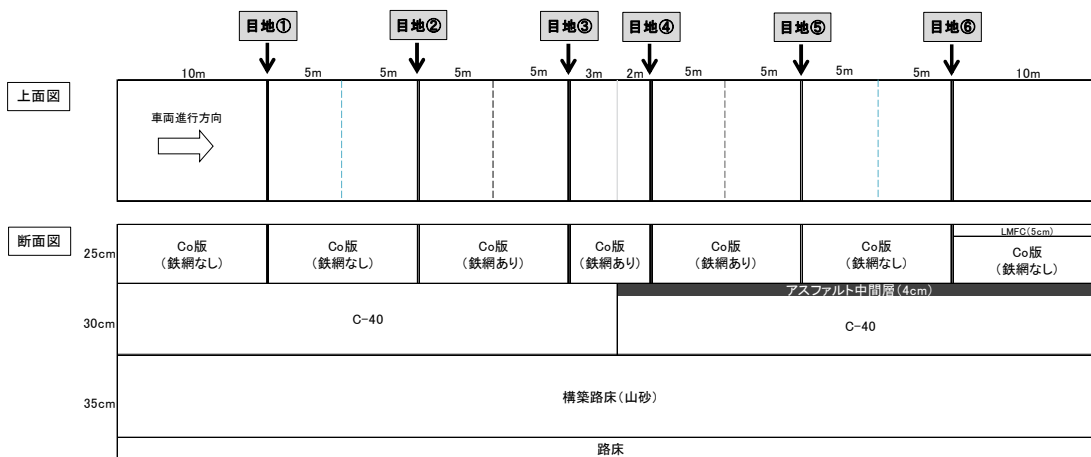
図-3.2.2 供試体の模擬破断部

②舗装走行実験場内のコンクリート舗装版

土木研究所内舗装走行実験場のコンクリート舗装版は、写真-3.2.5に示すように実物大のコンクリート舗装版が施工されており、大型車両を繰り返し走行させ促進載荷試験により耐久性に関する評価を行っている。舗装走行実験場の目地構造図を図-3.2.3、構造条件、FWDによる荷重伝達率を表-3.2.3に示す。測定は舗装走行実験場内での目地①～⑥で実施し、FWD測定箇所の最も近傍にあるダウエルバーを測定した。



写真-3.2.5 舗装走行実験場のコンクリート舗装版工区



※幅員：5m

図-3.2.3 コンクリート舗装版目地部の構造図

表-3.2.3 構造条件およびFWD 測定結果

目地 名称	コンクリート舗装版の内部 (鉄網の有無)		コンクリート舗装版より 下層の構造		FWD 測定結果
	目地手前 Co版	目地奥側 Co版	中間層	下層路盤	
目地①	鉄網なし	鉄網なし	—	C-40(t=30cm)	85.9%
目地②	鉄網なし	鉄網あり	—	C-40(t=30cm)	97.4%
目地③	鉄網あり	鉄網あり	—	C-40(t=30cm)	95.6%
目地④	鉄網あり	鉄網あり	あり(t=4cm)	C-40(t=26cm)	80.7%
目地⑤	鉄網あり	鉄網なし	あり(t=4cm)	C-40(t=26cm)	93.6%
目地⑥	鉄網なし	鉄網なし	あり(t=4cm)	C-40(t=26cm)	90.1%

2) 漏洩磁束法による測定方法

測定方法は、始めに対象ダウエルバーを磁化させるため、磁石ユニット（写真-3.2.1）を用い対象ダウエルバー上を移動させ、着磁を実施し、対象ダウエルバーを磁化させた。その後、計測装置を用い、磁束密度の測定を実施した。なお、本測定では、比較的広範囲を測定するため、写真-3.2.6に示す磁気計測装置（Ⅱ型）を用いた。また、共通して各測定対象ダウエルバーに対し、図-3.2.4に示す通り着磁はダウエルバー直上を基準（0mm）とし、そこから200mm、

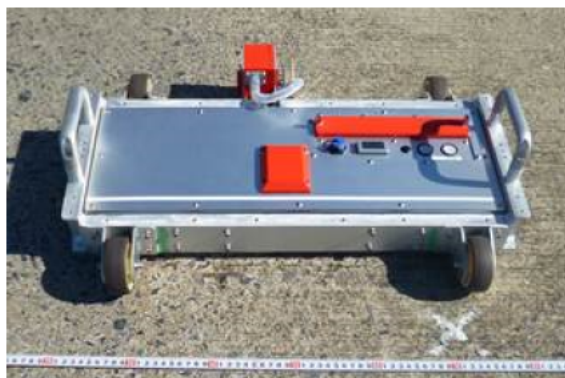


写真-3.2.6 磁気計測装置（Ⅱ型）

400mm離れた位置での3箇所磁石ユニットを供試体の端から端へ往復移動させ着磁を実施した（図-3.2.4では対象ダウエルバーは供試体の左側がS極、右側がN極になる）。磁束密度の測定は、対象ダウエルバーのS極側を起点に、N極側へ向かって実施することを基本とした。

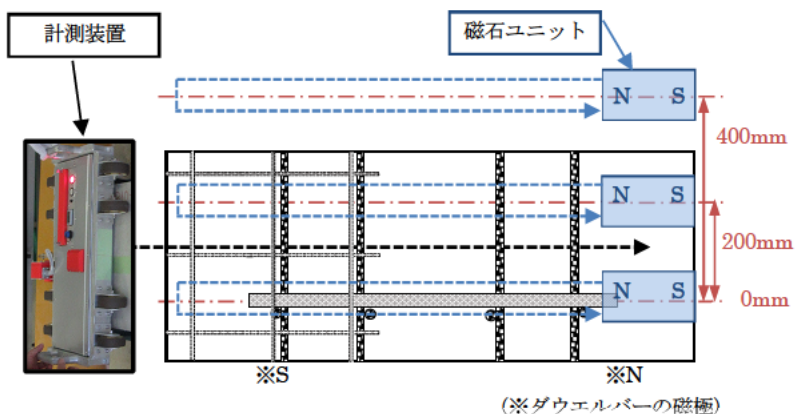


図-3.2.4 着磁方法

測定方法（着磁方向、供試体の磁極方向）が異なる場合の影響、模擬破断部の隙間、ダウエルバーのかぶりの違いによるダウエルバーの破断検知可否、対象ダウエルバー近傍のダウエルバーが与える影響、そして実道での適用性を評価するため、以下の①～④の条件で測定を実施した。

①測定方法（着磁方向、供試体の磁極）が異なる場合の測定

コンクリート舗装版内の磁性体である鋼材は、ダウエルバーのほかに、鉄網、チェアが存在する。漏洩磁束法は、ダウエルバーを磁化させ、その磁束密度を測定するため、他の磁性体が測定に影響を与える可能性が考えられる。

そこで、鉄網の存在が測定結果に与える影響を検討するため、図-3.2.5、表-3.2.4に示す測定条件により、健全である供試体（S-25）を用いて、測定条件が異なる場合での磁束密度の違いを検討した。

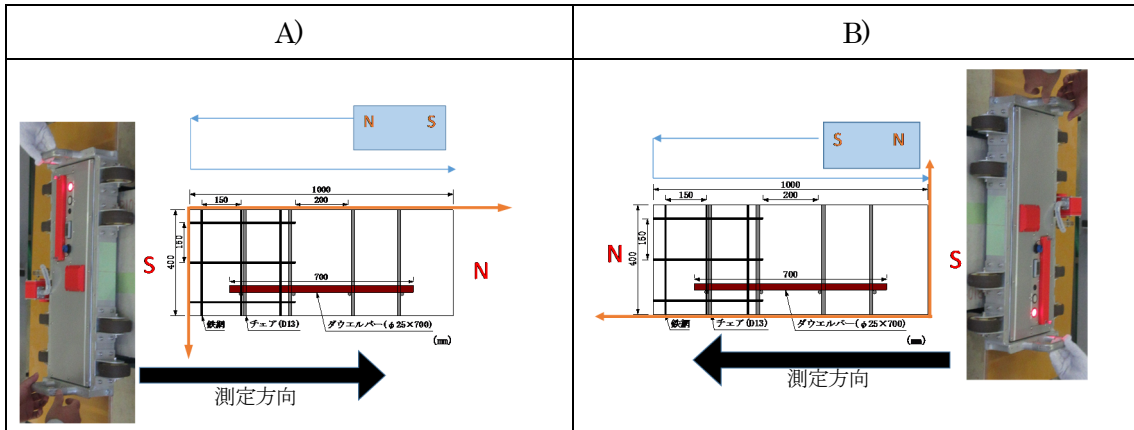


図-3.2.5 供試体の磁極の向き

※ ← : 距離の方向性

表-3.2.4 測定番号と測定条件 (対象 : S-25)

測定番号	供試体の磁極	測定条件
11A11B	A)	図-3.2.5 に示す基本条件で実施。
21A11B		11A11B と着磁方向が逆。
11A21B		着磁距離を増加 (193cm)。
21A21B		11A21B と着磁方向が逆。
11A31B		着磁を鉄網上で終了した場合。
11A41B		着磁箇所を 0、250、500mm
11A51B	B)	図-3.2.5 に示す条件で、供試体の磁極、計測機の測定方向を逆にした条件で実施。
11A61B		11A51B と着磁方向が逆。

②供試体条件 (模擬破断部の隙間、かぶり) が異なる場合の測定

表-3.2.2 に示す、かぶり、ダウエルバーの模擬破断隙間によって、破断の検知が可能か検討を行った。

③測定方法（供試体を並べた状態）が異なる場合の測定

測定対象ダウエルバー近傍の他のダウエルバーが測定結果に与える影響を検討するため、測定方法（供試体を並べた状態）が異なる状態で測定を実施した。

図-3.2.6に示すように、実道のコンクリート舗装版目地部のようにダウエルバーが400mmの間隔で設置された状態を想定して、版厚25cmの供試体3体を隙間なく並べた状態で対象供試体（対象供試体：a) S-25、b) B0-25）を測定し、測定対象以外のダウエルバーが測定結果に与える影響を検討した。

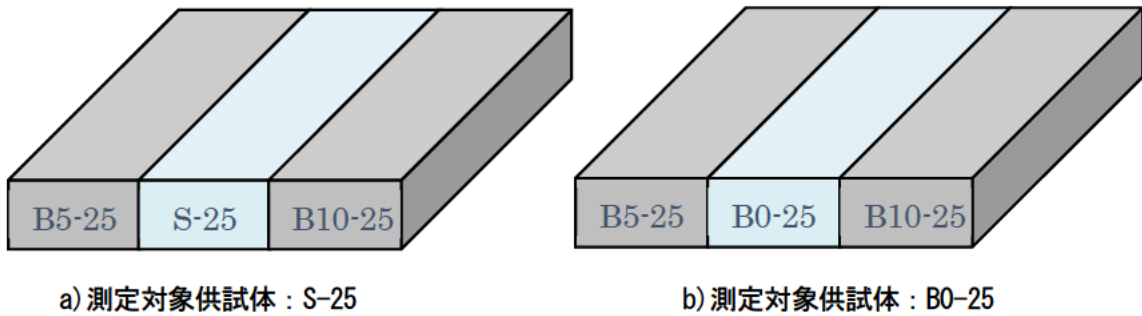


図-3.2.6 供試体の配置方法

④舗装走行実験場（実大供試体）での測定

実道での適用性を評価するため、写真-3.2.5、図-3.2.3に示す土木研究所内舗装走行実験場で測定を実施し、各目地のダウエルバーの破断有無を推定した。

着磁位置、測定位置を写真-3.2.7に示す。着磁位置は供試体測定時と同様に、対象ダウエルバーの直上（基準）とそこから200、400mmの位置で着磁を実施し、着磁距離は目地奥側（リーブ版側）500mmから目地手前（アプローチ版側）500mmの範囲を目地奥側（リーブ版側）から1往復させた。測定は、目地手前（アプローチ版側）1000mmから目地奥側（リーブ版側）1000mmまでの2000mmを測定した。

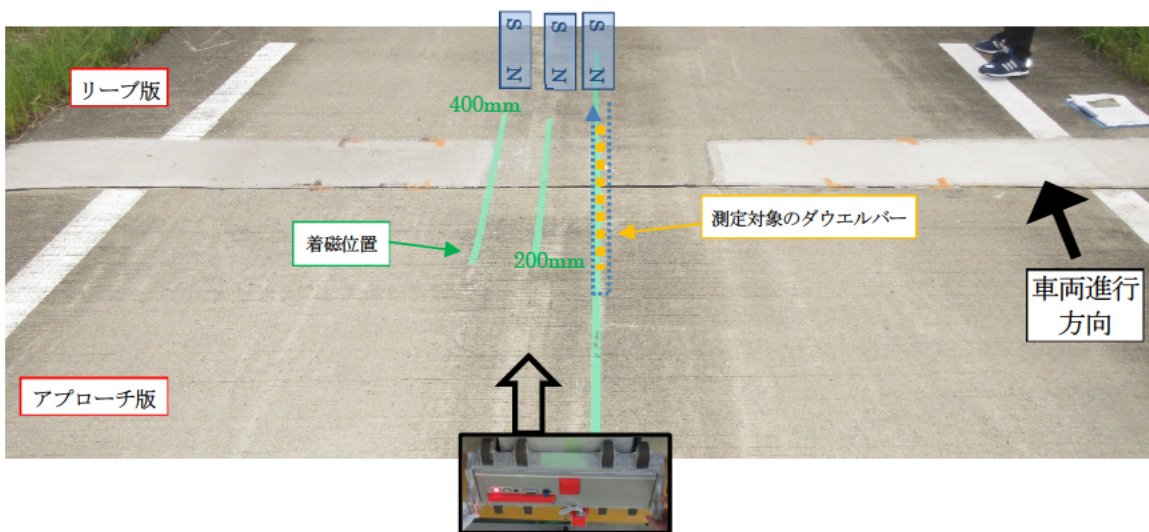


写真-3.2.7 着磁位置及び測定位置

(2) 漏洩磁束法による実験結果

1) 測定条件（着磁方向、供試体の磁極方向）が与える影響

①各測定条件での測定結果

健全な供試体である S-25 の測定結果を図-3.2.7 に示す。

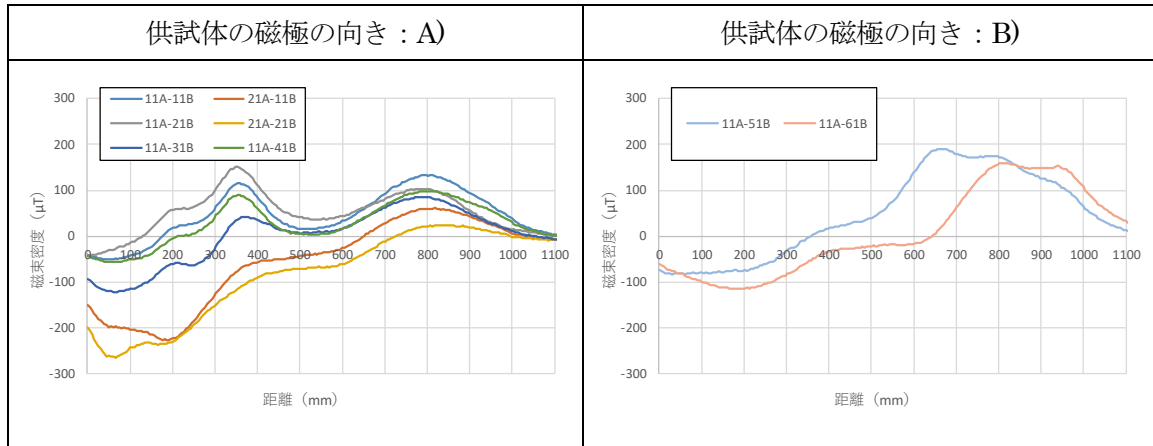


図-3.2.7 測定条件ごとの結果

供試体の磁極が S 極から N 極の方向へ測定しているため、破断のない S-25 では、ダウエルバーの位置する約 150～850mm 区間の磁束密度は、一般的には右上がりの波形を示す。

供試体の磁極が A) の向きでは、鉄網無側から着磁を実施した (11A11B、11A21B、11A31B、11A41B) では、鉄網の影響により 300～400mm 付近で山型の波形となり、鉄網の影響を受けていることがわかる。一方で、鉄網側から着磁を実施した場合 (21A11B、21A21B) は、300～400mm 付近に山型の波形は見られず、鉄網による大きな影響は確認できなかった。また、着磁距離、位置を変えた場合 (11A21B、11A41B) では、大きな変化は確認できなかった。

供試体の磁極が B) の向きでは、着磁の向きに関わらず、0～500mm 程度までは変化がなかったが 500mm 以降で山型の波形を示し、着磁の方向によってその山型を示す距離（位置）が異なった。

以上より、着磁方向や測定の向きにより鉄網の影響を大きく受け、測定結果は測定条件により大きく影響を受けた。

②補正式の検討

供試体内の磁束密度分布を把握するため、代表的な例として、11A11B での磁束密度分布を図-3.2.8 に示す。

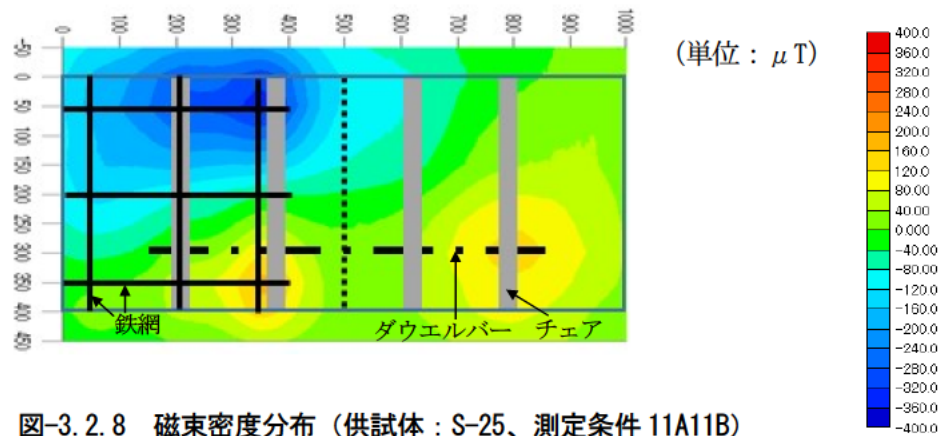


図-3.2.8 磁束密度分布（供試体：S-25、測定条件 11A11B）

磁束密度の分布は、ダウエルバーのある供試体単辺方向300mm位置の値よりも、供試体の端(400mm)に近い350mm位置での値の変化の方が大きく、これが鉄網等の影響を多く含んでいると考えられる。そこで300mmよりも350mm位置の方がその影響をわずかに多く含んでいると考え、その差に係数を掛けて差し引くことでこの影響を緩和することを試み、下記の補正式による検討を行った。

$$\begin{aligned} \text{補正後の300mm位置の値} &= \text{300mm位置の値} \\ &\quad - \text{係数} \times (\text{350mm位置の値} - \text{300mm位置の値}) \end{aligned}$$

ここで、式中の300mm位置、350mm位置は走行方向位置（グラフ横軸）ではなく、走行直角方向の供試体短辺方向位置。従って300mm位置はダウエルバー上である。値は、磁束密度 [μT] である。

健全な供試体であるS-25と破断を模擬したB10-25に補正式を適用し、補正式の係数に1.5、2、3、4を適用した場合の磁束密度を図-3.2.9に示す。

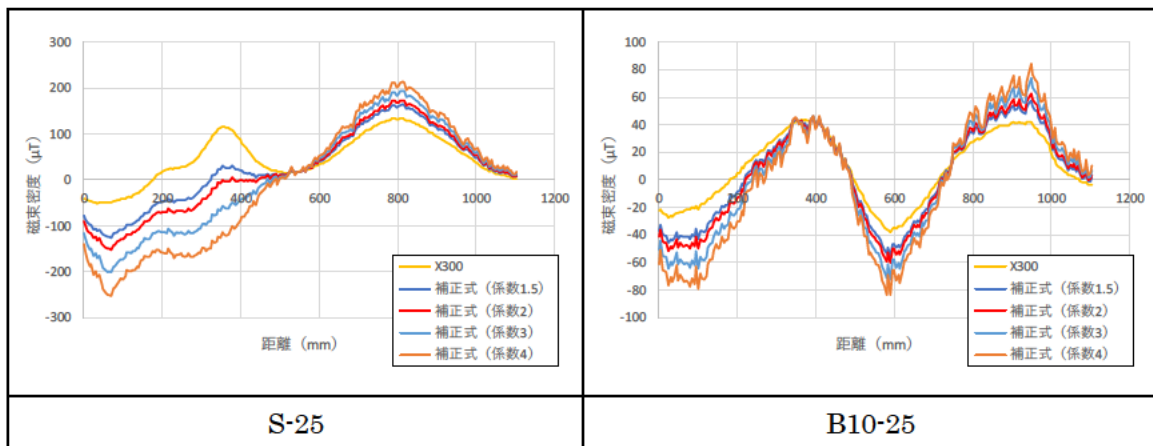


図-3.2.9 係数の検証

破断のないS-25では、補正式を適用することにより、300mm付近での山型が低くなり、その他の部分では大きな変化は確認できなかった。また、係数が1.5~4の範囲内では、係数が大きくなると300mm付近の磁束密度は低くなった。

模擬破断距離10mmであるB10-25では、係数によらず500mm付近での破断を示すS字カーブが確認され、係数の違いによる顕著な影響は確認できなかった。

以上より、破断のない供試体では、緩やかに右上がりを示す波形が理想的と考え、係数2の採用が、妥当であると判断した。

② 補正式妥当性の検証

補正式の妥当性を確認するため、図-3.2.7に示した測定結果に補正式を適用した結果を図-3.2.10に示す。

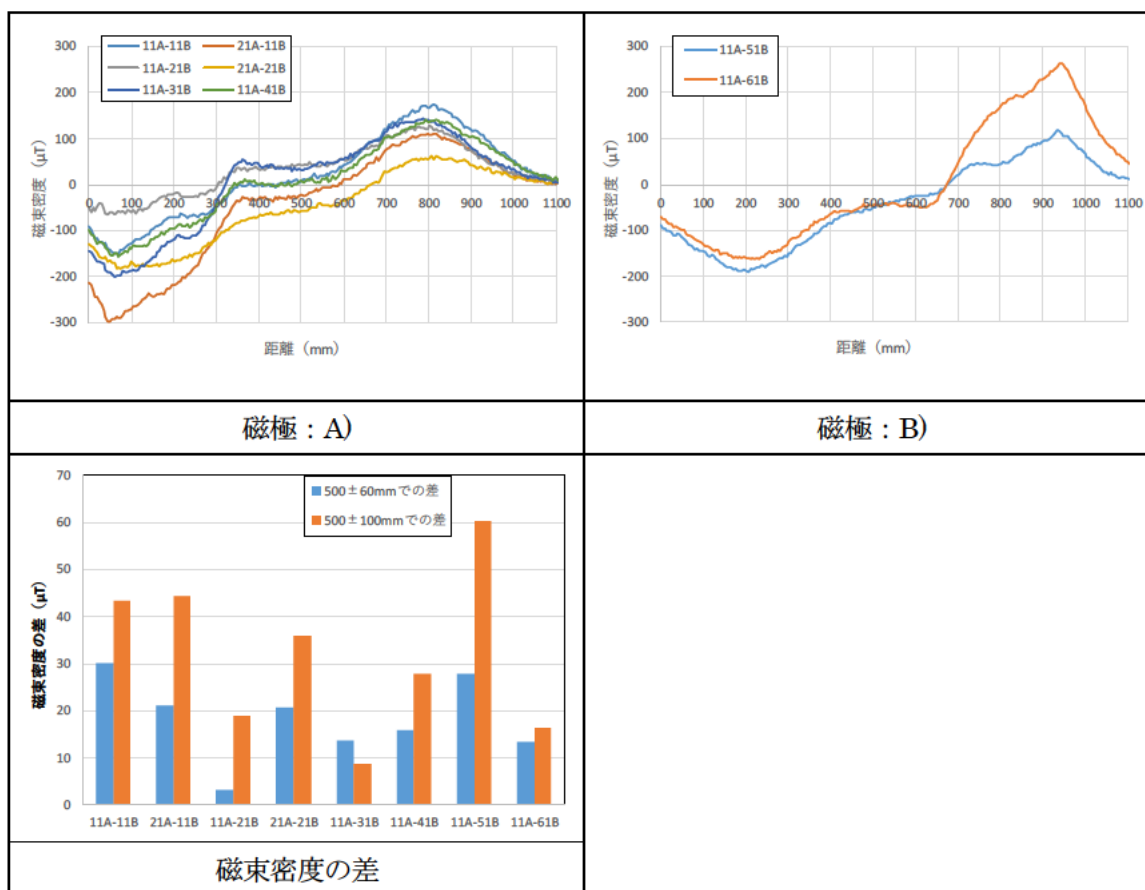


図-3.2.10 各測定条件の補正結果

図-3.2.7と比較すると、図-3.2.10に示す測定波形では300mm付近の鉄網による影響は低減され、比較的同じ傾向を示す波形を示した。

また、健全なダウエルバーでは右上がりの波形を示し、破断を示すダウエルバーでの測定波形は、500mm位置の前では山型、500mm位置の後では谷型のS字型波形を示す。そこで、500mmを中心とした前後の磁束密度の差をとり、プラスの場合は健全、マイナスの場合は破断を示すと考え、併せて、図-3.2.10に磁束密度の差を示す。磁束密度の差は、各測定条件で値の差はあるものの、供試体中心より±60、100mmい

ずれの測定条件でもプラスの値を示した。

以上より、測定条件による鉄網の大きな影響は、補正式により著しく低減され、測定結果は測定条件に拘らず同様の傾向を示したことから、今回の供試体を用いた測定では、測定条件に大きく依存せず評価可能と考えた。以降での測定結果は補正を実施した場合で検討を行った。

但し、本件で用いた補正式は、本件で用いた供試体のみでの評価であるため、汎用的に用いる補正方法が確立できれば、本件で用いた供試体だけでなく他の形状にも適用できる可能性があり、汎用性が増加する、と考えられる。

2) 供試体条件（模擬破断部の隙間、かぶり）が異なる場合の影響

供試体の磁極が A の場合での測定結果を図-3.2.11、供試体の磁極が B の場合での測定結果を図-3.2.12 に示す。

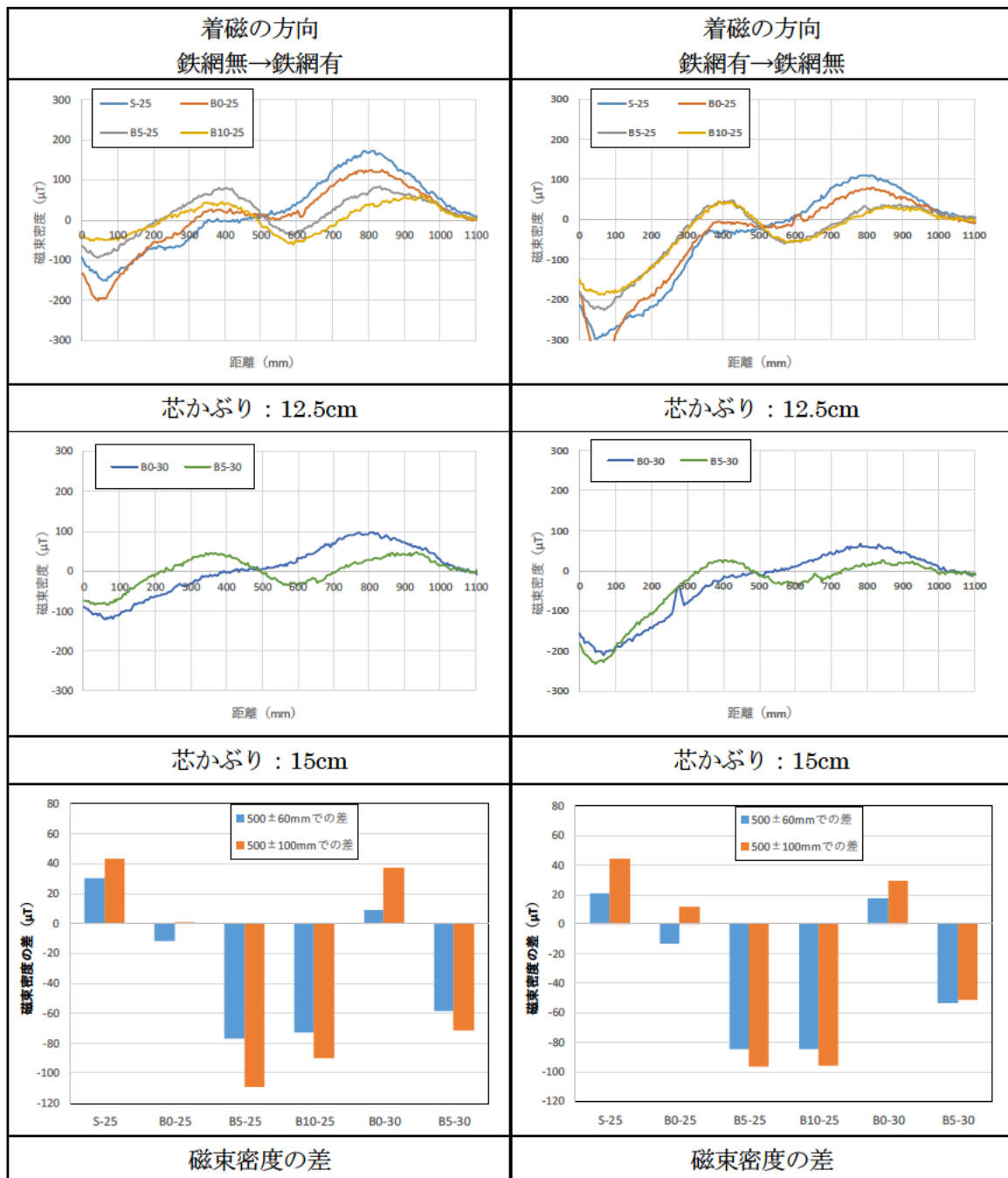


図-3.2.11 各供試体の測定結果（磁極：A）

図-3.2.11 によると補正後の測定波形及び磁束密度の差は、着磁の方向に依存せず、同様の傾向を示した。横軸 300～700mm 付近の測定波形は、全ての供試体で 500mm 位置を中心に概ね点対称な波形を示した。

破断位置 500mm を中心とした 400～600mm 付近に着目すると、芯かぶり 12.5cm の供試体では、S-25 では緩やかな右上がりの波形を示し、健全な場合の波形を示した。B0-25 では、僅かではあるが、右下がりの波

形を示した。B5-25、B10-25 では、400mm 付近に山型、600mm 付近に谷型の波形を示し、破断している場合の波形を示した。

芯かぶり 15cm の供試体では、B0-30 は緩やかな右上がりの波形を示し、B5-30 は 400mm 付近に山型、600mm 付近に谷型の波形を示し、破断している場合の波形を示した。

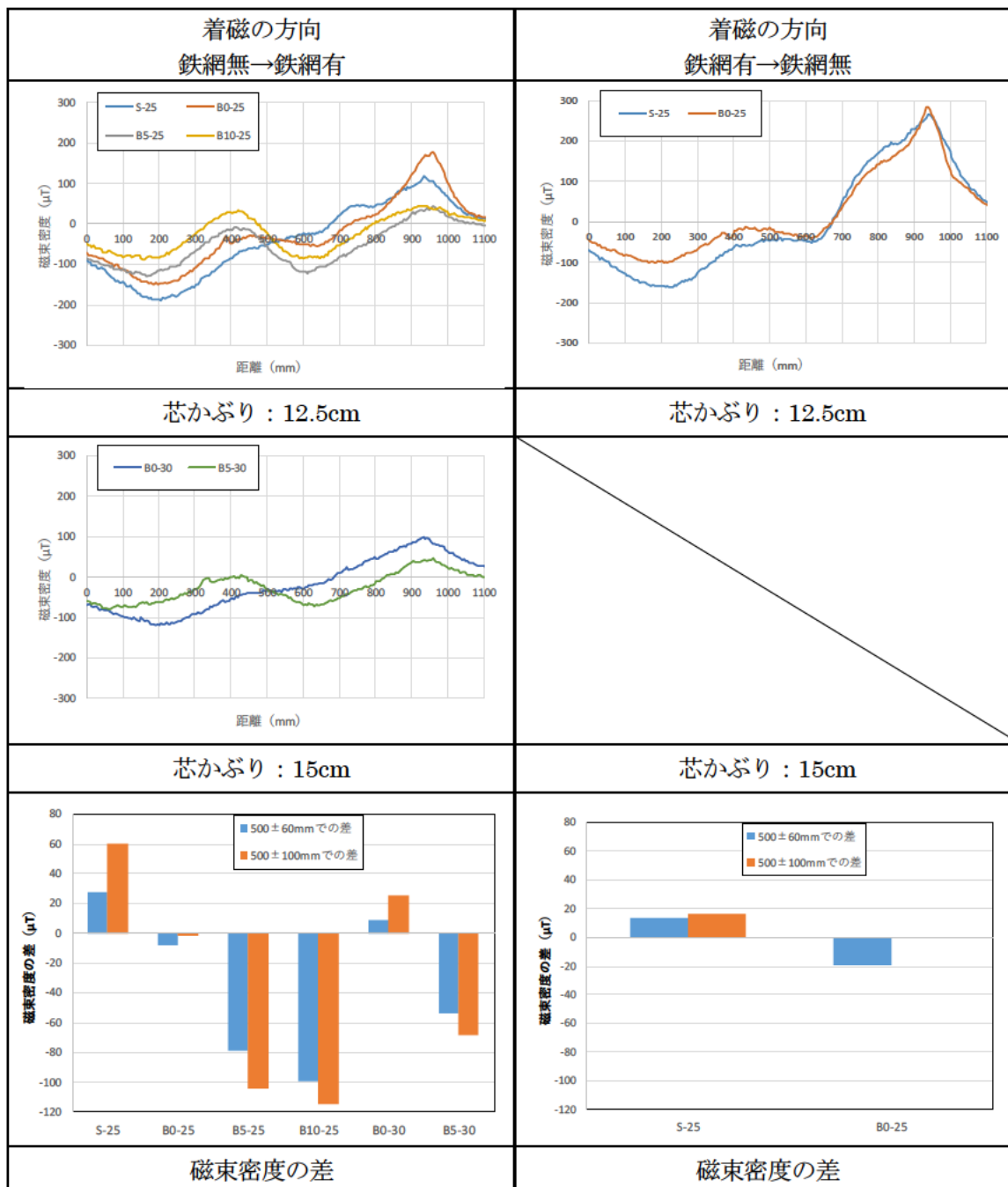


図-3.2.12 各供試体の測定結果 (磁極 : B)

図-3.2.12では、健全であるS-25では着磁の方向が変わった場合、磁束密度の差は多少低い傾向を示したが、その他の場合での測定波形及び磁束密度の差は、着磁の方向に依存せず、同様の傾向を示した。また、磁極の向きが異なる図-3.2.11と図-3.2.12を比較しても、同様の傾向を示し、補正式の適用により測定条件の影響を緩和できていることが再確認できる。

破断位置500mmを中心とした400～600mm付近の測定波形に着目すると、図-3.2.11と概ね同様の傾向を示した。

供試体中心の磁束密度差から、ダウエルバー破断を推定すると、隙間が5、10mmの場合は破断、かぶりと磁束密度の差分をとる距離によっては、隙間が0mmの場合は測定条件により破断と健全が混在する結果であった。

以上より、現状では漏洩磁束法によりダウエルバーの破断を推定する場合、隙間が5mm以上であれば破断検知可能と考えられる。但し、隙間0mmの場合でも、健全な供試体とは異なる波形を示していることから、健全と破断を示す閾値の更なる検討、補正式の精度向上、かぶり深さによる影響の検討を重ね、適用範囲の設定することによって、ダウエルバーの破断検知手法として適用できる可能性がある。

3) 測定方法（供試体を並べた状態）が異なる場合の影響

測定対象ダウエルバー近傍の他のダウエルバーが測定結果に与える影響を検討するため、並べた状態での測定結果を図-3.2.13に示す。図中には比較のため、単体での測定結果も併せて示した。

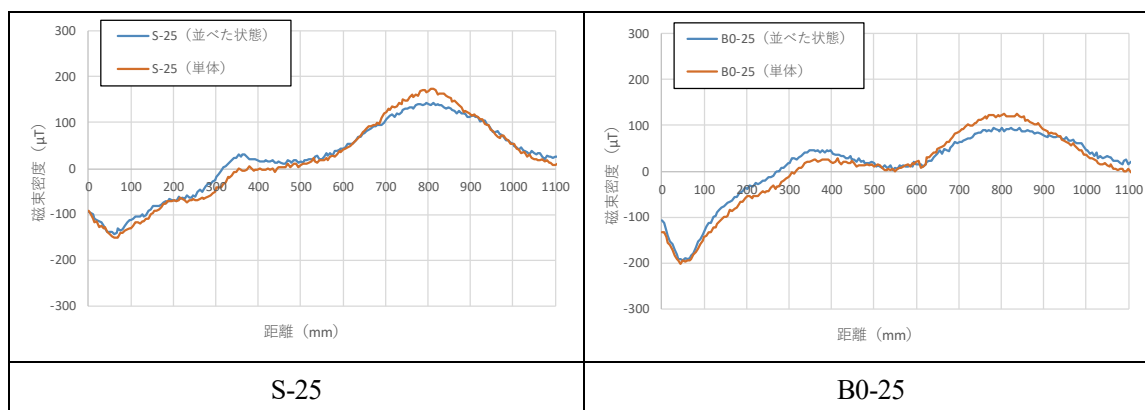


図-3.2.13 単体と並べた状態での測定結果の比較

S-25、B0-25共に単体での測定結果と比較し、並べた状態でも同様の測定波形を示したことから、測定対象ダウエルバー近傍の他のダウエルバーの影響は受けないことがわかった。

4) 舗装走行実験場（実大供試体）での測定

(単位: μT)

舗装走行実験場目地部の磁束密度分布を把握するため、一例として、目地②の磁束密度分布を図-3.2.14に示す。供試体の磁束密度分布は、鉄網やチェアーの影響により供試体端部に近い50mm、350mm位置付近にピークを示したが、舗装走行実験場の目地部の磁束密度分布は、供試体よりも外側にピークを示し、今回の測定範囲内では、最外の-50mm、450mm位置付近であり、供試体と舗装走行実験場では異なる磁束密度分布を示した。これは、鉄網やチェアーの鋼材類の配置（長さ）が異なるためと推定される。よって、鋼材の配置により磁束密度の分布が異なるため、鋼材配置条件ごとに専用の補正が必要であることを示唆している。

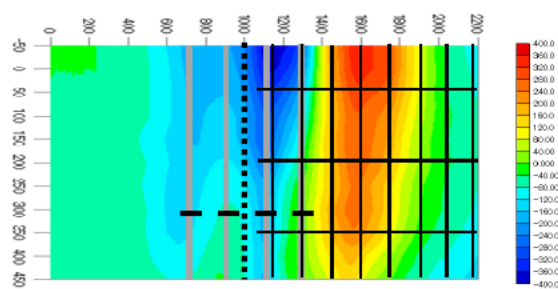


図-3.2.14 磁束密度分布（目地②）

ここでは、測定結果の波形のままの簡単な比較と、あくまで参考として供試体で得られた補正処理を実施した結果の比較を行い、舗装走行実験場内の目地①～⑥におけるダウエルバーの破断を推定した。

図-3.2.15に測定結果、図-3.2.16に補正処理後の測定結果、図-3.2.17に目地位置での磁束密度の差を示す。

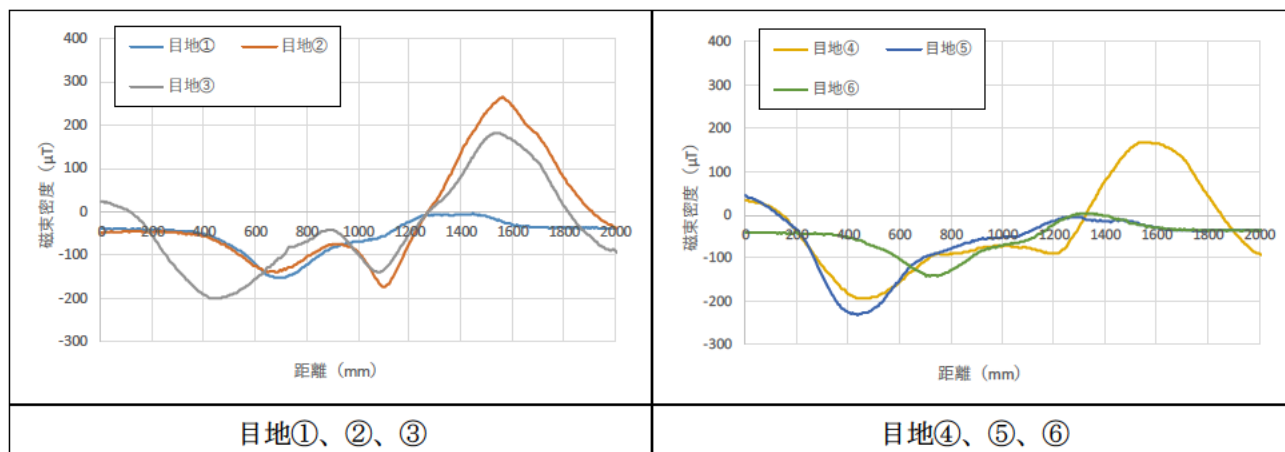


図-3.2.15 測定結果

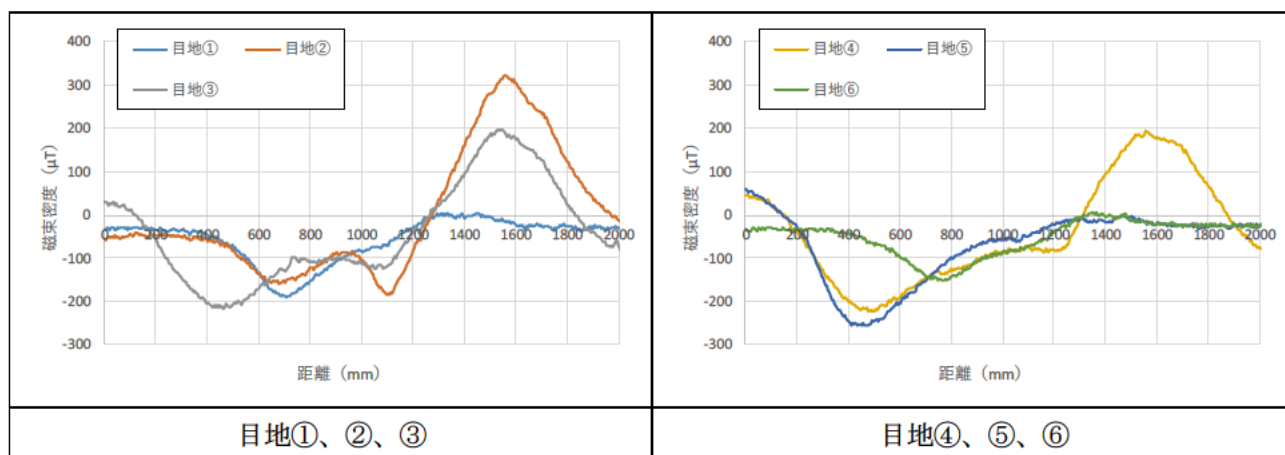


図-3.2.16 補正処理後の測定結果

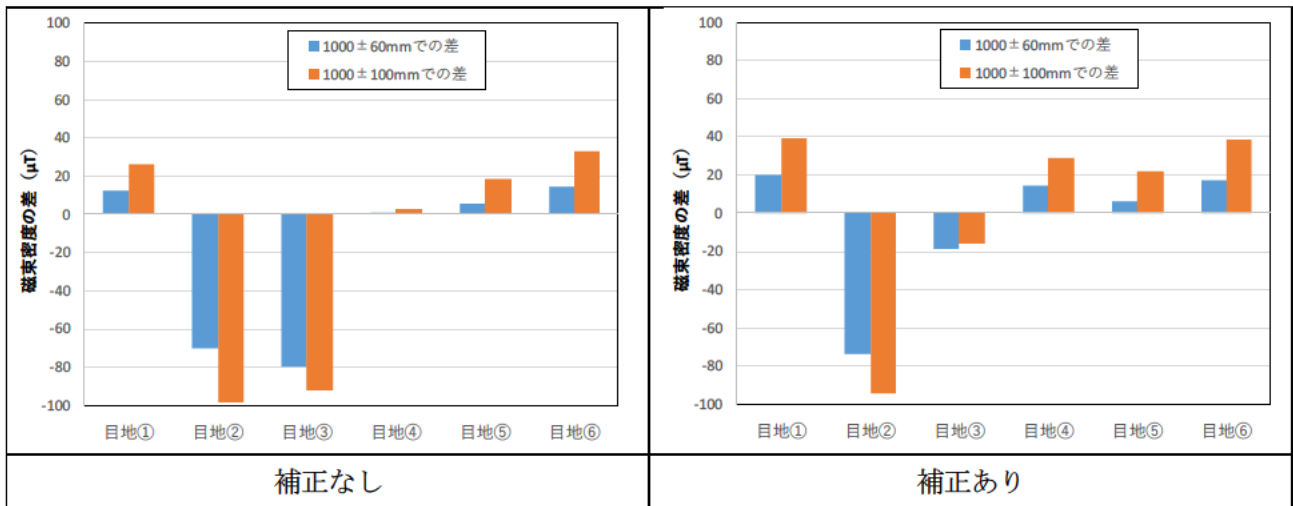


図-3.2.17 磁束密度の差

鉄網が無い目地（目地①、目地⑥）では、横軸 700mm 付近にピークを持つ谷型波形、横軸 1300mm 付近にピークを持つ山型波形が表れている。これはダウエルバーの端部に対応するものと考えられる。アプローチ版に鉄網が有る目地（目地③、目地④、目地⑤）では横軸 400mm 付近にピークを持つ谷型波形、リーブ版に鉄網がある目地（目地②、目地③）では横軸 1600mm 付近に大きなピークを持つ山型波形が表れており、鉄網の影響が大きく表れていることがわかる。

目地①、⑤、⑥では、目地位置である横軸 1000mm 付近では緩やかな右上がりの磁束密度を示し、磁束密度の差もプラスを示したことから、ダウエルバー破断の可能性は低いと推察できる。

目地②では、横軸 1100mm 付近に谷型波形を示したが、アプローチ版側である 900mm 付近には山型の分布は認められなかった。また、横軸 1100mm 付近の谷型波形は補正処理によっても低減されなかった。磁束密度の差はマイナスの値を示し、仮に破断している場合、破断隙間は 5mm 程度以上の可能性が高い。しかし、波形が山側のない谷型波形であり、目地位置を中心に点対称の波形となっていないため、ダウエルバー破断以外の影響と考えられ、破断の可能性は低いと推察した。

目地③では、横軸 900mm 付近に山型、1100mm 付近に谷型波形を示し、目地位置を中心に点対称な波形を示した。さらに磁束密度の差分もマイナスを示したことから、ダウエルバー破断の可能性が考えられる。

目地④では、横軸 1100mm 付近に谷型波形が見られるが、900mm 付近に山型分布は見られず、目地位置を中心とした点対称とはなっていないため、ダウエルバーの破断の可能性は低い、と推察できる。

以上より、漏洩磁束法により舗装走行実験場の目地①～⑥におけるダウエルバーの破断を推定した結果を表-3.2.5 に示す。

表-3.2.5 漏洩磁束法によるダウエルバー破断推定結果

目地 No	目地①	目地②	目地③	目地④	目地⑤	目地⑥
ダウエルバー破断の可能性※	無	無	有	無	無	無

※：供試体での補正処理を本来適用外である舗装走行実験場に適用した結果であるため、参考値である。

(3) まとめ

ダウエルバーの破断を模擬した供試体と舗装走行実験場を用いて、漏洩磁束法により、ダウエルバーの破断検知可能かを評価した結果、以下のことがわかった。

- ・鋼材の配置条件により磁束密度分布は影響を受け、着磁方向や測定の向き等の測定条件により測定結果は大きく影響を受けた。しかし、鋼材配置が既知であれば、ダウエルバー直上のセンサー以外のセンサーの値を用い、補正処理することで、その影響を低減できる可能性があった。
- ・ダウエルバーの破断を模擬した隙間を設けて検討した結果、隙間が 5、10mm の場合は破断検知可能であったが、隙間 0mm の場合は測定条件により破断と健全が混在する結果であった。
- ・測定対象ダウエルバー以外のダウエルバーが測定結果に与える影響を検討した結果、測定対象ダウエルバー近傍の他のダウエルバーの影響は低いことがわかった。
- ・目地を模擬した供試体と舗装走行実験場の目地部では、磁束密度の分布は異なった。これは、鉄網などの鋼材配置条件が同一でないため、と考えられる。よって、鉄網などの鋼材配置条件ごとに磁束密度分布を把握しておくことで、ダウエルバー以外の影響を低減するための適切な補正処理の適用が可能と考えられる。

(4) 今後の課題

本検討結果を受けて、今後の課題を以下に記載する。

1) 補正処理の汎用性の向上

本検討では、ダウエルバー、鉄網、チェアーの鋼材配置が既知の条件で実施したため、ダウエルバー近傍の磁束密度を用いて、補正処理によって鉄網の影響を低減することが可能であった。

一般的に、コンクリート舗装では、 $\phi 25\text{mm}$ 長さ 700mm のダウエルバー、 $\phi 6\text{mm}$ 格子間隔 150mm の鉄網が用いられる。よって、これらの配置による磁束密度分布を把握しておくことで、実道においても鉄網の影響を低減させる補正処理を実施できる可能性がある。

但し、ダウエルバーの位置は、電磁波レーダー等の非破壊検査で探査可能であるが、鉄網の位置を非破壊検査で特定することは不明確な部分が残る。よって、鉄網の位置が不明確でも、対応できる工夫が必要である。

2) 破断隙間 0mm での検知

本検討では、単純に目地位置前後での磁束密度の差分により、破断か健全かを判断した。しかし、本結果では隙間 0mm では、破断と健全が混在する結果となり、確実な破断検知は難しい結果であった。

一方で、測定波形を確認すると、健全と隙間 0mm では異なる測定波形を示していることから、適切に判断できる条件や閾値を設定することで、隙間 0mm でも破断検知できる可能性がある、と考えられる。

参考文献

- 1) 若林ほか：有限要素法を用いたコンクリート舗装の目地部評価に関する検討，土木学会第 72 回年次学術講演集，V-111，p221-222，2017
- 2) KEYTEC 株式会社：電磁波レーダ波形の読み取り方，<http://www.key-t.co.jp/resources/rader-tecinfo/rader10/>
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'10[基礎編]，2010
- 4) 唐木ほか：電磁波レーダを用いた Co 床版の損傷箇所検出方法について，第 32 回日本道路会議，No.3071，2017
- 5) 廣瀬ほか：漏洩磁束法によるポストテンション実橋における PC 鋼材破断調査，プレストレストコンクリート工学会第 23 回プ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，p.467～470，2014 年 10 月
- 6) 調査要領：東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社，平成 29 年 7 月
- 7) 萩原ほか：実験による漏洩磁束法の適用性検証，プレストレストコンクリート工学会 第 24 回プ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，p.283～286，2015 年 10 月

3.3 MMS を用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討

3.3.1 はじめに

コンクリート舗装の目地部は雨水の浸入のリスクが高く、コンクリート版下の路盤の支持力低下やダウエルバーなどの目地金物の腐食・破断に伴う荷重伝達機能の低下などにつながるおそれがあるため、構造上の弱点になると認識されている。目地部において荷重伝達機能が低下すると、ポンピング作用により版下に空洞が発生し、最終的に段差が生じる。そのため、段差が生じている箇所について早期に把握し、措置を講ずることがコンクリート版の高耐久性を維持するために重要と考えられる。現在、目地部の段差の測定方法は、舗装調査・試験法便覧「S031 舗装路面の段差の測定方法」¹⁾ に示す、2本のスケールを用いて測定する手法が一般的であるが、交通規制が必須であるうえ、スケールを当てる位置などにより測定値にバラつきが生じる。また、段差についての交通規制を必要としない簡易な評価手法としては、加速度を用いた手法が知られているが、加速度は段差以外にも路面上の様々な要素の影響を受ける。

本検討では、交通規制を要せずに効率的かつ、より精緻に段差を定量的に評価できる可能性のある技術の1つとして、MMS (Mobile Mapping System) に着目し、土木研究所舗装走行実験場内のコンクリート舗装目地部を対象に、プロファイラとMMS から算出した段差の比較を行った。

3.3.2 実験方法

(1) 測定箇所

図-3.3.1 に本研究の測定対象箇所の概要を示す。場所は土木研究所舗装走行実験場の試験走路のうち、コンクリート舗装の10m 区間である。片方の端部はダウエルバーを用いない突合せ目地構造で他のコンクリート版と接続しており、もう片方の端部はアスファルト舗装と接続している。また、コンクリート版の中央は目地板およびダウエルバーを使用した膨張目地構造となっている。以上3箇所について、それぞれ図-3.3.1 に示す7測線(延長1m)の縦断プロファイルを取得し、比較した。

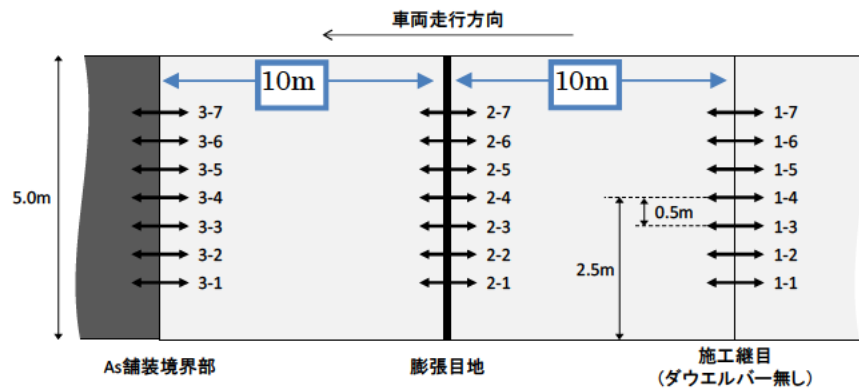


図-3.3.1 測定箇所概要

(2) 測定方法

上記に示した測線について、路面プロファイラおよびMMS を用いて測定を行い、路面のプロファイルを取得した。

1) MMS による測定方法

MMS は車両に搭載された高密度レーザスキャナにより取得した膨大な3次元点群データの中から、同時

に撮影している路面の写真などを使用し測線を特定し、レーザ特有の点群のバラツキを抑えるため、測線を中心に左右 5cm の範囲内にある点群の平均をその測線の点とし、測線のプロファイルとした。

2) 路面プロファイラによる測定方法

図-3.3.2 に使用した路面プロファイラの外観を示す。このプロファイラは、梁に沿って移動する架台に設置されたレーザ変位計を用いて、測線上の路面の高さを連続して測定する形式のものである。連続した 0.5mm 毎の値を読み取り、測定値とした。



図-3.3.2. 路面プロファイラ

(3) 段差の算出

図-3.3.3 に MMS および路面プロファイラから取得した縦断プロファイルによる段差算出方法を示す。測線中央から前後 300mm の範囲を対象に、得られた路面プロファイルで直線回帰を行い、それぞれの回帰区間中央部の高さの差を段差と定義した。なお、測定区間中央には目地が存在

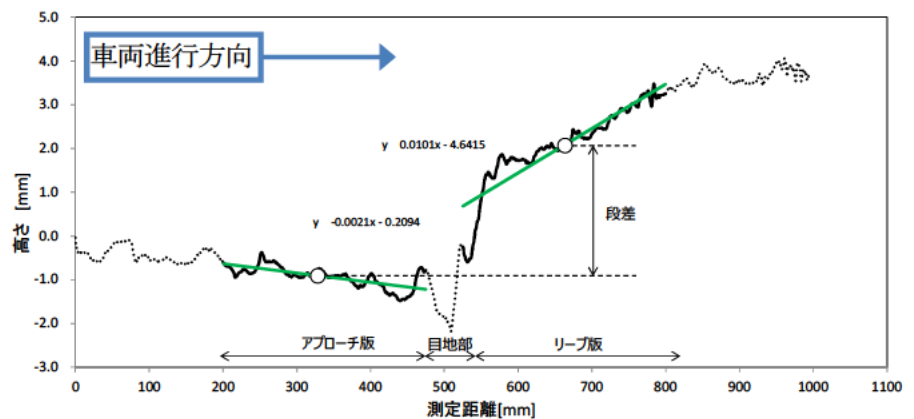


図-3.3.3 縦断プロファイルによる段差の算出方法

し、直線回帰を行う際に影響を受けてしまうため、施工継目とアスファルト舗装の境界部については 50mm、膨張目地については 100mm の区間を除外して回帰を行った。

また、今回は前後 300mm の区間で回帰を行ったが、この範囲を変えれば段差の大きさは変化する。一般的に用いられるスケールを用いた測定方法についても、同様にスケールの長さや測定位置によって値が変化するため、定量的な評価を行う上で統一を図る必要があると考えられる。

3.3.3 測定結果

図-3.3.4にMMSによる段差算出結果を示す。MMSによる測定は5回行った。値のバラつきは最大で10mm程度存在するが、他の値に比べ誤差の大きい値のほとんどは、同じ1回の測定で得られた結果であった。これは、取得した測線の点群データの位置のずれ

や、特質な凹凸（飛散した骨材やキメ部など）が起因したものと推察される。続いて、プロファイラとMMSでそれぞれ算出した段差を比較した。図-3.3.5に結果を示す。MMSの段差については上述の通り測定によるバラつきがあるため、最大値と最小値を除いた3つの測定データの平均値を採用した。プロファイラから算出した値に対して2~3mm以内の誤差の範囲内に留まっており、この範囲内の評価であればMMSでも十分段差を評価可能であると考えられる。

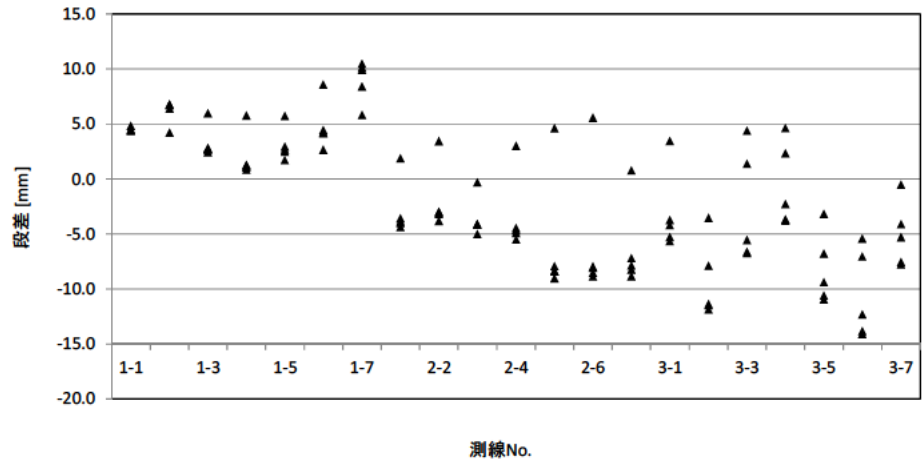


図-3.3.4 MMSによる段差算出結果

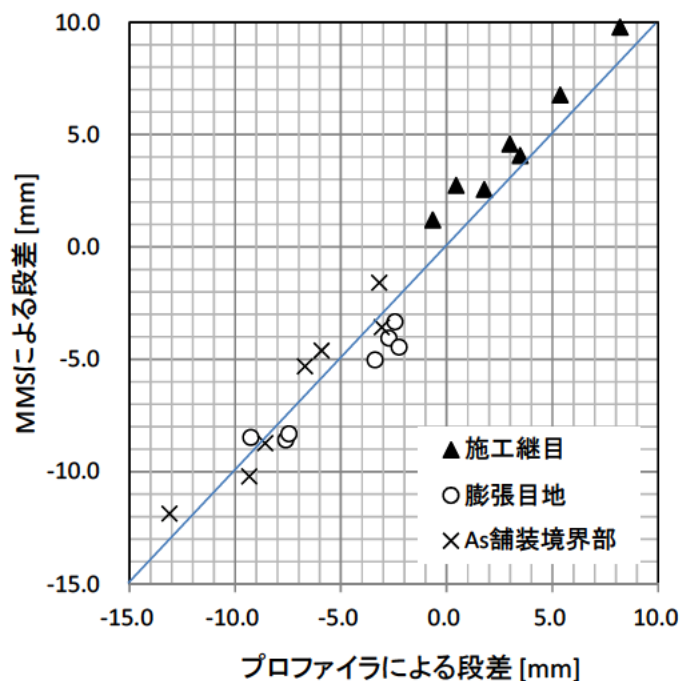


図-3.3.5 プロファイラとMMSの比較

3.3.4 おわりに

本検討では、コンクリート舗装の段差を効率的に取得する手法の1つとして、MMSに着目し、路面プロファイラとの比較を行った。その結果、複数回測定を行うことで路面プロファイラによって算出した段差に対して2~3mm以内の誤差で測定が可能であることが分かった。一方、段差量と目地部の構造的な損傷についての関係について必ずしも明確になっていないため、得られた段差に関するデータと目地部の構造的な損傷の関係性について、さらに検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、S031 舗装路面の段差の測定方法、平成19年6月8日

3.4 動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping) を用いた国道におけるコンクリート版下の健全性評価

3.4.1 目的

コンクリート舗装において、空洞箇所等の損傷箇所を検出するために、電磁波レーダや FWD によるたわみ量を用いた検討を行っている。しかしながら、電磁波レーダでは、コンクリート舗装内の鉄筋や、目地の影響があることから、損傷を検出することが難しい。また、コンクリート舗装では、荷重の載荷位置によりたわみ量が大きく変化することから、たわみ量から損傷箇所を検出する方法は、目地部やクラック発生位置しか報告がない。

ここでは、コンクリート舗装版下の損傷の一つである空洞を検出する方法について検討を行った。検討の具体的方法は、FWD 試験装置で 0.5m ピッチで測定したコンクリート版の D_0 たわみ曲線を用い空洞が存在するコンクリート版を検出できるのか検証を行った。判定方法として、測定された D_0 たわみ曲線と健全なコンクリート版の D_0 たわみ曲線との違いを、音声認識の分野で利用されている、動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping : DTW)を用い、その値から空洞箇所を検出可能であるか検討を行った。

また、供用中の幹線道路について、同じように D_0 たわみ曲線を用い、損傷があるかどうかの検討を行った。

検討結果を以下に示す。

3.4.2 損傷箇所検出方法

異常検出方法としては、音声分野で使用されている DTW を用いた。DTW の計算方法を式 (3.4.1) に、計算概要を図-3.4.1 に示す。通常は、図-3.4.1 の上の図に示すように、同時刻の絶対差の合計値の大小から相似性を判断する。そのため、位相がある場合では、相似性を求めることが出来ない。

DTW は、2つの時系列の各点の距離を総当たりで比較し、2点の距離が最短となる距離の合計 (DTW 距離) の大小で相似性を判断するため、位相がある場合でも、相似性を比較することが出来る。

今回の計算では、X軸を時系列ではなく、目地からの距離として、たわみ曲線同士の DTW 距離を計算した。このことで、目地間隔が異なっても計算することが可能となる。

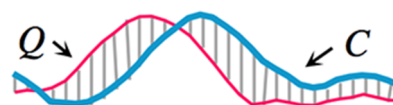
測定たわみ曲線 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

基準たわみ曲線 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$

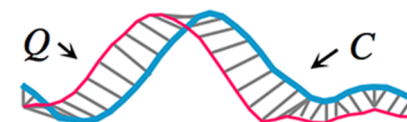
$D(X, Y) = f(n, m)$

$$f(t, i) = \|x_t - y_i\| + \min \begin{cases} f(t, i-1) \\ f(t-1, i) \\ f(t-1, i-1) \end{cases} \quad \text{式 (3.4.1)}$$

初期条件 $f(0, 0) = 0, f(t, 0) = f(0, t) = \infty$



2つの時系列について、相関があるか調べる場合、一般的には上図のように同時刻における絶対差の合計距離から判断する。しかしながら、周期が異なる時系列では相関がでない。



DTW では2つの時系列の各点の距離を総当たりで比較した上で、系列同士の距離が最短となるパスを見つける。これが DTW 距離になる。DTW の特徴として2つの系列の周期性および時間が違って、DTW 距離が計算できる。

図-3.4.1 DTW の計算概要

3.4.3 模擬空洞を用いた模擬実験

(1) 実験条件

DTW を用い、コンクリート版下の空洞を検出することができるかについて確認するため、図-3.4.2 および図-3.4.3 に示すように、模擬空洞を有したコンクリート舗装を構内に構築し、FWD 試験を行った。試験ヤードの舗装構成は、Co 版厚 20cm、路盤は粒度調整碎石 20cm、路床 CBR12% である。模擬空洞の大きさは 1m×1m、厚さ 10cm の硬質発泡スチロールを路盤上部（図中青色）と路盤下部（図中緑色）に埋設した。FWD 試験は模擬空洞を設置した右ラインと模擬空洞のない左ラインにて 0.5m 間隔で実施した。その結果を図-3.4.4 に示す。

DTW 距離を計算するため、基準となるたわみ曲線が必要となることから、今回は、L1、L6 を除いた健全部（左ライン、図中青矢印）で測定された Co 版 4 枚分の D_0 たわみ曲線の平均値を用いた。

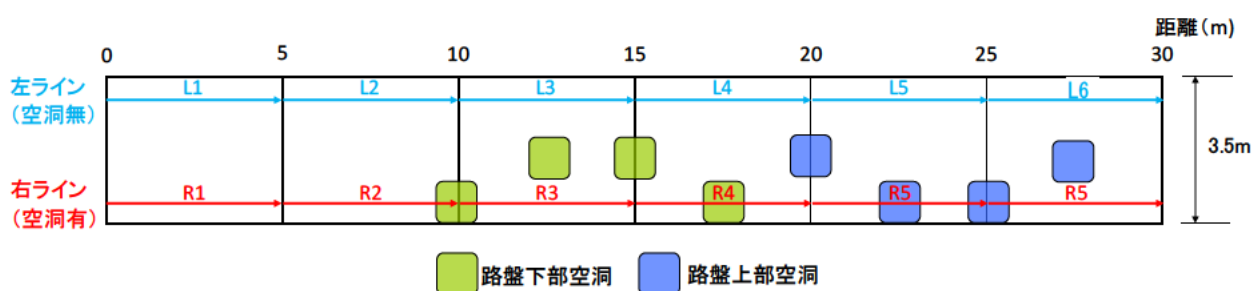


図-3.4.2 試験ヤード平面図（緑：路床直上空洞、青：Co 版直下空洞）

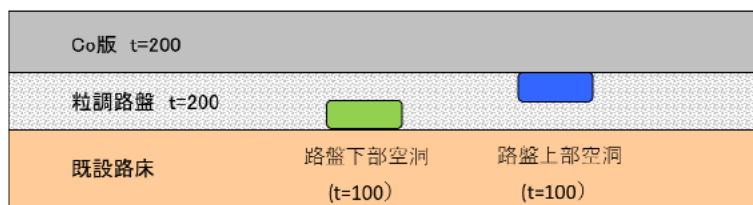


図-3.4.3 試験ヤード断面図

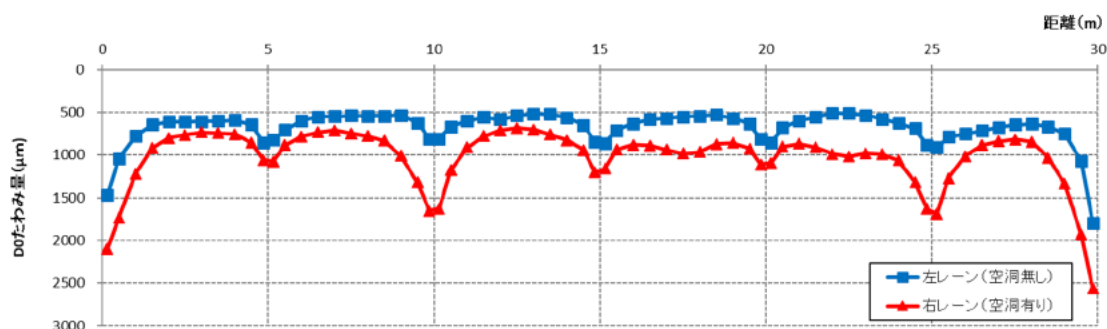


図-3.4.4 たわみ量測定結果 (D_0 たわみ量)

(2) 検証結果

式 (3.4.1) の DTW を用い DTW 距離計算した。その結果を図-3.4.5 に示す。図より、健全箇所のためみ曲線の DTW 距離は平均 159、標準偏差 63 となった。空洞箇所有無を検出する閾値を平均+3 σ (誤差が正規分布すると仮定し、空洞が存在しない場合 99.85%の確率このたわみ量以下となる値) とし、平均 159+標準偏差 63 \times 3=347 とすると、空洞がある Co 版の DTW 距離は全てこの値より大きな値であったことが確認できた。このことから、DTW を用いることで、空洞の Co 版について検出できることが確認された。

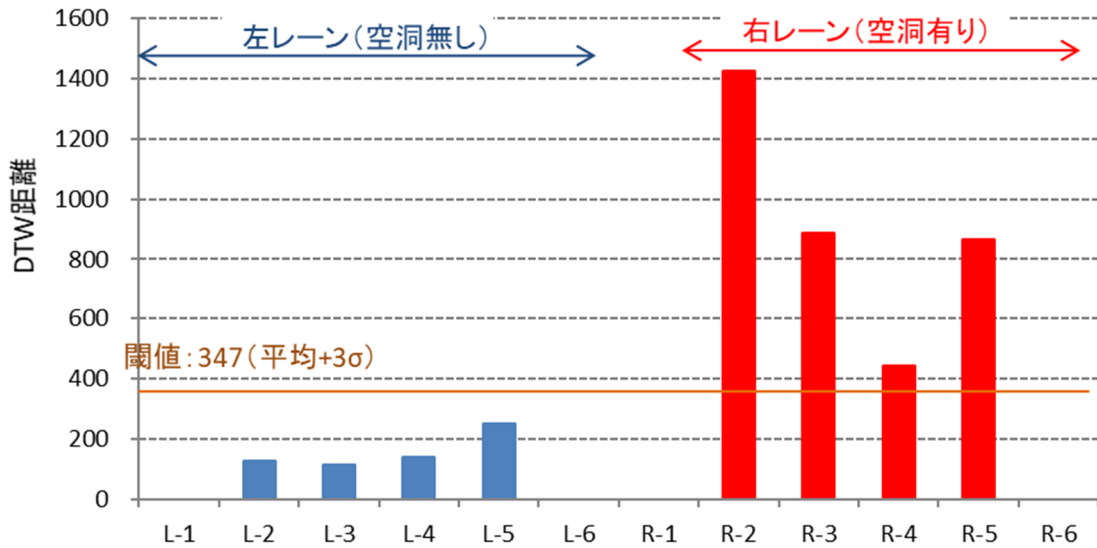


図-3.4.5 DTW 計算結果

3.4.4 供用中の幹線道路の測定結果

模擬空洞を有した試験ヤードにて、DTW の計算結果から、空洞箇所のある版を検出することが出来たことから、実道でも空洞の損傷箇所について検出可能であるかの検討を行った。その結果を以下に示す。

(1) D₀たわみ曲線による損傷箇所検出結果

供用中の A、B、C 工区において、1 枚約 10m の Co 版において、両端部、中央部を含む 5 点の D₀たわみ曲線から DTW 距離を計算した。その結果を以下に示す。

ただし、DTW 距離を計算するにあたり、比較する基準たわみ曲線は健全だと考えられる A 工区の平均値を用いた。

1) A 工区

FWD 測定位置を図-3.4.6 に、測定結果および DTW 距離の計算結果を表-3.4.1 と図-3.4.7、図-3.4.8 に示す。

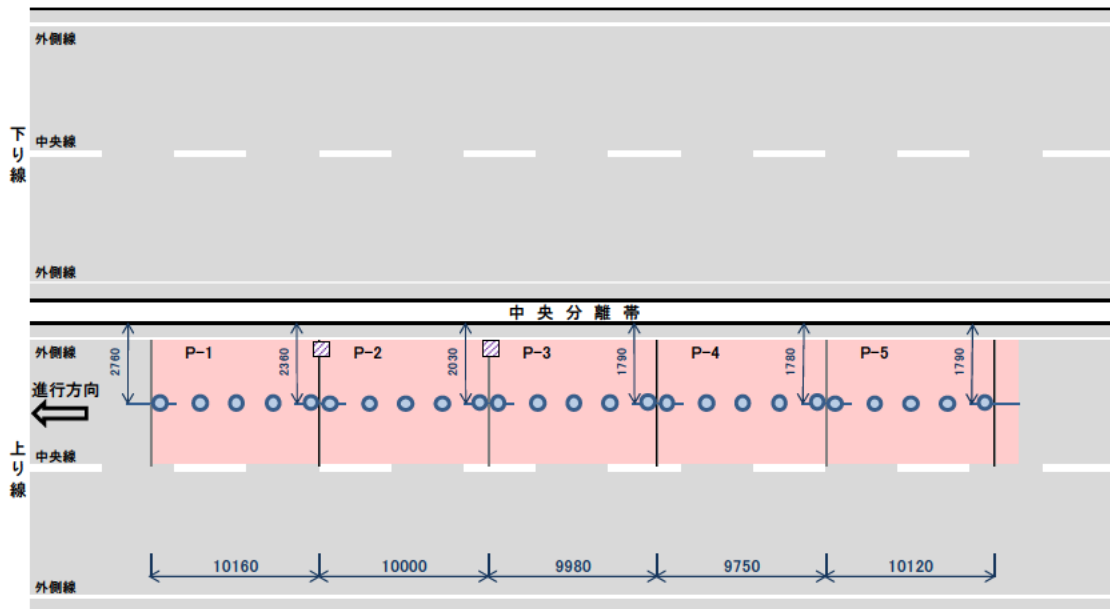


図-3.4.6 A 工区測定位置 (単位 : mm)

表-3.4.1 A 工区の D₀たわみ測定結果と DTW 距離

		A 工区					基準たわみ曲線
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	
D ₀ (μm)	目地部	295	307	359	368	373	340
	版央 1 (2.5m)	254	270	276	282	295	275
	版央 2 (5.0m)	271	276	280	289	286	280
	版央 3 (7.5m)	285	290	281	292	304	290
	版央 4 (9.85m)	332	373	374	381	415	375
DTW 距離		123	44	30	46	113	

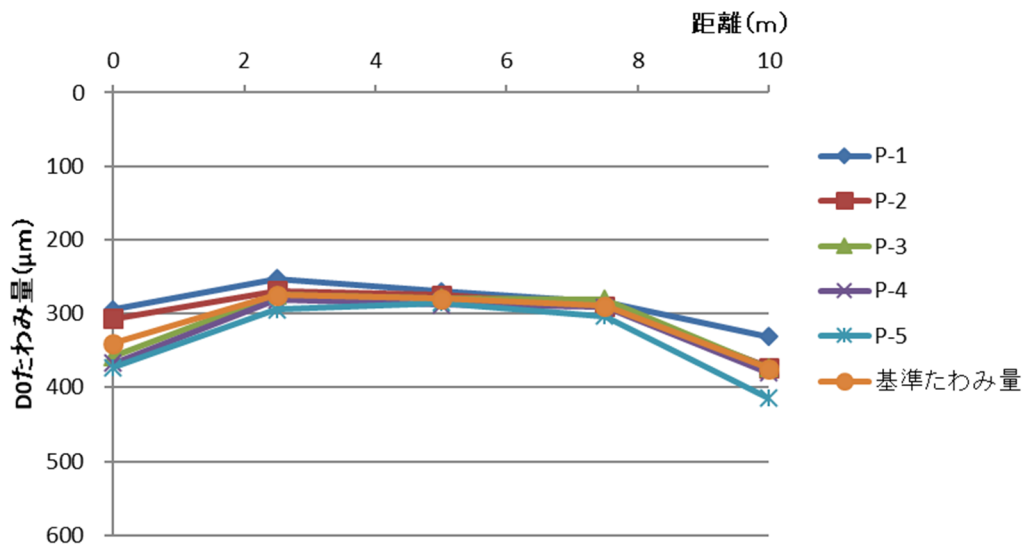


図-3.4.7 A工区 D₀たわみ量測定結果

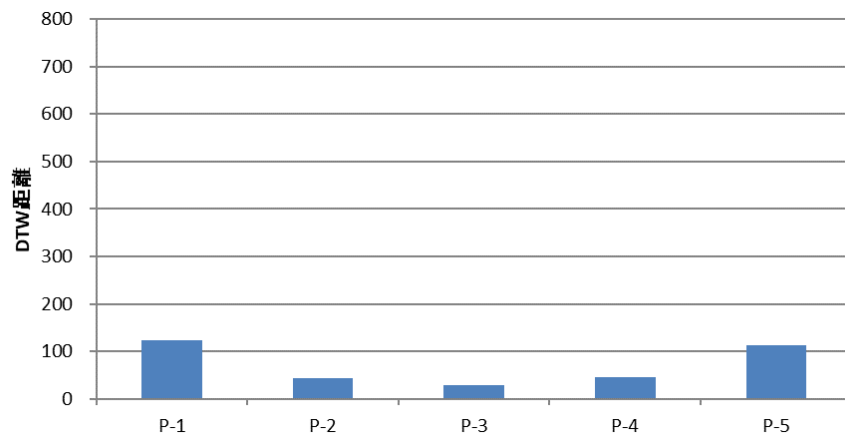


図-3.4.8 A工区 DTW 距離計算結果

表-3.4.1 と図-3.4.7、図-3.4.8 より、A 工区において、DTW 距離は平均 71、標準偏差 43 であった。空洞が存在しているかを判断するための閾値として、平均+3 σ = 201 とした。

この閾値を用い判断したところ、全ての Co 版の DTW 距離が下回っていることから、A 工区において空洞は存在しないと判断した。

2) B工区

FWD 測定位置を図-3.4.9に、測定結果および DTW 距離の計算結果を表-3.4.2と図-3.4.10、図-3.4.11に示す。

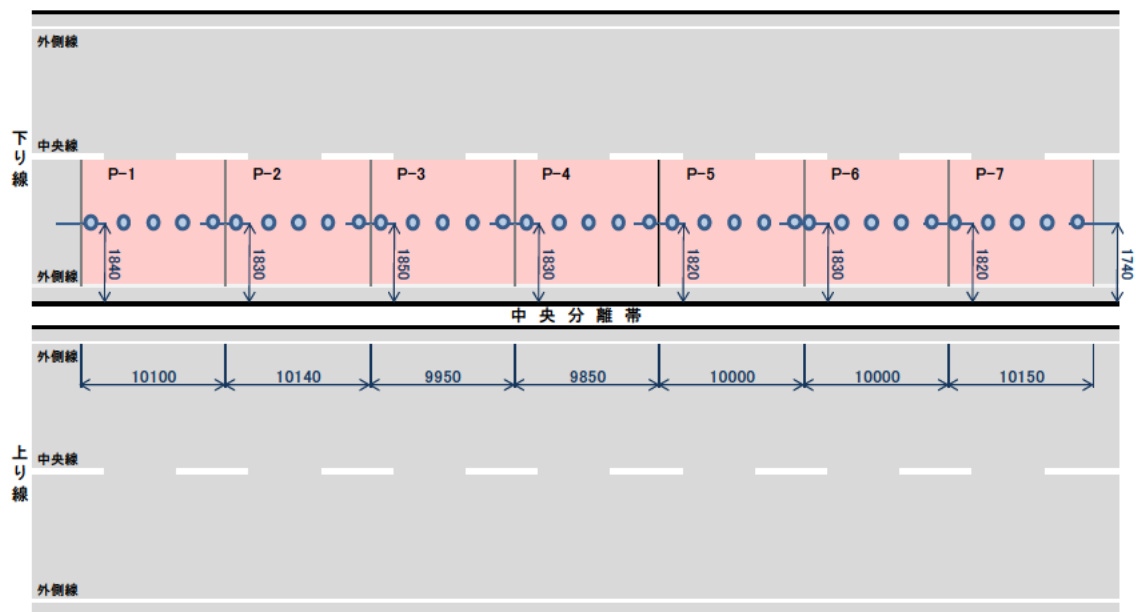


図-3.4.9 B工区測定位置 (単位 : mm)

表-3.4.2 B工区のD₀たわみ測定結果とDTW距離

		B工区							基準たわみ曲線
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	
D ₀ (μ m)	目地部	390	412	360	317	422	359	388	340
	版央 1 (2.5m)	302	325	305	269	302	318	334	275
	版央 2 (5.0m)	349	366	289	274	305	329	534	280
	版央 3 (7.5m)	288	324	281	273	295	366	372	290
	版央 4 (9.85m)	405	377	341	428	359	384	343	375
	DTW 距離	150	242	102	105	155	157	399	

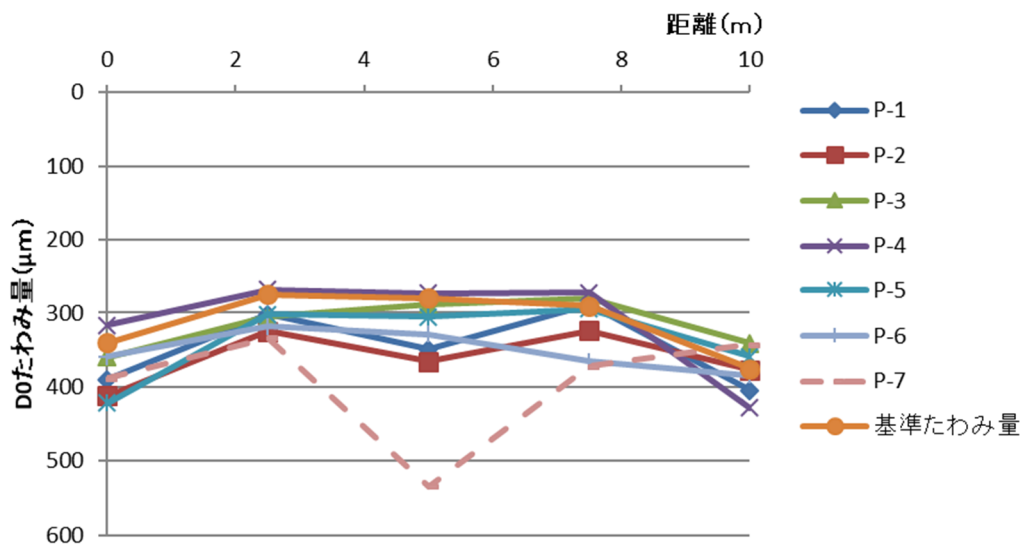


図-3.4.10 B工区 D₀たわみ量測定結果

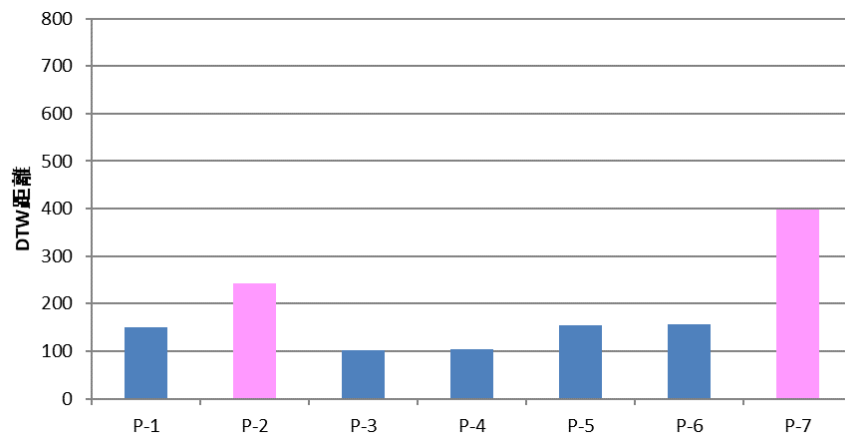


図-3.4.11 B工区 DTW 距離計算結果

表-3.4.2 と図-3.4.10、図-3.4.11 より、B 工区において P-2 および P-7 の D₀たわみ曲線が中心付近で折れ曲がっており、他の D₀たわみ曲線と異なる曲線を示している。これらの Co 版の DWT 距離も閾値の 201 を超えており、空洞が生じている可能性がある。

3) C工区

FWD 測定位置を図-3.4.12に、測定結果および DTW 距離の計算結果を表-3.4.3と図-3.4.13、図-3.4.14に示す。

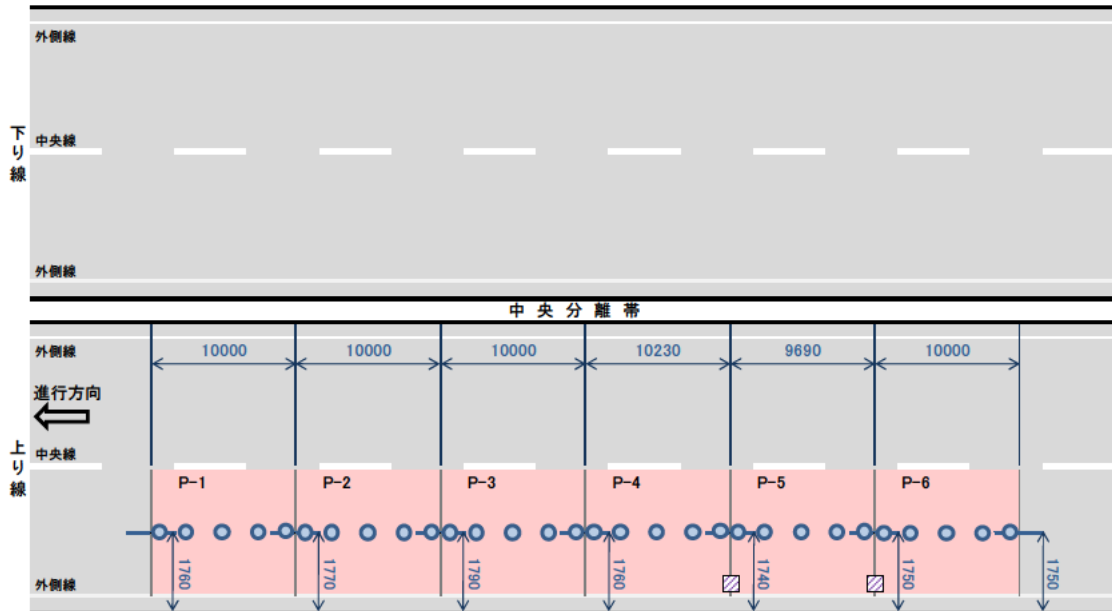


図-3.4.12 C工区測定位置（単位：mm）

表-3.4.3 C工区のD₀たわみ測定結果とDTW距離

		C工区						基準たわみ曲線
		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	
D ₀ (μ m)	目地部	479	377	338	316	306	365	340
	版央 1 (2.5m)	379	299	291	293	300	529	275
	版央 2 (5.0m)	416	321	324	292	344	408	280
	版央 3 (7.5m)	314	353	283	282	394	503	290
	版央 4 (9.85m)	380	334	328	323	348	555	375
	DTW 距離	356	174	116	114	199	770	

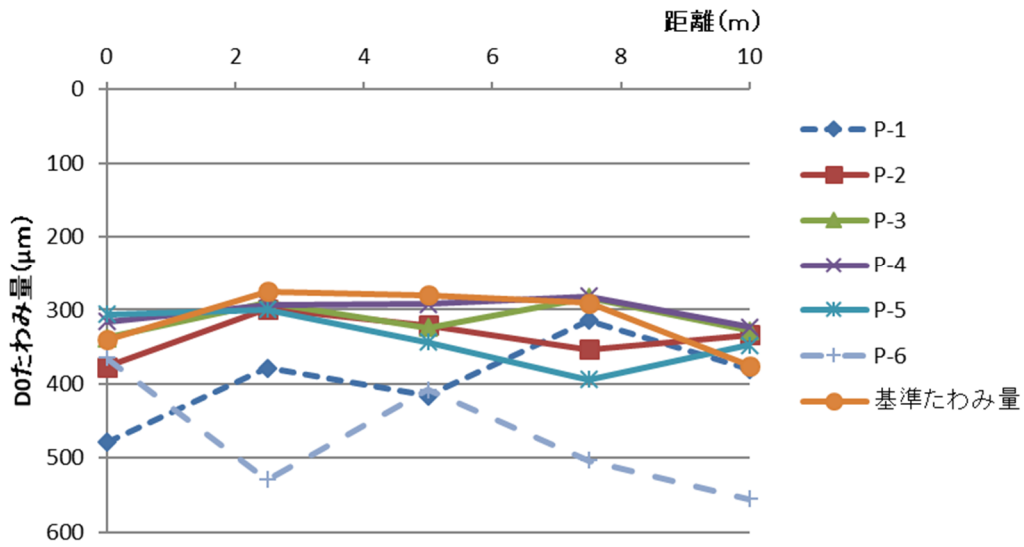


図-3.4.13 C工区 D₀たわみ量測定結果

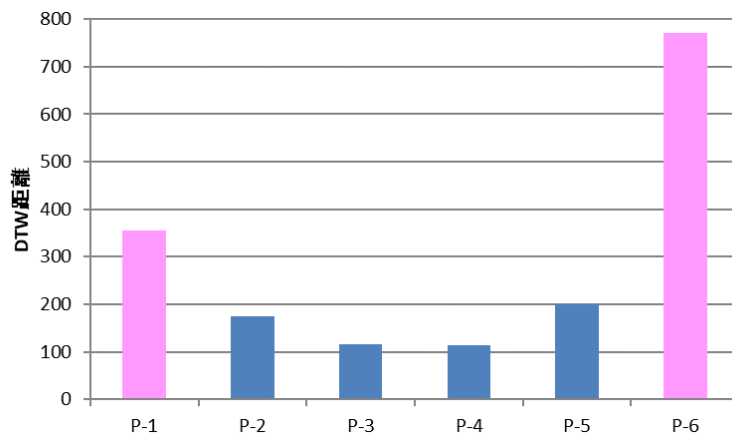


図-3.4.14 C工区 DTW 計算結果

表-3.4.3 と図-3.4.13、図-3.4.14 より、C 工区において P-1 および P-6 の D₀たわみ曲線が上に凸の曲線ではなく、他の D₀たわみ曲線と異なる曲線を示している。これらの Co 版の DTW 距離も閾値の 201 を超えており、空洞が生じている Co 版の可能性はある。

3.4.4 まとめ

実物大の試験ヤードにおいて、D₀たわみ曲線の DTW 距離を比較することで、コンクリート版下に空洞の損傷があるコンクリート版を検出することが出来た。

また、供用中の実道において、D₀たわみ曲線の DTW 距離を比較することで、D₀たわみ曲線が凸形ではないコンクリート版を検出することが出来たが、空洞の有無については実道にて確認を行っていないため、検証することができていない。

現在の調査手法では、コンクリート版 1 枚当たり、数点 FWD 測定を行っていることから、測定に時間

が必要となっている。今後は、実用が期待されている Moving Wheel Deflectometer (MWD) においても適用できるか検討を行っていき、測定の効率性についても検討を行っていきたい。

3.5 コンクリート舗装の非破壊検査手法と課題

「3.1」～「3.4」にて、検討した各非破壊検査手法について、診断箇所、項目、診断原理及び課題を整理した。その結果を表-3.5.1に示す。

表-3.5.1 各非破壊検査手法の課題

記載箇所	診断箇所、項目	診断原理	課題
3.1	目地 劣化過程を考慮した健全度	3DFEM 逆解析	<ul style="list-style-type: none"> ・構造の異なるコンクリート舗装目地部での適用事例での積み重ね及び検証 ・実際の目地状況との整合性の確認
3.2	目地 ダウエルバー(破断)	漏洩磁束法	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄網の影響緩和方法 ・健全と破断を判断する閾値の検討 ・実際のダウエルバーとの整合性の確認
3.3	目地 段差	MMS	<ul style="list-style-type: none"> ・段差程度と目地部の構造的な損傷の関係性 ・ネットワークレベルの診断への適用性
3.4	コンクリート版下の健全性	DTW	<ul style="list-style-type: none"> ・実際の版下状況と DTW 結果との整合性の確認 ・MWD 併用による測定効率化

3章では、各非破壊検査手法について診断可否や診断精度を検討した。しかし、表-3.5.1に示した各非破壊検査の課題に加え、本検討では、供試体での検討や、一つの路線での検討結果であり、その適用性や適用範囲については不十分な点も残る。また、開削調査と併せた目地内部もしくはコンクリート版下の実際の状況と非破壊検査の結果との整合性の確認が必要と考えている。

4. 積雪寒冷地における凍上対策に関する検討

積雪寒冷地におけるコンクリート舗装の課題である「凍上等の影響による構造的な破損」について、既設舗装調査を行い、既存の設計法の問題点を抽出し、改善方法を検討した。

4.1.1 設計基準の推移

舗装における凍上対策としては、凍結の入る深さの材料を非凍上性の材料で置き換える置換工法が主に用いられている。表-4.1.1にコンクリート舗装に関する過去からの設計基準を凍上対策に関わる置換率の項目について、「セメント・コンクリート舗装要綱」¹⁾、「舗装設計便覧」²⁾よりまとめた。昭和30年より設計手法に示されており、当所は「凍結深さを考慮する」との記載であったが、その後、昭和39、42年までは「凍結する深さまで」と記載されている。昭和47年以降は「アスファルト舗装要綱」³⁾に準拠した「理論最大凍結深さに対し70%の深さ」までとされている。

表-4.1.1 置換率に関する設計基準の推移

設計年度	S30	S39・S42	S47	S55	S59	H18
置換率						
凍結深さを考慮する	○	—				
10年間の理論最大凍結深さに対し	—	凍結深まで	—			
10年確率の理論最大凍結深さに対し	—		70%		—	
n年確率の理論最大凍結深さに対し	—				70%	

4.1.2 凍上によるコンクリート舗装版の損傷

路床に凍上が発生した場合、図-4.1.1に示すような現象によりコンクリート舗装版にひび割れが入ると考えられる。発生要因を以下に示す。

(1) 縦断方向のひび割れ

凍上性の材料で構成された路床まで凍結が入り、路肩からの水分の供給がある場合、図-4.1.1の左図のように、路肩側の路床にアイスレンズが発生・発達し、舗装版が持ち上げられる。ここに車輛荷重が繰り返しかかり縦断的にひび割れが発生する。またこの場合、融解期には路肩端部の支持力の低下をまねき、新たなひび割れの発生要因となる。

(2) 横断方向のひび割れ

一方、図-4.1.1の右図のように路床にアイスレンズが発生した場合、車輛荷重がかかることにより横断方向にひび割れが発生する。また先述と同様に、融解期には舗装版直下の支持力の低下をまねき、新たなひび割れの発生要因となる。

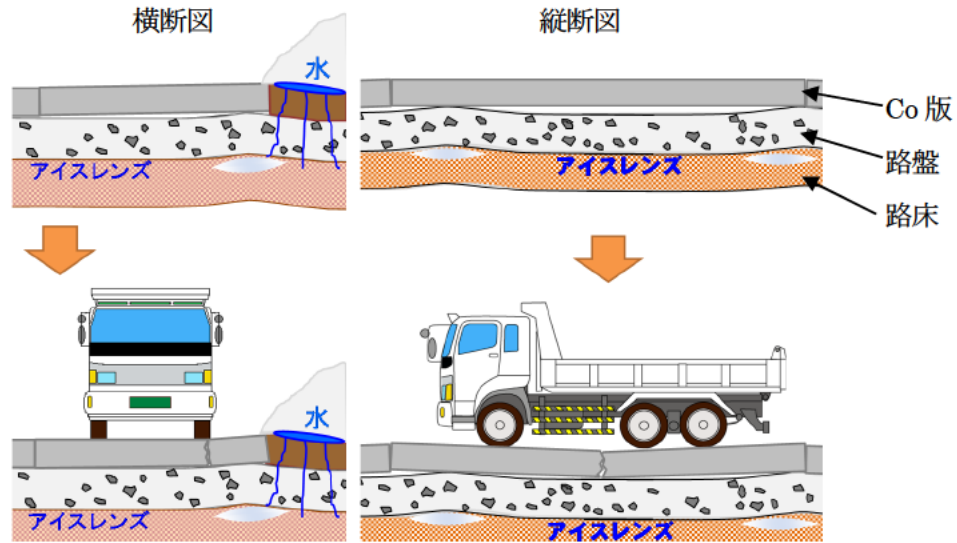


図-4.1.1 凍上によるひび割れ

4.1.3 既設舗装調査

(1) 目視調査

北海道内において比較的長い延長でコンクリート舗装が明かり部に施工されている区間に対し、徒歩による目視調査を行い、構造的破損であるひび割れの発生状況を把握した。平成27年度に調査した結果と舗装断面を図-4.1.2に示す。両路線とも20年確率の理論最大凍結深さの70%にあたる深さまで凍上性の低い材料で構成されているが、ひび割れが確認されなかった一般国道229号神恵内は、路床が岩盤となっている。一方、ひび割れが確認された一般国道231号増毛では、路床がレキ質土であり、凍上試験を行った結果、凍上性の材料であることが確認された。

		調査路線名	R229 神恵内	R231 増毛
			コンクリート舗装 t=20cm 上層路盤 (切込碎石40mm級) t=25cm 凍上抑制層 (切込碎石80mm級) t=25cm or 0cm 路床(岩盤)	コンクリート舗装版 t=25cm 上層路盤 (切込碎石30mm級) t=15cm 下層路盤 (切込碎石40mm級) t=25cm 凍上抑制層 (切込碎石80mm級) t=15cm 路床(レキ質土) 【凍上性】
H27	横断ひび割れCo版数(枚)		0	40
	縦断ひび割れCo版数(枚)		0	7
	ひび割れ発生頻度(件/km)		0.00	8.63

図-4.1.2 ひび割れ発生頻度と舗装断面

次に、調査箇所近傍の増毛、積丹の AMeDAS データ過去 12 年分を用いて凍結指数を算出し、「寒冷地地盤工学」⁴⁾ に示される「凍結指数と予想凍結深さの関係」の式より求めた凍結深さを図-4.1.3 に示す。これより、2 箇所とも凍結が路床まで到達する冬を経験していると考えられる。

以上より、一般国道 231 号増毛で縦・横断ひび割れが発生した要因として、凍上の影響が考えられる。これは、理論最大凍結深さの 70% を非凍上性の材料で置換した場合でも、凍上性の路床まで凍結が達するとコンクリート舗装版に構造的なひび割れが生じさせる可能性を示唆するものである。

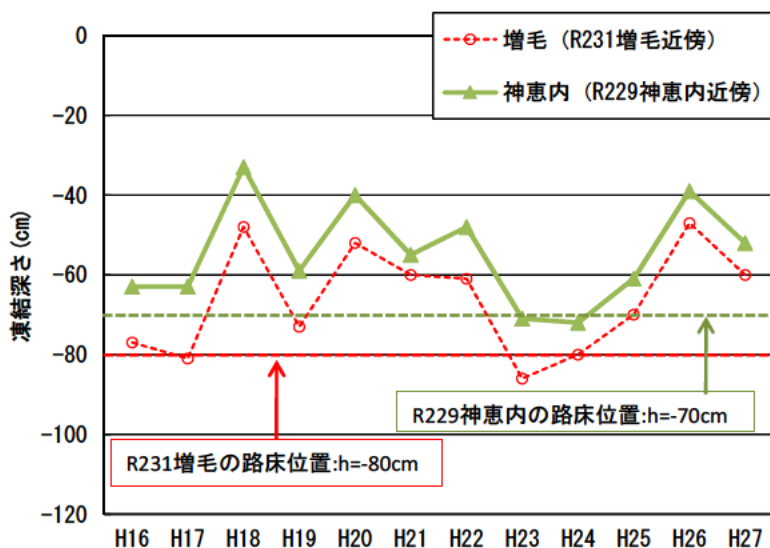


図-4.1.3 凍結指数より求めた凍結深さ

(2) 凍上量調査

構造的なひび割れが多く発生している一般国道 231 号増毛において、発生要因を検証するため、平成 28 年度の冬期間に、図-4.1.4 に示す横断ひび割れが発生しているコンクリート舗装版を対象に凍上量調査を実施した。調査方法は、凍上が生じる前の 12 月に路面高をレベル測量により計測し、凍上量が最大となる 2 月下旬から 3 月上旬に、再度同じ計測点の路面高さを計測し、その差を求めるものである。

調査箇所近傍の増毛の AMeDAS データより整理した凍結指数、最大積雪量、および実測した凍上量の最大値を表-4.1.2 に示す。調査期間の凍結指数は平年並みであったが、積雪量は非常に少なく、路面が外気にさらされやすい環境であったことから、路床まで凍結が入ったと考えられ、調査期間に最大 13mm の凍上を観測した。

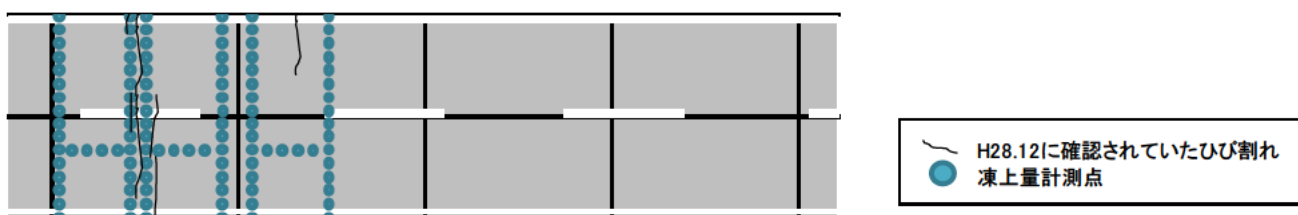


図-4.1.4 凍上量調査概要

表-4.1.2 気象条件と凍上量

	調査年の値	過去10年の平均値
凍結指数 (°C/days)	272.4	256.6
最大積雪深 (cm)	69	136
最大凍上量 (mm)	13	-
最大凍上量観測日	H29.2.22	-

(3) FWD 調査

最大 13mm の凍上が確認されたため、平成 29 年 4 月にコンクリート舗装版下の支持力等を確認するため、版央と、目地部において FWD 調査を実施することとした。FWD 調査に先立ちコンクリート舗装版の目視調査を行った結果と FWD 測定位置を図-4.1.5 に示す。図中、赤線で示した箇所になたなひび割れが発生していることが確認されたため、新たにひび割れが発生した版においてはひび割れ部において計測を実施した。

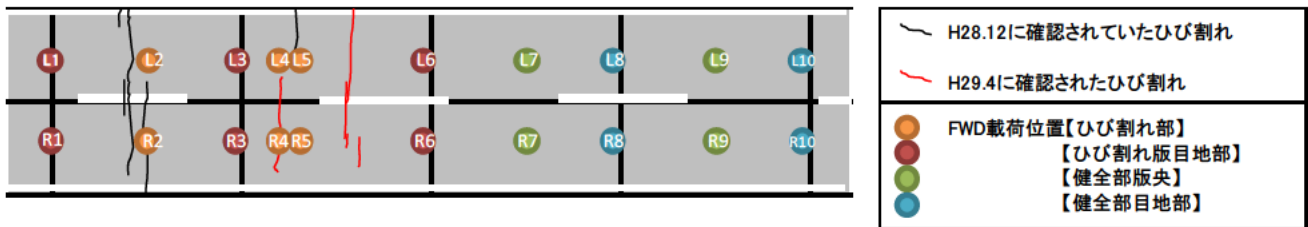


図-4.1.5 目視調査結果及び FWD 調査位置

表-4.1.3、図-4.1.6 に測定結果を示す。 D_0 たわみ量は、健全な版では平均値が版央で 160 μm 程度、目地部で 240 μm 程度であり、ばらつきは小さい状況であった。一方、ひび割れの生じた版では、 D_0 たわみ量は最大で 587 μm であり、たわみ量、ばらつきともに大きい結果となった。特に、図-4.1.5 の図中に赤線で示した新たなひび割れが確認された L5、R4 において、たわみ量が大きく、支持力の低下が顕著であった。400 μm を超えると舗装版下に空間のある可能性があるといわれているが、新たなひび割れが確認された L5、R4 ではこの値を超えており、図-4.1.1 に示すような要因によりコンクリート舗装版にひび割れが入ったものと推察される。

表-4.1.3 FWD 調査結果

(単位： μm)

No.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
箇所	ひび目地	既存ひび	ひび目地	既存ひび	新規ひび	ひび目地	健全版央	健全目地	健全版央	健全目地
D_0	241	166	268	371	587	288	148	238	174	238
No.	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
箇所	ひび目地	既存ひび	ひび目地	新規ひび	-	ひび目地	健全版央	健全目地	健全版央	健全目地
D_0	265	172	417	402	285	317	155	224	170	270

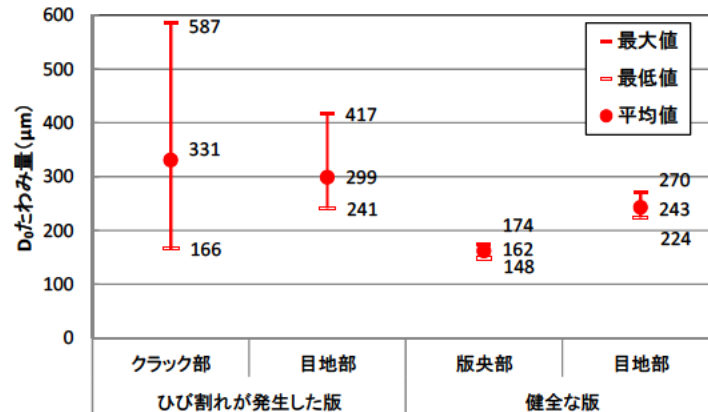


図-4.1.6 D₅₀たわみ量

4.1.4 既設舗装調査における考察

既設舗装調査により、凍上が生じると短い期間で構造的な破損に至ることが確認され、本調査においては、最大凍上量観測日からひび割れ発生を確認するまでの期間は2ヶ月程度と極めて短い期間であった。また、FWD調査の結果から、新たにひび割れが生じた箇所においては舗装版下に空間のある可能性が高いことから、凍上により路盤面に不陸が発生しコンクリート舗装版と路盤の間に空間が生じることが損傷発生の要因の一つと考えられる。また、凍結深さ内に凍上性の路床土がない路線では、構造的な損傷であるひび割れは確認されなかったが、理論最大凍結深さの70%までを非凍上性の材料で置換し、その下に凍上性の路床土がある路線では構造的なひび割れが確認されたことから、凍上対策としては、凍結が入る深さまで非凍上性の材料で置き換えることが有効であると考えられる。

4.2 FEMによる凍上の影響の評価

既設舗装調査の結果より、凍上による路盤とコンクリート舗装版の間に生じた空間が早期のひび割れ発生の要因となったと考えられることから、この影響を検証するためFEM解析、および「舗装設計便覧」²⁾のコンクリート舗装の理論設計方法を用いて疲労度を算定し、凍上が舗装寿命に及ぼす影響について評価を試みた。

4.2.1 検討モデルの作成

当研究所所有の苫小牧寒地試験道路にて、FEM解析に用いるコンクリート舗装版のサイズに合わせた3.5m×10.0mの範囲において凍上形状の計測を行った。

計測は冬期間、コンクリート舗装の標高をメッシュ状に計測し、秋期に計測した初期値との標高差より凍上量を算出する方法を用いた。なお、軸方向はFEM解析モデルにおける軸方向と一致させている。計測結果をコンター図で表したものを図-4.2.1に示す。凍上量は一様ではなく不陸が生じていることがわかる。

この計測結果を用い、平面と仮定したコンクリート舗装版下面と凍上により不陸の生じた路盤表面の間に生じる空間幅を計算した結果、コンクリート舗装版と路盤面の間に最大約19mmの空間が生じた。このことから、今回計測した凍上による不陸形状を凍上によるコンクリート舗装版への影響の検証を行うことが可能と判断

し、以後の解析に用いることとした。

検証モデル（以下、凍上モデル）は空間幅 5mm 未満をコンクリート舗装版と密着、5mm 以上 10mm 未満を 5mm の空間、10mm 以上 15mm 未満を 10mm の空間、15mm 以上 20mm 未満を 15mm の空間として作成した。

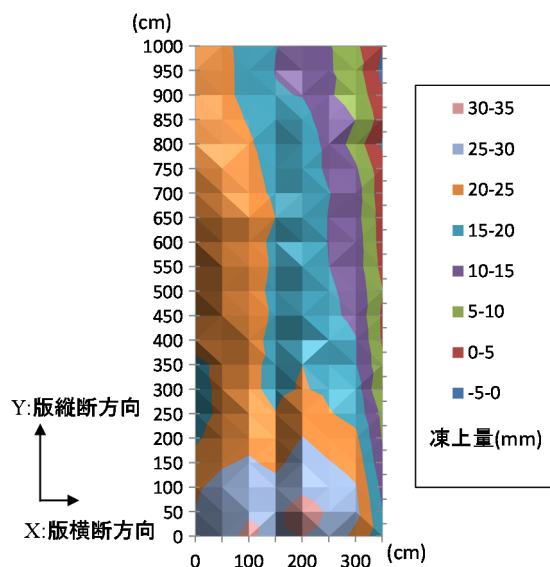


図-4.2.1 凍上による不陸高さのコンター図

4.2.2 解析条件

FEM解析はPave3Dを用い、モデルサイズはコンクリート舗装版1枚を想定した幅3.5m×長さ10.0m×深さ3.5mとした。解析モデルの地盤条件を表-4.2.1に示す。コンクリート舗装版、粒状材料の弾性係数およびポアソン比は、「舗装設計便覧」²⁾に示されている代表的な値を用いた。なお、融解期の路床の支持力低下時における弾性係数については設計CBRの下限値である3に10を乗じた値とした。^{5, 6)} また、舗装厚については一般国道231号増毛における現在の20年設計の断面より決定し、凍結深さは当該地区の20年確率理論最大凍結深さである100cmとした。解析に用いた要素分割間隔はX、Y軸方向ともに12.5cm、コンクリート舗装版におけるZ軸方向の要素分割間隔は5.0cmとし、荷重条件は実際にダンプトラックを用いた計測により得られた条件を用いた。載荷位置は図-4.2.2の赤色の着色の位置であり、X軸方向は前輪路肩側の荷重中心位置が縦自由端部から100cm離れとなる位置とし、Y軸方向はコンクリート舗装版に生じる引張応力が最大となる位置を繰り返し計算により求めた結果、凍上モデルにおける路盤表面とコンクリート舗装版の間の空間上に後輪が載荷される位置となった。

表-4.2.1 解析モデルの地盤条件

	層厚 (mm)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)
コンクリート舗装	250	28,000	0.2	2,500
上層路盤	300	200	0.35	2,040
下層路盤	300	200	0.35	2,040
路床	2650	100	0.4	-
路床(支持力低下時)	150	30	0.4	-

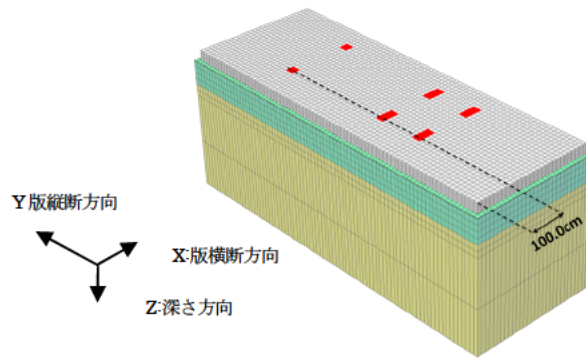


図-4.2.2 荷重載荷位置

4.2.3 解析内容

路盤上面に不陸の発生していない①標準モデル、凍上により路盤とコンクリート舗装版の間に空間が生じた②凍上モデル、融解期における路床の支持力低下を考慮し深さ85~100cmの位置の支持力を100MPaから30MPaに低減した③支持力低下モデル、およびFWD試験結果より、凍上が発生した箇所が融解期を迎え、コンクリート舗装版と路盤の間に空間が生じている可能性や路床の支持力が低下している可能性が示唆されたことから、凍上モデルにおいて深さ85~100cmの位置の支持力を30MPaに低減した④複合モデルを作成し、解析を行った。

4.2.4 解析結果

(1) 凍上に対する検討

凍上モデルにおける FEM 解析結果を図-4.2.3 に示す。また、検討モデル別に最大引張応力と発生位置を整理したものを表-4.2.2 に示す。

凍上モデルの最大引張応力は 1.42MPa となり、標準モデルの 0.23MPa と比較して、約 6 倍の引張応力が生じる結果となった。また、両モデルとも最大引張応力の発生位置は版中央部の下面端部であり、この位置から版下面の横断方向に高い値で引張応力が分布していた。このことから、疲労によりひび割れが生じる場合、版端部下面より横断方向にひび割れが生じると想定される。

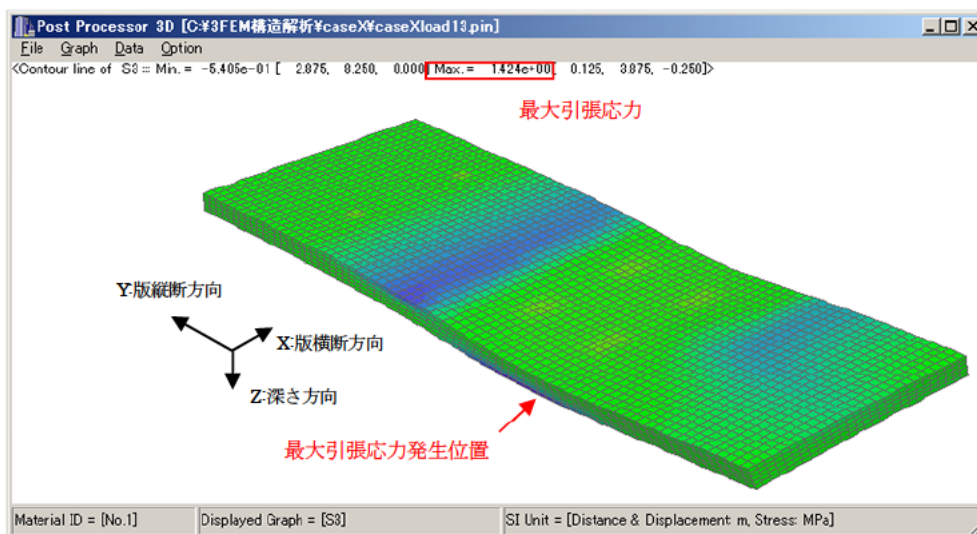


図-4.2.3 応力度コンター図 (凍上モデル)

表-4.2.2 FEM解析結果

	最大引張応力 (MPa)	標準モデル との比較	最大引張応力 発生位置
①標準モデル	0.23	-	版端部下面
②凍上モデル	1.42	6.2倍	版端部下面
③支持力低下モデル	0.46	2.0倍	版端部下面
④複合モデル	1.60	7.0倍	版端部下面

(2) 支持力低下に対する検討

支持力低下モデルでは表-4.2.2に示すように、最大引張応力は0.46MPaであり、支持力低下を起こしていない標準モデルの2倍の値となった。

(3) 凍上と融解期の支持力低下の複合作用の検討

複合モデルでは表-4.2.2に示すように、最大引張応力は凍上モデルより大きな1.60MPaとなり、標準モデルの約7倍の値となった。

以上より、凍上による不陸や路床の支持力低下によってコンクリート舗装版に生じる引張応力が増大することが確認された。

4.3. 疲労度による凍上の影響の評価

FEM解析を行った結果、最大引張応力に差が見られた標準モデルと凍上モデルを用い、凍上により生じるコンクリート舗装版と路盤間の空間が舗装体の寿命に及ぼす影響を評価した。ここでは、舗装寿命を「舗装設計便覧」²⁾のコンクリート舗装の理論設計方法を用いて、疲労度を算定し評価を行った。

4.3.1 条件の設定

積雪寒冷地におけるコンクリート舗装の供用状況を再現するため、以下のように条件を設定した。

温度応力の算定にあたっては、「舗装設計便覧」²⁾に示されている温度分布と実測値を比較し、発生頻度分布が近似している「温度差の小さいところ」の分布を引用した。なお、実測値は一般国道231号増毛と同一路線の石狩市浜益区送毛のコンクリート舗装版のデータを用いている。

舗装厚・車線数・車線幅員については、石狩市浜益区送毛のコンクリート舗装版の値を用い、舗装厚25cm、車線数2、舗装版延長10.0m、舗装版幅3.5m、車線幅員3.25mとした。

交通量については一般国道231号において既往の車両重量調査結果が無いいため、この区間の交通量(交通量区分N4:大型車交通量341台/日)と同等程度の交通量である一般国道238号稚内市声間(交通量区分N4:大型車交通量547台/日)の調査結果を用いた。

疲労度を算定するための設計期間は、標準モデルでは標準的な設計期間である20年、一般国道231号増毛の供用期間である35年、および疲労度1.0を超える期間とした。疲労度の計算条件を表-4.3.1に示す。FEM解析結果をもとに横断ひび割れを対象とし、疲労着目点を縦自由端部・横ひび割れとした。また、曲げ強度は、実態調査を行った一般国道231号増毛等より採取したコア(n=9)の試験結果の平均値である5.4MPaを用いた。

表-4.3.1 疲労度の計算条件

設定された舗装の目標	
ひび割れ率〔性能指標値〕(cm/m ²)	10
信頼度(%)	90
舗装版の条件	
舗装の種類	普通コンクリート舗装
曲げ強度(MPa) ※R231増毛,R231石狩の採取コアの平均値	5.4
弾性係数(MPa)	28,000
ポアソン比	0.2
温度膨張係数(1/°C)	10×10 ⁻⁶
横目地間隔(m)	10
目地	ダウエルバー使用
交通条件	
大型車混入比率	郊外部
温度差が正の時に走行する大型車数/大型車の全交通量	0.60
温度差が負の時に走行する大型車数/大型車の全交通量	0.40
舗装した十分な幅の路肩	ある
着目点	
着目点	縦自由端部
想定ひび割れ	横ひび割れ

4.3.2 合成応力の算出

「舗装設計便覧」²⁾に示されている疲労度の算定方法には、式4.3.1に示すように凍上を考慮する項目がないため、式4.3.2に示すように凍上による影響を反映させることを試みた。

$$\sigma_m = \sigma_{ei,j} + \sigma_{tk} \quad \text{式 4.3.1}$$

$$\sigma_m = \sigma_{ei,j} + \sigma_{tk} + \sigma_{fi,j} \quad \text{式 4.3.2}$$

ここに、 σ_m ：合成応力

$\sigma_{ei,j}$ ：輪荷重 P_i が走行位置 j を通過した場合の輪荷重応力

σ_{tk} ：コンクリート版上下面温度差 k による温度応力

$\sigma_{fi,j}$ ：輪荷重 P_i が走行位置 j を通過した場合の凍上に起因する輪荷重応力の増分

$\sigma_{fi,j}$ は表-4.3.2に示す様に、輪荷重 P_i が走行位置 j を通過した場合の「モデル間における各条件の最大引張応力の差」より求めた。表-4.3.2では算出した最大引張応力の代表値として、走行位置 j が縦自由端部から 105cm および 15cm の位置に輪荷重 P_i が作用した場合の計算値と応力差を示している。軸荷重が大きくなるほど、また載荷位置が縦自由端部に近いほど、標準の条件と凍上した条件における応力差が大きくなり、合成応力に加算される値が増加する傾向となっている。

表-4.3.2 最大引張応力

軸荷重 Pi (kN)	1日の 通過 輪数	舗装版端部にかかる最大引張応力(MPa)				応力差(MPa)	
		標準モデル		凍上モデル			
		走行位置 j=105cm	走行位置 j=15cm	走行位置 j=105cm	走行位置 j=15cm	走行位置 j=105cm	走行位置 j=15cm
9.8	1,229	0.03	0.12	0.25	0.43	0.22	0.31
19.6	252	0.06	0.23	0.42	0.80	0.37	0.57
29.4	274	0.09	0.35	0.60	1.16	0.52	0.82
39.2	49	0.12	0.46	0.78	1.53	0.67	1.07
49.0	23	0.15	0.58	0.97	1.90	0.82	1.32
58.8	10	0.18	0.69	1.14	2.26	0.97	1.57
68.6	2	0.21	0.81	1.32	2.63	1.12	1.82
78.4	2	0.23	0.92	1.50	3.00	1.27	2.07
88.2	0	0.26	1.04	1.69	3.37	1.42	2.33
98.0	0	0.29	1.15	1.87	3.73	1.57	2.58

4.3.3 疲労度の算定

上記にて設定した条件、および得られた合成応力を疲労度の算定式に入れ、計算を行った。なお、疲労度の算定にあたっては、「舗装設計便覧」²⁾に示されている「我が国のコンクリート舗装の実績によって検証されている疲労曲線」(以下、A曲線)、および「最近の研究成果によって定められた疲労曲線」(以下、B曲線)の双方の計算を行い、B曲線については「舗装設計便覧」²⁾に示される破壊確率50%を用いた。

結果を表-4.3.3に示す。網掛け部分は、写真-4.3.1に示すような版全幅にわたり貫通する1本の横断ひび割れが生じることとなる疲労度1.0を上回る結果を示している。

標準の条件では一般国道231号増毛の現在の供用年数である35年においても疲労度が1.0を上回らない結果となり、供用48年の条件においてA曲線で疲労度が1.0を超えた。一方、凍上した条件には、A曲線において18日の供用で、B曲線では90日で疲労度が1.0を上回った。以上の結果より、凍上が発生しなければ、20年以上構造的な損傷が生じない舗装でも、凍結が路床まで到達し、凍上が発生した場合、数十日でコンクリート舗装版に構造的な損傷の発生する可能性があることが確認された。

表-4.3.3 疲労度の試算結果

	供用期間	疲労度	
		A曲線	B曲線
標準の条件	20年	4.10E-01	4.00E-02
	35年(供用年数相当)	7.40E-01	5.00E-02
	48年	1.01E+00	7.00E-02
凍上した条件	18日	1.06E+00	2.00E-02
	60日(1シーズン)	3.14E+03	7.90E-01
	90日	3.29E+03	1.03E+00



写真-4.3.1 横断ひび割れ

4.3.4 実態調査結果との比較

4.1.3で報告した既設舗装調査において、横断ひび割れ等が他の路線より高い割合で確認された一般国道231号増毛においては、FEM解析と疲労度の算定で示されたように、凍上により生じたコンクリート舗装版と路盤面との空間や、路床の支持力低下によって、車輛走行によりコンクリート舗装版に生じる引張応力が増加し、短い期間に疲労度が1.0を超え構造的な損傷に至ったと判断される。また、実態調査では最大凍上量確認後から60日程度でひび割れが確認されたが、FEM解析を用いた疲労度の算定においても同様の結果となっている。

4.4. 結論

積雪寒冷地における既設舗装調査および解析結果より得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 既設舗装調査により、凍上が発生すると短い期間で構造的な破損に至ることが確認された。本調査においては、最大凍上量観測日からひび割れ発生を確認するまでの期間は2ヶ月程度と極めて短い期間であった。
- (2) FWD調査の結果から、新たにひび割れが生じた箇所においては舗装版下に空間のある可能性が高いことから、凍上により路盤面に不陸が発生しコンクリート舗装版と路盤の間に空間が生じることが損傷発生の要因と考えられる。
- (3) 凍結深さ内に凍上性の路床土がない路線では、構造的な損傷であるひび割れは確認されなかったが、理論最大凍結深さの70%までを非凍上性の材料で置換しその下に凍上性の路床土がある路線では構造的なひび割れが多く確認された。
- (4) FEM解析の結果、コンクリート舗装版と路盤の間に空間のある凍上モデルの最大引張応力は、コンクリート舗装版と路盤が密着している標準モデルと比較して、約6倍の引張応力が生じる結果となった。
- (5) FEM解析の結果を反映させた疲労度計算の結果、凍上が発生しなければ、20年以上構造的な損傷が生じないコンクリート舗装版でも、凍結が路床まで到達し、凍上が発生した場合、数十日で構造的な損傷が発生する結果となり、既設舗装調査の結果と一致した。

以上より、凍上性材料が凍結深さ内の路床に用いられ、コンクリート舗装版下面に不陸が発生すると舗装寿命が低下することが明らかになったことから、積雪寒冷地のコンクリート舗装の路床設計においては、凍結深さまで非凍上性材料で構成させることを提案する。

4.5. 成果の普及

本成果は、当研究所を含む産・学・官から構成された北海道土木技術会において平成29年9月にとりまとめられた「積雪寒冷地におけるコンクリート舗装の設計・施工に関する手引き（案）」の路床設計に関する事項に反映され、北海道内におけるコンクリート舗装の設計に活用されている。なお、この手引き（案）は、当研究所のHP（<http://www2.ceri.go.jp/jpn/iji/index.htm>）よりダウンロード可能となっている。



図-4.5.1 HP掲載状況

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：セメント・コンクリート舗装要綱
- 2) 社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧、2006.
- 3) 社団法人 日本道路協会：アスファルト舗装要綱
- 4) 地盤工学会北海道支部地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学、凍上被害とその対策、2009.12
- 5) 社団法人 日本道路協会：舗装設計便覧、p.114、2006.
- 6) 北海道開発局：道路設計要領、p1-5-3、2017
- 7) 北海道土木技術会舗装研究委員コンクリート舗装小委員会：積雪寒冷地におけるコンクリート舗装の設計・施工に関する手引き（案）、平成29年

5. 既往の維持修繕工法の改善に関する検討

コンクリート舗装の維持修繕工法は、目的、損傷状態に応じて修繕工法が提案¹⁾されているものの、同一路線、同一損傷に対し各修繕工法の効果や、効果の持続性を定量的に評価した事例は見当たらない。路線によっては、損傷に対しライフサイクルコストや交通規制状況を考慮すると、恒久的な措置ではなく、応急的な措置により対処せざる得ない状況も考えられ、修繕工法の効果とその持続性を把握しておくことは、コンクリート舗装の修繕を計画する上で非常に重要である。

そこで、本章では、「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」で検討した路線を対象に、国道事務所と連携し複数の修繕工法を試験施工し、追跡調査によりその効果の確認と課題を抽出した。なお、各修繕工法の実施及び「5.2 各修繕工法の追跡調査結果 (1) アンダーシーリング工法を実施した箇所の追跡調査結果」は、国道事務所が実施し、土木研究所はそのデータをご提供頂いた。また、土木研究所では、各修繕工法の選定における助言、及び「5.2 各修繕工法の追跡調査結果 (2) 各目地に実施した修繕工法の追跡調査結果」を実施し、これらの結果を併せて取り纏めた。

5.1 各修繕工法の内容

5.1.1 概要

「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」に記載した通り、対象とする路線は50年程度の供用により損傷を受けた路線で、これまでアスファルトによるオーバーレイ工法、注入工法が実施された。舗装断面は図-5.1.1に示す通り、供用開始時は版厚25cmのコンクリート舗装であったが、現在はアスファルト舗装によりオーバーレイされ結果としてコンポジット舗装断面となっている。調査の結果、ダウエルバーの破断による荷重伝達性能の低下により大型車両走行時に振動の発生が生じている一方で、コンクリート版自体は緻密な硬化体を形成し供用55年を経ても、良好な性状を示したことから、既存のコンクリート版を可能な限り活用し、修繕を実施した。

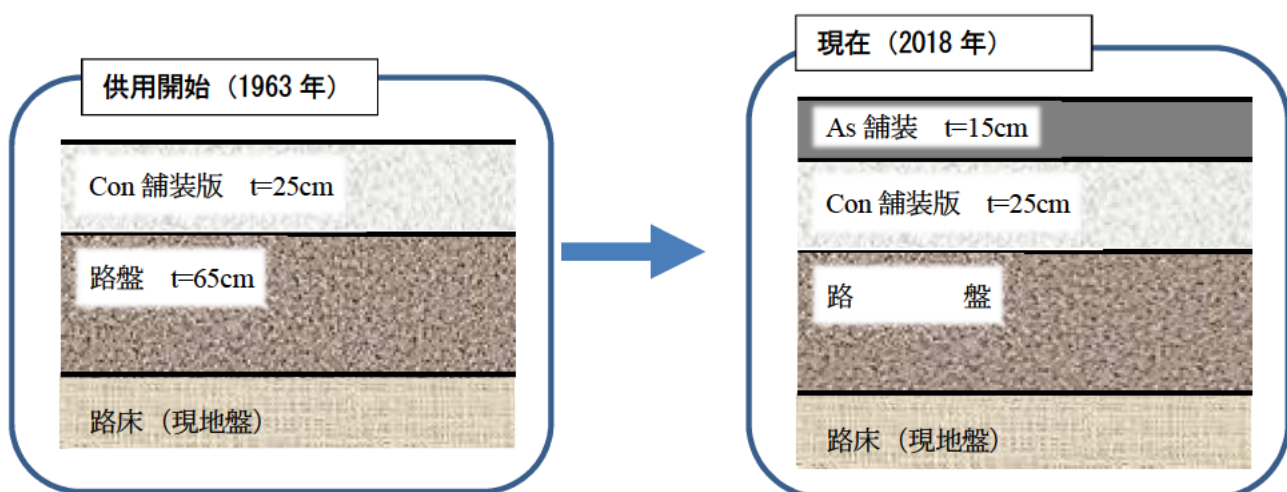


図-5.1.1 舗装断面

5.1.2 各修繕工法の内容

(1) アンダーシーリング工法による修繕工法

「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」での調査結果より、本路線は、ダウエルバーの破断による荷重伝達性能の低下に起因する損傷のため、局部打替え工法、パーステッチ工法のように荷重伝達性能を回復する修繕工法が望ましい。しかし、本路線は昼間の交通規制が難しく、夜間の交通規制のみで修繕することが求められた。そこで、局部打替え工法、パーステッチ工法などの修繕工法に比べ、比較的短い交通規制で

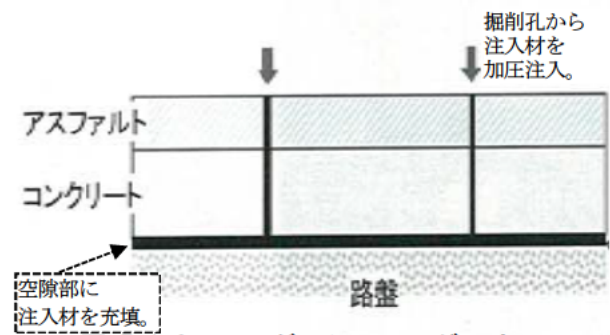


図-5.1.2 アンダーシーリング工法のイメージ図（断面）

対応が可能なアンダーシーリング工法に着目し、 D_0 たわみ量、荷重伝達率の改善を目的に、修繕工法への適用を検討した。アンダーシーリング工法は、従来、目地部などでアスファルト系材料またはセメント系材料を注入し、コンクリート版下と路盤の間に生じた空隙や空洞を充填する工法として、従来では維持工法として位置付けられるが、本検討では図-5.1.3に示すよう、コンクリート版全体に定間隔で複数の掘削孔から注入することで、修繕工法への適用を検討した。

図-5.1.2にアンダーシーリング工法のイメージ図、表-5.1.1に注入条件、図-5.1.3に注入箇所を示す。アンダーシーリング工法は、コンクリート版下まで1枚の版に対し所定の8箇所を $\phi 50\text{mm}$ で削孔し、ブローンアスファルトを 0.4MPa の圧力にて注入した。

なお、本修繕では、アンダーシーリング工法の実施後、アスファルト舗装を15cm厚さにてオーバーレイを実施した。

表-5.1.1 注入条件

項目	内容
注入材料	ブローンアスファルト
注入方法	加圧注入 (0.4MPa)
注入量	平均 約4.6mm厚(注入量から算出)

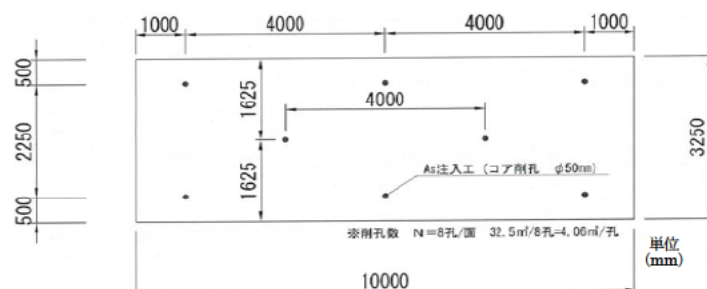


図-5.1.3 注入箇所

(2) 各目地に実施した修繕工法

実施した各修繕工法のイメージ図を図-5.1.4、各目地の損傷状況及び修繕工法選定理由を表-5.1.2に示す。

目地①は局部打替え工法を実施した。局部打替え工法は、目地部のコンクリート版を撤去した後、ダウエルバー（φ28mm、設置間隔：400mm）とチェアを設置しジェットコンクリートを用いて復旧した。なお、既存コンクリート版とジェットコンクリートの接合部は、タイバー（D22mm、設置間隔：300mm）で連結した。

目地③はバーステッチ工法を実施した。バーステッチ工法は、深さ7cm程度の切込みを入れた後、ダウエルバー（φ22mm、設置間隔：300mm）を再設置し、樹脂モルタルで復旧した。

目地④、⑤はクラック抑制シート工法を実施した。クラック抑制シート工法は、コンクリート版とアスファルト舗装との継ぎ目に幅50cmのクラック抑制シート（ガラス繊維+改質As）を用いてプライマーを塗布して敷設した。

目地⑥、⑩は、ウォータージェットにより既存コンクリート版の一部を開削した後、目地板（エラストイト）を設置し目地の開きを4cmから2cmに改善した後、ジェットコンクリートを用いて復旧した。なお、本目地では、ダウエルバーについては破断の有無に関わらず未措置である。

目地①、③、④、⑤、⑥、⑩は上記の措置終了後、その他の目地は既存のアスファルト層を切削後、改質Ⅱ型密粒度アスコンにて厚さ15cmでオーバーレイを実施した。

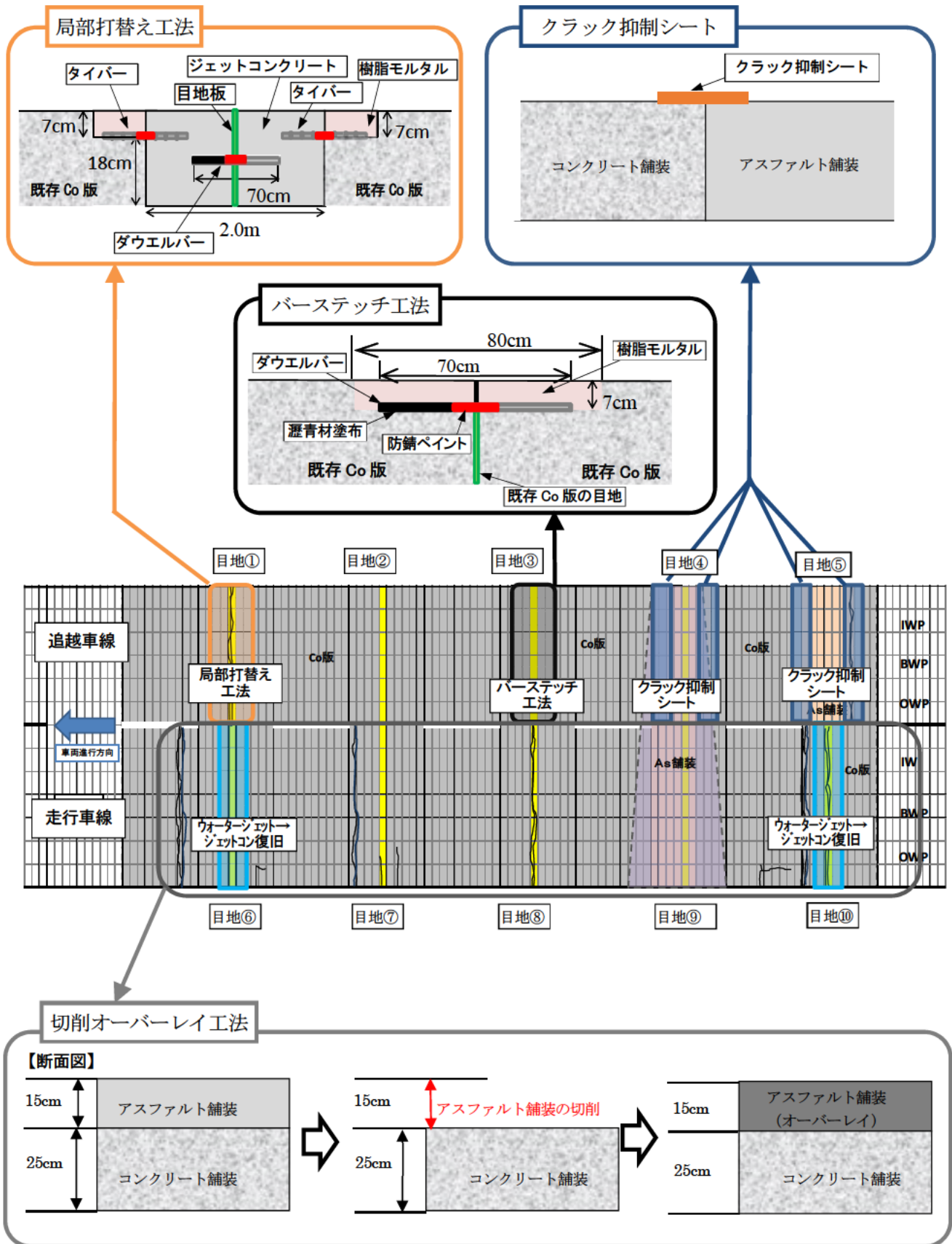


図-5.1.4 各修繕工法のイメージ

表-5.1.2 各目地の損傷状況及び修繕工法選定理由

名称	振動対策を目的とした過去の補修履歴 (聞き取り調査) ※表層(Po)H11施工		一次調査		二次調査			補修		
	Con版 目地部	As舗装 OL部	有無	程度・状況 (I-IV)	Con版の目視観察	目地近傍の ひび割れ有無	目地金物の 状態 (Con撤去時確認)	Con版下 空洞の有無	対策工法	適用理由など
目地①	-	-	有	IV	無	無	破断 (Con撤去時確認)	無 (過去補修の形跡)	局部打替え工法(ダウエルバー再設置) +As打替え	・局部打替え工法の効果検証
目地②	-	-	無 (健全)	-	無	無	未確認 (恐らく破断)	無 (過去補修の形跡)	目地部対策なし →As打替えのみ	【目地②と目地③の比較】 ・比較的健全な目地部への対策検討 ・パーステッチ工法の有効性評価
目地③	-	-	無 (健全)	-	無	無	未確認 (恐らく破断)	無 (過去補修の形跡)	パーステッチ工法(ダウエルバー再設置) +As打替え	
目地④	目地Con撤去 →As舗装	時期不明 打替え	無	-	-	-	-	無 (過去補修の形跡)	クランク抑制シート +As打替え	【目地④・⑤と目地③の比較】 ・不連続断面部への対策検討 ・クランク抑制シートの効果検証
目地⑤	目地Con撤去 →As舗装	-	有	II-III Con-As境界	-	-	-	無 (過去補修の形跡)	クランク抑制シート +As打替え	
目地⑥	-	時期不明 打替え	無	-	有 3m以内	有 3m以内	破断 (W時確認)	無 (過去補修の形跡)	W/開削部のCon復旧 (目地板の設置,ダウエルバーなし) +As打替え	・目地の開きを改善(4cm→2cm)した効果 の検証 (簡易補修の効果検証)
目地⑦	-	-	有	I	有 3m以内	有 3m以内	破断 (人力掘削確認)	無 (過去補修の形跡)	目地部対策なし →As打替えのみ	【目地⑦・⑧と他の目地部の比較】 ・簡易補修(As打替えのみ)の効果検証 (簡易補修の効果検証)
目地⑧	-	-	有	II-III	無	無	破断 (人力掘削確認)	無 (過去補修の形跡)	目地部対策なし →As打替えのみ	
目地⑨	目地Con撤去 →As舗装	時期不明 打替え	無	-	-	-	-	無 (過去補修の形跡)	クランク抑制シートなし →As打替えのみ	(簡易補修の効果検証)
目地⑩	-	-	有	II-III	有 3m以内	有 3m以内	破断 (W時確認)	無 (過去補修の形跡)	W/開削部のCon復旧 (目地板の設置,ダウエルバーなし) +As打替え	・目地の開きを改善(4cm→2cm)した効果 の検証 (簡易補修の効果検証)

5.2 各修繕工法の追跡調査結果

(1) アンダーシーリング工法を実施した箇所の追跡調査結果

図-5.2.1 にアンダーシーリング工法実施前後における D_0 たわみ量、荷重伝達率の測定結果を示す。FWD により測定した D_0 たわみが $400\mu\text{m}$ 以上で空洞の可能性あり、荷重伝達率が 80%以上で有効、と判断される。

アンダーシーリング施工前は、 D_0 たわみは大きい箇所では $600\mu\text{m}$ 程度、荷重伝達率は低い箇所では 40% 程度を示したが、アンダーシーリング施工後は、全ての測定箇所、 D_0 たわみは $400\mu\text{m}$ 未満、荷重伝達率は 80%以上を示し、健全な値まで回復したことから、アンダーシーリング工法による修繕効果が確認できた。

図-5.2.2 に各測点のアンダーシーリング工法実施前後の D_0 たわみ、図-5.2.3 に各測点のアンダーシーリング工法実施前後の荷重伝達率、図-5.2.4 に各測点のアンダーシーリング工法実施前後の L_{10} 振動レベル測定結果、表-5.2.1 にアンダーシーリング工法実施前後の平均 L_{10} 振動レベルを示す。振動レベルの変化と FWD による D_0 たわみ、荷重伝達率の変化に明確な相関は確認できないが、アンダーシーリング工法の実施により L_{10} 振動レベルは平均約 2dB 低下した。また、個別の測点で着目すると、図-5.2.1 に示す○の測点 (測点 81) では、アンダーシーリング工法実施前 (D_0 たわみ : $610\mu\text{m}$ 、荷重伝達率 : 41.0%) は L_{10} 振動レベルが 63dB

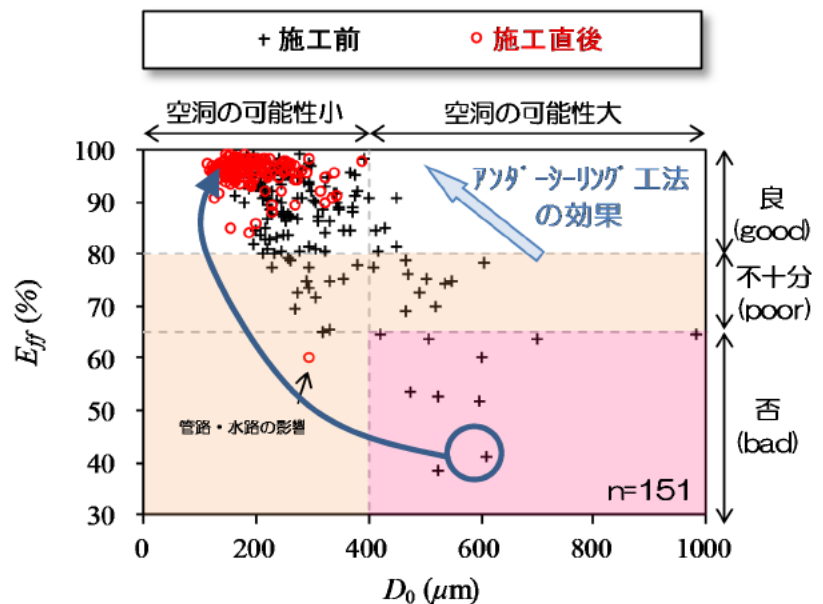


図-5.2.1 アンダーシーリング前後における D_0 たわみ、荷重伝達率の測定結果

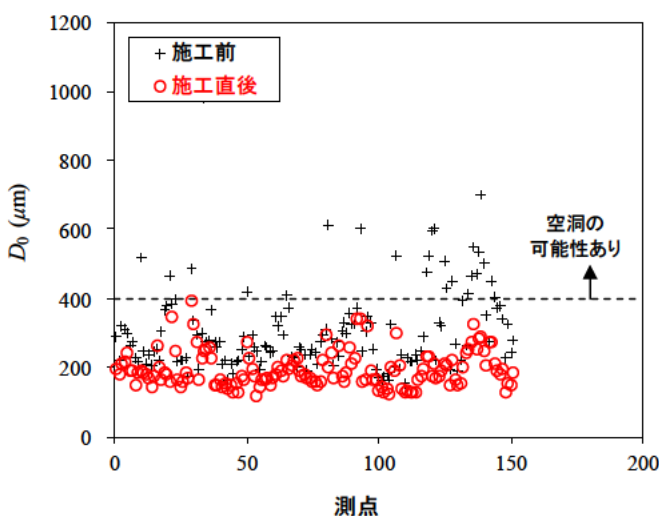


図-5.2.2 各測点のアンダーシーリング工法実施前後の D_0 たわみ

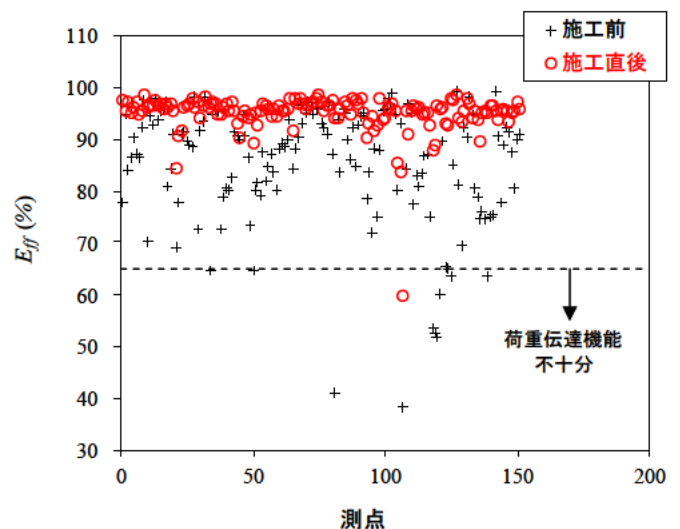


図-5.2.3 各測点のアンダーシーリング工法実施前後の荷重伝達率

であったが、アンダーシーリング工法実施後 (D_0 たわみ: $199\mu\text{m}$ 、荷重伝達率: 94.0%) は L_{10} 振動レベルが 58dB まで低下した。さらに、振動要請限度超過地点は測定点数 20 箇所のうち、アンダーシーリング工法実施前は 7 箇所であったのが、アンダーシーリング工法後は 1 箇所に減少したことから、振動モニタリング結果からも、アンダーシーリング工法による修繕効果を確認できた。

なお、本修繕工法には、アンダーシーリング工法に加え切削オーバーレイ工法も実施しており、切削オーバーレイ工法の修繕効果も含まれている。そのため、アンダーシーリング工法実施のみでの修繕効果の確認も今後必要と考えている。

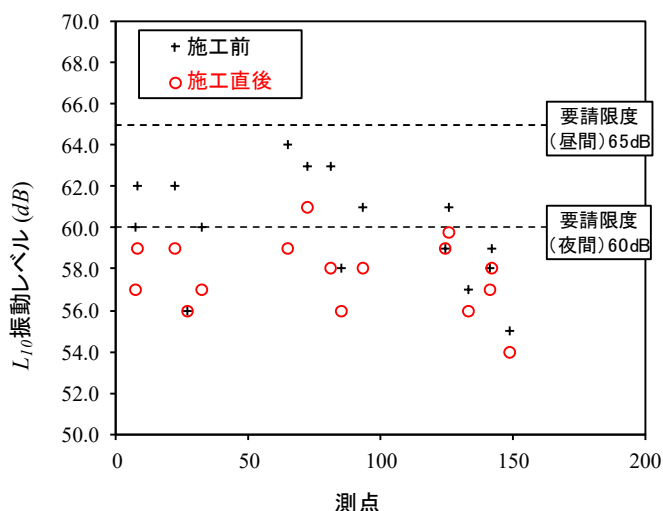


図-5.2.4 各測点のアンダーシーリング工法実施前後の L_{10} 振動レベル

表-5.2.1 アンダーシーリング工法実施前後の平均 L_{10} 振動レベル

アンダーシーリング実施前 の平均 L_{10} 振動レベル (dB)	アンダーシーリング実施後 の平均 L_{10} 振動レベル (dB)	アンダーシーリング前後における 平均 L_{10} 振動レベル (dB) の差
59.5	57.5	2.0

以上より、従来、維持工法として位置づけられているアンダーシーリング工法は、 D_0 たわみの低下、荷重伝達率の回復及び振動レベルの低減が確認され、修繕工法として適用できる可能性を示した。さらに、アンダーシーリング工法は、局部打替え工法やバーステッチ工法などの修繕工法と比較し、コンクリート材料の養生時間が不要であり、比較的短い交通規制で対応が可能であるため、効率的な修繕工法として適用できる可能性が示唆された。但し、本結果は、アンダーシーリング工法実施直後の結果であるため、アンダーシーリング工法による効果の持続性については、今後、追跡調査による確認が必要と考えている。

(2) 各目地に実施した修繕工法の追跡調査結果

1) FWD による構造評価

図-5.2.5 に各目地の修繕工法の概要、FWD 測定位置、図-5.2.6 に追越車線の D_0 たわみ測定結果 (49kN)、図-5.2.7 に追越車線の荷重伝達率測定結果、図-5.2.8 に走行車線の D_0 たわみ測定結果 (49kN)、図-5.2.9 に追越車線の荷重伝達率測定結果を示す。

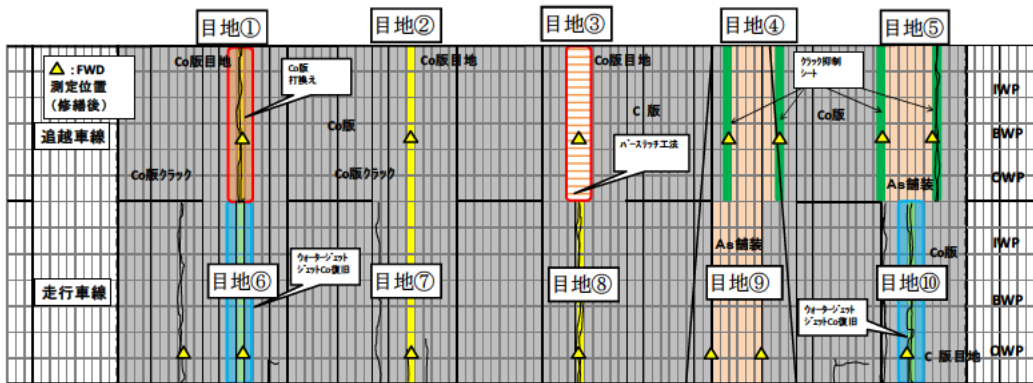


図-5.2.5 各目地の修繕工法の概要



図-5.2.6 D_0 たわみ (49kN) 測定結果【追越車線】

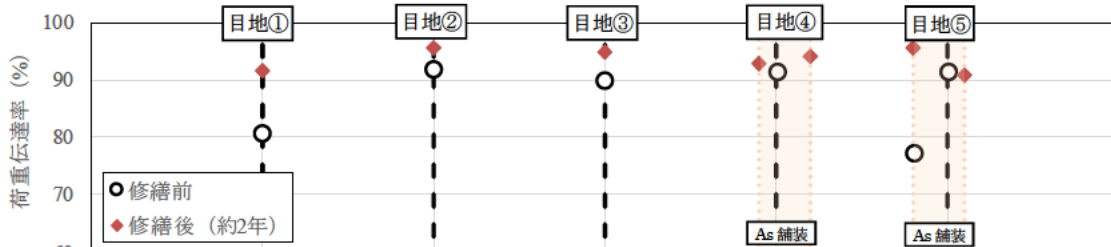


図-5.2.7 荷重伝達率 (98kN) 測定結果【追越車線】

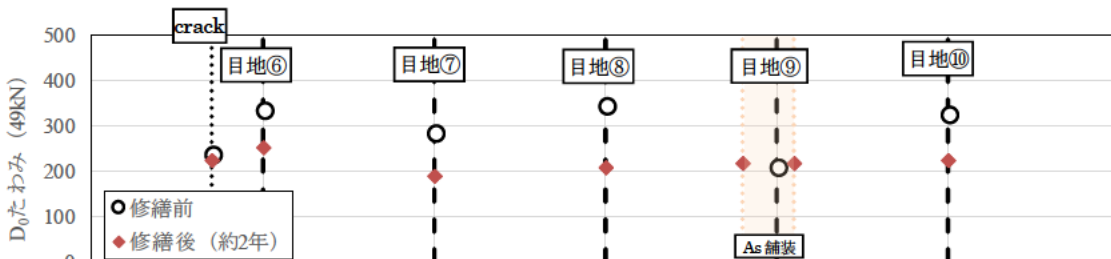


図-5.2.8 D_0 たわみ (49kN) 測定結果【走行車線】

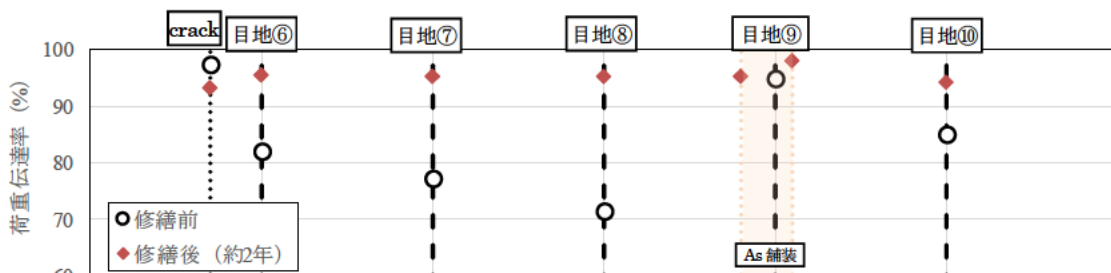


図-5.2.9 荷重伝達率 (98kN) 測定結果【走行車線】

各修繕工法実施後の追越車線での D_0 たわみ (49kN) は、各修繕工法によって明確な傾向は確認できず、約 100~250 μm のたわみを示し、いずれの目地でも空洞の可能性は低い結果であった。各修繕工法実施後の追越車線での荷重伝達率も同様に、各修繕工法によって明確な傾向は確認できず、全ての目地で 90%以上の荷重伝達率を示し、十分な荷重伝達性能を示したことから、各修繕工法の修繕効果が確認できた。

各修繕工法実施後の走行車線での D_0 たわみ (49kN) は、各修繕工法によって明確な傾向は確認できず、約 180~250 μm のたわみを示し、いずれの目地でも空洞の可能性は低い結果であった。各修繕工法実施後の走行車線での荷重伝達率でも同様に、各修繕工法によって明確な傾向は確認できず、全ての目地で 90%以上の荷重伝達率を示し、十分な荷重伝達性能を示した。走行車線で実施した修繕工法は、目地内のダウエルバーの措置は実施しておらず、アスファルト舗装の切削オーバーレイ工法であるが、いずれの目地でも十分な荷重伝達性能を示したことから、現在までの結果では十分な修繕効果があることを示した。

但し、本調査結果は修繕後から供用約 2 年までの結果であり、修繕効果の持続性に関しては、今後の検証が必要と考えている。

2) MRP による縦断形状測定結果

図-5.2.10 に追越車線の縦断形状、図-5.2.11 に走行車線の縦断形状を示す。

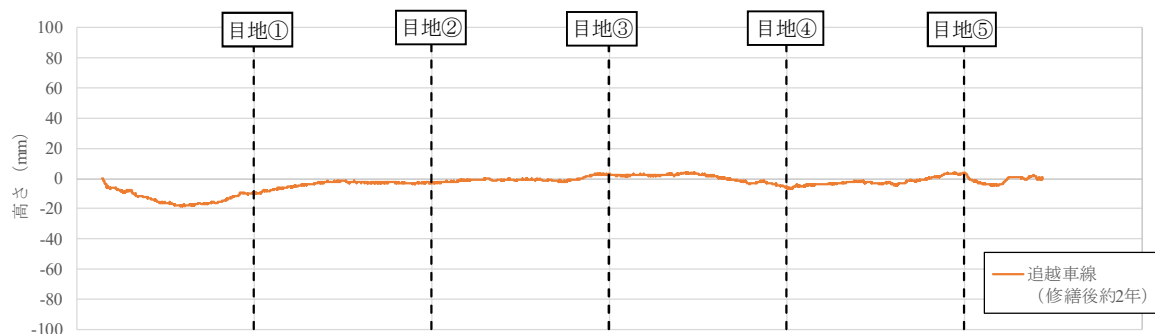


図-5.2.10 縦断形状測定結果【追越車線】

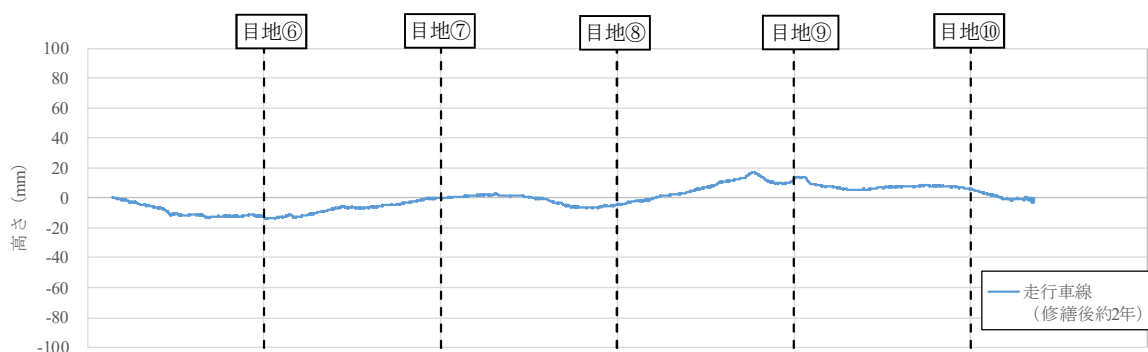


図-5.2.11 縦断形状測定結果【走行車線】

各目地で顕著な損傷が発生していないため、各修繕工法による縦断形状に明確な傾向は確認できなかった。FWD による調査結果同様、本調査結果は修繕後から供用約 2 年での結果であり、修繕効果の持続性の確認に関しては、今後も継続的な調査が必要と考える。

3) 路面外観調査

目視によるひび割れ調査した結果、目地①では、路面の両端に 50～60cm 程度の微細なひび割れが発生していた（写真-5.2.1）。但し、このひび割れによる車両通行に伴う振動や不具合などは、調査実施時には確認できなかった。目地①では、局部打替え工法を実施しており、目地にはダウエルバーを設置している。そのため、コンクリート版は拘束されず自由に挙動するため、アスファルト表面にリフレクションクラックが発生したと推察される。また、他の目地でのひび割れは確認できなかった。

本調査結果は修繕実施後から供用約 2 年での結果であり、目地①に発生したひび割れの進展状況や他の目地の状況の確認するため、今後も継続的な調査が必要と考える。

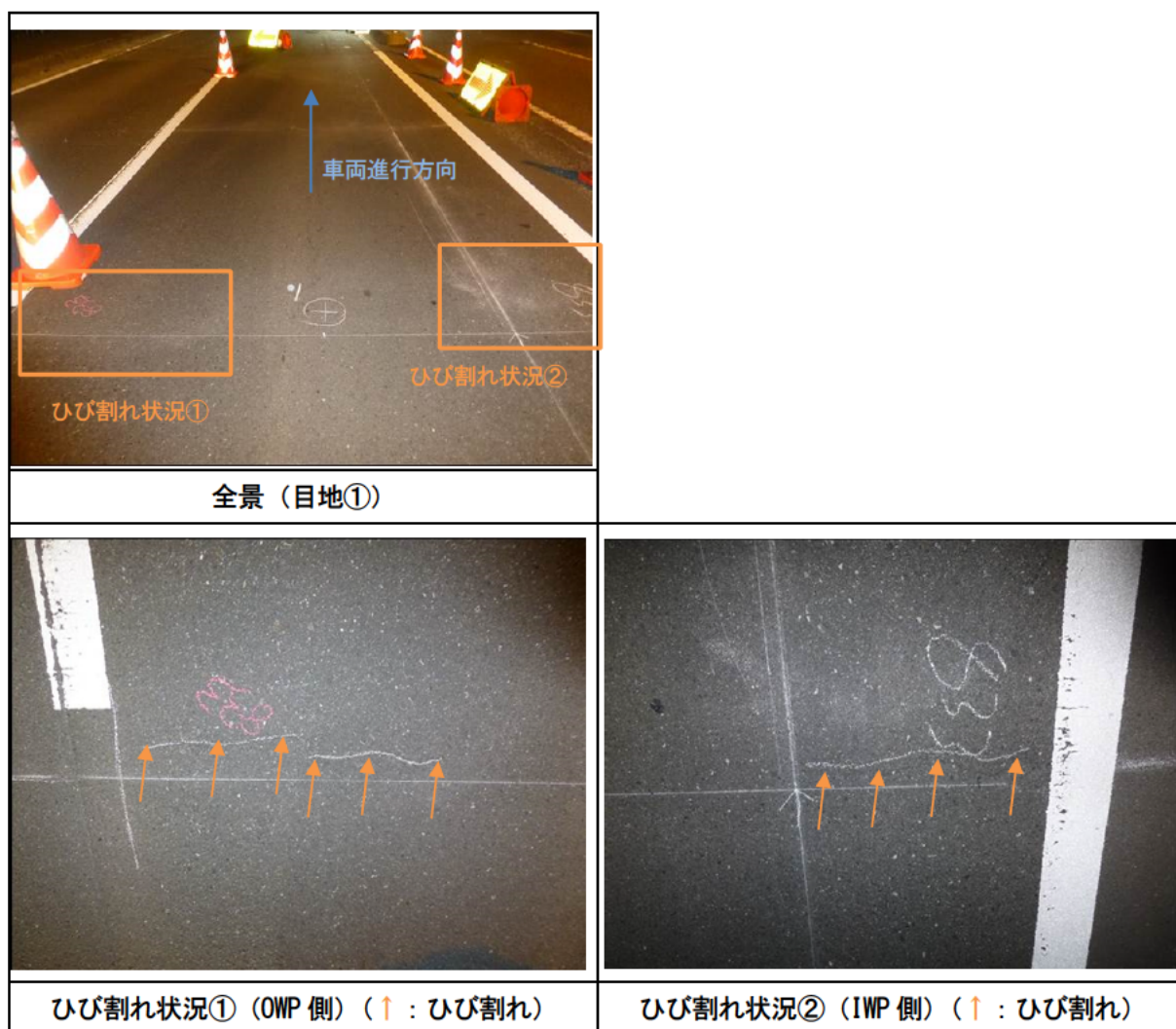


写真-5.2.1 ひび割れの様子 (目地①)

5.3 各修繕工法の課題

実道にて各修繕方法を実施し、修繕後供用2年で追跡調査をした結果から得られた課題を以下に示す。

①各修繕工法における修繕効果の持続性の確認

アンダーシーリング工法、局部打替え工法、バーステッチ工法、クラック抑制シート、切削オーバーレイ工法を実施し、各修繕工法による修繕効果が確認できた。その一方で、現在のところ損傷が発生しておらず各修繕工法による修繕効果に関しては明確な違いは確認できなかった。よって、今後も各修繕箇所での供用による追跡調査を実施し、各修繕工法による効果の持続性の把握する必要があると考えている。

②アンダーシーリング工法のみ修繕効果の確認

本検討では、アンダーシーリング工法を実施した箇所では、併せて切削オーバーレイ工法も実施している。そのため、修繕効果にはアンダーシーリング工法のみ効果だけではなく、切削オーバーレイ工法の効果も含まれる。

修繕工法の採用を策定するためには、個別の効果の確認が必要であり、今後、試験的にアンダーシーリング工法のみを実施した場合での修繕効果の確認が必要と考えている。

③バーステッチ工法の効率化

本路線の損傷要因は、ダウエルバーの破断による荷重伝達性能の低下に起因する損傷と推察した。このような場合は、荷重伝達性能を回復することを目的に、バーステッチ工法の採用が考えられるが、本路線では、バーステッチ工法を採用するために必要な交通規制時間を確保することが難しかった。そのため、多くの現場条件で採用できるようにするためには、施工の効率化による施工時間の短縮化が求められる。

5.4 まとめ

大型車両通行時に振動が発生する不具合が生じたコンクリート舗装に、各修繕工法を適用した結果、以下のことがわかった。

- ・従来、維持工法として位置づけられているアンダーシーリング工法を適用した結果、 D_0 たわみの低下、荷重伝達率の回復及び L_{10} 振動レベルの低減が確認され、修繕工法として適用できる可能性を示した。さらに、アンダーシーリング工法は、局部打替え工法やバーステッチ工法などの修繕工法と比較し、コンクリート材料の養生時間が不要であり、比較的短い交通規制で対応が可能であるため、効率的な修繕工法として適用できる可能性が示唆された。なお、アンダーシーリング工法による修繕効果の持続性については、今後の追跡調査が必要と考える。
- ・各目地に、局部打替え工法、バーステッチ工法、クラック抑制シート、切削オーバーレイ工法を適用した結果、修繕実施後から供用約2年までは顕著な損傷は確認されず、各工法の修繕効果が確認できた。一方で、各工法の修繕効果に関しては明確な違いは確認されず、修繕効果の持続性の確認を含め今後の追跡調査が必要である。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013, 2013年11月

6 まとめと今後の課題

本共同研究では、コンクリート舗装版の高耐久性を発揮させるため既往の維持修繕工法の改善を目的に、コンクリート舗装の供用調査による各性能の把握、損傷要因の調査、目地部における非破壊診断手法の検討、寒冷地における凍上対策及び各修繕工法の効果の比較・検証と課題の抽出を実施した。まとめると以下のとおりである。

6.1 平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査

供用 16 年、18 年での平泉バイパスのコンクリート舗装を調査した結果、以下のことが分かった。

- ・ FWD による構造評価から、供用に伴い版央の D_0 たわみ量に大きな変化は確認できなかった。一方で、目地部の荷重伝達率は供用に伴い全体的には若干低下する傾向にあった。中でも荷重伝達率低下が進行している目地部では、急激に荷重伝達率が低下し、コンクリート版同士の一体性が失われる可能性があることが示唆された。
- ・ ひび割れ測定結果では、供用に伴いひび割れ度は若干増加傾向を示した。
- ・ すべり抵抗性の測定結果から、供用により若干すべり抵抗は低下する傾向にあったが、供用初期に適切なすべり抵抗性が確保されている場合、供用 18 年でも大きな性能低下は確認されず、良好なすべり抵抗性を示した。
- ・ コンクリート舗装版の鉄網設置有無での、ひび割れ度、ひび割れ幅を比較したところ、鉄網有無による明確な傾向は確認できなかった。
- ・ 最大で 14m の盛土高さを有している区間があるが、本調査では、盛土に起因すると考えられるコンクリート舗装の損傷は確認できなかった。

6.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析

現地調査の結果より、以下のことが分かった。

- ・ 過去に実施されたアンダーシーリングによりコンクリート版下に空洞はないものの、ダウエルバーの破断により荷重伝達性能は発揮されず、また横目地が開き、開きが大きい箇所では重度のリフレクションクラックが発生し、振動の発生に繋がった、と推察できる。
- ・ FWD による荷重伝達率が 65%以上にも関わらず、ダウエルバーの破断が確認されたことから、従来の評価方法では目地構造の劣化を正しく判定できない危険性が示唆された。

コンクリート舗装版から切出したコンクリートの材料分析を実施した結果、以下のことがわかった。

- ・ 曲げ強度試験の結果、設計基準強度である 4.5kN/mm^2 を満たし、十分な曲げ強度性能を有していると判断できる。また、圧縮強度試験、静弾性係数試験の結果から、若干静弾性係数が高い傾向を示したものの、良好な強度性能を示した。

- ・ダウエルバーに対する腐食環境性を把握するため、コンクリートの中性化深さ、塩化物含有量を測定した結果、中性化深さ、塩化物含有量ともに低く、コンクリート中のダウエルバーに対する腐食環境性は極めて低い結果であった。
- ・供用によりコンクリート舗装版としては構造的損傷が確認されるが、供用 55 年を経てもコンクリート材料としては非常に良好な材料性能を示した。

コンクリート舗装中の破断したダウエルバー採取し分析した結果、以下のことがわかった。

- ・ダウエルバーの組織は全体的にフェライト+パーライト組織を呈しており、化学成分も鉄筋コンクリート用棒鋼の材質として一般的であると考えられる。
- ・「f-1」では、破断部に変形が認められなかったことから疲労による破壊の可能性、「O-1」では破断部の特徴から孔食を起点とした両振り曲げによる疲労による破壊と推定された。
- ・また、O-1 と同一目地内のダウエルバーO-2 は、未破断であったものの減肉部近傍の複数箇所でき裂の様相が認められ、き裂は天地を問わず形成されていたことから、今後の継続使用で破断に至っていた可能性が示唆される。

6.3 コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発

コンクリート舗装横目地の健全度を評価するために、目地の劣化過程を 3DFEM でモデル化した劣化構造モデルによって逆解析を行う方法を開発した。この方法では、劣化過程を 5 つの Stage に分け、健全、ダウエルバー腐食、ダウエルバー切断、ダウエルバー切断+わずかな空洞、ダウエルバー切断+大きな空洞の順番で劣化していくと仮定し、それぞれについて具体的な 3DFEM による劣化構造モデルを作成した。逆解析には、各 Stage ごとにあらかじめランダムに生成した舗装各層の弾性係数によるたわみのデータベースを作成しておき、FWD で測定したたわみと一致した弾性係数と Stage の組み合わせを求める単純な方法を採用した。開発した方法を平泉バイパスのコンクリート舗装における FWD 測定結果に適用した結果以下のような知見を得た。

- ・3 回にわたる FWD 調査結果より、供用年数とともに目地部の D_0 は増加し E_{ff} は減少する傾向がみられたが、従来の健全度による判定方法によれば空洞は無いとされた。
- ・適切なデータベースの規模を設定することにより、逆解析結果によるたわみは測定値と高い精度で一致することを確認した。
- ・逆解析された各層の弾性係数のうち、アスファルト中間層と粒状路盤は区間内で設定した下限値と上限値の間で大きく変動した。
- ・区間の平均的な弾性係数は経年的に大きな変化はなかったことから、 D_0 や E_{ff} の経年的な変化は弾性係数によるものではないと推定される。
- ・同じ施工区間の目地において、供用した年数が進むにつれ劣化が進行していく割合を定量的に表現することに成功した。
- ・ D_0 や E_{ff} から目地部の Stage を個別に判定することは困難であるが、健全な Stage1 とダウエルバーが切

断されて空洞がある Stage4、5 の区別は可能である。

- D_0 や E_{ff} とコンクリート版の曲げ応力には弱い相関関係がみられるが、前者から後者を推定するような回帰式を得ることは難しく、劣化構造モデルによる応力解析が必要である。

6.4 目地部におけるダウエルバーの健全性評価手法に関する検討

ダウエルバーの破断を模擬した供試体と舗装走行実験場を用いて、漏洩磁束法により、ダウエルバーの破断検知可能かを評価した結果、以下のことがわかった。

- 鋼材の配置条件により磁束密度分布は影響を受け、着磁方向や測定の向き等の測定条件により測定結果は大きく影響を受けた。しかし、鋼材配置が既知であれば、ダウエルバー直上のセンサー以外のセンサーの値を用い、補正処理することで、その影響を低減できる可能性があった。
- ダウエルバーの破断を模擬した隙間を設けて検討した結果、隙間が 5、10mm の場合は破断検知可能であったが、隙間 0mm の場合は測定条件により破断と健全が混在する結果であった。
- 測定対象ダウエルバー以外のダウエルバーが測定結果に与える影響を検討した結果、測定対象ダウエルバー近傍の他のダウエルバーの影響は低いことがわかった。
- 目地を模擬した供試体と舗装走行実験場の目地部では、磁束密度の分布は異なった。これは、鉄網などの鋼材配置条件が同一でないため、と考えられる。よって、鉄網などの鋼材配置条件ごとに磁束密度分布を把握しておくことで、ダウエルバー以外の影響を低減するための適切な補正処理の適用が可能と考えられる。

6.5 MMS を用いたコンクリート舗装の段差評価に関する検討

交通規制を要せずに効率的かつ、より精緻に段差を定量的に評価できる可能性のある技術の1つとして、MMS (Mobile Mapping System) に着目し、路面プロファイラと MMS から算出した段差の比較を行い、測定精度の確認を行った。

- MMS により測定した段差は、複数回測定を行うことで路面プロファイラによって算出した段差に対して 2~3mm 以内の誤差で測定が可能であることが分かった。一方、段差量と目地部の構造的な損傷についての関係について必ずしも明確になっていないため、得られた段差に関するデータと目地部の構造的な損傷の関係性について、さらに検討が必要と考えられる。

6.6 積雪寒冷地における凍上対策に関する検討

積雪寒冷地における既設舗装調査および解析結果より得られた主な知見を以下に示す。

- 既設舗装調査により、凍上が発生すると短い期間で構造的な破損に至ることが確認された。本調査においては、最大凍上量観測日からひび割れ発生を確認するまでの期間は2ヶ月程度と極めて短い期間であった。
- FWD 調査の結果から、新たにひび割れが生じた箇所においては舗装版下に空間のある可能性が高いことから、凍上により路盤面に不陸が発生しコンクリート舗装版と路盤の間に空間が生じることが損傷発生

の要因と考えられる。

- ・凍結深さ内に凍上性の路床土がない路線では、構造的な損傷であるひび割れは確認されなかったが、理論最大凍結深さの70%までを非凍上性の材料で置換しその下に凍上性の路床土がある路線では構造的なひび割れが多く確認された。
- ・FEM解析の結果、コンクリート舗装版と路盤の間に空間のある凍上モデルの最大引張応力は、コンクリート舗装版と路盤が密着している標準モデルと比較して、約6倍の引張応力が生じる結果となった。
- ・FEM解析の結果を反映させた疲労度計算の結果、凍上が発生しなければ、20年以上構造的な損傷が生じないコンクリート舗装版でも、凍結が路床まで到達し、凍上が発生した場合、数十日で構造的な損傷が発生する結果となり、既設舗装調査の結果と一致した。

以上より、凍上性材料が凍結深さ内の路床に用いられ、コンクリート舗装版下面に不陸が発生すると舗装寿命が低下することが明らかになったことから、積雪寒冷地のコンクリート舗装の路床設計においては、凍結深さまで非凍上性材料で構成させることを提案する。

6.7 既往の維持修繕工法の改善に関する検討

大型車両通行時に振動が発生する不具合が生じたコンクリート舗装に、各修繕工法を試験施工した結果、以下のことがわかった。

- ・従来、維持工法として位置づけられているアンダーシーリング工法を適用した結果、 D_0 たわみの低下、荷重伝達率の回復及び L_{10} 振動レベルの低減が確認され、修繕工法として適用できる可能性を示した。さらに、アンダーシーリング工法は、局部打替え工法やバーステッチ工法などの修繕工法と比較し、コンクリート材料の養生時間が不要であり、比較的短い交通規制で対応が可能であるため、効率的な修繕工法として適用できる可能性が示唆された。なお、アンダーシーリング工法による修繕効果の持続性については、今後の追跡調査が必要と考える。
- ・各目地に、局部打替え工法、バーステッチ工法、クラック抑制シート、切削オーバーレイ工法を適用した結果、修繕実施後から供用約2年までは顕著な損傷は確認されず、各工法の修繕効果が確認できた。一方で、各工法の修繕効果に関しては明確な違いは確認されず、修繕効果の持続性の確認を含め今後の追跡調査が必要である。

謝辞

本共同研究を実施するにあたり、「平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査」にご協力頂いた国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所水沢国道維持出張所、「国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」及び「既往の維持修繕工法の改善に関する検討」にご協力及びデータのご提供をして頂いた国道交通省関東地方整備局大宮国道事務所さらに現地調査にご協力頂いた関係者の方々に感謝の意を表します。

付録

付録 1. 「2.1 平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査」測定データ

付録 1.1 FWD 測定結果【版央】

付録 1.2 FWD 測定結果【目地部】

付録 1.3 DF テスターによる動的摩擦係数、CT メーターによる平均プロファイラ深さ測定結果

付録 1.4 ひび割れ度測定結果

付録 2. 「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」測定データ

付録 2.1 コンクリートの材料分析結果

付録 3. 「3.2.2 漏洩磁束法によるダウエルバー破断検知に関する実験的検討」測定データ

付録 3.1 漏洩磁束法による磁束密度測定結果（コンター図）

付録 1. 「2.1 平泉バイパスコンクリート舗装の追跡調査」

測定データ

付録 1.1 FWD 測定結果【版央】

付録 1.2 FWD 測定結果【目地部】

付録 1.3 DF テスターによる動的摩擦係数、CT メーターによる平均プロファイラ深さ測定結果

付録 1.4 ひび割れ度測定結果

付録 1.1 FWD 測定結果【版央】

●2 工区（下り）

○供用 9 年（H20）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (℃)	鉄網の有無
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
2-1	98 07	127	118	115	107	104	99	87	82	73	55	17 1	有
2-2	98 07	117	111	106	102	96	92	88	75	68	53	17 1	
2-3	98 07	137	129	126	117	112	109	99	85	76	58	17 1	
2-4	98 07	136	128	128	119	112	107	102	87	76	58	17 9	
2-5	98 07	133	125	125	117	111	108	100	87	77	58	17 6	
2-6	98 07	136	127	127	117	111	107	100	87	76	59	17 8	
2-7	98 07	134	124	119	111	109	102	99	84	76	60	17 5	
2-8	98 07	131	120	119	110	106	102	95	84	75	59	17 8	
2-9	98 07	133	124	120	113	108	104	96	86	76	60	18 0	
2-10	98 07	146	138	135	127	121	117	110	96	87	69	18 4	
2-11	98 07	149	136	133	130	123	117	111	99	88	70	18 5	無
2-12	98 07	117	115	111	103	99	94	90	78	70	56	18 5	
2-13	98 07	139	128	125	116	111	106	100	86	76	58	19 4	
2-14	98 07	126	117	114	105	101	97	91	79	70	54	18 8	
2-15	98 07	129	119	113	107	101	97	90	78	68	52	19 5	
2-16	98 07	125	115	112	105	99	95	89	75	66	50	18 9	
2-17	98 07	125	114	110	103	100	96	89	77	68	53	18 7	
2-18	98 07	113	105	104	92	91	86	80	69	61	47	18 6	
2-19	98 07	121	112	111	103	98	92	87	74	67	53	18 9	
2-20	98 07	132	125	123	115	110	105	99	86	76	59	18 5	
2-21	98 07	134	127	125	116	112	109	101	88	78	61	18 9	
2-22	98 07	120	111	110	102	97	93	89	76	70	55	19 1	
2-23	98 07	113	104	99	91	89	85	78	67	58	45	19 0	
2-24	98 07	119	110	110	97	96	90	85	73	65	50	19 2	
2-25	98 07	104	96	92	86	82	79	74	62	54	42	19 4	
2-26	98 07	115	106	104	95	93	88	82	71	61	46	19 5	
2-27	98 07	120	108	109	99	96	91	84	72	62	44	19 6	
平均		127	118	116	108	103	99	92	80	71	55	18 5	—
最大値		149	138	135	130	123	117	111	99	88	70	19 6	
最小値		104	96	92	86	82	79	74	62	54	42	17 1	
平均（鉄網有区間）		133	125	122	114	109	105	98	85	76	59	17 6	有
最大値（鉄網有区間）		146	138	135	127	121	117	110	96	87	69	18 4	
最小値（鉄網有区間）		117	111	106	102	96	92	87	75	68	53	17 1	
平均（鉄網無区間）		124	115	112	104	100	95	89	77	68	53	19 0	無
最大値（鉄網無区間）		149	136	133	130	123	117	111	99	88	70	19 6	
最小値（鉄網無区間）		104	96	92	86	82	79	74	62	54	42	18 5	

○供用16年 (H27)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (℃)	鉄網の有無
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
2-1	98 07	126	121	117	110	102	100	92	81	70	55	12.2	有
2-2	98 07	124	117	115	128	102	79	84	85	70	55	12.0	
2-3	98 07	136	130	136	109	113	109	104	87	79	62	11.9	
2-4	98 07	140	133	131	135	114	115	104	90	80	62	11.6	
2-5	98 07	143	134	136	106	117	114	104	92	82	64	11.9	
2-6	98 07	143	136	137	136	117	114	104	92	82	64	11.5	
2-7	98 07	133	126	122	97	111	108	100	87	78	62	11.3	
2-8	98 07	131	124	119	110	108	107	98	86	79	62	11.6	
2-9	98 07	138	129	125	131	113	111	103	91	83	67	11.1	
2-10	98 07	153	149	142	135	132	131	121	106	95	73	11.1	
2-11	98 07	149	145	140	129	129	124	117	104	94	76	11.1	無
2-12	98 07	133	123	120	104	106	101	96	84	76	62	10.8	
2-13	98 07	141	134	131	129	117	95	104	91	81	63	10.7	
2-14	98 07	129	124	118	102	105	104	94	82	72	57	10.9	
2-15	98 07	132	122	119	116	105	102	94	82	72	55	10.7	
2-16	98 07	131	123	118	110	104	101	92	80	71	55	10.8	
2-17	98 07	126	118	113	107	102	98	91	78	69	54	10.8	
2-18	98 07	115	109	107	89	93	89	81	72	63	49	11.0	
2-19	98 07	125	117	114	115	102	98	89	79	71	57	10.7	
2-20	98 07	137	129	126	119	112	110	102	86	77	62	10.6	
2-21	98 07	134	128	122	110	109	106	99	85	77	61	10.7	
2-22	98 07	119	111	105	99	95	94	86	76	68	54	10.5	
2-23	98 07	111	102	96	102	86	84	79	66	59	46	10.4	
2-24	98 07	115	107	103	96	91	89	81	70	62	48	10.3	
2-25	98 07	106	100	94	90	83	80	73	64	54	42	10.3	
2-26	98 07	117	108	105	99	93	91	83	72	64	47	10.2	
2-27	98 07	122	113	111	104	97	94	87	75	65	49	10.4	
平均		130	123	119	112	106	102	95	83	74	58	11.0	—
最大値		153	149	142	136	132	131	121	106	95	76	12.2	
最小値		106	100	94	89	83	79	73	64	54	42	10.2	
平均 (鉄網有区間)		137	130	128	120	113	109	101	90	80	63	11.6	有
最大値 (鉄網有区間)		153	149	142	136	132	131	121	106	95	73	12.2	
最小値 (鉄網有区間)		124	117	115	97	102	79	84	81	70	55	11.1	
平均 (鉄網無区間)		126	118	114	107	102	98	91	79	70	55	10.6	無
最大値 (鉄網無区間)		149	145	140	129	129	124	117	104	94	76	11.1	
最小値 (鉄網無区間)		106	100	94	89	83	80	73	64	54	42	10.2	

○供用18年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)	鉄網の有無
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
2-1	98.07	140	133	128	126	121	110	104	92	75	55	3.1	有
2-2	98.07	129	123	120	119	113	106	100	89	74	57	3.1	
2-3	98.07	149	141	138	136	128	119	113	100	85	64	2.9	
2-4	98.07	156	145	140	139	132	122	117	102	86	66	1.2	
2-5	98.07	149	143	138	137	129	121	117	101	87	67	1.1	
2-6	98.07	149	141	135	135	127	119	113	98	83	65	1.1	
2-7	98.07	142	134	130	128	121	114	109	97	82	65	1.1	
2-8	98.07	137	134	129	128	121	112	107	96	83	64	1.0	
2-9	98.07	145	139	132	132	124	116	112	98	85	67	1.3	
2-11	98.07	151	152	144	146	138	130	125	112	96	74	1.2	無
2-12	98.07	133	130	123	122	116	109	104	92	79	61	1.3	
2-13	98.07	145	138	132	132	125	117	113	99	83	65	1.3	
2-14	98.07	133	127	121	121	114	107	102	90	76	59	1.1	
2-15	98.07	133	127	122	121	115	108	102	90	75	57	1.2	
2-16	98.07	134	128	123	121	116	106	104	91	75	57	1.1	
2-17	98.07	131	125	118	118	112	105	101	87	74	57	1.1	
2-18	98.07	122	118	111	113	106	98	93	79	69	51	1.1	
2-19	98.07	132	128	122	122	114	105	101	89	75	58	1.3	
2-20	98.07	142	138	132	132	124	116	111	100	83	65	1.3	
2-21	98.07	135	134	128	127	120	112	108	95	82	64	1.2	
2-22	98.07	122	117	110	113	106	98	96	82	71	56	1.1	
2-23	98.07	108	106	101	101	95	87	83	72	64	49	1.1	
2-24	98.07	114	109	105	104	99	91	88	78	63	49	1.0	
2-25	98.07	108	102	96	96	91	83	79	70	56	43	1.0	
2-26	98.07	123	120	114	112	106	97	93	81	69	49	1.3	
2-27	98.07	131	126	119	119	112	104	100	84	70	50	1.2	
平均		134	129	123	123	116	108	104	91	77	59	1.4	
最大値		156	152	144	146	138	130	125	112	96	74	3.1	
最小値		108	102	96	96	91	83	79	70	56	43	1.0	
平均 (鉄網有区間)		144	137	132	131	124	115	110	97	82	63	1.8	有
最大値 (鉄網有区間)		156	145	140	139	132	122	117	102	87	67	3.1	
最小値 (鉄網有区間)		129	123	120	119	113	106	100	89	74	55	1.0	
平均 (鉄網無区間)		129	125	119	119	112	104	100	88	74	57	1.2	無
最大値 (鉄網無区間)		151	152	144	146	138	130	125	112	96	74	1.3	
最小値 (鉄網無区間)		108	102	96	96	91	83	79	70	56	43	1.0	

●3工区（上り）

○供用16年（H27）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-1	98.07	110	103	101	95	87	88	80	69	62	51	-0.6
3-2	98.07	109	102	97	92	85	84	78	65	60	50	-0.8
3-3	98.07	110	98	94	86	77	74	66	55	47	40	-0.9
3-4	98.07	85	77	75	70	64	63	57	48	41	34	-0.9
3-5	98.07	99	88	85	78	72	68	62	51	44	35	-0.7
3-6	98.07	92	81	79	74	67	66	59	51	45	35	-0.6
3-7	98.07	103	91	91	84	77	75	67	58	51	40	-0.4
3-8	98.07	94	83	81	74	68	67	61	52	48	40	-0.4
3-9	98.07	109	99	98	92	84	84	76	66	56	45	-0.7
3-10	98.07	112	103	97	91	84	83	76	64	55	44	-0.5
3-11	98.07	118	107	104	98	91	90	83	69	61	47	-0.6
3-12	98.07	93	84	81	78	74	76	71	63	56	46	-0.7
3-13	98.07	131	121	118	111	103	101	92	76	66	51	-0.7
3-15	98.07	120	109	106	100	93	91	84	70	61	47	-0.5
3-16	98.07	120	111	106	98	91	90	83	68	60	46	-0.6
3-17	98.07	115	107	104	97	90	89	80	67	57	44	-0.4
3-19	98.07	103	92	92	84	77	77	70	59	51	41	-0.5
3-20	98.07	112	104	100	95	86	86	79	66	59	45	-0.4
3-21	98.07	123	112	112	104	98	97	89	77	65	52	-0.5
3-22	98.07	128	118	115	108	100	99	92	78	66	50	-0.5
3-24	98.07	93	87	82	75	69	67	60	51	45	37	-0.7
3-25	98.07	100	91	88	81	74	73	65	55	49	39	-0.6
3-26	98.07	98	88	85	79	72	72	65	54	48	38	-0.8
3-27	98.07	102	94	88	83	76	75	68	57	51	40	-0.8
3-28	98.07	99	90	86	82	75	73	67	56	48	39	-0.7
3-29	98.07	107	96	90	86	80	76	70	56	50	39	-0.6
3-30	98.07	101	89	87	81	72	71	64	52	45	35	-0.4
3-31	98.07	86	78	76	69	63	61	56	47	42	34	-0.5
3-32	98.07	98	89	86	80	73	71	64	53	46	37	-0.6
3-33	98.07	106	95	93	85	77	76	68	56	49	39	-0.6
3-34	98.07	94	86	80	74	68	66	59	50	43	36	-0.3
3-35	98.07	111	100	96	88	79	77	69	56	51	39	-0.5
3-36	98.07	110	102	96	90	83	80	72	62	53	42	-0.4
3-37	98.07	122	112	106	101	92	90	83	68	60	49	-0.3
3-38	98.07	126	114	109	105	96	95	83	72	62	49	-0.2
3-39	98.07	122	114	109	102	94	93	84	71	62	48	-0.3
3-40	98.07	118	109	102	98	91	89	79	67	58	45	-0.4
3-41	98.07	108	98	96	90	84	82	73	61	54	43	-0.6
3-43	98.07	116	105	99	96	87	86	78	66	57	46	-0.4
3-45	98.07	138	126	121	116	108	106	96	82	71	56	-0.5
3-46	98.07	132	121	123	111	104	103	93	79	69	55	-0.5
3-47	98.07	141	131	132	120	112	109	99	84	74	59	-0.5
3-48	98.07	115	105	104	98	93	94	86	76	67	54	-0.4
3-49	98.07	142	130	128	121	112	112	103	88	79	63	-0.2
3-50	98.07	117	108	104	99	91	90	84	72	62	49	-0.1

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-51	98.07	116	106	103	97	90	88	80	68	60	46	-0.1
3-52	98.07	98	90	79	82	75	75	67	57	52	41	0.0
3-53	98.07	118	108	101	97	90	89	81	67	59	44	-0.1
3-54	98.07	114	104	104	92	86	84	77	63	56	43	0.1
3-55	98.07	105	96	91	86	80	78	70	59	51	39	-0.1
3-56	98.07	116	107	105	98	91	88	79	67	59	45	0.1
3-57	98.07	129	119	115	110	103	102	92	77	68	51	-0.1
3-58	98.07	130	120	118	108	102	100	90	76	66	50	0.0
3-59	98.07	130	122	117	110	103	100	91	75	65	49	-0.1
3-60	98.07	115	102	100	94	87	86	78	65	56	42	0.0
3-61	98.07	114	103	106	94	88	86	78	66	57	44	-0.1
3-63	98.07	124	114	117	104	97	95	86	72	64	50	-0.2
3-64	98.07	102	92	88	86	81	80	73	63	58	46	-0.2
3-65	98.07	115	109	105	99	91	91	84	71	64	51	-0.1
3-66	98.07	123	113	112	105	100	97	89	75	67	51	-0.1
平均		112	103	99	93	86	85	77	65	57	45	-0.4
最大値		142	131	132	121	112	112	103	88	79	63	0.1
最小値		85	77	75	69	63	61	56	47	41	34	-0.9

○供用18年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (℃)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-1	98.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-2	98.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-3	98.07	110	99	94	79	79	76	68	60	50	42	1.3
3-4	98.07	89	80	77	69	69	64	60	51	44	36	0.9
3-5	98.07	103	94	91	77	77	73	66	56	46	36	1.0
3-6	98.07	96	85	82	72	72	68	63	52	45	36	1.2
3-7	98.07	96	93	86	76	76	72	66	55	47	38	1.3
3-8	98.07	93	84	81	70	70	69	63	55	49	41	1.5
3-9	98.07	106	98	95	91	87	81	74	63	56	41	0.6
3-10	98.07	108	104	96	86	86	83	76	65	55	46	1.3
3-11	98.07	112	102	99	96	93	87	81	67	60	45	0.0
3-12	98.07	88	82	77	72	72	73	67	61	52	44	1.3
3-13	98.07	124	117	109	98	98	93	84	73	60	47	1.5
3-15	98.07	112	103	96	86	86	83	76	65	54	42	1.2
3-16	98.07	115	108	102	88	88	85	78	65	54	42	1.0
3-17	98.07	106	103	99	86	86	81	74	63	52	41	0.5
3-19	98.07	98	87	84	74	74	71	65	56	47	38	1.4
3-20	98.07	106	100	95	82	82	80	73	63	53	42	1.8
3-21	98.07	113	105	102	90	90	86	80	68	58	46	1.3
3-24	98.07	91	86	81	69	69	66	61	51	43	38	1.5
3-25	98.07	99	90	85	72	72	71	64	55	47	39	1.3
3-26	98.07	94	84	77	69	69	65	59	51	46	38	1.4
3-27	98.07	102	94	87	78	78	74	67	56	50	40	1.1
3-28	98.07	99	93	87	73	73	70	65	55	47	38	1.0
3-29	98.07	105	94	94	78	78	76	69	58	50	39	0.7
3-30	98.07	103	94	91	75	75	72	66	55	46	37	0.6
3-31	98.07	89	81	75	66	66	63	58	49	42	35	0.1
3-32	98.07	95	90	86	71	71	68	62	51	45	36	0.4
3-34	98.07	91	84	79	67	67	64	58	50	45	36	0.3
3-35	98.07	100	93	87	75	75	71	65	56	47	38	0.3
3-36	98.07	106	96	89	78	78	74	69	57	50	40	0.3
3-37	98.07	128	104	102	85	85	82	75	65	55	43	0.4
3-38	98.07	117	111	105	90	90	87	79	67	57	43	0.3
3-39	98.07	108	102	97	85	85	81	75	64	54	44	0.7
3-40	98.07	103	95	93	82	82	77	71	61	51	40	0.3
3-43	98.07	106	98	94	82	82	77	73	63	55	44	0.1
3-45	98.07	133	124	120	108	108	102	95	83	70	54	0.6
3-46	98.07	122	115	112	97	97	93	85	73	63	51	1.2
3-47	98.07	139	131	124	119	115	108	101	84	73	54	0.9
3-49	98.07	134	130	122	117	113	106	99	84	74	56	1.1
3-50	98.07	115	113	106	102	97	91	86	73	64	48	1.0

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-52	98.07	97	92	84	84	81	76	70	58	52	39	1.7
3-54	98.07	106	101	93	91	87	81	75	62	53	39	2.1
3-56	98.07	108	106	99	95	91	83	78	65	55	40	1.1
3-58	98.07	131	127	117	111	109	102	95	81	66	48	2.1
3-59	98.07	127	124	118	110	107	99	93	78	64	45	1.6
3-61	98.07	111	107	102	94	91	85	80	69	55	40	2.1
3-63	98.07	127	122	117	110	106	99	93	79	67	50	2.0
3-64	98.07	106	103	96	94	91	86	80	69	61	46	1.9
3-65	98.07	121	116	111	105	103	98	90	78	68	52	1.9
3-66	98.07	140	134	125	119	114	105	97	81	71	51	2.1
平均		109	102	96	87	86	81	75	64	54	42	1.1
最大値		140	134	125	119	115	108	101	84	74	56	2.1
最小値		88	80	75	66	66	63	58	49	42	35	0.0

○3工区（下り）

○供用9年（H20）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-1	98 07	81	78	77	69	66	65	60	51	46	35	19 6
3-2	98 07	84	82	82	72	71	68	63	55	49	40	20 1
3-3	98 07	81	77	75	67	65	61	57	49	44	36	20 2
3-4	98 07	87	82	79	74	70	66	63	53	45	35	19 9
3-5	98 07	96	90	88	80	77	73	68	57	50	38	19 8
3-6	98 07	98	93	88	84	79	76	70	59	50	38	19 9
3-7	98 07	91	83	82	74	71	69	63	54	47	36	19 9
3-8	98 07	104	99	95	87	82	81	74	63	53	39	20 3
3-9	98 07	98	95	90	86	83	79	75	64	56	43	20 7
3-10	98 07	115	107	103	96	90	86	81	67	57	42	20 0
3-11	98 07	112	107	105	96	91	86	79	68	56	41	20 5
3-12	98 07	120	111	107	100	96	91	83	71	59	45	20 6
3-13	98 07	108	100	97	91	88	85	80	68	59	45	21 6
3-14	98 07	95	90	86	80	77	75	70	59	53	39	20 8
3-15	98 07	92	90	88	81	79	77	71	59	54	42	20 8
3-16	98 07	103	98	94	87	81	79	74	63	54	40	21 2
3-17	98 07	103	98	95	89	84	80	74	64	56	41	20 8
3-18	98 07	109	98	96	89	83	80	75	65	56	41	20 8
3-19	98 07	99	94	91	85	81	78	72	62	54	41	20 8
3-20	98 07	113	105	100	92	88	83	76	64	56	41	21 4
3-21	98 07	115	112	105	97	92	87	80	68	59	43	21 0
3-22	98 07	125	119	114	106	101	96	90	75	65	47	20 7
3-23	98 07	135	130	125	117	111	105	95	82	69	50	20 6
3-24	98 07	93	86	84	75	71	68	62	52	45	34	21 0
3-25	98 07	98	88	85	76	73	69	62	54	46	35	19 9
3-26	98 07	90	85	80	72	70	65	60	50	43	34	20 1
3-27	98 07	96	89	84	75	73	68	62	53	45	34	20 2
3-28	98 07	96	89	85	76	75	70	64	55	47	36	21 0
3-29	98 07	104	97	93	85	80	75	69	59	51	38	20 9
3-30	98 07	105	100	95	86	82	78	72	60	52	39	20 0
3-31	98 07	91	85	79	76	68	65	60	50	43	33	20 3
3-32	98 07	99	89	87	77	74	70	63	54	47	35	21 0
3-33	98 07	87	84	78	72	68	66	60	51	43	33	21 1
3-34	98 07	90	78	77	69	66	61	58	49	42	34	20 0
3-35	98 07	89	81	79	73	67	65	59	50	45	34	20 5
3-36	98 07	89	82	78	69	66	63	58	50	44	35	21 0
3-37	98 07	89	79	78	70	66	62	58	49	42	32	21 3
3-38	98 07	93	82	78	70	66	64	59	50	42	32	22 2
3-39	98 07	92	85	80	70	66	63	59	49	42	32	21 4
3-40	98 07	92	82	78	71	66	63	57	48	42	33	20 3
3-41	98 07	93	82	79	69	66	62	57	48	43	33	20 9
3-42	98 07	94	83	81	70	67	64	57	47	42	33	20 9
3-43	98 07	93	81	77	73	68	63	58	48	41	32	20 5
3-44	98 07	88	81	79	70	66	63	58	48	41	32	21 1
3-45	98 07	117	107	104	97	91	87	81	68	60	45	19 8
3-46	98 07	129	119	115	106	99	95	89	76	66	48	20 1
3-47	98 07	135	124	119	110	106	99	93	78	67	49	21 1
3-48	98 07	131	126	122	112	105	99	93	77	68	51	20 7
3-49	98 07	129	123	119	109	105	101	93	81	70	53	20 9
3-50	98 07	117	108	105	98	95	89	84	73	65	47	20 2

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-51	98.07	94	86	86	78	75	71	67	57	51	40	20.5
3-52	98.07	94	87	83	78	73	70	66	56	48	39	20.7
3-53	98.07	110	107	101	94	90	86	82	69	60	47	20.8
3-54	98.07	111	100	95	88	82	78	72	59	52	39	21.5
3-55	98.07	113	104	104	94	90	85	79	65	57	43	20.9
3-56	98.07	123	112	107	99	94	90	84	71	61	47	20.3
3-57	98.07	132	122	118	109	103	98	90	77	67	49	20.3
3-58	98.07	125	116	109	101	96	91	85	72	62	47	20.3
3-59	98.07	109	103	99	91	89	84	77	66	60	45	11.0
3-60	98.07	97	94	85	79	77	73	69	58	51	40	11.4
3-61	98.07	109	102	98	91	88	81	81	65	59	43	10.7
3-62	98.07	112	104	103	97	91	87	80	72	63	47	10.8
3-63	98.07	114	104	101	95	91	86	77	63	60	46	10.4
3-64	98.07	99	94	92	84	79	78	75	61	56	42	12.3
3-65	98.07	116	105	104	99	93	91	85	73	68	53	11.7
3-66	98.07	112	108	104	98	95	90	89	79	71	55	13.0
平均		104	97	93	86	81	78	72	61	53	40	19.5
最大値		135	130	125	117	111	105	95	82	71	55	22.2
最小値		81	77	75	67	65	61	57	47	41	32	10.4

○供用16年 (H27)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-1	98.07	76	70	68	67	63	58	56	48	41	31	7.2
3-2	98.07	85	79	76	75	70	65	68	57	47	39	7.9
3-3	98.07	82	76	73	73	68	63	62	55	41	33	7.0
3-4	98.07	86	81	76	74	71	64	41	53	45	39	7.0
3-5	98.07	88	82	79	79	74	68	62	57	45	36	7.2
3-6	98.07	99	93	89	89	82	76	71	61	47	36	8.0
3-7	98.07	90	83	80	78	73	67	62	55	44	31	6.9
3-8	98.07	105	97	94	91	86	78	74	62	49	38	6.9
3-9	98.07	101	94	89	90	84	79	72	66	55	43	7.0
3-10	98.07	109	101	96	96	90	82	77	66	52	46	6.9
3-11	98.07	106	96	94	92	86	80	73	63	51	33	7.0
3-12	98.07	110	104	101	98	92	85	84	67	53	41	7.0
3-13	98.07	104	98	94	92	87	82	79	67	55	41	7.0
3-14	98.07	89	86	80	80	77	70	44	59	44	43	7.2
3-15	98.07	88	81	79	79	74	69	65	59	47	45	7.4
3-16	98.07	94	88	84	83	79	72	67	57	45	38	7.3
3-17	98.07	97	91	88	87	82	76	67	62	51	42	7.7
3-18	98.07	99	92	88	87	83	77	78	61	50	36	8.2
3-19	98.07	92	86	83	81	76	70	70	59	51	37	7.8
3-20	98.07	100	94	89	88	83	75	68	60	51	38	8.2
3-21	98.07	104	96	91	91	87	79	71	61	44	44	7.6
3-22	98.07	113	107	103	102	97	88	79	70	59	42	8.0
3-23	98.07	123	115	110	109	103	95	83	74	61	46	8.2
3-24	98.07	87	80	76	75	72	64	44	52	40	37	8.8
3-25	98.07	88	82	77	76	72	66	57	53	43	33	8.3
3-26	98.07	83	76	73	72	67	61	56	49	40	26	8.2
3-27	98.07	89	82	78	76	72	66	64	53	36	32	8.1
3-28	98.07	98	91	86	81	76	69	72	57	47	37	7.3
3-29	98.07	102	93	87	86	81	73	68	59	50	39	8.2
3-30	98.07	101	96	88	89	82	75	66	59	50	37	7.4
3-31	98.07	91	86	80	77	72	66	42	53	44	40	7.2
3-32	98.07	90	85	82	81	74	68	67	53	45	33	7.7
3-33	98.07	84	78	74	74	69	63	56	53	47	37	8.0
3-34	98.07	80	75	70	71	66	60	26	48	40	28	7.4
3-35	98.07	84	77	72	74	68	63	58	50	42	36	7.9
3-36	98.07	89	82	76	74	70	64	59	53	42	34	7.5
3-37	98.07	83	77	72	72	68	61	53	48	40	29	7.5
3-38	98.07	84	77	72	72	67	61	52	47	40	31	7.2
3-39	98.07	81	73	69	70	64	59	48	44	33	30	7.7
3-40	98.07	81	74	71	69	65	59	54	46	38	30	7.9
3-41	98.07	85	77	74	73	69	62	54	46	37	28	7.7
3-42	98.07	79	72	69	68	63	58	61	47	34	29	6.7
3-43	98.07	82	76	71	71	66	59	53	47	39	29	7.8
3-44	98.07	81	76	72	71	66	60	60	47	41	31	7.2
3-45	98.07	105	99	94	92	87	80	75	64	50	39	7.2
3-46	98.07	113	107	103	102	94	87	69	70	60	47	6.5
3-47	98.07	121	112	108	105	99	90	80	71	59	46	7.1
3-48	98.07	126	118	113	111	105	95	89	76	63	49	6.9
3-49	98.07	121	113	109	107	100	92	84	74	63	46	6.3
3-50	98.07	104	98	94	93	87	81	75	65	57	46	6.9

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-51	98.07	86	79	75	73	69	63	48	51	42	38	6.6
3-52	98.07	88	80	76	73	69	63	58	52	42	36	6.1
3-53	98.07	101	93	90	88	83	79	61	62	55	51	6.3
3-54	98.07	105	97	91	89	83	76	67	58	47	37	6.1
3-55	98.07	97	89	86	83	78	72	58	58	54	42	5.8
3-56	98.07	104	97	92	89	85	79	27	63	61	46	6.4
3-57	98.07	118	112	105	104	98	90	43	72	65	43	6.6
3-58	98.07	110	103	98	96	89	83	74	66	58	42	6.6
3-59	98.07	108	103	99	96	89	83	74	66	55	44	6.9
3-60	98.07	107	99	93	89	83	76	31	59	47	42	6.9
3-61	98.07	102	96	93	90	84	77	70	61	50	42	6.6
3-62	98.07	107	102	96	94	88	82	76	64	54	42	6.6
3-63	98.07	109	104	99	97	91	84	47	67	59	44	6.6
3-64	98.07	104	95	91	92	85	79	53	66	58	51	6.2
3-65	98.07	114	107	102	101	95	88	60	72	61	56	6.0
3-66	98.07	106	100	97	94	90	84	80	69	57	47	6.0
平均		97	91	86	85	80	73	63	59	49	39	7.2
最大値		126	118	113	111	105	95	89	76	65	56	8.8
最小値		76	70	68	67	63	58	26	44	33	26	5.8

○供用18年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-1	98.07	85	79	76	74	70	65	62	54	45	33	1.2
3-2	98.07	96	90	85	85	80	75	70	62	54	43	1.3
3-3	98.07	90	85	79	77	73	69	65	58	48	39	1.1
3-4	98.07	88	82	79	78	73	66	62	54	45	36	1.1
3-5	98.07	95	93	87	85	79	73	67	58	49	38	1.0
3-6	98.07	100	95	91	88	83	76	70	60	52	38	1.0
3-7	98.07	92	85	83	73	73	71	66	56	50	40	2.2
3-8	98.07	108	99	96	86	86	82	76	63	56	42	2.5
3-9	98.07	99	95	89	83	83	80	75	64	57	45	2.1
3-10	98.07	108	103	99	87	87	83	77	64	56	44	2.0
3-11	98.07	110	103	99	85	85	82	74	63	54	41	2.1
3-12	98.07	118	110	106	93	93	90	82	70	61	46	1.9
3-13	98.07	103	98	95	84	84	82	77	64	57	44	1.7
3-14	98.07	94	90	86	77	77	75	71	60	53	40	1.9
3-15	98.07	96	90	89	79	79	77	72	62	54	43	2.0
3-16	98.07	106	101	93	93	86	79	73	60	53	39	1.3
3-17	98.07	109	104	96	96	92	83	79	68	57	42	1.0
3-18	98.07	107	102	96	94	89	82	76	67	56	42	0.7
3-19	98.07	102	96	91	91	87	80	75	67	56	43	0.6
3-20	98.07	109	106	97	98	93	82	77	66	56	44	1.1
3-21	98.07	111	107	101	99	94	88	82	71	56	41	1.1
3-22	98.07	121	116	110	107	102	94	87	74	62	46	1.0
3-23	98.07	130	122	115	113	108	101	96	83	67	50	1.1
3-24	98.07	94	89	82	81	76	67	63	54	46	36	1.1
3-25	98.07	95	86	83	79	75	68	64	55	46	36	1.2
3-26	98.07	95	91	88	85	79	71	67	54	48	37	1.1
3-27	98.07	96	87	83	79	75	68	65	54	47	35	1.1
3-28	98.07	98	89	85	83	78	72	67	60	47	35	1.1
3-29	98.07	104	96	92	78	78	76	70	60	50	39	1.8
3-30	98.07	105	97	93	82	82	79	72	62	52	41	1.3
3-31	98.07	89	84	79	69	69	65	60	51	43	35	1.6
3-32	98.07	97	90	85	85	79	71	68	58	46	35	0.8
3-33	98.07	90	81	79	77	71	64	61	54	43	32	0.8
3-34	98.07	86	80	77	66	66	63	58	50	43	35	1.6
3-35	98.07	92	81	78	69	69	66	62	52	44	36	1.2
3-36	98.07	90	85	80	70	70	67	62	53	46	35	1.4
3-37	98.07	91	85	79	70	70	67	62	53	45	36	1.6
3-38	98.07	89	82	78	69	69	65	60	50	44	36	1.4
3-39	98.07	89	82	77	68	68	64	59	50	43	33	1.5
3-40	98.07	87	81	77	66	66	62	57	49	41	34	1.8
3-43	98.07	92	83	80	68	68	65	59	49	42	33	1.8
3-44	98.07	91	87	83	70	70	68	62	54	44	36	1.4
3-45	98.07	109	106	101	88	88	85	80	68	57	46	1.7
3-46	98.07	114	107	102	92	92	88	84	72	61	49	1.5
3-47	98.07	121	113	111	97	97	94	87	75	63	49	1.3
3-48	98.07	128	123	119	104	104	100	93	79	65	51	1.8
3-49	98.07	126	116	112	100	100	95	89	77	64	51	1.5
3-50	98.07	112	103	101	89	89	87	82	70	60	49	1.4

測点	荷重補正 (kN)	補 正 た わ み (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
3-51	98.07	95	86	83	72	72	70	64	55	47	37	1.3
3-52	98.07	86	81	77	68	68	66	63	53	45	36	1.1
3-53	98.07	103	98	93	83	83	81	75	64	55	43	0.8
3-54	98.07	114	104	101	86	86	81	74	64	54	41	1.5
3-57	98.07	115	107	105	92	92	88	82	69	59	46	1.7
3-58	98.07	110	103	102	89	89	86	80	68	58	46	1.7
3-59	98.07	111	103	99	89	89	84	78	68	57	45	1.6
3-61	98.07	113	106	102	89	89	87	80	69	58	46	1.5
3-62	98.07	111	105	102	89	89	87	80	69	58	47	1.4
3-63	98.07	114	106	103	90	90	87	81	69	57	45	1.3
3-64	98.07	101	93	92	78	78	76	71	62	53	42	1.4
3-65	98.07	113	103	102	90	90	88	82	71	61	49	1.2
3-66	98.07	110	105	99	89	89	88	81	72	61	48	1.5
平均		102	96	92	84	82	78	72	62	53	41	1.4
最大値		130	123	119	113	108	101	96	83	67	51	2.5
最小値		85	79	76	66	66	62	57	49	41	32	0.6

○4工区（下り）

○供用9年（H20）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
4-19	98.07	130	122	118	113	105	103	95	82	75	56	14.7
4-20	98.07	130	123	119	112	107	102	96	84	73	56	15.0
4-21	98.07	131	125	122	116	111	106	101	87	78	60	15.9
4-22	98.07	126	119	117	110	102	100	95	79	71	53	15.5
4-23	98.07	144	137	131	124	117	113	106	91	78	59	15.9
4-24	98.07	157	147	147	139	130	126	119	104	90	68	14.7
4-25	98.07	137	130	129	123	116	111	105	93	82	64	16.0
4-26	98.07	147	139	138	129	119	116	109	93	82	61	16.0
4-27	98.07	123	115	114	106	101	97	91	81	71	55	16.6
4-28	98.07	127	123	119	113	105	104	96	87	76	59	16.5
4-29	98.07	145	134	132	123	116	109	103	87	76	57	15.5
4-30	98.07	124	117	113	107	98	95	89	77	67	51	14.2
4-31	98.07	133	127	124	117	109	106	100	86	74	56	15.0
4-32	98.07	148	139	134	129	120	115	111	95	83	62	15.3
4-33	98.07	138	127	125	118	110	108	100	88	77	58	16.0
4-34	98.07	131	124	121	115	108	104	98	86	77	59	17.6
4-35	98.07	142	132	129	121	115	109	104	90	78	59	17.1
4-36	98.07	125	119	116	109	103	99	93	81	72	55	17.9
平均		135	128	125	118	111	107	101	87	77	58	15.9
最大値		157	147	147	139	130	126	119	104	90	68	17.9
最小値		123	115	113	106	98	95	89	77	67	51	14.2

○供用16年 (H27)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
4-1	98.07	115	107	103	97	91	91	83	71	64	53	1.5
4-2	98.07	123	117	116	109	104	103	95	83	76	65	1.3
4-3	98.07	114	106	103	97	92	90	82	71	64	52	2.0
4-4	98.07	111	104	101	99	89	88	81	71	65	54	1.9
4-5	98.07	103	96	93	90	84	83	76	65	60	50	1.9
4-6	98.07	109	102	100	94	88	87	81	71	65	53	1.8
4-7	98.07	115	106	108	98	92	93	82	74	67	55	2.0
4-8	98.07	124	116	88	107	98	98	90	78	70	59	2.6
4-9	98.07	116	107	102	95	91	91	82	72	65	54	2.6
4-10	98.07	102	96	90	88	82	80	73	63	57	48	1.6
4-11	98.07	99	91	90	80	79	77	68	62	57	48	1.7
4-12	98.07	111	103	102	85	89	87	79	70	61	50	2.0
4-13	98.07	104	97	111	91	87	84	74	67	60	50	1.9
4-14	98.07	112	104	99	92	87	85	77	66	60	48	1.7
4-15	98.07	101	90	92	72	79	78	69	62	56	46	1.9
4-16	98.07	108	99	98	96	87	85	78	68	60	49	2.4
4-17	98.07	115	105	104	106	92	89	80	69	60	50	2.5
4-18	98.07	120	111	110	109	98	96	89	74	67	53	2.3
4-19	98.07	119	111	114	105	97	97	86	73	63	51	2.6
4-20	98.07	121	112	107	96	96	93	87	74	66	51	2.3
4-21	98.07	123	113	112	95	101	99	91	79	69	54	1.8
4-22	98.07	121	111	109	102	94	91	86	71	62	48	1.6
4-23	98.07	130	119	114	119	103	101	91	76	67	51	1.4
4-24	98.07	142	133	128	123	115	114	103	88	77	60	1.5
平均		115	107	104	98	92	91	83	72	64	52	1.9
最大値		142	133	128	123	115	114	103	88	77	65	2.6
最小値		99	90	88	72	79	77	68	62	56	46	1.3

○供用 18 年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										路面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀	
4-19	98.07	121	112	112	106	103	97	91	78	68	48	3.2
4-20	98.07	119	112	107	106	102	94	84	71	64	47	3.3
4-22	98.07	117	108	103	100	96	88	81	66	59	44	2.6
4-23	98.07	130	121	117	110	105	97	89	74	64	45	2.3
4-24	98.07	141	134	130	124	119	111	103	86	76	54	2.3
4-26	98.07	128	119	112	111	105	97	90	73	65	47	2.3
4-27	98.07	108	100	96	94	91	84	78	67	59	44	2.0
4-28	98.07	111	101	96	93	89	83	76	64	56	42	2.1
4-29	98.07	123	113	108	105	101	93	85	72	62	44	1.6
4-30	98.07	115	105	100	99	95	88	82	69	59	44	2.4
4-31	98.07	121	113	107	104	99	91	83	69	61	44	2.3
4-32	98.07	134	122	118	116	111	103	94	81	70	50	2.3
4-33	98.07	127	116	111	108	104	96	88	74	65	48	2.3
4-34	98.07	127	114	109	108	104	96	90	76	67	49	2.5
4-35	98.07	133	122	117	112	107	97	90	75	65	47	2.9
4-36	98.07	127	116	111	110	105	97	90	76	67	50	3.0
平均		124	114	110	107	102	94	87	73	64	47	2.5
最大値		141	134	130	124	119	111	103	86	76	54	3.3
最小値		108	100	96	93	89	83	76	64	56	42	1.6

付録 1.2 FWD 測定結果【目地部】

●2 工区（下り）

○供用 9 年（H20）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)	鉄網の有無
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀			
2-1	98.07	231	210	201	191	168	154	139	116	94	73	93.0	15	有
2-2	98.07	214	174	167	153	138	125	110	91	74	54	87.6	17	
2-3	98.07	239	199	189	178	158	143	128	106	84	61	88.3	15	
2-4	98.07	249	202	188	179	161	145	131	109	87	63	86.1	16	
2-5	98.07	276	226	214	198	177	159	142	116	91	66	87.4	16	
2-6	98.07	278	216	201	185	168	152	136	112	90	64	84.0	16	
2-7	98.07	268	209	199	188	168	154	138	116	92	66	85.2	16	
2-8	98.07	266	218	204	190	172	155	139	116	91	65	86.7	17	
2-9	98.07	266	213	199	187	169	154	139	116	94	71	85.7	17	
2-10	98.07	310	229	216	203	183	166	149	123	100	71	82.2	17	
2-11	98.07	316	266	249	231	210	190	170	141	111	79	88.1	17	無
2-12	98.07	256	218	211	199	180	163	149	125	100	74	90.3	17	
2-13	98.07	242	212	201	185	166	150	135	111	90	66	90.8	16	
2-14	98.07	283	233	224	206	187	167	150	122	94	66	88.3	16	
2-15	98.07	260	212	197	186	165	150	133	109	87	61	86.2	17	
2-16	98.07	248	203	192	178	158	143	126	102	80	55	87.2	17	
2-17	98.07	255	188	174	163	147	133	119	99	79	58	81.3	17	
2-18	98.07	289	245	233	213	191	171	154	124	97	68	89.2	17	
2-19	98.07	279	234	212	201	177	159	142	116	90	62	86.2	18	
2-20	98.07	297	244	225	211	189	170	152	124	99	69	86.2	18	
2-21	98.07	296	208	191	181	161	146	133	111	88	65	78.4	18	
2-22	98.07	279	234	210	195	178	160	144	119	94	69	85.8	18	
2-23	98.07	267	186	174	166	147	132	118	97	76	56	78.9	18	
2-24	98.07	241	175	172	157	142	126	112	92	70	51	83.2	18	
2-25	98.07	244	191	178	166	147	131	116	95	74	50	84.5	18	
2-26	98.07	250	201	192	178	159	143	127	103	80	56	87.0	18	
2-27	98.07	228	164	157	151	131	118	104	86	68	46	81.7	18	
平均（全体）		264	211	199	186	167	150	135	111	88	63	85.9	16.9	—
最大値（全体）		316	266	249	231	210	190	170	141	111	79	93.0	18.2	
最小値（全体）		214	164	157	151	131	118	104	86	68	46	78.4	15.0	
平均（鉄網有区間）		260	210	198	185	166	151	135	112	90	65	86.6	16.2	有
最大値（鉄網有区間）		310	229	216	203	183	166	149	123	100	73	93.0	16.8	
最小値（鉄網有区間）		214	174	167	153	138	125	110	91	74	54	82.2	15.0	
平均（鉄網無区間）		266	213	199	186	167	150	134	111	87	62	85.5	17.3	無
最大値（鉄網無区間）		316	266	249	231	210	190	170	141	111	79	90.8	18.2	
最小値（鉄網無区間）		228	164	157	151	131	118	104	86	68	46	78.4	16.1	

○供用16年 (H27)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)	鉄網の 有無
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀			
2-1	98.07	182	171	161	153	140	125	39	94	79	51	93.7	10.4	有
2-2	98.07	203	192	187	175	158	141	107	99	82	46	95.8	10.7	
2-3	98.07	219	206	194	182	165	146	119	104	86	51	93.9	10.0	
2-4	98.07	214	195	182	174	158	141	127	102	94	64	92.0	9.9	
2-5	98.07	210	206	194	184	168	149	121	108	100	59	96.0	9.7	
2-6	98.07	219	204	191	181	165	147	133	108	98	47	93.2	9.6	
2-7	98.07	261	237	224	211	192	171	146	123	105	64	92.3	9.6	
2-8	98.07	221	206	193	184	168	150	129	108	94	59	93.3	9.3	
2-9	98.07	239	198	187	179	165	148	124	108	99	63	87.8	9.3	
2-10	98.07	294	321	198	191	174	157	108	119	102	67	80.5	9.2	
2-11	98.07	304	276	258	244	221	196	169	139	116	76	91.9	9.4	
2-12	98.07	230	223	208	198	181	163	146	123	102	78	95.1	9.0	無
2-13	98.07	211	204	191	180	163	146	120	107	90	68	95.1	8.9	
2-14	98.07	232	218	204	194	177	158	71	114	96	63	93.7	8.9	
2-15	98.07	221	197	184	176	162	144	120	102	100	74	90.9	0.6	
2-16	98.07	213	196	182	172	157	140	119	101	89	50	92.3	8.9	
2-17	98.07	249	172	163	156	142	128	94	93	80	53	79.1	9.0	
2-18	98.07	226	243	195	185	167	149	108	110	90	61	92.5	8.9	
2-19	98.07	222	204	190	181	165	146	123	108	93	60	92.4	8.7	
2-20	98.07	249	223	209	196	178	160	121	117	94	65	91.2	8.6	
2-21	98.07	277	195	181	174	158	141	127	106	89	62	79.0	8.5	
2-22	98.07	254	211	199	190	173	153	135	115	94	71	88.0	8.4	
2-23	98.07	219	176	165	156	141	126	88	92	77	57	85.9	8.2	
2-24	98.07	226	166	155	148	133	118	104	86	73	49	81.2	8.3	
2-25	98.07	229	167	155	146	132	117	104	85	63	48	80.7	8.6	
2-26	98.07	217	208	184	174	156	139	120	99	82	56	91.8	8.3	
2-27	98.07	227	184	174	164	147	131	84	94	73	56	86.7	8.7	
平均 (全体)		232	207	189	179	163	146	115	106	90	60	89.8	8.8	—
最大値 (全体)		304	321	258	244	221	196	169	139	116	78	96.0	10.7	
最小値 (全体)		182	166	155	146	132	117	39	85	63	46	79.0	0.6	
平均 (鉄網有区間)		226	214	191	181	165	148	115	107	94	57	91.8	9.8	有
最大値 (鉄網有区間)		294	321	224	211	192	171	146	123	105	67	96.0	10.7	
最小値 (鉄網有区間)		182	171	161	153	140	125	39	94	79	46	80.5	9.2	
平均 (鉄網無区間)		236	204	188	178	162	144	115	105	88	62	88.7	8.2	無
最大値 (鉄網無区間)		304	276	258	244	221	196	169	139	116	78	95.1	9.4	
最小値 (鉄網無区間)		211	166	155	146	132	117	71	85	63	48	79.0	0.6	

○供用18年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)	鉄網の 有無
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀			
2-1	98.07	177	144	137	129	119	108	101	88	67	49	87.2	2.2	有
2-2	98.07	175	167	157	147	134	122	112	95	74	52	94.6	2.9	
2-3	98.07	201	188	174	162	147	132	121	99	79	57	92.7	3.3	
2-4	98.07	196	169	160	152	139	126	116	96	78	55	89.7	3.1	
2-5	98.07	196	180	169	159	144	133	123	98	82	58	92.5	2.2	
2-6	98.07	189	165	155	148	135	123	113	94	76	54	90.2	2.3	
2-7	98.07	227	183	170	162	148	132	123	101	82	59	85.8	2.1	
2-8	98.07	196	170	160	152	138	125	115	96	78	57	89.7	2.0	
2-9	98.07	213	165	155	148	134	123	114	95	80	59	84.1	2.0	
2-10	98.07	277	184	173	164	150	135	127	105	86	63	76.9	2.1	
2-11	98.07	347	197	182	176	160	145	135	112	91	65	68.9	2.2	無
2-12	98.07	242	184	171	166	152	137	128	109	88	66	82.8	2.0	
2-13	98.07	206	161	154	145	131	121	114	96	76	54	85.6	2.1	
2-14	98.07	208	163	154	148	135	122	111	94	76	56	85.2	2.0	
2-15	98.07	212	156	146	138	126	111	106	86	69	50	81.4	1.9	
2-16	98.07	182	153	144	136	124	111	105	87	70	50	88.6	2.1	
2-17	98.07	226	154	143	136	123	112	104	87	69	49	77.5	1.9	
2-18	98.07	208	161	152	144	132	119	111	93	75	54	84.5	1.8	
2-19	98.07	193	153	144	138	125	113	105	88	72	51	85.6	1.8	
2-20	98.07	218	172	162	153	139	127	117	98	81	57	85.2	1.9	
2-21	98.07	300	155	149	140	128	114	110	92	73	54	66.3	2.3	
2-22	98.07	221	163	154	148	133	119	113	91	77	56	82.1	1.9	
2-23	98.07	182	129	121	116	106	95	89	73	60	45	79.8	1.9	
2-24	98.07	194	131	123	116	105	95	86	73	58	41	77.6	1.6	
2-25	98.07	200	120	112	107	97	87	81	68	54	38	71.8	1.6	
2-26	98.07	192	153	142	134	121	109	100	81	63	45	85.1	1.9	
2-27	98.07	185	145	133	126	114	102	94	74	60	43	83.4	2.1	
平均 (全体)		213	162	152	144	131	119	110	91	74	53	83.5	2.1	—
最大値 (全体)		347	197	182	176	160	145	135	112	91	66	94.6	3.3	
最小値 (全体)		175	120	112	107	97	87	81	68	54	38	66.3	1.6	
平均 (鉄網有区間)		205	172	161	152	139	126	117	97	78	56	88.4	2.4	有
最大値 (鉄網有区間)		277	188	174	164	150	135	127	105	86	63	94.6	3.3	
最小値 (鉄網有区間)		175	144	137	129	119	108	101	88	67	49	76.9	2.0	
平均 (鉄網無区間)		219	156	146	139	126	114	106	88	71	51	80.7	2.0	無
最大値 (鉄網無区間)		347	197	182	176	160	145	135	112	91	66	88.6	2.3	
最小値 (鉄網無区間)		182	120	112	107	97	87	81	68	54	38	66.3	1.6	

●3工区（上り）

○供用16年（H27）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-1	98.07	254	172	163	149	136	122	109	86	67	66	78.2	-0.5
3-2	98.07	231	160	147	135	124	109	89	77	62	57	77.9	-0.4
3-3	98.07	203	103	98	89	81	70	62	51	40	38	65.1	-0.4
3-4	98.07	190	129	118	107	98	84	74	57	45	36	76.5	-0.4
3-5	98.07	218	139	129	117	106	92	83	63	46	40	74.3	-0.5
3-6	98.07	174	111	102	93	86	75	71	58	45	38	73.7	-0.5
3-7	98.07	198	112	106	97	91	80	74	61	47	42	69.7	-0.6
3-8	98.07	191	123	115	106	97	86	73	65	50	54	75.0	-0.4
3-9	98.07	198	128	120	112	105	89	81	66	53	42	75.7	-0.3
3-10	98.07	216	136	131	118	109	96	86	72	59	53	75.3	-0.4
3-11	98.07	212	140	133	123	113	101	92	75	59	57	77.0	-0.4
3-12	98.07	274	181	167	155	143	124	113	87	65	58	75.7	-0.5
3-13	98.07	244	160	146	137	127	114	102	80	64	52	74.8	0.1
3-14	98.07	133	123	119	116	110	102	95	79	67	64	94.8	0.1
3-15	98.07	216	166	145	135	124	110	95	79	59	52	80.3	-0.4
3-16	98.07	197	143	133	123	113	100	91	73	53	48	80.5	-0.5
3-17	98.07	215	148	137	127	116	103	92	76	57	50	78.0	0.1
3-18	98.07	167	157	149	138	126	114	98	82	63	48	94.2	0.2
3-19	98.07	185	201	122	113	104	92	82	67	51	40	79.3	-0.2
3-20	98.07	210	183	141	130	119	106	96	75	62	47	80.4	-0.1
3-21	98.07	218	164	155	143	131	117	105	82	65	46	83.1	0.2
3-22	98.07	175	178	158	145	135	118	108	85	67	55	94.8	0.0
3-23	98.07	178	169	161	150	137	122	112	88	68	51	94.9	0.4
3-24	98.07	156	173	97	89	83	73	68	54	42	32	76.4	0.1
3-25	98.07	144	96	86	81	76	66	60	49	40	48	75.0	0.2
3-26	98.07	235	147	137	127	116	100	83	68	52	50	73.7	-0.2
3-27	98.07	149	164	91	83	77	67	62	51	41	34	75.8	-0.1
3-28	98.07	179	115	108	97	89	76	69	54	44	32	75.4	-0.1
3-29	98.07	203	115	105	95	86	74	63	54	44	45	68.0	-0.1
3-30	98.07	146	97	90	82	75	65	53	52	41	41	76.1	-0.3
3-31	98.07	128	94	86	81	75	67	57	51	40	42	80.4	-0.1
3-32	98.07	142	93	88	81	74	65	54	49	40	40	76.7	0.0
3-33	98.07	160	89	84	77	72	64	47	47	38	42	68.9	0.0
3-34	98.07	175	106	100	91	83	72	60	51	41	41	72.5	-0.3
3-35	98.07	195	120	114	104	95	83	73	60	48	40	73.9	0.2
3-36	98.07	245	138	129	118	108	93	71	65	51	50	69.0	0.1
3-37	98.07	185	153	142	130	117	104	89	76	58	58	86.8	0.3
3-38	98.07	195	138	127	117	108	96	82	68	55	55	79.0	0.5
3-39	98.07	200	151	138	128	118	104	91	76	60	62	81.7	0.3
3-40	98.07	185	119	110	103	95	85	74	63	52	55	74.7	0.0
3-41	98.07	179	120	113	103	96	85	76	64	54	39	77.2	0.9
3-42	98.07	183	207	88	83	79	72	63	55	43	39	65.0	1.0
3-43	98.07	207	144	134	126	117	105	94	77	61	50	78.7	1.4
3-44	98.07	179	172	163	152	141	126	112	90	73	58	95.5	1.9
3-45	98.07	214	149	139	131	121	108	91	81	67	65	79.0	0.3
3-46	98.07	242	179	170	159	148	132	117	96	75	57	82.5	0.2
3-47	98.07	158	171	128	118	110	99	87	74	59	57	89.5	0.4
3-48	98.07	201	190	177	166	154	138	122	101	81	68	93.7	0.9
3-49	98.07	268	167	158	145	136	122	110	89	72	57	74.1	0.7
3-50	98.07	192	130	123	114	107	95	84	69	58	56	78.2	1.0

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-51	98.07	117	112	104	95	90	80	69	62	54	52	93.9	0.8
3-52	98.07	193	134	126	117	109	96	81	70	56	52	79.3	0.7
3-53	98.07	248	104	99	91	85	76	69	58	48	38	56.9	1.1
3-54	98.07	195	215	127	117	108	96	86	68	52	37	79.0	0.8
3-55	98.07	137	141	124	116	109	95	84	70	56	43	95.2	0.7
3-56	98.07	248	166	153	140	130	115	100	81	65	48	76.3	1.0
3-57	98.07	169	162	153	145	139	127	112	95	78	60	95.1	0.9
3-58	98.07	253	160	137	129	120	106	91	75	60	44	70.3	0.7
3-59	98.07	187	136	130	120	114	103	92	78	66	54	82.0	1.1
3-60	98.07	148	137	127	115	105	92	84	65	51	43	92.1	0.8
3-61	98.07	219	140	133	122	113	100	88	72	57	45	75.5	1.4
3-62	98.07	137	128	124	118	112	102	93	82	68	69	94.8	1.0
3-63	98.07	234	146	138	127	118	105	92	76	60	47	74.2	0.5
3-64	98.07	241	266	154	143	132	119	104	87	69	71	78.0	0.6
3-65	98.07	256	286	196	179	167	147	129	104	83	73	86.6	0.5
3-66	98.07	265	288	239	224	209	190	170	138	110	93	95.0	0.3
平均 (全体)		197	150	130	120	111	99	87	72	57	50	79.6	0.3
最大値 (全体)		274	288	239	224	209	190	170	138	110	93	95.5	1.9
最小値 (全体)		117	89	84	77	72	64	47	47	38	32	56.9	-0.6

○供用18年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)	
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀			
3-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-4	98.07	204	144	135	123	113	99	86	66	52	35	79.8	-0.6	
3-5	98.07	252	168	158	141	128	112	100	74	57	36	76.9	-0.4	
3-6	98.07	208	132	128	115	108	95	87	67	54	36	76.0	-0.4	
3-7	98.07	226	127	118	111	104	92	84	65	53	36	68.7	-0.5	
3-8	98.07	223	142	133	122	115	103	95	74	59	40	74.6	1.1	
3-9	98.07	227	151	143	131	120	107	95	74	60	40	77.3	-0.7	
3-10	98.07	260	164	156	142	132	117	105	82	64	44	75.1	0.4	
3-11	98.07	261	171	159	146	135	120	107	84	69	45	75.7	-0.6	
3-12	98.07	327	218	204	187	172	152	135	101	80	52	76.9	-0.6	
3-13	98.07	293	186	175	161	150	133	119	92	73	48	74.9	-0.3	
3-14	98.07	249	163	159	140	130	115	102	82	65	43	77.9	-0.2	
3-15	98.07	258	183	173	156	143	126	112	86	69	46	80.4	-0.3	
3-16	98.07	233	160	149	137	126	111	98	74	60	40	77.8	0.0	
3-17	98.07	247	163	154	140	129	115	102	78	63	43	76.9	0.3	
3-18	98.07	254	146	139	127	117	104	92	71	56	37	70.9	0.2	
3-19	98.07	243	151	143	132	121	108	96	74	59	39	74.0	1.3	
3-20	98.07	253	171	160	148	137	122	109	84	67	44	77.4	0.2	
3-21	98.07	266	187	179	160	148	132	118	92	71	44	80.5	0.5	
3-22	98.07	260	197	186	173	159	143	126	99	79	53	83.3	1.1	
3-23	98.07	226	140	129	118	108	96	84	63	52	35	72.7	0.2	
3-24	98.07	186	118	110	101	93	84	74	58	49	34	74.3	0.0	
3-25	98.07	164	101	97	90	83	75	67	52	44	31	74.3	-0.2	
3-26	98.07	309	203	190	174	160	141	124	91	71	45	76.3	-0.5	
3-27	98.07	191	114	110	100	92	82	75	56	46	32	73.0	0.0	
3-28	98.07	216	138	133	116	106	91	81	62	50	35	76.2	-0.1	
3-29	98.07	235	133	124	113	101	89	77	59	47	31	69.0	0.1	
3-30	98.07	182	115	108	98	90	81	71	53	43	28	74.2	0.1	
3-31	98.07	163	106	98	92	85	76	68	53	42	29	75.3	0.1	
3-32	98.07	169	99	91	86	79	70	63	49	40	29	70.1	0.0	
3-33	98.07	193	104	96	91	84	75	67	52	41	31	66.7	0.8	
3-34	98.07	245	157	146	134	122	106	92	69	53	33	74.7	0.4	
3-35	98.07	216	133	129	118	108	97	86	65	53	37	75.0	0.7	
3-36	98.07	287	156	145	132	121	106	94	71	56	37	67.0	0.3	
3-37	98.07	227	148	140	127	117	104	92	72	58	39	76.2	0.4	
3-38	98.07	225	144	135	122	111	98	88	67	55	37	75.0	0.3	
3-39	98.07	237	157	148	135	125	111	99	77	62	43	77.1	0.3	
3-40	98.07	202	130	118	111	103	91	82	64	53	37	73.7	1.0	
3-41	98.07	216	141	130	118	109	97	87	67	54	37	75.0	1.3	
3-42	98.07	209	158	144	129	119	107	97	74	59	40	81.7	0.4	
3-43	98.07	253	175	160	148	139	125	113	90	74	50	77.4	1.2	
3-44	98.07	235	178	162	150	140	126	114	90	74	49	81.6	1.1	
3-45	98.07	260	176	160	148	136	122	112	88	73	51	76.2	0.5	
3-46	98.07	309	226	207	191	180	161	145	112	92	60	80.1	1.2	
3-47	98.07	224	155	138	129	119	108	97	74	65	45	76.3	0.9	
3-48	98.07	247	181	165	155	145	132	120	95	80	56	80.2	1.5	
3-49	98.07	307	192	176	164	156	140	131	102	83	58	73.0	1.1	
3-50	98.07	228	149	134	125	115	103	93	72	60	42	74.2	1.0	

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-51	98.07	200	127	118	108	102	91	84	66	54	38	74.4	2.0
3-52	98.07	214	157	141	132	122	108	99	76	60	39	79.4	1.7
3-53	98.07	246	170	157	142	131	117	108	82	64	42	77.9	2.2
3-54	98.07	230	163	151	136	126	111	102	77	60	37	79.1	2.1
3-55	98.07	216	157	143	129	119	106	96	75	61	40	79.6	1.3
3-56	98.07	292	169	152	139	129	118	105	83	66	43	68.4	1.1
3-57	98.07	434	248	225	204	189	168	150	112	89	54	68.3	2.3
3-58	98.07	288	173	160	142	133	120	107	82	64	41	71.4	2.1
3-59	98.07	201	149	135	125	120	109	100	82	67	48	80.3	1.6
3-60	98.07	224	156	140	128	119	105	94	74	59	39	76.7	1.9
3-61	98.07	238	155	143	129	120	107	97	77	62	42	75.0	2.1
3-62	98.07	401	149	137	124	117	105	93	74	60	41	50.9	2.1
3-63	98.07	250	162	147	135	126	114	102	80	66	46	74.2	2.0
3-64	98.07	287	195	179	162	153	137	125	99	81	54	77.0	1.9
3-65	98.07	314	258	234	214	202	181	166	132	105	69	85.3	1.9
3-66	98.07	351	311	289	266	250	230	210	169	141	95	90.2	2.1
平均 (全体)		246	161	150	137	127	113	102	79	63	42	75.5	0.7
最大値 (全体)		434	311	289	266	250	230	210	169	141	95	90.2	2.3
最小値 (全体)		163	99	91	86	79	70	63	49	40	28	50.9	-0.7

○3工区（下り）

○供用9年（H20）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達 率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-1	98.07	175	138	128	115	103	91	82	66	51	36	84.5	17.9
3-2	98.07	175	136	121	112	102	93	82	67	53	38	81.9	17.9
3-3	98.07	175	140	119	110	102	92	82	70	56	43	80.9	17.9
3-4	98.07	167	116	106	97	86	77	68	55	45	35	77.7	18.2
3-5	98.07	203	155	140	134	116	105	93	76	59	42	81.5	18.4
3-6	98.07	178	147	135	123	112	100	90	73	57	41	86.2	18.6
3-7	98.07	175	148	134	129	111	100	89	71	57	40	86.9	18.8
3-8	98.07	188	153	146	133	118	104	93	74	59	41	87.5	18.6
3-9	98.07	213	192	179	170	150	134	120	98	76	50	91.3	18.7
3-10	98.07	170	161	153	138	122	109	98	80	63	44	94.8	18.8
3-11	98.07	175	171	161	147	133	119	107	86	67	47	95.8	19.0
3-12	98.07	184	182	169	158	141	126	113	92	70	48	95.7	19.0
3-13	98.07	166	157	148	142	125	115	103	85	69	47	94.3	19.2
3-14	98.07	147	139	134	127	113	103	92	78	61	44	95.4	19.2
3-15	98.07	137	132	124	116	104	94	86	72	57	41	95.0	19.1
3-16	98.07	139	136	130	123	107	96	88	74	58	42	96.6	19.0
3-17	98.07	158	148	138	128	113	103	92	77	60	42	93.1	19.0
3-18	98.07	136	128	121	110	101	92	85	72	58	42	94.0	19.3
3-19	98.07	143	134	131	119	108	100	90	74	59	43	95.7	19.3
3-20	98.07	142	139	129	118	108	98	89	74	59	44	95.1	19.5
3-21	98.07	163	153	141	132	118	106	95	78	62	43	92.9	19.4
3-22	98.07	192	188	181	167	149	134	119	97	75	52	96.9	19.5
3-23	98.07	203	180	168	155	140	128	113	94	73	51	90.5	19.4
3-24	98.07	158	153	143	132	120	108	97	80	62	45	95.3	19.6
3-25	98.07	139	135	127	115	101	88	78	63	49	35	95.5	19.8
3-26	98.07	129	125	115	106	92	83	72	57	46	34	94.2	19.6
3-27	98.07	141	132	122	110	97	87	76	59	47	33	92.9	19.7
3-28	98.07	130	126	117	109	96	85	74	60	46	35	94.7	19.6
3-29	98.07	132	118	114	106	93	82	73	58	46	35	92.6	20.0
3-30	98.07	139	135	128	115	101	89	79	64	50	36	95.9	20.1
3-31	98.07	135	124	123	112	96	85	76	60	47	34	95.5	19.9
3-32	98.07	127	124	115	105	91	81	71	56	44	33	95.2	20.1
3-33	98.07	128	124	116	105	91	81	71	57	44	33	95.1	19.9
3-34	98.07	119	117	111	101	88	80	71	58	46	35	96.5	20.5
3-35	98.07	117	110	104	96	83	74	65	54	42	32	94.3	19.7
3-36	98.07	120	116	109	98	87	78	70	56	46	35	95.2	19.8
3-37	98.07	123	119	110	102	87	76	67	54	43	32	94.8	20.2
3-38	98.07	122	120	112	102	90	79	70	56	45	33	95.8	20.3
3-39	98.07	115	112	104	96	83	74	66	53	41	31	95.1	20.2
3-40	98.07	119	113	107	95	85	76	67	54	43	33	94.7	19.8
3-41	98.07	117	116	107	95	83	73	64	52	41	30	95.7	20.2
3-42	98.07	123	121	112	104	89	79	69	55	44	31	95.3	20.6
3-43	98.07	115	95	88	82	72	66	59	49	40	31	86.8	20.3
3-44	98.07	163	158	151	134	117	102	89	69	51	35	96.3	20.2
3-45	98.07	140	135	125	115	100	90	80	65	50	38	94.3	20.6
3-46	98.07	173	168	158	141	126	112	100	81	64	46	95.5	20.3
3-47	98.07	200	198	182	165	146	129	115	91	70	49	95.4	20.5
3-48	98.07	177	174	162	148	130	114	100	82	63	45	95.7	20.9
3-49	98.07	209	205	195	178	158	141	125	101	77	55	96.6	21.0
3-50	98.07	258	191	178	164	148	133	118	96	75	52	81.6	21.0

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達 率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-51	98.07	127	124	116	109	97	89	79	66	52	40	95.5	21.0
3-52	98.07	124	96	93	89	78	69	62	50	42	32	85.4	6.2
3-53	98.07	185	122	116	112	96	89	80	66	52	39	77.1	6.8
3-54	98.07	194	118	123	112	98	88	78	65	52	39	77.6	7.2
3-55	98.07	210	138	130	119	100	98	86	72	56	42	76.4	8.1
3-56	98.07	174	125	98	106	93	84	75	63	51	37	71.9	8.4
3-57	98.07	260	178	197	180	167	150	134	111	89	62	86.1	8.8
3-58	98.07	221	149	136	135	114	105	93	77	61	43	76.1	9.0
3-59	98.07	198	135	129	118	107	96	89	72	59	43	78.7	9.5
3-60	98.07	152	100	107	99	93	85	77	67	55	42	82.5	9.6
3-61	98.07	164	110	108	103	89	83	75	64	52	40	79.6	9.8
3-62	98.07	180	120	121	124	102	93	86	72	59	43	80.3	10.0
3-63	98.07	211	162	132	122	114	103	93	78	64	47	77.1	10.5
3-64	98.07	189	135	117	104	103	92	84	69	56	42	76.6	10.6
3-65	98.07	198	192	127	119	106	98	88	73	60	45	78.2	10.6
3-66	98.07	212	145	142	138	117	106	98	81	67	49	80.3	11.0
平均		163	141	131	122	108	97	87	71	56	41	89.5	17.2
最大値		260	205	197	180	167	150	134	111	89	62	96.9	21.0
最小値		115	95	88	82	72	66	59	49	40	30	71.9	6.2

○供用16年 (H27)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達 率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-1	98.07	197	207	150	143	128	112	103	80	60	54	86.5	7.0
3-2	98.07	194	133	124	119	108	95	83	70	53	37	78.0	7.2
3-3	98.07	177	172	121	119	110	97	92	73	56	45	81.5	7.6
3-4	98.07	167	110	102	98	89	78	72	60	46	36	75.7	7.5
3-5	98.07	194	214	131	123	112	98	89	72	54	36	80.5	7.5
3-6	98.07	194	140	130	126	113	98	88	71	52	38	80.2	7.3
3-7	98.07	196	150	143	134	123	109	98	79	62	43	84.2	7.9
3-8	98.07	196	211	166	157	143	124	99	92	67	49	91.8	6.8
3-9	98.07	253	215	200	191	172	153	133	112	83	57	88.3	7.0
3-10	98.07	199	216	182	169	151	133	118	95	71	46	95.5	6.9
3-11	98.07	231	184	172	164	148	130	102	95	69	46	85.3	7.5
3-12	98.07	262	201	187	177	160	141	133	100	73	48	83.1	6.9
3-13	98.07	214	188	175	164	149	132	117	96	74	51	90.0	7.4
3-14	98.07	192	181	170	159	144	129	116	92	69	53	93.9	7.5
3-15	98.07	169	169	158	148	134	117	113	83	65	45	96.5	7.4
3-16	98.07	157	143	134	126	115	102	93	75	57	38	92.0	8.0
3-17	98.07	171	159	148	140	126	112	103	80	64	42	93.0	7.4
3-18	98.07	135	136	126	120	110	98	91	74	58	39	96.5	7.5
3-19	98.07	168	165	152	145	132	117	104	82	64	44	95.2	7.7
3-20	98.07	175	178	165	157	141	125	109	88	69	52	97.1	7.5
3-21	98.07	188	164	153	145	131	115	102	84	59	45	89.9	7.6
3-22	98.07	206	224	194	186	166	148	130	106	79	55	96.9	8.2
3-23	98.07	206	187	172	162	149	131	110	94	73	44	90.9	8.3
3-24	98.07	188	165	153	146	133	117	109	83	64	44	89.8	8.3
3-25	98.07	187	125	116	110	98	83	65	62	44	39	76.5	8.4
3-26	98.07	182	123	114	108	98	86	81	61	42	34	76.8	8.4
3-27	98.07	165	161	148	138	124	109	94	73	54	33	94.4	8.0
3-28	98.07	181	160	147	135	121	105	91	73	54	35	89.6	8.7
3-29	98.07	183	150	140	129	113	99	90	71	52	33	86.7	8.5
3-30	98.07	192	176	162	151	136	118	87	81	61	44	91.4	7.8
3-31	98.07	187	180	166	152	136	117	78	79	58	42	94.0	7.7
3-32	98.07	176	191	143	134	118	105	90	73	53	36	89.8	8.0
3-33	98.07	190	164	150	140	124	108	92	73	54	38	88.2	8.4
3-34	98.07	182	159	146	138	123	108	93	75	55	39	89.0	7.9
3-35	98.07	169	111	105	97	87	76	69	55	44	36	76.4	7.9
3-36	98.07	173	166	153	136	121	108	96	78	61	46	93.9	7.4
3-37	98.07	180	120	111	106	93	82	70	57	42	30	76.2	7.6
3-38	98.07	180	122	112	106	94	82	78	58	47	33	76.9	7.4
3-39	98.07	156	136	124	116	103	89	78	62	47	30	88.7	7.1
3-40	98.07	170	119	109	102	91	79	46	56	42	34	78.4	7.4
3-41	98.07	146	99	91	86	76	67	60	48	39	24	76.5	7.5
3-42	98.07	154	115	106	99	88	77	68	54	43	35	81.4	7.2
3-43	98.07	141	109	101	95	84	73	62	50	43	33	83.3	6.7
3-44	98.07	182	122	113	105	93	81	67	57	44	30	76.8	7.3
3-45	98.07	173	154	143	135	121	106	89	73	56	45	90.6	7.1
3-46	98.07	229	162	151	140	126	110	94	77	62	46	79.6	6.8
3-47	98.07	238	228	172	160	142	125	86	88	66	50	83.9	7.3
3-48	98.07	227	235	148	138	125	110	95	75	58	44	78.8	8.0
3-49	98.07	253	274	190	178	160	141	112	97	75	51	85.8	6.4
3-50	98.07	321	155	144	136	123	110	95	77	61	47	62.0	7.4

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達 率 (%)	路面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-51	98.07	187	118	113	106	97	86	79	65	50	40	75.2	6.0
3-52	98.07	147	153	108	104	94	83	59	61	47	35	85.0	6.3
3-53	98.07	229	150	140	131	118	105	90	74	59	54	75.9	6.3
3-54	98.07	226	248	150	139	125	109	59	77	58	39	79.7	6.0
3-55	98.07	237	143	133	124	112	99	55	70	54	36	71.7	5.9
3-56	98.07	195	138	128	119	106	94	79	64	54	33	79.1	6.2
3-57	98.07	259	173	161	150	137	120	74	85	74	54	76.7	6.5
3-58	98.07	291	316	198	187	168	149	74	103	82	59	80.9	6.3
3-59	98.07	221	244	148	141	126	112	98	77	71	39	80.2	6.5
3-60	98.07	181	136	129	120	109	98	33	72	58	42	83.3	6.4
3-61	98.07	193	132	123	115	103	90	90	67	61	27	77.9	6.4
3-62	98.07	208	229	140	131	119	105	86	76	61	43	80.3	6.1
3-63	98.07	283	141	131	124	111	99	37	72	62	47	63.4	6.4
3-64	98.07	235	255	164	153	138	124	110	88	67	47	82.3	5.9
3-65	98.07	265	196	184	173	156	138	101	102	78	60	82.0	6.0
3-66	98.07	328	358	241	230	208	185	150	135	104	76	84.7	6.0
平均		200	172	145	137	123	109	90	77	60	43	84.2	7.2
最大値		328	358	241	230	208	185	150	135	104	76	97.1	8.7
最小値		135	99	91	86	76	67	33	48	39	24	62.0	5.9

○供用18年 (H29)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達 率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-1	98.07	161	113	105	95	87	79	68	56	43	27	78.9	1.1
3-2	98.07	173	117	108	103	94	85	77	63	50	35	76.8	1.0
3-3	98.07	166	113	105	100	94	84	76	62	52	40	77.5	1.0
3-4	98.07	150	89	82	79	72	65	59	49	41	32	70.6	0.8
3-5	98.07	182	114	105	100	91	83	74	62	49	36	73.1	0.8
3-6	98.07	169	113	105	97	89	79	72	60	47	34	76.4	1.1
3-7	98.07	158	112	101	96	88	78	69	53	45	32	77.9	2.0
3-8	98.07	178	110	100	95	87	77	67	56	44	32	71.8	1.1
3-9	98.07	230	135	121	117	108	95	84	67	54	37	69.1	0.8
3-10	98.07	180	133	124	116	105	93	82	67	55	40	81.6	0.8
3-11	98.07	201	136	126	119	108	97	85	69	55	38	77.3	0.7
3-12	98.07	270	133	123	116	104	93	85	68	53	37	62.7	1.0
3-13	98.07	212	142	131	123	113	101	90	74	58	38	76.6	0.7
3-14	98.07	164	150	136	128	116	104	92	76	59	39	90.8	0.7
3-15	98.07	160	143	131	122	112	100	90	75	57	37	89.9	0.6
3-16	98.07	164	125	114	107	98	85	78	65	51	36	81.9	0.3
3-17	98.07	167	141	128	120	109	97	89	72	55	38	86.7	1.4
3-18	98.07	138	122	111	105	98	87	81	66	56	41	89.2	1.4
3-19	98.07	158	141	128	120	109	95	85	68	56	37	89.4	1.3
3-20	98.07	164	135	126	118	108	96	88	71	56	40	86.9	1.4
3-21	98.07	168	126	117	110	101	89	82	67	54	37	82.0	1.5
3-22	98.07	196	165	152	142	129	114	103	84	66	43	87.4	0.5
3-23	98.07	193	153	138	130	119	105	94	74	59	40	83.4	0.6
3-24	98.07	161	114	105	101	94	84	78	64	52	37	79.0	0.5
3-25	98.07	157	103	92	88	80	71	65	55	39	29	73.7	0.9
3-26	98.07	145	97	87	83	76	67	61	48	40	30	74.9	0.3
3-27	98.07	149	102	93	88	80	70	63	54	40	26	76.6	0.1
3-28	98.07	159	114	104	97	88	75	68	55	43	32	78.7	0.5
3-29	98.07	162	104	93	88	80	70	63	56	42	31	72.9	0.6
3-30	98.07	177	108	98	96	86	75	69	56	43	31	71.6	0.6
3-31	98.07	147	112	103	97	89	79	71	61	45	32	82.5	0.4
3-32	98.07	137	106	95	92	83	73	66	55	43	30	81.9	1.6
3-33	98.07	146	103	94	90	81	70	65	55	39	28	78.6	1.8
3-34	98.07	152	109	98	95	86	75	71	57	44	31	78.5	1.6
3-35	98.07	156	104	94	90	81	70	65	53	39	27	75.0	0.2
3-36	98.07	148	111	104	98	89	78	72	60	47	35	82.4	0.6
3-37	98.07	176	115	103	99	88	75	69	57	43	31	73.8	0.3
3-38	98.07	168	111	99	93	83	72	67	53	40	29	74.3	0.6
3-39	98.07	148	96	89	85	75	65	60	50	37	28	75.1	0.4
3-40	98.07	141	87	81	80	72	62	60	51	38	28	73.0	-1.1
3-41	98.07	154	101	92	88	78	66	61	47	37	27	74.6	-1.3
3-42	98.07	141	98	91	85	77	68	62	49	40	27	78.6	-1.4
3-43	98.07	129	97	89	83	75	65	61	50	40	26	81.5	-1.3
3-44	98.07	162	107	96	91	81	69	66	53	40	26	74.1	-1.3
3-45	98.07	165	106	99	93	85	76	70	57	46	34	75.0	-1.1
3-46	98.07	223	148	137	128	115	99	89	70	55	38	76.3	-1.1
3-47	98.07	222	160	148	138	123	109	101	82	62	44	80.0	-1.0
3-48	98.07	206	148	134	125	113	98	90	70	56	40	78.8	-0.8
3-49	98.07	261	184	170	158	143	125	115	91	69	43	78.8	-0.8
3-50	98.07	318	128	120	115	103	91	86	70	54	38	54.9	-0.7

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達 率 (%)	路面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
3-51	98.07	160	99	92	91	83	74	69	59	46	35	73.2	-0.5
3-52	98.07	129	106	98	94	86	77	71	60	47	30	86.5	-0.2
3-53	98.07	241	146	133	127	115	100	94	78	58	38	71.2	-0.3
3-54	98.07	219	140	128	119	106	93	84	68	50	33	73.8	-0.3
3-55	98.07	244	135	124	118	104	90	82	64	52	35	67.4	-0.5
3-56	98.07	205	124	115	107	96	83	77	62	48	34	71.7	-0.7
3-57	98.07	219	131	120	115	105	93	84	68	54	37	71.1	-0.6
3-58	98.07	325	147	136	127	115	101	92	73	55	36	58.9	-0.7
3-59	98.07	202	125	117	111	100	90	83	66	54	35	73.5	-1.0
3-60	98.07	163	142	129	122	110	99	90	74	60	42	88.2	-1.3
3-61	98.07	178	119	109	104	95	84	76	63	49	36	76.0	-1.5
3-62	98.07	188	124	114	107	98	87	80	65	52	35	75.6	-1.9
3-63	98.07	273	115	104	102	91	79	73	60	47	33	55.0	-1.9
3-64	98.07	211	126	118	111	100	88	80	64	52	35	71.6	-2.0
3-65	98.07	233	146	133	127	115	102	92	75	59	40	72.7	-2.1
3-66	98.07	285	174	162	153	138	122	112	90	69	44	72.5	-1.8
平均		185	123	113	107	97	85	78	64	50	35	76.5	0.1
最大値		325	184	170	158	143	125	115	91	69	44	90.8	2.0
最小値		129	87	81	79	72	62	59	47	37	26	54.9	-2.1

○4工区（下り）

○供用9年（H20）

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
4-19	98.07	210	164	147	128	121	112	100	84	68	50	82.5	13.1
4-20	98.07	205	155	148	138	125	113	103	88	70	53	83.7	13.7
4-21	98.07	227	165	157	144	130	120	107	92	74	53	81.8	13.8
4-22	98.07	189	147	140	128	115	106	95	80	65	48	85.0	14.1
4-23	98.07	195	137	131	120	109	100	90	74	62	45	80.2	14.5
4-24	98.07	239	169	159	149	133	122	110	92	75	55	79.8	14.6
4-25	98.07	201	154	148	139	128	119	108	95	80	60	84.9	14.8
4-26	98.07	217	142	135	126	115	105	95	80	67	51	76.7	14.6
4-27	98.07	204	149	141	133	119	109	99	83	69	51	81.6	14.7
4-28	98.07	171	130	121	112	103	94	86	72	60	46	82.9	14.9
4-29	98.07	185	135	127	119	106	97	86	73	59	42	81.5	15.2
4-30	98.07	176	126	121	112	99	89	80	68	56	41	81.3	15.1
4-31	98.07	164	136	128	119	106	97	88	75	62	46	87.5	16.2
4-32	98.07	183	152	142	133	118	107	96	79	66	48	87.6	17.4
4-33	98.07	170	145	135	126	113	105	93	80	68	51	88.7	18.2
4-34	98.07	187	145	135	127	114	104	94	80	66	48	83.8	18.3
4-35	98.07	192	129	124	114	104	95	88	75	62	46	78.3	18.7
4-36	98.07	191	141	134	124	112	102	93	78	65	47	82.4	19.0
4-37	98.07	192	130	124	117	105	97	90	77	65	48	78.5	18.8
平均		195	145	137	127	114	105	95	80	66	49	82.6	15.8
最大値		239	169	159	149	133	122	110	95	80	60	88.7	19.0
最小値		164	126	121	112	99	89	80	68	56	41	76.7	13.1

○供用16年 (H27)

測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
4-1	98.07	169	181	149	139	131	117	110	92	73	60	93.8	-0.4
4-2	98.07	204	188	173	163	152	136	121	104	86	78	91.9	-0.4
4-3	98.07	202	211	154	144	138	122	107	92	76	67	86.4	-0.3
4-4	98.07	190	201	142	133	123	109	95	81	69	61	85.5	-0.3
4-5	98.07	209	231	160	151	138	123	113	94	77	67	86.8	-0.4
4-6	98.07	211	226	162	155	142	127	109	93	72	54	86.6	-0.3
4-7	98.07	210	225	166	158	143	128	115	93	75	53	88.2	-0.4
4-8	98.07	202	215	163	151	142	124	95	94	75	77	89.4	-0.4
4-9	98.07	199	216	164	154	142	127	108	91	69	60	90.5	-0.4
4-10	98.07	171	145	136	126	117	103	87	79	65	74	88.6	-0.5
4-11	98.07	160	130	122	113	103	93	79	71	58	66	86.5	-0.4
4-12	98.07	173	179	134	123	114	101	75	74	64	60	87.4	-0.2
4-13	98.07	181	157	146	133	120	108	93	78	66	65	89.3	-0.5
4-14	98.07	175	144	136	126	119	105	91	78	62	67	87.7	-0.7
4-15	98.07	224	206	171	158	144	125	109	87	67	64	86.7	-0.9
4-16	98.07	195	153	144	133	124	111	91	82	67	55	85.1	-0.5
4-17	98.07	201	148	136	127	119	105	93	77	60	51	80.7	-0.5
4-18	98.07	230	227	150	139	131	117	105	85	69	68	78.7	-0.6
4-19	98.07	410	452	128	118	109	97	86	71	56	63	47.6	-0.6
4-20	98.07	223	245	137	127	118	104	91	75	58	66	76.2	-0.7
4-21	98.07	237	260	162	148	137	121	105	87	65	71	81.0	-0.6
4-22	98.07	190	203	146	136	125	111	93	77	66	54	86.8	-0.8
4-23	98.07	229	169	137	125	115	101	87	72	52	60	74.9	-0.8
4-24	98.07	251	174	151	139	128	115	100	84	67	52	75.3	-0.5
平均		210	204	149	138	128	114	98	84	67	63	83.8	-0.5
最大値		410	452	173	163	152	136	121	104	86	78	93.8	-0.2
最小値		160	130	122	113	103	93	75	71	52	51	47.6	-0.9

○供用 18 年 (H29)

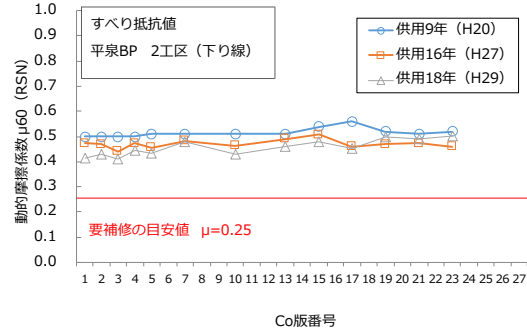
測点	荷重補正 (kN)	補正たわみ (μm)										荷重伝達率 (%)	路面温度 (°C)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₇₅	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₂₀₀		
4-19	98.07	683	116	107	102	95	89	80	67	55	42	27.1	2.5
4-20	98.07	260	138	128	117	109	98	89	73	61	44	66.0	3.4
4-21	98.07	278	182	169	155	144	129	115	91	73	49	75.6	2.4
4-22	98.07	222	169	158	145	132	119	105	83	69	47	83.3	2.5
4-23	98.07	243	139	128	118	108	97	87	69	56	38	69.1	2.7
4-24	98.07	282	166	153	142	131	117	106	82	68	46	70.4	2.7
4-25	98.07	251	167	158	145	134	123	112	88	76	54	77.3	3.2
4-26	98.07	236	155	145	132	123	110	99	80	66	48	76.1	2.2
4-27	98.07	233	151	143	132	123	110	99	79	66	45	76.0	2.1
4-28	98.07	191	133	125	116	109	98	87	71	59	43	79.2	2.2
4-29	98.07	220	142	129	120	110	99	87	67	56	39	73.8	2.2
4-30	98.07	218	131	119	112	104	93	82	65	55	39	70.6	2.7
4-31	98.07	235	134	124	117	108	97	88	70	58	40	69.2	2.5
4-32	98.07	239	153	142	130	119	105	93	74	60	42	74.6	3.2
4-33	98.07	235	153	145	134	124	110	99	79	64	43	76.1	2.6
4-34	98.07	248	144	133	126	117	103	93	74	60	42	69.9	2.6
4-35	98.07	255	133	123	115	107	96	85	69	58	41	65.0	2.8
4-36	98.07	252	139	132	122	115	100	90	73	60	42	68.6	2.7
4-37	98.07	225	129	121	113	107	97	88	73	61	43	69.9	3.1
平均		263	146	136	126	117	105	94	75	62	44	70.4	2.6
最大値		683	182	169	155	144	129	115	91	76	54	83.3	3.4
最小値		191	116	107	102	95	89	80	65	55	38	27.1	2.1

付録 1.3 DF テスターによる動的摩擦係数、CT メーターによる平均プロファイラ深さ測定結果

●各版の経年変化

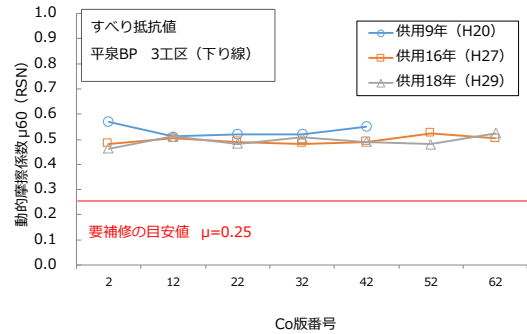
●動的摩擦係数 μ 60 (RSN)

- 供用年数による比較
- ・第2工区下り (OWP)

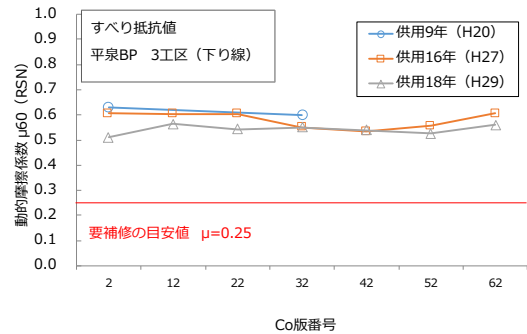


※Co番号1～11が鉄網有区間、12～27が鉄網無し区間

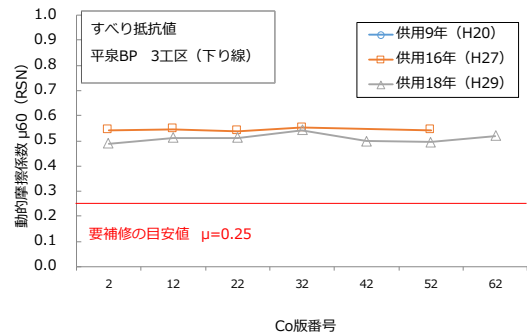
- ・第3工区下り (OWP)



- ・第3工区下り (BWP)

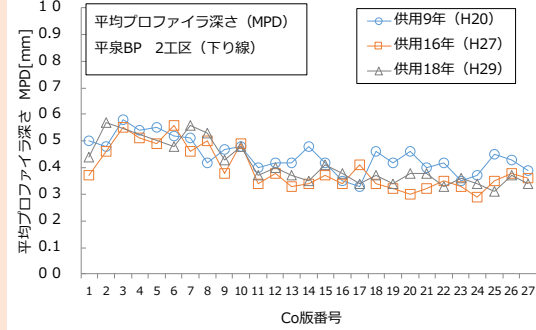


- ・第3工区下り (IWP)

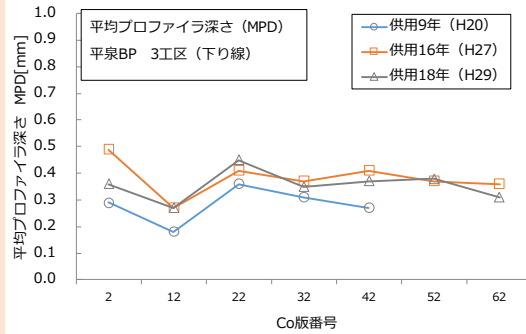


●平均プロファイラ深さMPD(mm)

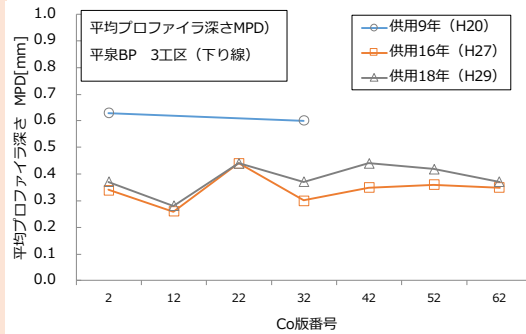
- 供用年数による比較
- ・第2工区下り (OWP)



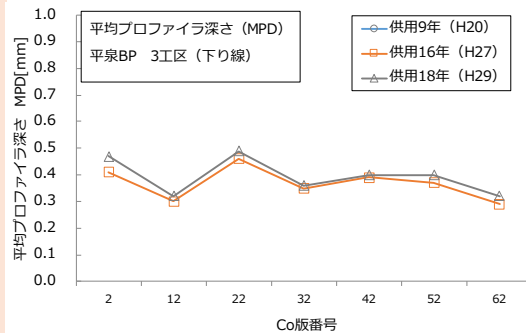
- ・第3工区下り (OWP)



- ・第3工区下り (BWP)



- ・第3工区下り (IWP)



●測定結果【供用9年（H20）】

工区	No	OWP						BWP						IWP																	
		すべり抵抗値RSN (DFT)					テクスチャ (CTM)		すべり抵抗値RSN (DFT)					テクスチャ (CTM)		すべり抵抗値RSN (DFT)					テクスチャ (CTM)										
		20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]									
2工区 下り線	1		0.55	0.50		0.50	0.50																								
	2		0.55	0.50		0.50	0.48																								
	3		0.56	0.50		0.50	0.58																								
	4		0.55	0.50		0.50	0.54																								
	5		0.56	0.51		0.51	0.55		0.63	0.59		0.59																			
	6						0.52																								
	7		0.56	0.51		0.51	0.51																								
	8						0.42																								
	9						0.47																								
	10		0.57	0.51		0.51	0.48																								
	11						0.40																								
	12						0.42																								
	13		0.56	0.51		0.51	0.42																								
	14						0.48																								
	15		0.59	0.54		0.54	0.42		0.63	0.59		0.59																			
	16						0.35																								
	17		0.57	0.56		0.56	0.33																								
	18						0.46																								
	19		0.58	0.52		0.52	0.42																								
	20						0.46																								
	21		0.56	0.51		0.51	0.40																								
	22						0.42																								
	23		0.58	0.52		0.52	0.35																								
	24						0.37																								
	25						0.45																								
	26						0.43																								
	27						0.39																								
	ave					0.51	0.45						0.59																		
3工区 下り線	2		0.62	0.57		0.57	0.29		0.66	0.63		0.63																			
	12		0.56	0.51		0.51	0.18																								
	22		0.54	0.52		0.52	0.36																								
	32		0.57	0.52		0.52	0.31		0.63	0.60		0.60																			
	42		0.60	0.55		0.55	0.27																								
	52																														
	62																														
ave					0.53	0.28						0.62																			

●測定結果【供用16年（H27）】

平泉BP DFT, CTM調査結果表（H27・11/19）

工区	No	OWP						BWP						IWP									
		すべり抵抗値RSN (DFT)					テクスチャ (CTM)		すべり抵抗値RSN (DFT)					テクスチャ (CTM)		すべり抵抗値RSN (DFT)					テクスチャ (CTM)		
		20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	
2工区 下り線	1	0.53	0.52	0.51	0.48	0.47	0.37	0.24															
	2	0.52	0.52	0.49	0.48	0.47	0.46	0.30															
	3	0.51	0.50	0.47	0.45	0.44	0.55	0.36															
	4	0.52	0.52	0.51	0.48	0.47	0.51	0.35															
	5	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46	0.49	0.35						0.43	0.30	0.54	0.53	0.52	0.50	0.49	0.48	0.36	
	6						0.56	0.44															
	7	0.54	0.53	0.52	0.49	0.48	0.46	0.27															
	8						0.50	0.32															
	9						0.38	0.24															
	10	0.51	0.51	0.49	0.47	0.46	0.49	0.27															
	11						0.34	0.20															
	12						0.38	0.27															
	13	0.56	0.54	0.53	0.50	0.49	0.33	0.20															
	14						0.34	0.23															
	15	0.58	0.57	0.54	0.53	0.51	0.37	0.22						0.37	0.31	0.55	0.55	0.53	0.52	0.50	0.39	0.24	
	16						0.34	0.20						0.29	0.17								
	17	0.52	0.51	0.49	0.47	0.46	0.41	0.24															
	18						0.34	0.18						0.35	0.18								
	19	0.53	0.52	0.51	0.49	0.47	0.32	0.17						0.32	0.14								
	20						0.30	0.16						0.41	0.20								
	21	0.55	0.53	0.52	0.49	0.47	0.32	0.17						0.27	0.16								
	22						0.35	0.21						0.32	0.18								
	23	0.52	0.51	0.49	0.47	0.46	0.33	0.24						0.43	0.21								
	24						0.29	0.17						0.35	0.22							0.37	0.20
	25						0.35	0.19						0.35	0.19							0.34	0.19
	26						0.38	0.29						0.35	0.18							0.39	0.23
	27						0.36	0.23						0.33	0.20							0.41	0.22
ave					0.47	0.39						#DIV/0!	0.35						0.49	0.40			
3工区 下り線	2	0.55	0.54	0.53	0.50	0.48	0.49	0.30	0.61	0.63	0.62	0.62	0.61	0.34	0.19	0.62	0.60	0.59	0.56	0.54	0.41	0.28	
	12	0.57	0.56	0.54	0.51	0.50	0.27	0.17	0.63	0.64	0.63	0.62	0.60	0.26	0.14	0.61	0.60	0.59	0.57	0.55	0.30	0.19	
	22	0.56	0.54	0.53	0.51	0.49	0.41	0.27	0.63	0.63	0.62	0.61	0.60	0.44	0.33	0.61	0.59	0.58	0.56	0.54	0.46	0.31	
	32	0.55	0.55	0.53	0.51	0.48	0.37	0.23	0.59	0.59	0.58	0.56	0.55	0.30	0.16	0.61	0.62	0.60	0.58	0.55	0.35	0.20	
	43	0.55	0.54	0.53	0.51	0.49	0.41	0.22	0.58	0.59	0.58	0.54	0.53	0.35	0.21							0.39	0.21
	52	0.59	0.58	0.56	0.53	0.52	0.37	0.22	0.60	0.60	0.59	0.57	0.56	0.36	0.22	0.61	0.61	0.59	0.57	0.54	0.37	0.22	
ave	0.58	0.57	0.54	0.52	0.50	0.36	0.20	0.61	0.63	0.62	0.62	0.61	0.35	0.15							0.29	0.18	
					0.50	0.38						0.58	0.34						0.55	0.37			

●測定結果【供用 18 年 (H29)】

平泉BP DFT, CTM調査結果表 (2018/2/26測定)

工区	No	OWP						BWP						IWP																									
		すべり抵抗値RSN (DFT)				テクスチャ (CTM)		すべり抵抗値RSN (DFT)				テクスチャ (CTM)		すべり抵抗値RSN (DFT)				テクスチャ (CTM)																					
		20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	MPD [mm]	RMS [mm]																	
2工区 下り線	1	0.46	0.44	0.41	0.40	0.41	0.44	0.28																															
	2	0.50	0.47	0.43	0.42	0.43	0.57	0.37																															
	3	0.49	0.44	0.41	0.40	0.41																																	
	4	0.51	0.47	0.45	0.42	0.45																																	
	5	0.50	0.46	0.43	0.43	0.43													0.52	0.51	0.49	0.49	0.49																
	6						0.48	0.31																															
	7	0.54	0.52	0.48	0.48	0.48	0.56	0.34																															
	8						0.53	0.31																															
	9						0.43	0.32																															
	10	0.46	0.45	0.43	0.42	0.43	0.48	0.26																															
	11						0.37	0.22																															
	12						0.40	0.23																															
	13	0.48	0.47	0.46	0.44	0.46	0.37	0.19																															
	14						0.35	0.25																															
	15	0.50	0.49	0.48	0.46	0.48	0.41	0.24					0.41	0.26	0.50	0.50	0.49	0.48	0.49	0.49	0.45	0.26																	
	16						0.38	0.25																															
	17	0.48	0.47	0.45	0.44	0.45	0.34	0.19																															
	18						0.37	0.19																															
	19	0.52	0.51	0.50	0.48	0.50	0.34	0.18																															
	20						0.38	0.26																															
	21	0.51	0.50	0.49	0.47	0.49	0.38	0.21																															
	22						0.33	0.18																															
	23	0.52	0.51	0.50	0.48	0.50	0.36	0.18																															
	24						0.34	0.18																															
	25						0.31	0.19																															
	26						0.37	0.24																															
	27						0.34	0.22																															
	ave					0.46	0.40						#DIV/0!	0.41																									
3工区 下り線	2	0.52	0.49	0.46	0.44	0.46	0.36	0.24	0.53	0.54	0.51	0.50	0.51	0.37	0.20	0.56	0.53	0.49	0.46	0.49	0.47	0.33																	
	12	0.56	0.54	0.51	0.48	0.51	0.27	0.17	0.55	0.57	0.56	0.56	0.56	0.28	0.14	0.55	0.54	0.51	0.49	0.51	0.32	0.19																	
	22	0.53	0.51	0.48	0.46	0.48	0.45	0.31	0.57	0.56	0.54	0.53	0.54	0.44	0.24	0.53	0.52	0.51	0.52	0.51	0.49	0.26																	
	32	0.56	0.54	0.51	0.48	0.51	0.35	0.23	0.56	0.57	0.55	0.54	0.55	0.37	0.25	0.56	0.57	0.54	0.53	0.54	0.36	0.20																	
	42	0.53	0.51	0.49	0.47	0.49	0.37	0.24	0.54	0.55	0.54	0.53	0.54	0.44	0.22	0.52	0.52	0.50	0.49	0.50	0.40	0.24																	
	52	0.52	0.50	0.48	0.48	0.48	0.38	0.25	0.53	0.54	0.53	0.53	0.53	0.42	0.24	0.53	0.52	0.50	0.48	0.50	0.40	0.27																	
	62	0.54	0.54	0.52	0.51	0.52	0.31	0.17	0.55	0.58	0.56	0.56	0.56	0.37	0.19	0.54	0.54	0.52	0.50	0.52	0.32	0.18																	
ave					0.49	0.36						0.54	0.38						0.51	0.39																			

付録 1.4 ひび割れ度測定結果

○供用 18 年 (H29)

工区	版No	変状		ひびの位置 (起点目地からの距離)	ひび割れの長さ	ひび割れの幅	ひび割れ度 cm/m ²
		ひび	角欠け				
第2工区 (下り)	0	-	隅角部	-	-	-	-
	1	-	隅角部	-	-	-	-
	10	横断	-	5.80m	305cm	0.45mm	6.8
	11	-	縁部	-	-	-	-
	27	-	縁部	-	-	-	-
第3工区 (上り)	9	横断	-	2.28m	91cm	0.25mm	2.4
	13	縦断	-	0.10m	25cm	0.10mm	0.7
	14	横断	-	5.40m	190cm	0.10mm	5.1
	18	横断	-	4.80m 5.50m	21cm 7cm 375cm	0.2mm 0.4mm 0.4mm	10.7
	20	横断	-	5.40m	25cm 49cm 32cm	0.1mm 0.25mm 0.25mm	2.8
	22	横断	-	6.40m	375cm	3.00mm	10.0
	23	横断	縁部	4.70m	375cm	1.30mm	10.0
	25	横断	-	5.10m	36cm	0.20mm	1.0
	27	-	隅角部	-	-	-	-
	28	縦断	-	0.22m	22cm	0.15mm	0.6
	29	縦断	-	0.00m	14cm	0.10mm	0.4
	30	-	縁部	-	-	-	-
	33	横断	-	5.30m	143cm	0.05mm	3.8
	36	縦断	-	0.00m	19cm	0.40mm	0.5
	37	縦断	-	9.84m	16cm	0.20mm	0.4
	41	横断	-	5.50m	375cm	0.15mm	10.0
	42	横断	-	5.20m	375cm	0.60mm	10.0
	44	横断	-	4.70m 5.10m	112cm 375cm	0.25mm 0.4mm	13.0
	47	横断	縁部	5.80m	68cm	0.15mm	1.8
	48	横断	隅角部、縁部	4.40m	375cm	0.70mm	10.0
	51	横断	-	4.10m	375cm	0.35mm	10.0
	53	横断	-	5.50m	375cm	0.55mm	10.0
	55	横断	-	6.70m	375cm	0.55mm	10.0
57	横断	-	4.10m	375cm	0.15mm	10.0	
60	横断	縁部	5.70m	375cm	1.3mm~3.0mm	10.0	
62	横断	-	4.90m	375cm	0.40mm	10.0	
64	-	縁部	0.00m	-	-	-	
第3工区 (下り)	37	縦断	-	9.32m	68cm	0.25mm	1.5
	41	横断	-	4.44m	300cm	0.50mm	6.7
	42	横断	縁部	6.18m	450cm	0.90mm	10.0
	47	縦断	-	10.00m	135cm	0.25mm	3.0
	48	横断	-	-	106cm 130cm 45cm	0.3mm 0.45mm 0.15mm	6.2
	49	縦断	-	0.00m 10.00m	80cm 44.1cm 152cm	0.2mm 0.1mm 0.14mm	6.1
	50	縦断	-	0.00m	148cm 75cm	0.2mm 0.2mm	5.0
	53	縦断	-	10.00m	52cm	0.15mm	1.2
	54	縦断	-	0.00m	63cm	0.50mm	1.4
	55	横断	-	4.23m	450cm	0.2mm~0.5mm	10.0
	56	横断	-	3.41m	400cm	0.20mm	8.9
	57	横断	-	3.91m	25cm	0.20mm	0.6
	60	横断	-	5.45m	360cm	0.20mm	8.0
62	縦断	-	10.00m	120cm 37cm	0.5mm 0.7mm	3.5	
63	縦断	-	0.00m	64cm	0.20mm	1.4	
66	-	隅角部	-	-	-	-	
第4工区 (下り)	21	横断	-	3.83m	312cm	0.20mm	6.9
	25	横断	-	5.80m	285cm	0.70mm	6.3
	28	横断	-	9.89m 9.86m	76cm 60cm	0.15mm 0.1mm	3.0
	30	横断	-	10.00m	30cm	0.30mm	0.7
	31	-	縁部	-	-	-	-
37	横断	-	5.50m	600cm	10.00mm	13.3	

付録 2. 「2.2 国道におけるコンクリート舗装の損傷事例の分析」 測定データ

付録 2.1 コンクリートの材料分析結果

付録 2.1 コンクリートの材料分析結果

●曲げ強度試験結果

供試体 名称	破断面の幅				破断面高さ			スパン l (mm)	強度試験		
	幅1 b 1 (mm)	幅2 b 2 (mm)	幅3 b 3 (mm)	平均 b (mm)	高さ1 h 1 (mm)	高さ2 h 2 (mm)	平均 h (mm)		最大荷重 P (kN)	曲げ強度 f c (N/mm ²)	平均値
A-1	99.3	99.1	99.1	99.2	101.2	100.7	100.9	300.0	21.4	6.36	6.44
B-1	98.8	99.1	99.1	99.0	102.3	102.5	102.4	300.0	24.0	6.95	
B-2	100.5	100.6	100.7	100.6	101.6	101.4	101.5	300.0	20.8	6.01	

●圧縮強度試験、静弾性係数試験結果

供試体名称	コア試験体寸法：直径は、上下高さの1/4付近及び高さの中央付近で直交する2方向で計測 高さは、4か所において0.1mmまで測定															試験体 断面積 (mm ²)	試験体 質量 (g)	見掛けの 密度 (g/cm ³)	高さ と 直径 の比	寸法に 関する 補正係数	最大 荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性 係数 (kN/mm ²)
	直径 (mm)							高さ (mm)														補正前	補正後 ^{*1}	
	1	2	3	4	5	6	平均	1	2	3	4	MAX	MIN	平均										
α-1	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.4	99.3	185.3	185.3	185.0	185.0	185.3	185.0	185.2	7744	3541.7	2.47	1.87	0.99	573.2	74.0	73.3	41.3	
α-2	99.1	99.2	99.2	99.2	99.3	99.2	99.2	149.1	149.0	148.9	148.9	149.1	148.9	149.0	7729	2835.2	2.46	1.50	0.96	462.4	59.8	57.4	41.2	
α-3	99.3	99.2	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	125.0	125.0	124.8	125.0	125.0	124.8	124.9	7744	2375.2	2.46	1.26	0.93	557.2	72.0	67.0	42.0	

●静弾性係数試験結果

静弾性係数試験データシート

α-1		α-2		α-3	
応力 (N/mm ²)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	応力 (N/mm ²)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	応力 (N/mm ²)	ひずみ (×10 ⁻⁶)
0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.33	26	1.35	30	1.43	21
2.66	57	2.65	63	2.61	44
3.94	88	3.95	95	3.95	73
5.29	118	5.24	127	5.20	101
6.57	150	6.56	160	6.51	133
7.79	177	7.83	190	7.86	165
9.07	209	9.11	222	9.12	194
10.33	239	10.42	253	10.46	225
11.66	271	11.70	285	11.74	256
13.02	303	13.00	316	13.07	288
14.29	334	14.35	348	14.23	315
15.56	364	15.58	378	15.52	347
16.90	397	16.90	409	16.86	378
18.21	429	18.23	442	18.14	410
19.50	461	19.54	472	19.40	440
20.79	493	20.83	504	20.70	472
22.06	524	22.11	534	22.02	504
23.33	556	23.39	564	23.32	536
24.61	588	24.66	595	24.61	567
25.89	620	25.92	626	25.85	597
27.25	655	27.27	660	27.16	629
28.51	688	28.53	690	28.46	661
29.75	720	29.85	723	29.76	693
31.10	755	31.18	756	31.04	724
32.33	788			32.32	756
33.65	822			33.65	789
34.94	857			34.89	820
36.25	892			36.18	853
37.53	928				
縦ひずみ50μ時の応力 (N/mm ²)	2.36	縦ひずみ50μ時の応力 (N/mm ²)	2.14	縦ひずみ50μ時の応力 (N/mm ²)	2.89
圧縮強度の1/3の応力 (N/mm ²)	24.68	圧縮強度の1/3の応力 (N/mm ²)	19.94	圧縮強度の1/3の応力 (N/mm ²)	23.98
1/3の応力時の縦ひずみ (μ)	590	1/3の応力時の縦ひずみ (μ)	482	1/3の応力時の縦ひずみ (μ)	552
静弾性係数 (kN/mm ²)	41.3	静弾性係数 (kN/mm ²)	41.2	静弾性係数 (kN/mm ²)	42.0

●中性化深さの測定結果

供試体 名称	中性化深さ (mm)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
α-1	0	0	0	0	0	1.0	1.6	0	0.3
α-2	0	0	1.7	0	0	0	0	0	0.2
α-3	0	0	0	3.2	0	0	0	0	0.4

●塩化物含有量試験結果

表 塩化物イオン濃度試験結果

試料名	深度 (mm)	単位容積質量 (kg/m ³)	Cl ⁻		
			(mass%)		(kg/m ³)
α-1	0 ~ 20	2470	0.02	(0.015)	0.37
	20 ~ 40		0.01	(0.009)	0.22
	40 ~ 60		0.01	(0.009)	0.22
	60 ~ 80		0.01	(0.007)	0.17
	80 ~ 100		0.00	(0.005)	0.12
	100 ~ 120		0.00	(0.003)	0.07
	120 ~ 140		0.00	(0.003)	0.07
α-2	0 ~ 20	2460	0.02	(0.018)	0.44
	20 ~ 40		0.00	(0.003)	0.07
	40 ~ 60		0.01	(0.006)	0.15
	60 ~ 80		0.01	(0.006)	0.15
	80 ~ 100		0.01	(0.008)	0.20
	100 ~ 120		0.00	(0.001)	0.02
	120 ~ 140		0.00	(0.004)	0.10

注) 塩化物イオン濃度試験の結果は絶乾ベース。

() 内は単位容積質量当たりの塩化物イオン量換算に使用した値である。

$$\text{Cl}^- (\text{kg/m}^3) = \text{単位容積質量} (\text{kg/m}^3) \times \text{Cl}^- (\text{mass}\%) \div 100$$

●配合推定【β-1】

硬化コンクリートの配合推定計算表

件名：コンクリート供試体の各種試験業務

試料名：β-1

項目	記号	結果	単位
単位容積質量 及び付着水分		水中質量 2324.7 表乾質量 3881.6 絶乾質量 3778.1	g
	a	絶乾単位容積質量=絶乾質量/(表乾質量-水中質量)×1000	2427 kg/m ³
	b	表乾単位容積質量=表乾質量/(表乾質量-水中質量)×1000	2493 kg/m ³
	c	付着水分=(表乾質量-絶乾質量)/絶乾質量×100	2.7 %
化学分析値	d	コンクリートの強熱減量(600℃)	3.5 %
		コンクリートの強熱減量(1000℃)	4.4 %
	e	コンクリートの不溶残分	80.3 %
	f	コンクリートの酸化カルシウム	8.1 %
原材料の 分析値**	g	セメントの酸化カルシウム	64.5 %
	h	セメントの強熱減量(600℃)	0.6 %
	I	骨材の不溶残分	95.2 %
	j	骨材の酸化カルシウム	0.4 %
	k	骨材の強熱減量(600℃)	1.2 %
コンクリート試料の 配合割合	l*	骨材量=(e/I)×100	84.3 %
	m*	セメント量={f-I*×j/100}/g}×100	12.0 %
	n*	結合水=d-{l*×k/100}+(m*×h/100)}	2.4 %
コンクリート試料の 配合割合 l*+m*+n*=100に換算	l	骨材量={l*/(l*+m*+n*)}×100	85.37 %
	m	セメント量={m*/(l*+m*+n*)}×100	12.18 %
	n	結合水={n*/(l*+m*+n*)}×100	2.44 %
骨材絶乾ベースでの硬 化コンクリートの単位質量 当たりの推定配合	o	骨材量={l/(100+c)}×1000	831 kg/t
	p	セメント量={m/(100+c)}×1000	119 kg/t
	q	水量={(n+c)/(100+c)}×1000	50 kg/t
単位量推定	r*	単位骨材量(絶乾ベース)=b×o/1000	2072 kg/m ³
	r	単位骨材量(表乾ベース)=r*+(r*×1.8/100)	2109 kg/m ³
	s	単位セメント量=b×p/1000	296 kg/m ³
	t	単位水量=(b×q/1000)-(r*×1.8/100)	88 kg/m ³
	u	水セメント比=(t/s)×100	30 %

**ここにあげた骨材の分析値は、セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」の全国骨材の平均値です。また、骨材の吸水率は1.8%と仮定しました。

●配合推定【β-3】

硬化コンクリートの配合推定計算表

件名：コンクリート供試体の各種試験業務

試料名：β-3

項目	記号	結果	単位
単位容積質量 及び付着水分		水中質量 2748.4 表乾質量 4613.5 絶乾質量 4491.8	g
	a	絶乾単位容積質量=絶乾質量/(表乾質量-水中質量)×1000	2408 kg/m ³
	b	表乾単位容積質量=表乾質量/(表乾質量-水中質量)×1000	2474 kg/m ³
	c	付着水分=(表乾質量-絶乾質量)/絶乾質量×100	2.7 %
化学分析値	d	コンクリートの強熱減量(600℃)	3.3 %
		コンクリートの強熱減量(1000℃)	4.4 %
	e	コンクリートの不溶残分	81.6 %
	f	コンクリートの酸化カルシウム	7.5 %
原材料の 分析値**	g	セメントの酸化カルシウム	64.5 %
	h	セメントの強熱減量(600℃)	0.6 %
	I	骨材の不溶残分	95.2 %
	j	骨材の酸化カルシウム	0.4 %
	k	骨材の強熱減量(600℃)	1.2 %
コンクリート試料の 配合割合	l*	骨材量=(e/I)×100	85.7 %
	m*	セメント量={f-I*×j/100}/g}×100	11.1 %
	n*	結合水=d-{l*×k/100}+(m*×h/100)}	2.2 %
コンクリート試料の 配合割合 l*+m*+n*=100に換算	l	骨材量={l*/(l*+m*+n*)}×100	86.57 %
	m	セメント量={m*/(l*+m*+n*)}×100	11.21 %
	n	結合水={n*/(l*+m*+n*)}×100	2.23 %
骨材絶乾ベースでの硬 化コンクリートの単位質量 当たりの推定配合	o	骨材量={l/(100+c)}×1000	843 kg/t
	p	セメント量={m/(100+c)}×1000	109 kg/t
	q	水量={(n+c)/(100+c)}×1000	48 kg/t
単位量推定	r*	単位骨材量(絶乾ベース)=b×o/1000	2085 kg/m ³
	r	単位骨材量(表乾ベース)=r*+(r*×1.8/100)	2123 kg/m ³
	s	単位セメント量=b×p/1000	270 kg/m ³
	t	単位水量=(b×q/1000)-(r*×1.8/100)	81 kg/m ³
	u	水セメント比=(t/s)×100	30 %

**ここにあげた骨材の分析値は、セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」の全国骨材の平均値です。また、骨材の吸水率は1.8%と仮定しました。

●曲げ強度試験状況



写真-1 切断前 (A-1)



写真-2 切断前 (B-1)

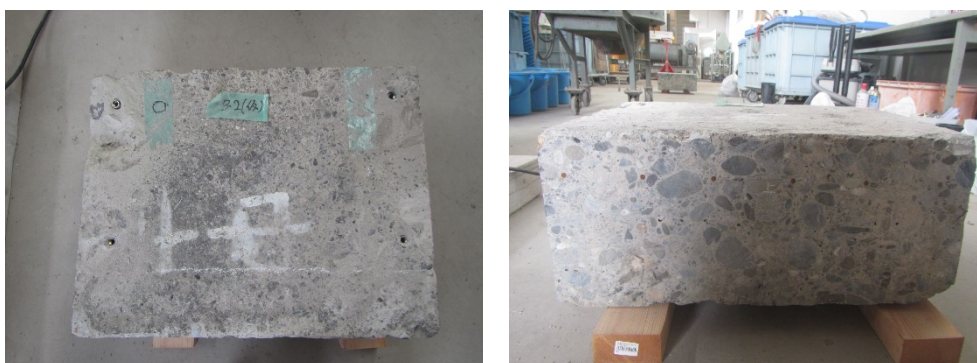


写真-3 切断前 (B-2)

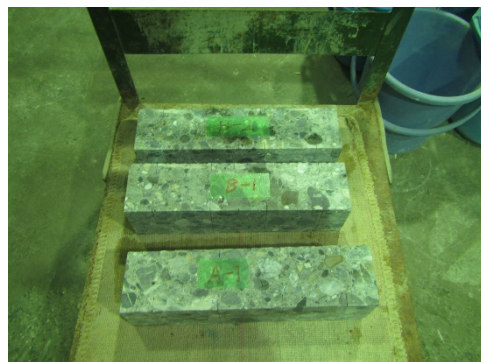
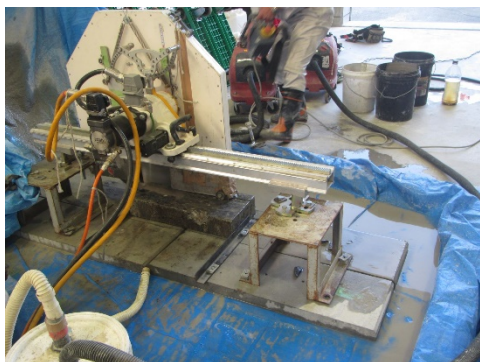


写真-4 コンクリート供試体の切出し状況



写真-5 曲げ強度試験状況



写真-6 曲げ強度試験後の供試体 (A-1)



写真-7 曲げ強度試験後の供試体 (B-1)



写真-8 曲げ強度試験後の供試体 (B-2)

● 圧縮強度試験、静弾性係数試験状況



写真-9 圧縮強度・静弾性係数試験状況
(α-1)



写真-10 圧縮強度・静弾性係数試験状況
(α-2)



写真-11 圧縮強度・静弾性係数試験状況 (α-3)



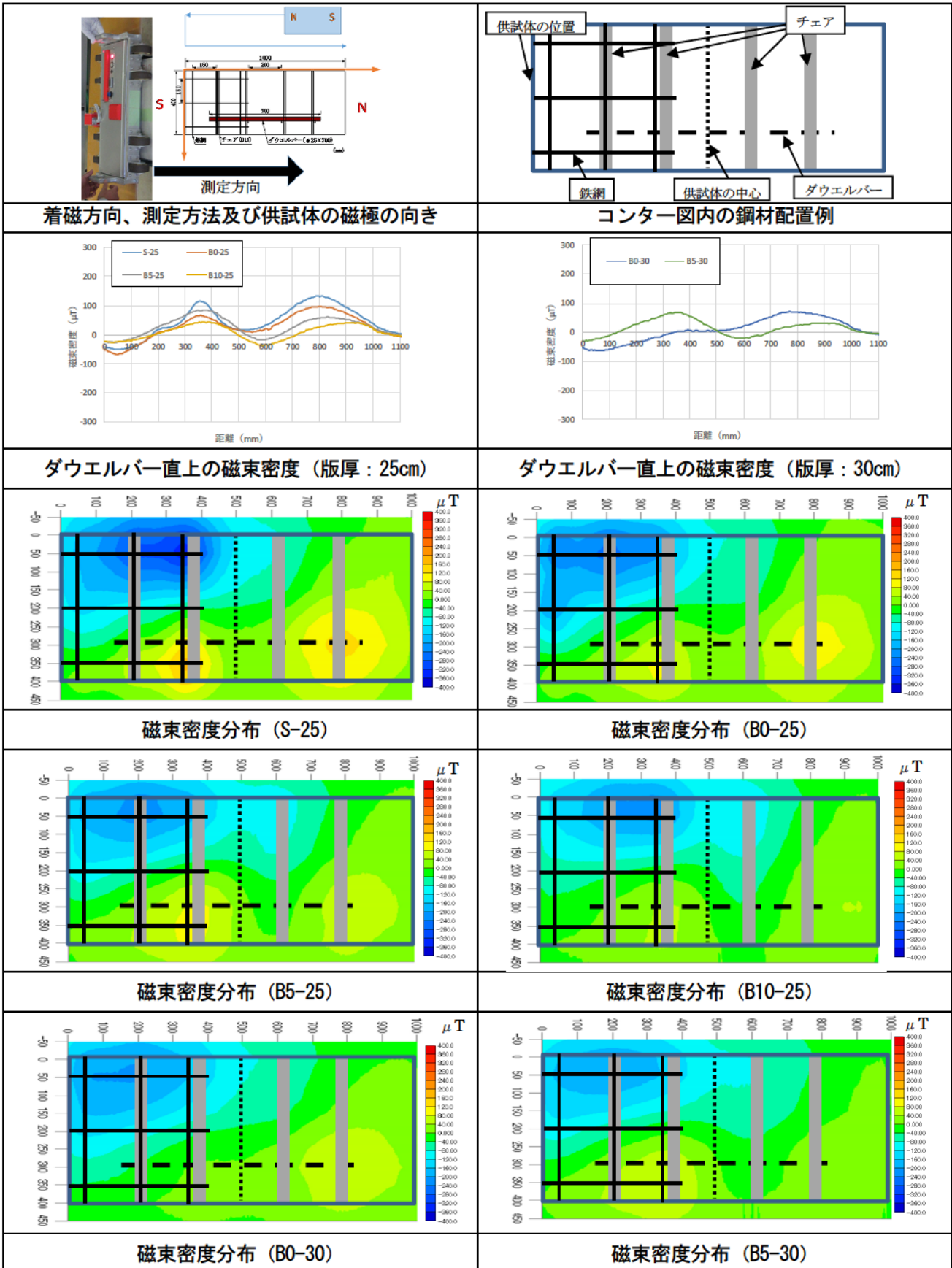
写真-12 試料微粉碎状況(ディスク・ミル)
(塩化物イオン濃度試験)

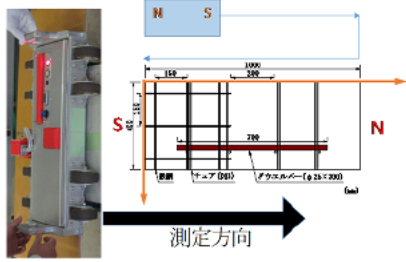
付録 3. 「3.2.2 漏洩磁束法によるダウエルバー破断検知に 関する実験的検討」測定データ

付録 3.1 漏洩磁束法による磁束密度測定結果（コンター図）

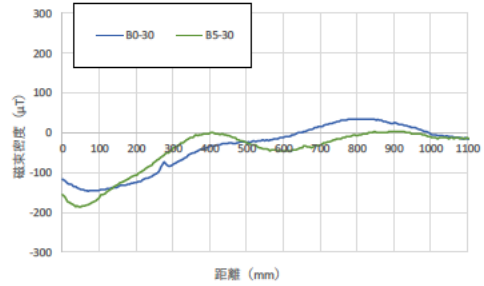
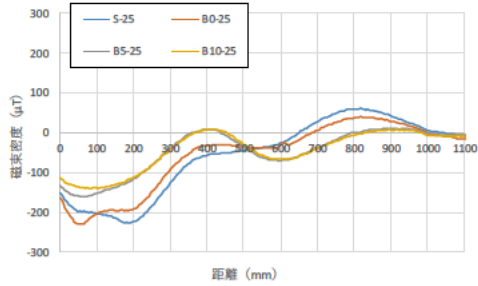
付録 3.1 漏洩磁束法による磁束密度測定結果（コンター図）

●磁束密度測定結果（供試体）



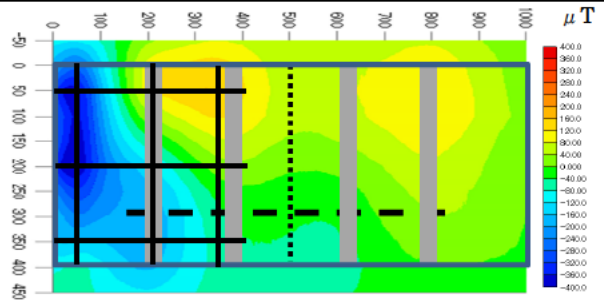
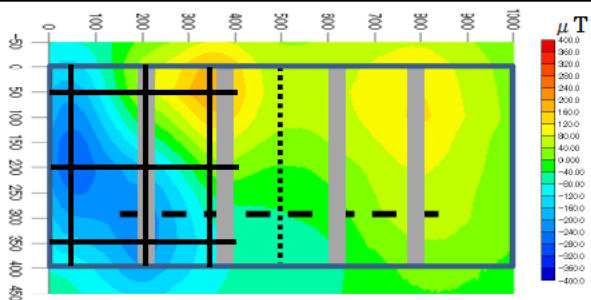


着磁方向、測定方法及び供試体の磁極の向き



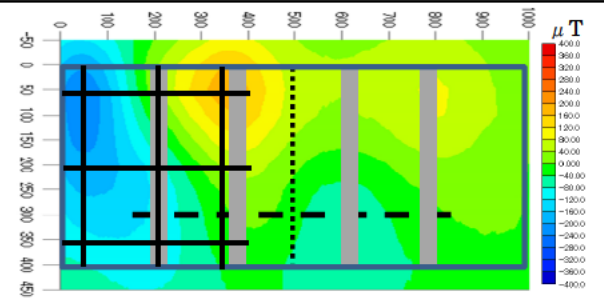
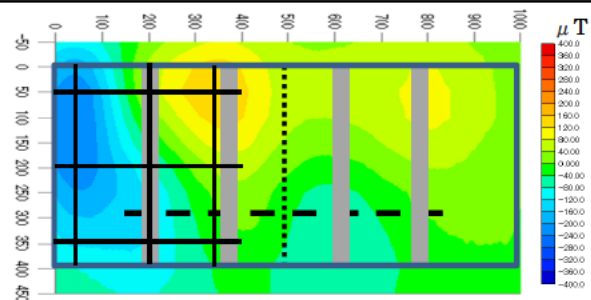
ダウエルバー直上の磁束密度 (版厚 : 25cm)

ダウエルバー直上の磁束密度 (版厚 : 30cm)



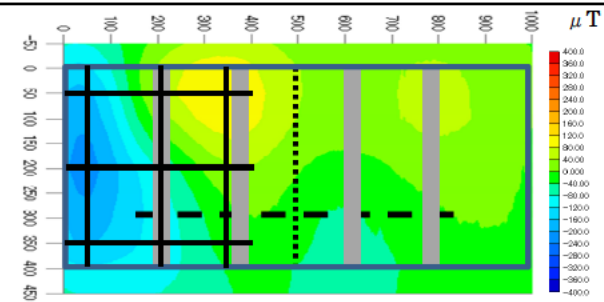
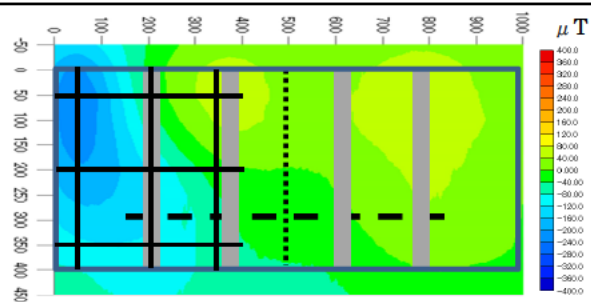
磁束密度分布 (S-25)

磁束密度分布 (B0-25)



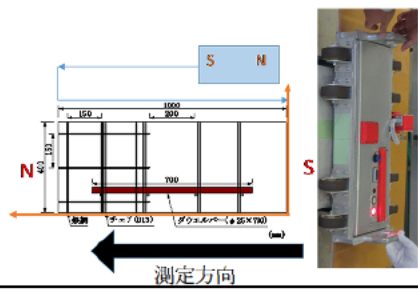
磁束密度分布 (B5-25)

磁束密度分布 (B10-25)



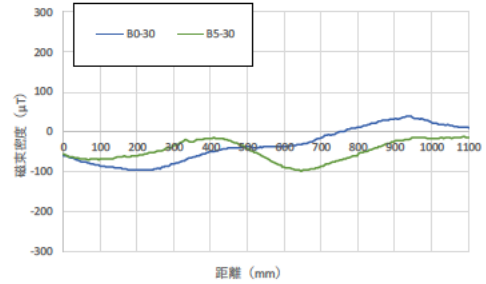
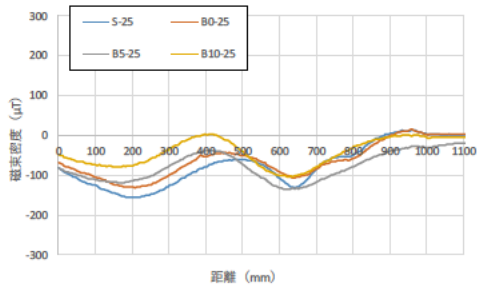
磁束密度分布 (B0-30)

磁束密度分布 (B5-30)



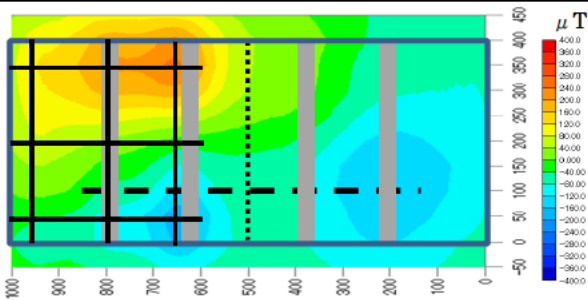
測定方向

着磁方向、測定方法及び供試体の磁極の向き

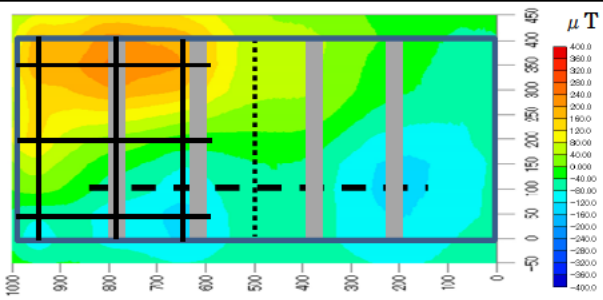


ダウエルバー直上の磁束密度 (版厚 : 25cm)

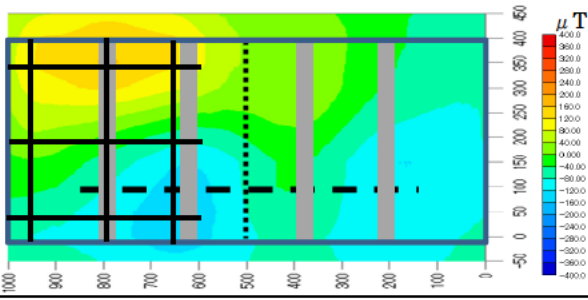
ダウエルバー直上の磁束密度 (版厚 : 30cm)



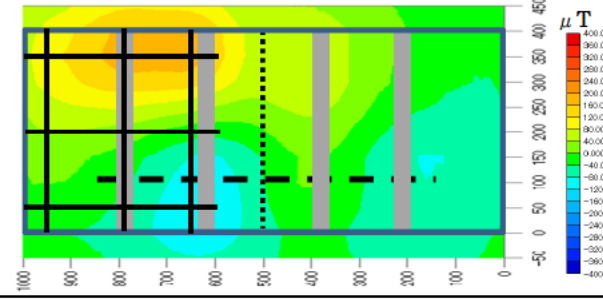
磁束密度分布 (S-25)



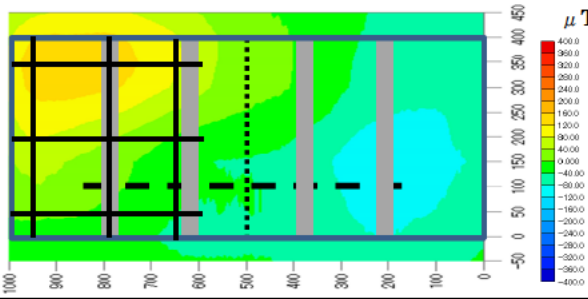
磁束密度分布 (B0-25)



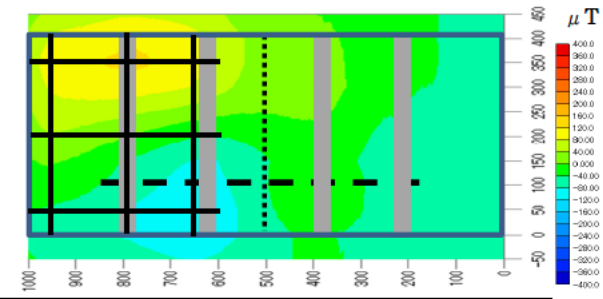
磁束密度分布 (B5-25)



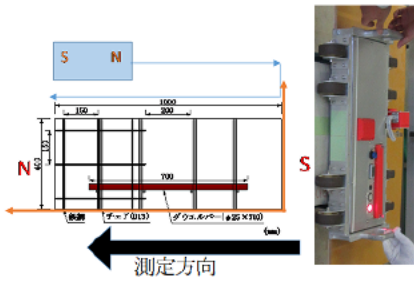
磁束密度分布 (B10-25)



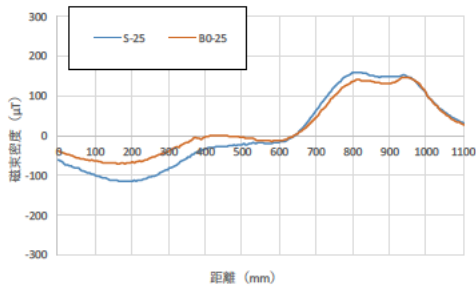
磁束密度分布 (B0-30)



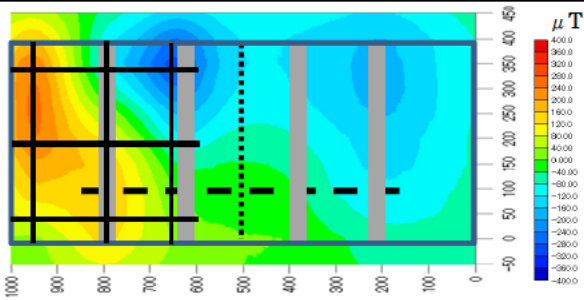
磁束密度分布 (B5-30)



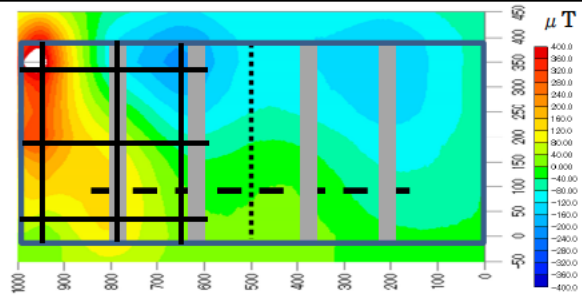
着磁方向、測定方法及び供試体の磁極の向き



ダウエルバー直上の磁束密度 (版厚 : 25cm)

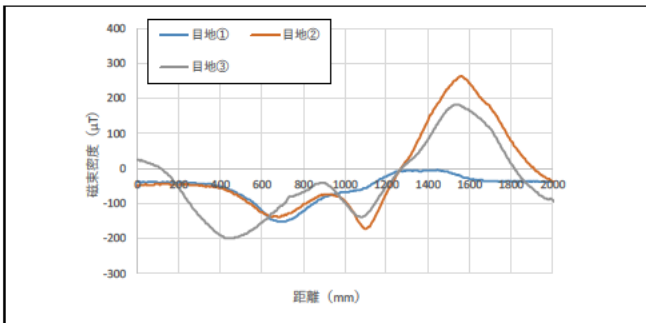


磁束密度分布 (S-25)

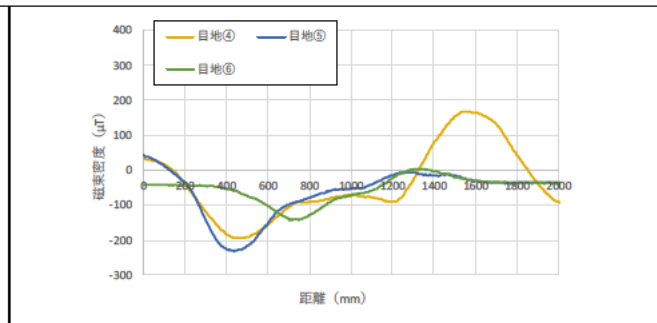


磁束密度分布 (B0-25)

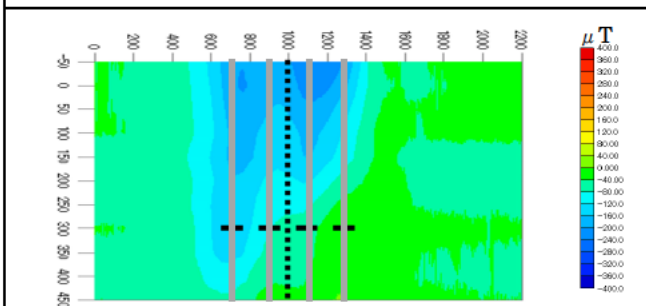
●磁束密度測定結果（舗装走行実験場）



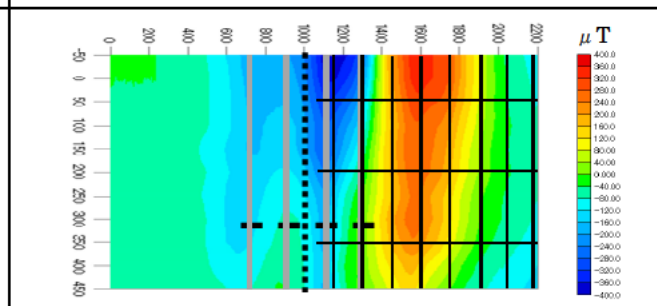
ダウエルバー直上の磁束密度（目地①～③）



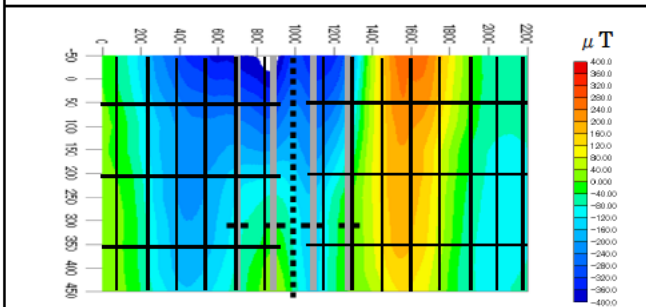
ダウエルバー直上の磁束密度（目地④～⑥）



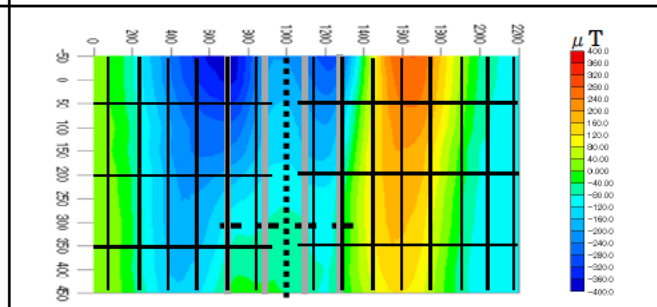
磁束密度分布（目地①）



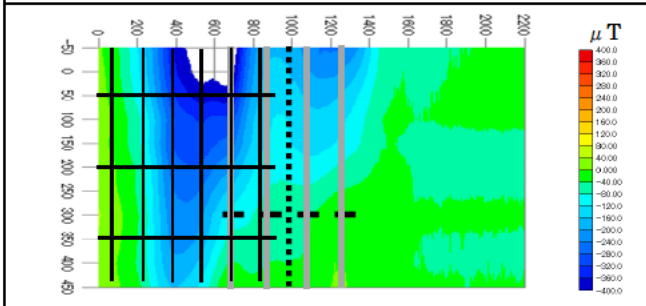
磁束密度分布（目地②）



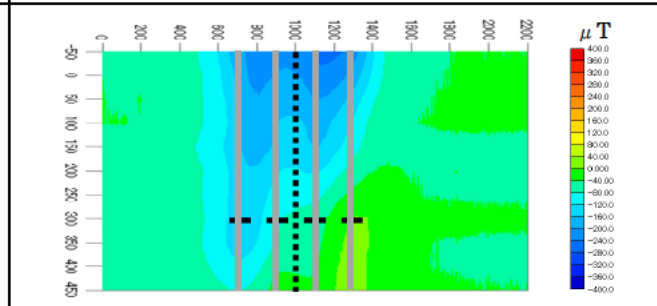
磁束密度分布（目地③）



磁束密度分布（目地④）



磁束密度分布（目地⑤）



磁束密度分布（目地⑥）

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No. 513 March 2019

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所企画部業務課

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754