

博士論文

舗装診断力の向上に資する研究

2022年3月

北海道科学大学大学院工学研究科
工学専攻 博士後期課程
中 村 博 康

概 要

厳しい財政状況や人材不足にある舗装分野において、過去に整備された膨大な社会資本を維持し続けるためには、効率的な維持管理による長寿命化が重要である。また、効率的な維持管理のためには、点検→診断→措置→記録のメンテナンスサイクルの構築が求められており、その中でも適切な診断を行うことは早期劣化の再発防止の観点からも重要である。

本研究では、適切な診断には、診断に必要な詳細調査の効率化等の技術力をより高める必要があり、加えて、診断に必要な専門的な知識や経験を有した技術者が増えることで、舗装の損傷の要因を総合的に特定する力（以下、舗装診断力）が向上し、それによってより適切な診断や措置が可能となり、延いては長寿命化につながると考えた。そのため、舗装診断力を向上させることを目的に、診断の効率化による技術力の高度化を検討しつつ、併せて技術の伝承・普及も検討した。

本論文は第1章から第4章の章立てで構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景について述べ、本研究の着眼点とした舗装の診断技術に関する既往の研究を概観して、現状における課題について整理した。それらを踏まえて、本研究の目的を述べるとともに本研究の位置付けを明確化した。

第2章では、診断に関する技術力の高度化として、診断の効率化を目的に舗装のひび割れと支持力との関係を検討した。舗装路面のひび割れから雨水が浸透することにより、路床・路盤が脆弱化し早期劣化につながるため、ひび割れを適切に評価することは極めて重要である。しかし、アスファルト舗装のひび割れ評価指標であるひび割れ率は、幅1mm以上のひび割れを含むメッシュの割合を表しており、幅1mm未満は評価されていない。また、同一メッシュ内に2本以上ひび割れが存在した場合は、その数が増えようとも同一の評価となってしまう。そこで、高分解能ラインレーザによって幅1mm未満の微細なひび割れも取得し、それらをひび割れ幅に応じて分類し、ひび割れ特徴量（交点・分岐数・延長・面積）を求め、ひび割れ率との関係、特徴量同士の関係および支持力との関係を明らかにした。さらに、特徴量の中でも、ひび割れの総延長と舗装の支持力には強い相関があることが分かった。加えて、微細なひび割れの抽出精度の向上についても明らかにした。

第3章では、診断に関する技術の伝承・普及として、舗装の早期劣化区間にて行った詳細調査において、ナレッジマネジメント（SECIモデル）を取り入れた育成プログラムを計画・実行した。プログラム実行後のアンケート調査から、若手技術者は熟練技術者と共に詳細調査を行うことで暗黙知を獲得し（共同化）、各種調査結果の分析・考察を通してそれを形式知に変換し（表出化）、報告書を作成することで新しい形式知を得る（連結化）という過程を経ることで、若手技術者の育成に効果があることを明らかにした。さらに、北海道の中小規模の舗装会社を対象に若手技術者の育成と育成方法に関するアンケート調査を実施し、本プログラムに対するニーズを明らかにした。

第4章では、本研究で得られた知見を総括し、今後の課題についてまとめて結論とした。

目 次

要旨	II
目次	III
図のリスト	V
表のリスト	VIII

第 1 章 序論

1.1 研究の背景	2
1.1.1 建設業の現状	2
1.1.2 舗装分野の現状	5
1.2 点検の概要	7
1.2.1 点検の位置付け	7
1.2.2 点検項目	10
1.2.3 点検手法	11
1.3 診断の概要	14
1.3.1 診断の位置付け	14
1.3.2 詳細調査方法（コア採取方法）	14
1.3.3 詳細調査方法（FWD によるたわみ量調査方法）	16
1.3.4 詳細調査方法（開削調査方法）	22
1.3.5 診断の課題	24
1.4 研究の目的	25
1.5 本研究の構成	26
1.5.1 序論（第 1 章）	26
1.5.2 道路舗装の診断技術の高度化（第 2 章）	26
1.5.3 道路舗装の診断技術の普及（第 3 章）	27
1.5.4 結論（第 4 章）	27
1.6 第 1 章の参考文献	29

第2章 道路舗装の診断技術の高度化

2.1 緒言	33
2.2 微細なひび割れの抽出	35
2.3 ひび割れ特徴量の概要	40
2.4 微細なひび割れが多い現場における検証	41
2.4.1 調査概要	41
2.4.2 ひび割れ抽出の再現性と精度向上	41
2.4.3 ひび割れの抽出	46
2.4.4 ひび割れ特徴量同士の関係	49
2.4.5 FWDを用いたたわみ量調査	52
2.4.6 ひび割れ特徴量とFWDたわみの関係	53
2.5 微細なひび割れが少ない現場における検証	56
2.5.1 調査概要	56
2.5.2 ひび割れの抽出	57
2.5.3 ひび割れ特徴量とFWDたわみの関係	57
2.6 第2章の結論	61
2.7 第2章の参考文献	62

第3章 道路舗装の診断技術の普及

3.1 緒言	64
3.2 詳細調査における若手技術者育成プログラム	65
3.2.1 舗装の詳細調査のメンバ	65
3.2.2 SECIモデルの適用	67
3.3 若手技術者育成の効果の検証	71
3.3.1 第1回アンケート調査（プログラム終了直後）	71
3.3.2 第2回アンケート調査（プログラム終了から2年後）	75
3.4 若手技術者育成プログラムの普及	82
3.4.1 技術者の現状	82
3.4.2 若手技術者の育成	85
3.5 第3章の結論	87
3.6 第3章の参考文献	88

第4章 結論

謝辞	92
----	----

図のリスト

図番号	タイトル	ページ
図-1.1	建設年度別橋梁数	2
図-1.2	公共事業関係費（国全体）の推移	3
図-1.3	建設業就業者数の推移	4
図-1.4	建設業就業者の年齢構成の推移	4
図-1.5	建舗装のストックと事業費	5
図-1.6	舗装施工管理技術者資格試験受験者数	6
図-1.7	メンテナンスサイクル	7
図-1.8	特に注意すべき損傷進行メカニズム	8
図-1.9	点検要領における道路の分類	8
図-1.10	使用目標年数と早期劣化の考え	9
図-1.11	ひび割れのイメージ	10
図-1.12	わだち掘れのイメージ	10
図-1.13	コア採取箇所の事例	15
図-1.14	FWD の基本構造	16
図-1.15	載荷荷重の分散とたわみ曲線の関係	19
図-1.16	本研究の目的	25
図-1.17	本研究の構成	26
図-2.1	アスファルト舗装におけるひび割れの従来の評価例	35
図-2.2	ひび割れ調査および FWD 測定の実施箇所	37
図-2.3	Pave-CAD によるひび割れ特徴量の算出過程	38
図-2.4	取得路面画像	38
図-2.5	ひび割れ幅分類毎に階層化された展開図	39
図-2.6	ひび割れ特徴量	40
図-2.7	ひび割れの抽出結果（1 回目）	42
図-2.8	ひび割れ分類の割合（1 回目）	42
図-2.9	ひび割れ抽出の学習過程	43
図-2.10	ひび割れ総延長の標準偏差の変化	43
図-2.11	画像 A のひび割れ総延長（4 回目）	44
図-2.12	画像 A のひび割れ分類の割合（4 回目）	44
図-2.13	ひび割れ総延長 L とひび割れ総延長 L の標準偏差の関係	45
図-2.14	調査区間における $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含んだひび割れ率 MC の変動	46

図番号	タイトル	ページ
図-2.15	調査区間におけるひび割れ幅分類の割合	46
図-2.16	$W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC とひび割れ総延長 L の関係	48
図-2.17	ひび割れ総延長 L と交点数 N の関係	49
図-2.18	ひび割れ総延長 L と分岐数 M の関係	50
図-2.19	ひび割れ総延長 L と総面積 S の関係	50
図-2.20	交点数 N と分岐数 M の関係	50
図-2.21	項点数 N と総面積 S の関係	51
図-2.22	分岐数 M と総面積 S の関係	51
図-2.23	$W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と D_0 たわみ量の関係	53
図-2.24	$W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と残存等値換算厚 T_{A0} の関係	53
図-2.25	ひび割れ率と D_0 たわみ量の R^2 値とひび割れ幅の関係	54
図-2.26	ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係	55
図-2.27	ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との R^2 値とひび割れ幅の関係	55
図-2.28	調査区間におけるひび割れ幅分類の割合	57
図-2.29	全ひび割れ幅 W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係	58
図-2.30	$W \geq 1\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係	58
図-2.31	$W \geq 2\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係	58
図-2.32	$W \geq 3\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係	59
図-2.33	$W \geq 4\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係	59
図-2.34	ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との R^2 値とひび割れ幅の関係	60
図-2.35	微細なひび割れが多い現場と微細なひび割れが少ない現場を併せたひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係	60
図-3.1	舗装の詳細調査の流れ	65
図-3.2	WG メンバの年齢構成	66
図-3.3	開削調査の経験数	66
図-3.4	知識習得から価値の創出へのイメージ	67
図-3.5	SECI モデル	68
図-3.6	SECI モデルを適用した若手舗装技術者育成プログラム	69
図-3.7	SECI モデルによる人材育成のイメージ	70
図-3.8	他人の知識が自身に与えた影響（設問 1）	72
図-3.9	装診断に関する自身の知識の変化（設問 2）	72

図番号	タイトル	ページ
図-3.10	知識が多くなった理由（設問 3）	73
図-3.11	得られた知識の活用（設問 4）	73
図-3.12	技術者の年齢構成	83
図-3.13	技術者の数	83
図-3.14	技術者の年齢構成の比較	84
図-3.15	募集人数と採用人数	84
図-3.16	若手技術者の育成方法	85
図-3.17	希望する社外プログラム	86

表のリスト

表番号	タイトル	ページ
表-1.1	点検要領における点検結果からの診断区分	9
表-1.2	路面性状自動測定装置性能確認試験の合格範囲例	12
表-1.3	コア採取方法（乾式と湿式）の特徴	15
表-1.4	採取コアによるひび割れの状況	15
表-1.5	FWD のタイプ	17
表-1.6	たわみ指標の評価	19
表-2.1	ひび割れ幅分類	39
表-2.2	調査区間の表層の供用年数と道路土工	41
表-2.3	ひび割れ幅分類	42
表-2.4	従来のひび割れ率 C と $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC との関係	47
表-2.5	$W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC とひび割れ特徴量の関係（ R^2 値）	48
表-2.6	ひび割れ特徴量同士の関係（ R^2 値）	49
表-2.7	$W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と支持力の関係（ R^2 値）	53
表-2.8	ひび割れ特徴量と支持力の関係（ R^2 値）	55
表-3.1	第 1 回アンケート調査の項目	71
表-3.2	第 2 回アンケート調査の項目	75
表-3.3	回答のまとめ（設問 1 および設問 2）	76
表-3.4	回答のまとめ（設問 3 および設問 4）	77
表-3.5	回答のまとめ（設問 5 および設問 6）	78
表-3.6	回答のまとめ（設問 7）	79
表-3.7	回答のまとめ（設問 8）	80
表-3.8	技術者の現状や若手技術者の育成方法に関するアンケート調査の項目	82

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 建設業の現状

我が国の総人口は 2004 年に約 1 億 2,700 万人をピークに、その後、減少を続けており、2050 年には 9,515 万人となると推計されている¹⁾。

そのような中において、我が国の建設産業は国の重要な社会基盤を支え、人々の生活を守るために必要不可欠な基幹産業である。建設産業の成果物として、人々の生活に利便性や安心感を与える様々なものが存在する。それらを創出する建設産業が担う社会的役割は、将来にわたり不変である。言わば、それは建設業が高度経済成長期から日本の屋台骨を支える業種であることを意味する。さらに、我が国は地震・台風・豪雨・豪雪等の常襲地帯であり頻発する自然災害等や 2012 年 12 月 2 日に中央自動車道上り線笹子トンネルで発生したトンネル天井板の落下事故等も考慮すると、このような国土において「安心」「安全」「快適」な暮らしを確保するためには、防災・減災対策の観点からも計画的に社会資本整備を進めることが重要である。

高度経済成長期に集中的に整備されてきた社会資本は老朽化を迎え、例えば図-1.1 に示す日本にある道路橋の建設年度別の橋梁数の分布を見ると、1955 年から 1970 年にかけて建設されたものが約 26%在り、全国に約 72 万橋ある道路橋のうち、建設後 50 年以上経過する割合が 2019 年では約 27%であるのに対して 10 年後の 2029 年では約 52%に倍増すると推計されている²⁾。よって、今後、社会資本の老朽化対策に維持修繕予算を増大させつつ、長寿命化を目指さなければならないところである。

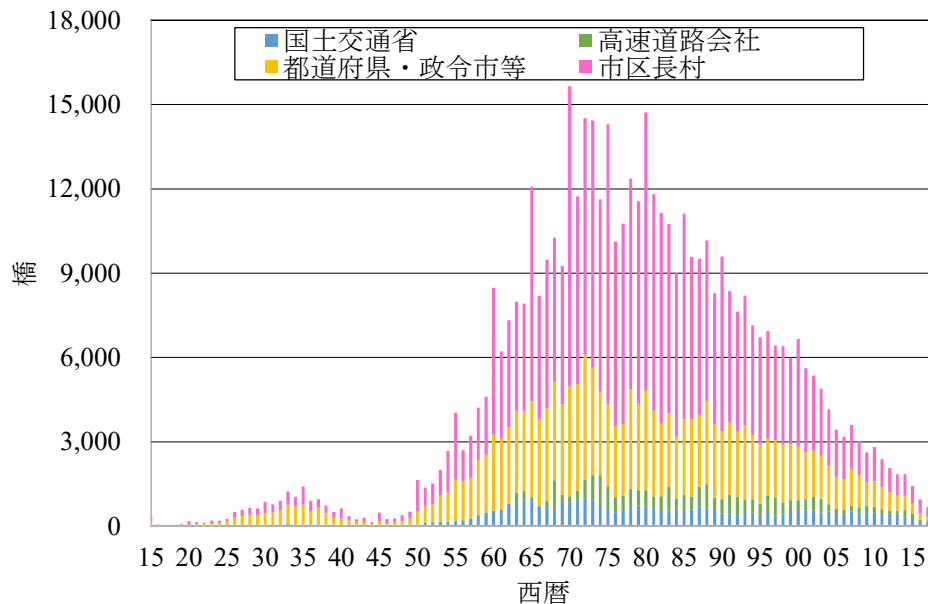
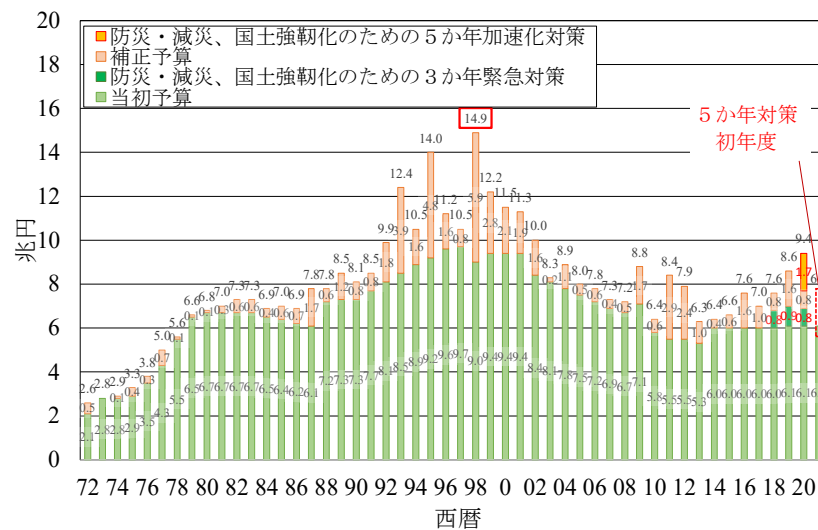


図-1.1 建設年度別橋梁数

そのような中，図-1.2 に示すように，国全体の公共事業関係費は，平成 30 年度から 3 年間においては「防災・減災，国土強靱化のための 3 か年緊急対策」として予算が追加され，さらに令和 2 年度からは「防災・減災，国土強靱化のための 5 か年加速化対策」として予算が追加されるなど，近年は国土強靱化基本計画に基づき微増傾向にあるが，ピーク時と令和 2 年度とを比較すると，当初予算ベースでは平成 9 年度の 9.7 兆円から 6.1 兆円，補正予算を加味しても平成 10 年度の 14.9 兆円から 9.4 兆円と，ともに 3 割以上減少している．今後もこのような厳しい財政状況が続けば，既存施設の維持管理，更新に支障を来す恐れある．そのため，この長寿命化の課題に対して，各インフラの点検・診断を行い，その結果を踏まえて適切な措置を講じるよう，メンテナンスサイクルの構築が行われている．



出典：令和3年度予算概要（R3.1 国土交通省）をもとに作成

図-1.2 公共事業関係費（国全体）の推移

また、我が国の経済発展に大きく寄与してきた建設業において、現在、建設業に従事している者は、次の世代に魅力ある建設産業を引き継ぐ責務を負っている。しかし、図-1.3に示すように、建設業就業者数³⁾が1997年に約685万人のピークを迎えた後大きく減少し、現在はピーク時の約70%である約490万人となっている。加えて、構造物を管理する国や地方自治体等での人口減少や少子高齢化に伴う技術者不足や財政難が深刻化しており、図-1.4に示すように、29歳以下の建設業就業者の割合は1997年では全産業とほぼ同じであったが、1998年以降は全産業と比べ急激に減少している。これとは逆に、55歳以上の割合は2004年以降急増し、全産業を大きく上回るペースで高齢化が進んでいる。以上より、建設業では、優れた建設技能者の高齢化、若年入職者の不足、建設従事者の定着率の低下といった問題が山積し、極めて危うい状況にある。長年にわたる建設投資の減少に伴い競争が激化する中で、技能労働者の就労環境が悪化してきたことに伴う構造的な問題により人材不足が顕在化している。今後、他産業を上回る高齢化と若年入職者の減少を放置したままでは、人材不足が更に深刻化する見込みである。

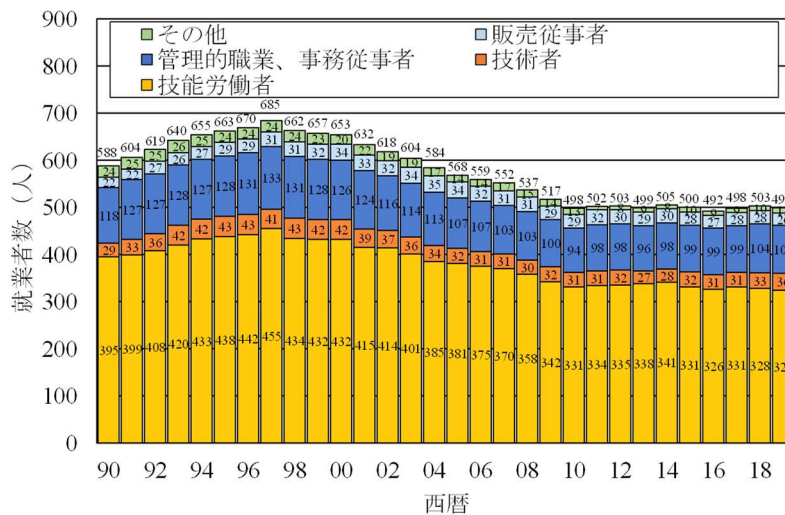


図-1.3 建設業就業者数の推移

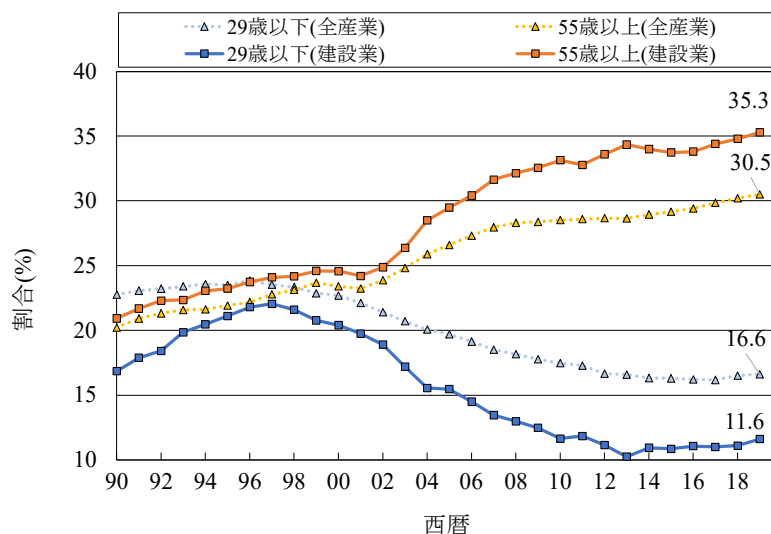


図-1.4 建設業就業者の年齢構成の推移

1.1.2 舗装分野の現状

一方、舗装分野においては、図-1.5 に示すように、舗装のストックは年々増加しているが、舗装事業費はピーク時よりも3割以上減少している⁴⁾。さらに1990年以降は舗装新設費よりも舗装維持修繕費の方が上回り、維持管理の重要性が増していることから、舗装分野においても予防保全型の管理を行い、長寿命化を目指す必要がある。そのためには、舗装を点検し、その結果から、劣化が著しく進行している箇所においては、適切に診断をしたうえで措置を実施する予防保全型管理を推進する必要がある。

また、舗装工事に携わる技術者の水準および能力の評価を的確に行うことにより、舗装工事の技術向上を図る目的で、一般社団法人日本道路建設業協会が実施している舗装施工管理技術者資格試験の受験者数⁵⁾は、図-1.6 に示すように年々減少しており、人口減少や少子高齢化に伴う技術者不足が顕著になっている。

そのような中、公益社団法人日本道路協会舗装委員会では、令和2年11月に、「舗装委員会における今後の取り組み」を取り纏め⁶⁾、この中で、舗装分野の課題について示している。この中では、人口減少・高齢化、インフラ老朽化といった社会情勢に対して、長寿命化や人材育成が舗装分野への要請であり、実践的な診断・予防技術の確立や若手技術者同士が所属や役職の枠にとらわれず、舗装分野の技術について自由に議論する場を創出することが重要であると示している。しかし、この要請に対し、魅力ある職場環境の整備や舗装の重要性のPRの必要性は示されているものの、どれも人材確保や離職防止の観点であり、技術者の育成に関する具体的な方策は示されていない。

このように、建設業とその中の舗装分野での現状と課題は同様であることが分かる。

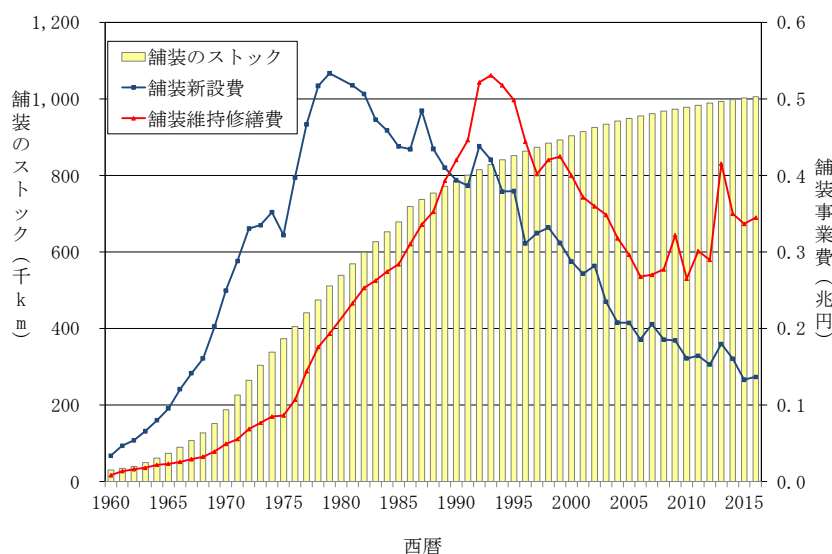


図-1.5 建舗装のストックと事業費

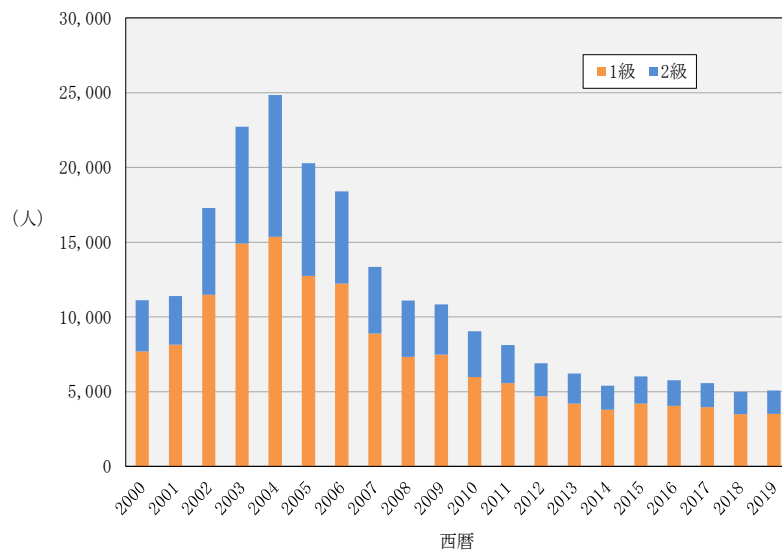


図-1.6 舗装施工管理技術者資格試験受験者数

1.2 点検の概要

1.2.1 点検の位置付け

舗装には自動車を中心とした道路利用者に安全性や利便性を与える役割があるものの、写真-1.1 に示すようなひび割れやわだち掘れや段差といった損傷が路面に生じることで走行性や快適性が損なわれてしまうことから、ひび割れ率やわだち掘れ量といった指標を用いて管理されている。

舗装は建設業の中でもストック量が約 100 万 km 以上と膨大なうえに、トンネルや橋と比べると更新周期が非常に短いため、技術者が限られている中においては、如何に効率的にメンテナンスを実施し長寿命化によってライフサイクルコストを縮減するかが喫緊の課題である^{6)・7)}。そのため、限りある維持修繕費用を効率的に活用し、高齢化する道路ストックのメンテナンス体制を構築するために、国土交通省は平成 25 年（2013 年）を「社会資本メンテナンス元年」と位置づけ、図-1.7 に示す道路の点検→診断→措置→記録で構成されるメンテナンスサイクルの構築の推進を提言した⁸⁾。こ



写真-1.1 舗装の損傷例
（左：ひび割れ 右：わだち掘れ）

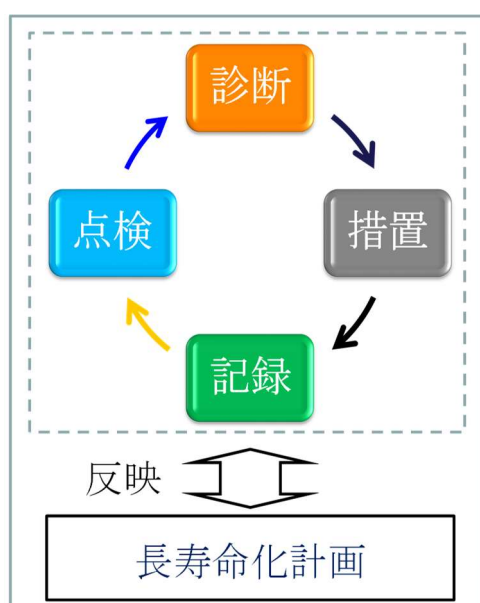


図-1.7 メンテナンスサイクル

の提言を踏まえて、舗装の表層や基層の適時修繕による路盤以下の層の保護等を通じ長寿命化に向けた舗装の効率的な修繕の実施を目的に、2016年10月に舗装点検要領が国土交通省道路局により策定され、メンテナンスサイクルを構築するために、各地方公共団体において要領に準じた点検が実施されている^{9)・12)}。さらに、要領では、図-1.8に示すように、舗装表面のひび割れから雨水が浸入することによって路盤層以深の支持力が低下する等、長寿命化の観点から路盤以下の層の保護に関し、特に注意すべき損傷進行メカニズムが書かれている。

また、舗装の維持管理に関する初めての技術基準である舗装点検要領において、より現場で適切かつ効率的にメンテナンスサイクルを構築するための図書として「舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針」が発刊されている¹³⁾。要領やこの図書では、道路管理者は図-1.9に示すように管理する道路を分類し、B以上に分類された道路に

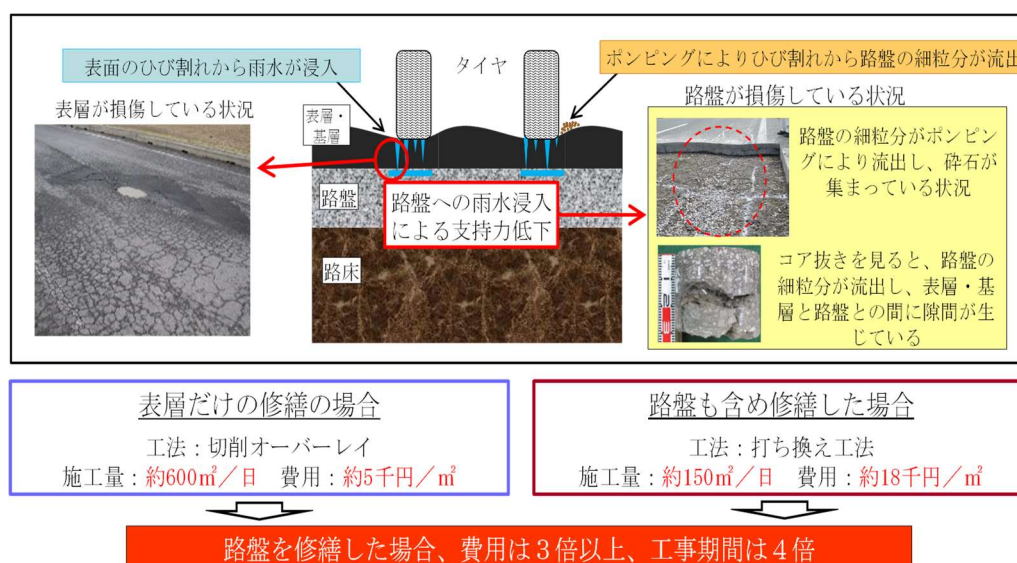


図-1.8 特に注意すべき損傷進行メカニズム

大分類	小分類	分類	主な道路 (イメージ)
損傷の進行が早い 道路等（例えば大型 車交通量が多い道路）	高規格幹線道路 等 （高速走行など求められる サービス水準が高い道路）	A	高速道路
		B	直轄国道
損傷の進行が緩や かな道路等（例えば 大型車交通量が少ない 道路）	生活道路等（損傷の進行 が極めて遅く、占用工事等 の影響が無ければ長寿命）	C	政令市・一般市道 補助国道・県道
		D	市町村道

図-1.9 点検要領における道路の分類

においては、図-1.10 に示すようにアスファルト舗装の表層を供用し続ける期間として使用目標年数を設定し、使用目標年数よりも早期に管理目標値を超過し劣化した区間は表-1.1 に示す診断区分Ⅲ-2 に区分され、修繕後に再び早期に劣化することを防ぐことが重要とされている。そのため、点検結果からその何れかが使用目標年数未満でかつ管理目標値を超過した早期劣化区間においては詳細調査を実施し、支持力等を確認したうえでその結果に基づいて修繕設計を行い、適切な措置を講じることとされている。

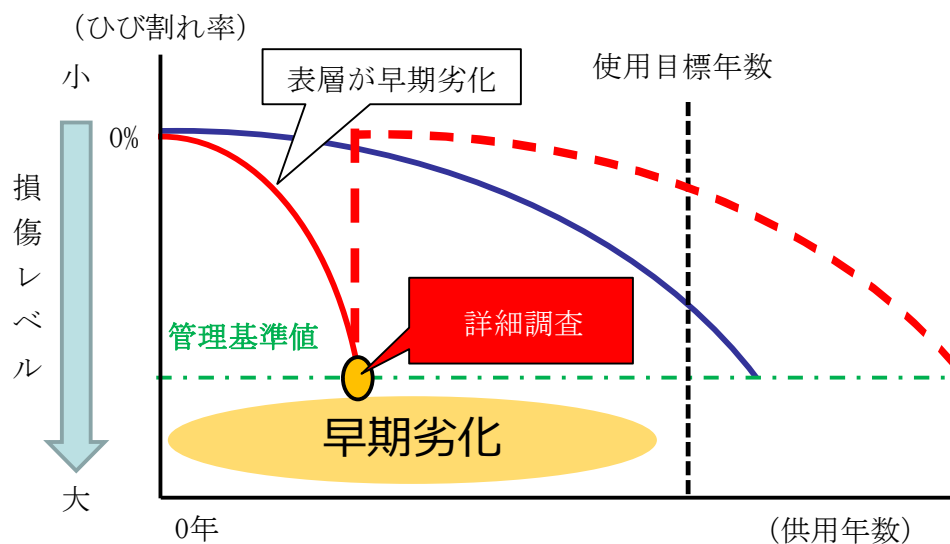


図-1.10 使用目標年数と早期劣化の考え

表-1.1 点検要領における点検結果からの診断区分

区分		状態
I	健全	損傷レベル小：管理基準に照らし、劣化の程度が小さく、舗装表面が健全な状態である
II	表層機能保持段階	損傷レベル中：管理基準に照らし、劣化の程度が中程度である
III	修繕段階	損傷レベル大：管理基準に照らし、それを超過している又は早期の超過が予見される状態
	(Ⅲ－１：表層等修繕)	表層の供用年数が使用目標年数を超える場合（路盤以下の層が健全であると想定される場合）
	(Ⅲ－２：路盤打換等)	表層の供用年数が使用目標年数未満である場合（路盤以下の層が損傷していると想定される場合）

1.2.2 点検項目

点検では、点検項目であるひび割れ、わだち掘れおよび *IRI* (International Roughness Index) の 3 要素を測定し、その結果と道路管理者が管理する道路によって設定した管理基準とを照らし健全性を診断する。なお、要領は舗装の修繕の効率的な実施を目的とした点検に関して定められたものであり、巡視の中で対応するような突発的なポットホールへの対応(補修材による穴埋め)等の応急措置は要領では対象外とされているが、巡視時に合わせて得られる路面の情報により実施する点検・診断・措置は対象となる。

ひび割れは図-1.11 に示すとおり、材料の劣化や舗装の疲労破壊によって舗装に発生する亀裂のことであり、点検項目にあるひび割れとは舗装表面に生じた亀裂のことである。ひび割れは、アスファルト舗装の場合はひび割れ率(%)として評価される。

わだち掘れは図-1.12 に示すとおり、車輪が通過する位置において縦方向に生じる連続的な凹みのことであり、(a)路床・路盤の圧縮変形、(b)アスファルト混合物の塑性変形や(c)アスファルト混合物の摩耗によって生じる。わだち掘れは、わだち掘れ量(mm)として評価される。

IRI は 1989 年に世界銀行が提案した路面のラフネス指標であり、道路の進行方向に発生する縦断凹凸を評価するものである。*IRI* は、2 軸 4 輪の車両の 1 輪だけを取り出した仮想車両モデル(クォーターカー)を一定の速度で走行した時に車が受ける上下方向の運動変位の累積と走行距離の比であり、*IRI*(mm/m または m/km)として評価される。

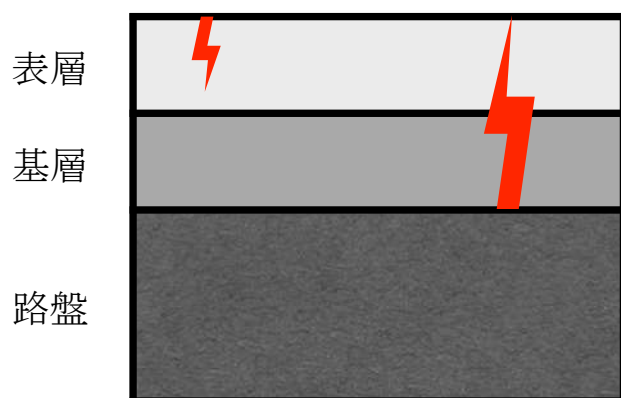


図-1.11 ひび割れのイメージ

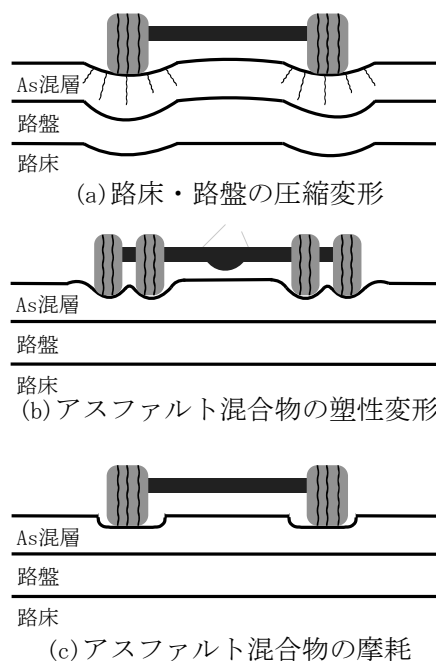


図-1.12 わだち掘れのイメージ

図ってきており，1989 年以降は測定装置を搭載した車両の精度検証のために年 1 回，一般財団法人土木研究センターにおいて表-1.2 に示す認定範囲のもと性能確認試験¹⁷⁾を受け精度を担保している．しかし，路面性状測定車を用いた路面性状測定は，測定精度が高く路面の性状を詳細に把握可能でより多くの情報を取得可能^{18)・19)}なものの，費用が高く高頻度では測定できない．最近では，ICT 技術の普及に伴い，画像を用い路面を評価する方法などが試みられている^{20)・21)}．この方法の特徴は路面性状測定車よりも比較的簡易に測定可能であり，様々な画像解析技術を用いることで迅速な解析が化可能であるものの，画像では路面の凹凸量の測定が難しいというデメリットもある．そのため，スマートフォン等によって路面の凹凸量を簡易に測定する方法が試行されている^{22)・24)}．これはスマートフォンの加速度センサーを用いて車両の振動から平坦性を評価するものである．スマートフォンの時計機能や GPS 機能を用いることで時間，位置情報も同時に取得することが可能であり，非常に簡易に路面の凹凸量が測定できる．以上のように，機器を用いた手法では，大量のデータの取得や高精度な路面の性状の把握が可能である一方で，路面性状測定車のような専用車両を用いると点検費用が高額になる傾向にあり予算の確保が課題である．



写真-1.3 路面性状測定車によるひび割れ測定例

表-1.2 路面性状自動測定装置性能確認試験の合格範囲例

評価項目	認定範囲
距離測定性能	光学測量機による距離の測定値に対し， $\pm 0.3\%$ 以内の精度であること
ひび割れ測定性能	幅 1mm 以上のひび割れが識別可能な精度であること
わだち掘れ測定性能	横断プロファイルメータによるわだち掘れ深さ（わだち掘れ量）の測定値に対し， $\pm 3\text{mm}$ 以内の精度であること
平坦性測定性能	縦断プロファイルメータ（3m プロファイルメータ）による標準偏差の測定値に対し， $\pm 30\%$ 以内の精度であること

一方、目視調査では、目視観察やスケール等の簡易な器具を用いて路面の破損状況を把握し、交通量や気象状況などの他の情報等も参考に破損の発生原因を推定（特定）する。目視調査の調査結果は技術者の経験等も加味され、破損程度の評価資料や構造調査の必要性の判断資料となる。目視による点検手法は、一般的^{25)・26)}には巡回パトロール時等における車上からの目視調査手法と写真-1.4 に示すような徒歩による目視調査手法がある。目視による調査結果は調査表等で整理、記録し、必要に応じて観察図や写真を添付し、さらに、交通量や気象条件、沿道環境、維持修繕履歴などの供用条件も記録しておくことが望ましい。道路管理者が管理する道路においては、ある一定頻度で日常巡回が実施されており、日常巡回の機会を通じて舗装表面の状態を目視で確認することが可能である。前述した路面性状測定車による点検では高価になるため、予算規模の小さい市町村等において点検要領に則った点検を実施しメンテナンスサイクルを構築するためには、コストを低く抑えられる目視点検が有力な手法である²⁷⁾。しかし、巡回時の目視による手法では路面性状測定車のような機器を用いる場合より安価であるものの、舗装の点検評価を適切に行うための専門的知識を有する人材が十分であるとは言い難い。



写真-1.4 徒歩による目視調査例

1.3 診断の概要

1.3.1 診断の位置付け

舗装の長寿命化には早期劣化の再発防止の観点から適切な診断が必要であり，そのためには早期劣化区間において詳細調査を実施することが望ましい．舗装の詳細調査²⁸⁾には，FWD（Falling Weight Deflectometer）を用いた非破壊手法や，劣化箇所においてコアの採取や開削をするという部分的な破壊手法があり，詳細調査を実施することで，舗装内部の支持力や損傷状態を把握することが可能である

1.3.2 詳細調査方法（コア採取方法）

コア採取方法は，写真-1.5 に示すような専用のコアカッターを用いて直径 5～15cm で路面から舗装を削孔し，写真-1.6 に示すようなコアを採取するものである．コア採取には，削孔時に水を使用しない乾式と使用する湿式の 2 方法があり，一般的には削孔時に発生する粉塵や削孔機の消耗等を考慮し湿式で行うことが多いが，現場条件等によって削孔の大きさや方法を使い分けることが好ましい．乾式および湿式の特徴を表-1.3 に示す．

ひび割れ部におけるコア採取では，図-1.13 に示すように，ひび割れ部のみだけでなくひび割れの端部やひび割れの先の部分からコアを採取し観察することによって，表-1.4 に示すように，ひび割れが表面から発生しているのか，それとも下面から発生しているのかが分かることが多い．舗装の厚さ，ひび割れ深さ，アスファルト舗装の層間の剥離の有無等が確認可能なほか，必要に応じて採取したコアを用いてアスファルトを抽出しアスファルト量や骨材の粒度等も確認可能である．



写真-1.5 削孔機によるコア採取状況



写真-1.6 採取したコアの状況例

わだち掘れ箇所においては、コアの各層の厚さを測ることによって、変形が表層のみか、あるいは基層まで及んでいるのかといったアスファルト混合物層のわだち掘れの影響範囲が分かる場合が多い。

表-1.3 コア採取方法（乾式と湿式）の特徴

乾式	メリット	水が使用できない場所においても利用可能
		周辺への水漏れの心配がない
		層間の滞水状況が確認可能
	デメリット	粉塵対策が必要
		摩擦熱で削孔機のドリルの消耗が激しい
湿式	メリット	粉塵の発生を抑制可能
		削孔機のドリルが長持ちする
	デメリット	汚水（切断水）の処理が必要
		層間の滞水状況が確認困難

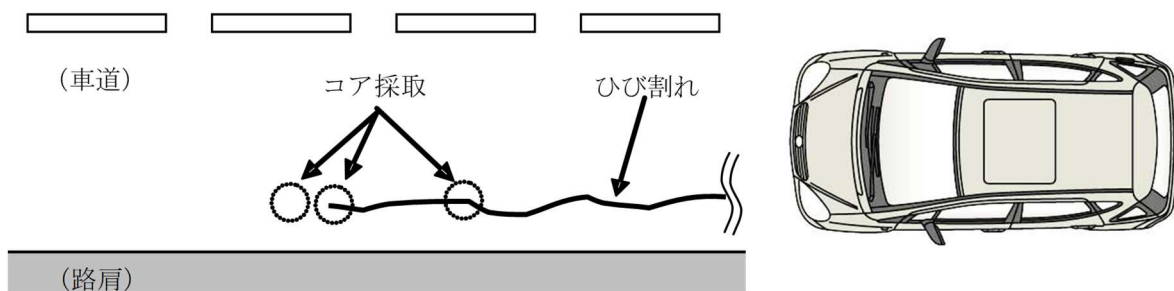
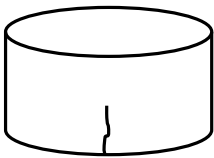
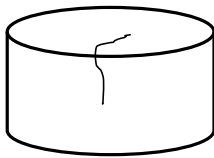
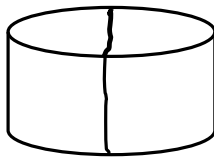


図-1.13 コア採取箇所の事例

表-1.4 採取コアによるひび割れの状況

コアの 状態			
	下面からひび割れ が発生	上面からひび割れが 発生	ひび割れがアスファ ルト混合物層を貫通
劣化 要因	疲労ひび割れ	劣化， わだち割れ等	疲労ひび割れ， 劣化，わだち割れ等

1.3.3 詳細調査方法（FWD によるたわみ量調査方法）

FWD とは、図-1.14 に示すように重錘を載荷板に落下させることにより舗装表面に衝撃荷重を作用させ、その際に舗装表面に発生するたわみを測定する機械の一般名称であり、主に舗装の支持力を測定・評価する目的で使用されている。調査はコンピュータ制御により行われ、たわみは載荷板中心からある間隔に設置されているたわみセンサーにより測定し、たわみ波形のピーク値を記録する。FWD の外観を写真-1.7 に示す。

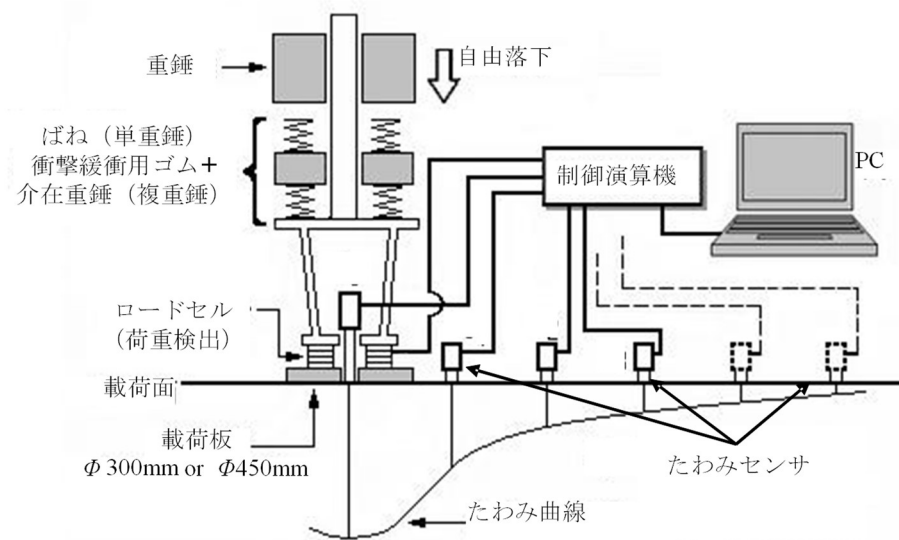


図-1.14 FWD の基本構造



写真-1.7 FWD の外観

従来、舗装の支持力を測定する試験には、写真-1.8 に示すベンケルマンビーム、平板載荷試験、現場 CBR 試験等があり、今なお現場で使われているがこれらの試験は専用の試験機を必要とし、かつ手間と時間を要するものである。これらの試験の代替として我が国においても 1960 年頃から支持力の非破壊試験に関する研究が始まり、1956 年には I-値（重錘重量 11.9kg、平板直径 180mm、落下高さ 300mm の条件で自由落下させた時の載荷点の最大変位量）による評価手法が提案されている²⁹⁾。その後、世界的に開発が進められ、最初の FWD はデンマークの研究所において開発された。我が国においては 1980 年代に港湾技術研究所や北海道工業大学（北海道科学大学の前身）に導入され FWD の研究が始まり^{30)・32)}、たわみ量を取得するセンサーの位置の検討等^{33)・34)}が進められた。そして、徐々にその利点が評価され運用マニュアル^{35)・38)}が整備されるようになり、現在では非破壊で舗装の支持力を測定する試験機として、舗装の長期供用性の評価^{39)・43)}や更なる研究^{44)・45)}等に用いられている。現在は、表-1.5 に示すように車載型とけん引型が、道路、空港、ヤード等のアスファルト舗装やコンクリート舗装において用いられている。



写真-1.8 左：ベンケルマンビーム，右：平板載荷試験，下：現場 CBR 試験

表-1.5 FWD のタイプ

タイプ	車載型	けん引型
主な用途	道路，他	空港
載荷板直径	300mm	450mm
主に使用する衝撃荷重	49kN,98kN	200kN

アスファルト混合物は温度により強度特性が異なるため、FWD によるたわみ測定で得られたたわみは、FWD 測定時の路面に作用させる載荷荷重のバラつきや舗装体の温度により測定値に違いが生じる。よって、これらの影響を排除するためには、測定値の標準化を行う必要があるため、標準条件（49kN, 20℃）で測定した値に測定値を補正する⁴⁶⁾。荷重補正の式を式-1.1 に、温度補正の式を式-1.2～式-1.5 に示す。

$$D' = D \times \frac{49}{L}$$

ここで、

(式-1.1)

D' ：荷重補正後のたわみ量(μm)

D ：測定たわみ量(μm)

L ：測定荷重(kN)

$$D'' = CF \times D' \quad (\text{式-1.2})$$

$$\log CF_0 = (-4.914 \times 10^{-5} \times H_{as} + 2 \times 10^{-4}) \times (T - 20) \quad (\text{式-1.3})$$

$$\log CF_{200} = (-4.829 \times 10^{-5} \times H_{as} + 2 \times 10^{-4}) \times (T - 20) \quad (\text{式-1.4})$$

ここで、

D'' ：温度補正後のたわみ量(μm)

CF_0 ： D_0 の温度補正係数

CF_{200} ： D_{200} の温度補正係数

H_{as} ：アスファルト混合物層の厚さ(mm)

T ：測定時におけるアスファルト混合物層の平均温度(℃)

$$T_{(s,t)} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + e \quad (\text{式-1.5})$$

ここで、

$T_{(s,t)}$ ：測定時の季節区分 s ，測定時刻 t における平均温度(℃)

s ：測定時の季節区分(春：5～7月,夏：8～10月,秋：11～1月,冬：2～4月)

※解析上の季節区分であり，一般的な季節区分の概念とは必ずしも一致しない。

t ：測定時刻(0～23時)

X_1 ：測定時刻 t における路面温度(℃)

X_2 ：測定時刻 t における気温(℃)

X_3 ：測定時刻 t における気温と 1 時間前の気温の差(℃)

X_4 ：アスファルト混合物層の厚さ(mm)

a, b, c, d, e ：回帰係数

FWD は路面に衝撃荷重を作用させた際に生じる舗装表面のたわみ量を測定するため、舗装表面に作用した衝撃荷重は荷重を受けた位置から舗装の深さ方向に伝達され、このときの荷重は図-1.15 に示すように舗装内部を円錐状に分散しながら伝わっていくと考えられている⁴⁶⁾。荷重が作用すると載荷荷重の影響範囲内にある層は、荷重の作用により上層から下層へ荷重が伝達される。荷重および温度の補正をしたたわみを用いて評価が可能なたわみ指標を表-1.6 に示す。

載荷板中心のたわみ量 (D_0) は舗装の全ての層が載荷荷重の影響範囲内にあることから、全ての層の垂直方向の変形量の合計を示していることになる。逆に、載荷板中心から 1500mm のたわみ量 (D_{1500}) に関係している層は、載荷荷重の影響範囲内にある路床のみである。以上より、載荷板中心のたわみ量 (D_0) は路床を含めた舗装全体の支持力を反映したものであり、載荷板中心から 1500mm のたわみ量 (D_{1500}) は路床の支持力を反映しているものである。さらに、載荷板中心のたわみ量 (D_0) と載荷板中心から 1500mm のたわみ量 (D_{1500}) の差によって、現状の残存等値換算厚 T_{A0} を求めることができる。そのため、新設時の T_A から T_{A0} を引くことによって不足 T_A を推定できる⁴⁶⁾。現状の残存等値換算厚 T_{A0} を求める式を式-1.6 に示す。また、前述したとおり、載荷板中心から 1500mm のたわみ量 (D_{1500}) に関係している層は、載荷荷重の影響範囲内にある路床のみであるため、路床の CBR を推定することができる。路床の推定 CBR を求める式を式-1.7 に示す。加えて、載荷板中心のたわみ量 (D_0) と載荷板中心から 1500mm のたわみ量 (D_{1500}) の差と同様の考え方から、アスファルト舗装の上部、

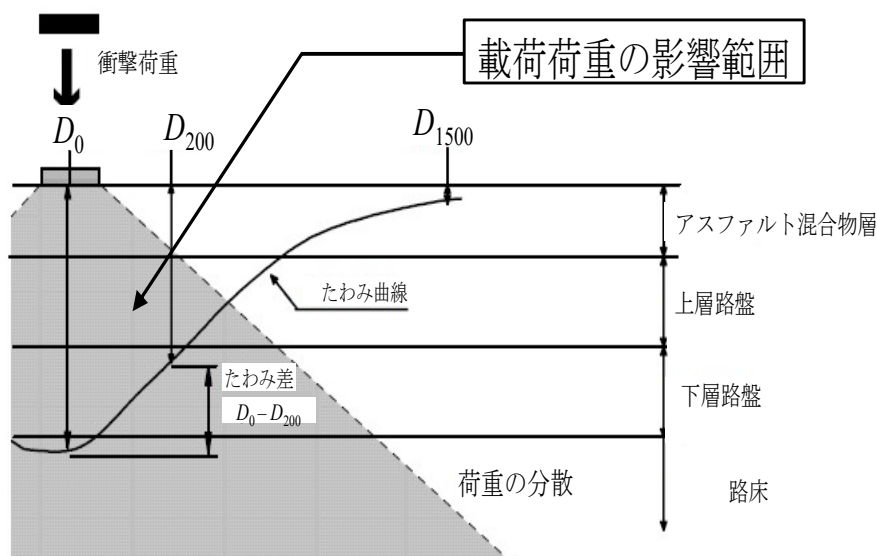


図-1.15 載荷荷重の分散とたわみ曲線の関係

表-1.6 たわみ指標の評価

評価	たわみセンサー	評価内容
たわみ指標	D_0	舗装全体の支持力評価
	$D_0 - D_{1500}$	残存等値換算厚の推定
	D_{1500}	路床の支持力評価
	$D_0 - D_{200}$	アスファルト混合物層の弾性係数の推定

つまり，アスファルト混合物層の強度を推定することができる．載荷板中心のたわみ量（ D_0 ）と載荷板中心から 200mm のたわみ量（ D_{200} ）の差とアスファルト混合物層の弾性係数とは直接的には相関は見られないものの，アスファルト混合物層の弾性係数 E と層厚との間には相関があることが知られており⁴⁶⁾，式-1.8 によってアスファルト混合物層の弾性係数を求めることができる．

$$T_{A0} = -25.8 \log \left(\frac{D_0 - D_{1500}}{10^3} \right) + 11.1 \quad (\text{式-1.6})$$

ここで，

T_{A0} ：残存等値換算厚（cm）

D_0 ：載荷板中心のたわみ量（ μm ）

D_{1500} ：載荷板中心から 1500mm のたわみ（ μm ）

$$CBR = 1,000 / D_{1500} \quad (\text{式-1.7})$$

ここで，

CBR ：現状の路床の推定 CBR （%）

D_{1500} ：載荷板中心から 1500mm のたわみ（ μm ）

$$E = 2,352 \left(\frac{D_0 - D_{200}}{10^3} \right)^{-1.25} / h_1 \quad (\text{式-1.8})$$

ここで，

E ：アスファルト混合物層の弾性係数（MPa）

D_0 ：載荷板中心のたわみ（ μm ）

D_{200} ：載荷板中心から 200mm のたわみ（ μm ）

h_1 ：アスファルト混合物層の厚さ（cm）

以上のように FWD は路面に作用させた荷重から得られるたわみによって，非破壊で舗装内部を詳細に調査することが可能であることから，舗装の構造評価に用いられている．その一方で，FWD の較正について，荷重計や変位計の較正は製造者で行われているものの，それらを組み込んだ FWD 装置としての較正についてはなされていなかった．そこで，2005 年に国立研究開発法人土木研究所によって，写真-1.9 に示す較正・検定施設がつくられ，2010 年よりその運用がなされている⁴⁷⁾．較正・検定施設では，荷重較正用の舗装が中央部にあり，それを挟んで変位計較正用の舗装が在る．荷重計の較正では，荷重計較正用舗装上のロードセルの上に FWD の荷重を載荷し，ロードセルと FWD の荷重計の測定値を比較する．変位計の較正では，変位計較正用舗装内に設けられた PC 鋼棒を不動点とし，そこに取り付けたギャップセンサーと FWD の変位計の測定値を比較する．このように装置としての較正・検定が行われていることで，FWD は非破壊でありながら一定の精度を有した詳細調査であるといえる．

FWD の長所として，測定が非破壊でありかつ容易で再現性が高いこと，多くのたわみを短時間で測定できたわみ形状を記憶できること等が挙げられる．しかし，その一方で，前述した従来の舗装の支持力を測定する試験同様に専用の試験機が必要であり，また，調査を行う区間においては規制を設置する必要があることから，試験に要する費用や規制設置に伴う社会的影響が課題である．

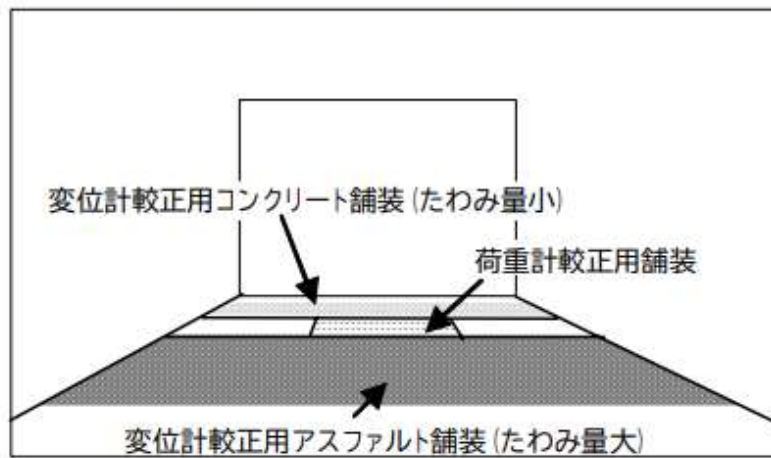


写真-1.9 施設の内部

1.3.4 詳細調査方法（開削調査方法）

開削調査方法は、写真-1.10 に示すように開削を行う箇所に事前にマーキングを施し、写真-1.11 に示すような舗装切断機を用いて舗装を切断し、写真-1.12 に示すように人力または重機によって舗装を取り除き、路盤面を露出させる。その後、必要に応じて路盤面で調査を実施し路盤層を重機で取り除き路床面を露出させ路床面において調査を行う。開削調査は、路面から下方向に開削していくため非常に大掛かりな調査であるが、各層の厚さや劣化状況の確認だけでなく、採取した試料による室内試験、各層にお



写真-1.10 開削調査前のマーキング例

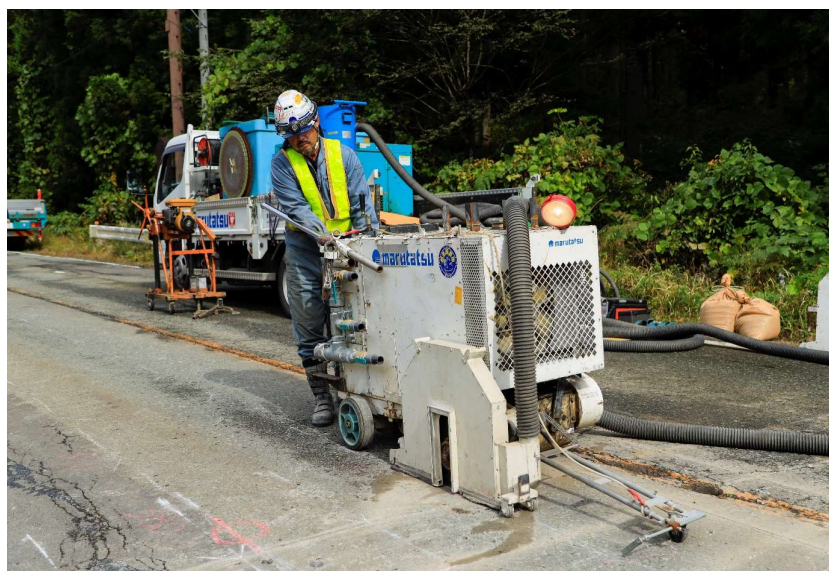


写真-1.11 舗装切断機による舗装切断

ける支持力調査等，多くの試験が実施できることから，早期劣化の要因を特定できる可能性が高い⁴⁸⁾。また，路盤や路床だけでなく，**写真-1.13**に示すように取り除いた舗装の下面も観察できるため，より確度の高い修繕設計や措置工法の選定が可能になる。



写真-1.12 舗装版の吊り上げ状況



写真-1.13 取り除いた舗装の下面の状況

1.3.5 診断の課題

適切な診断を行うためには舗装の支持力を確認することが重要であり、かつ、ひび割れの深さやひび割れ等からの浸水状況、路盤以深の状態等の確認が可能な開削調査が詳細調査方法の中で最も望ましいが、開削調査には時間や費用を要することや点での限定的な評価となることから、舗装構成や損傷形態が一樣でない場合は効率が良いとは言えない。そのため、FWD およびコア採取も現実的な詳細調査方法であると言えるが、やはり支持力の確認には FWD 測定車等が必要になり、さらには規制を要することから渋滞による社会的影響も大きい。加えて、破壊手法においては客観的な数値指標が存在しないため、技術者の経験的判断に頼らざるを得ないという問題がある。近年、規制を要しない支持力の測定方法として移動式たわみ測定装置を用いた手法⁴⁹⁾も検討されているものの、実用化に至っていない。

舗装が全国に膨大なストックを抱えている現状を考えると、効率的にメンテナンスサイクルを構築しそれを回し続け、早期劣化の再発を防止し長寿命化に取り組むためには、適切な診断が重要である。よって、主な詳細調査方法以外に、診断にかかる予算や社会的影響を極力抑えつつ、舗装の支持力を効率的に確認する技術が求められている。

さらに、詳細調査の結果から適切に診断を行うためには専門的な知識や経験が必要であり、建設業就業者数の減少や高齢化が深刻化している現状を踏まえると、適切な診断が可能な若手技術者を育成・普及させることも重要である。

1.4 研究の目的

現在の厳しい財政状況下において、過去に整備された膨大な社会資本を維持し続けるためには、建設業やその中にある舗装分野において、効率的な維持管理方法による長寿命化が重要である。それに加え、我が国の人口減少や建設業および舗装分野における高齢化と若年入職者の減少による人材不足を勘案すると、併せて維持管理を担う若手技術者の育成が極めて重要である。効率的な維持管理のためには、点検→診断→措置→記録のメンテナンスサイクルの構築が求められており、その中でも適切な診断を行うことは早期劣化の再発防止の観点からも重要である。

そのため、著者は、図-1.16に示すように、適切な診断には、診断に必要な詳細調査の効率化等の技術力をより高める必要があり、加えて、診断に必要な専門的な知識や経験を有した技術者が増えることで、『舗装に携わる技術者が舗装の損傷を調査し、その状態を踏まえ損傷の要因を総合的に特定する力（以下、舗装診断力）』が向上し、それによってより適切な診断や措置が可能となり、延いては長寿命化につながると考えた。

そこで、本研究では、舗装診断力を向上させることを目的に、診断の効率化による技術力の高度化を検討しつつ、併せて技術の伝承・普及も検討した。

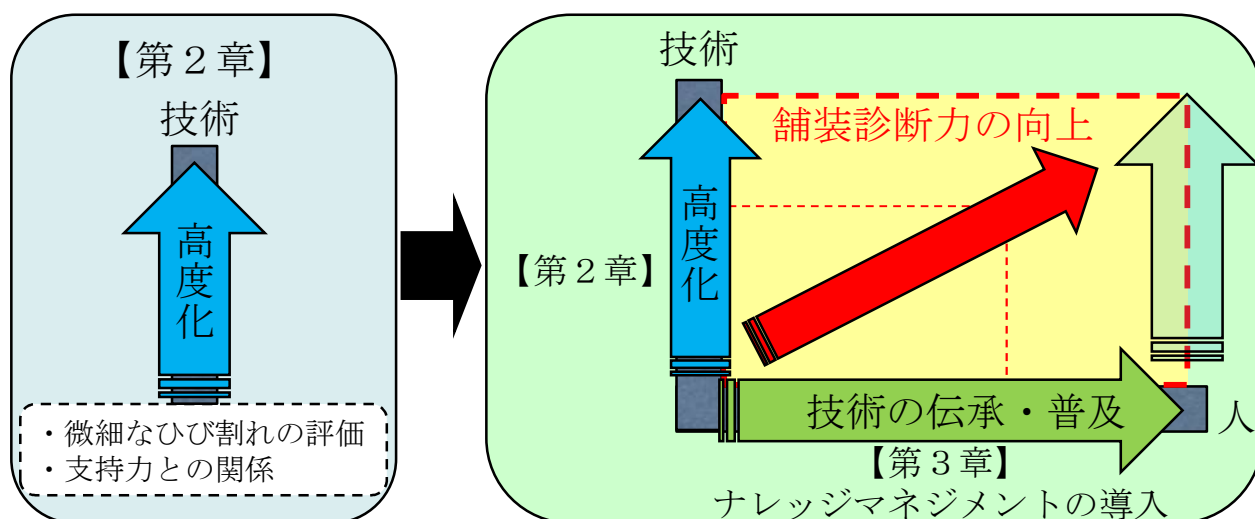


図-1.16 研究の目的

1.5 研究の構成

本研究の構成を図-1.17 に示す。

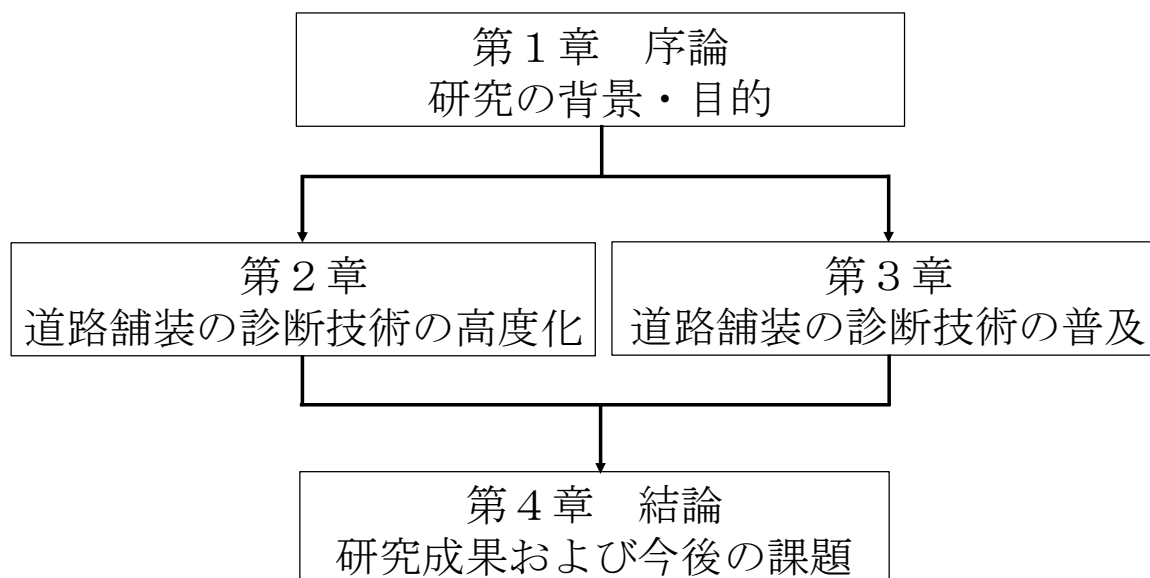


図-1.17 本研究の構成

1.5.1 序論（第1章）

第1章では、本研究の背景について述べ、本研究の着眼点とした舗装の診断技術に関する既往の研究を概観して、現状における課題について整理した。それらを踏まえて、本研究の目的を述べるとともに本研究の位置付けを明確化した。効率性や精度を向上させ診断に関する技術を高度化させるだけでなく、併せて、診断に関する専門的な知識や経験を有する技術者を普及させることが、診断技術の向上や、早期劣化の再発防止につながり、延いては長寿命化に繋がるため、重要である。

1.5.2 道路舗装の診断技術の高度化（第2章）

第2章では、診断に関する技術力の高度化として、診断の効率化を目的に舗装のひび割れと支持力との関係を検討した。舗装路面のひび割れから雨水が浸透することにより、路床・路盤が脆弱化し早期劣化につながるため、ひび割れを適切に評価することは極めて重要である。しかし、アスファルト舗装のひび割れ評価指標であるひび割れ率は、幅1mm以上のひび割れを含むメッシュの割合を表しており、幅1mm未満は評価されていない。また、同一メッシュ内に2本以上ひび割れが存在した場合は、その数が増えようとも同一の評価となってしまう。そこで、高分解能ラインレーザによって幅1mm未満の微細なひび割れも取得し、それらをひび割れ幅に応じて分類し、ひび割れ特徴量（交点・分岐数・延長・面積）を求め、ひび割れ率との関係、特徴量同士の関係および支持力との関係を明らかにした。さらに、特徴量の中でも、ひび割れの総延長と舗装の支持力には強い相関があることが分かった。加えて、微細なひび割れの抽出精度の向上についても明らかにした。

1.5.3 道路舗装の診断技術の普及（第3章）

第3章では、診断に関する技術の伝承・普及として、舗装の早期劣化区間にて行った詳細調査において、ナレッジマネジメント（SECIモデル）を取り入れた育成プログラムを計画・実行した。プログラム実行後のアンケート調査から、若手技術者は熟練技術者と共に詳細調査を行うことで暗黙知を獲得し（共同化）、各種調査結果の分析・考察を通してそれを形式知に変換し（表出化）、報告書を作成することで新しい形式知を得る（連結化）という過程を経ることで、プログラムに参加した若手技術者だけでなく、その若手技術者が所属する組織の若手技術者の育成にとっても有効であることを明らかにした。さらに、北海道の中小規模の舗装会社を対象に若手技術者の育成と育成方法に関するアンケート調査を実施し、本プログラムに対するニーズを明らかにした。

1.5.4 結論（第4章）

第4章では、結論として本研究で得られた知見を総括し、今後の課題と展開についてまとめて結論とした。

本研究では、次の成果が得られた。

- ① 診断技術の高度化として、ひび割れ特微量に着目したところ、微細なひび割れを含むひび割れ率とひび割れ特微量（交点、分岐数、総延長、総面積）との間にはほとんど相関は見られなかったものの、ひび割れ特微量同士の関係では、ひび割れ総延長と交点数、分岐数、ひび割れ総面積の間に強い相関が見られた。
- ② 微細なひび割れを含むひび割れ率と支持力の間には相関は見られなかったが、ひび割れ総延長と支持力には強い相関が見られた。そのため、ひび割れ評価指標としては、従来のひび割れ率ではなくひび割れ延長を用いることが望ましい。また、ひび割れ総延長を算出する対象のひび割れの幅を1mm以上とすると相関が低くなったことから、幅1mm未満の微細なひび割れを対象とすることで、より適切に舗装の支持力を評価できることを示唆していると考えられる。
- ③ 若手技術者育成プログラム終了後に行ったアンケート調査から、ステップ1～3における共同化では暗黙知の獲得が確実に行われ、ステップ1～3の表出化およびステップ4の連結化によって新たな知識（形式知）が得られたことが分かった。また、得られた新しい知識が所属における今後の業務に活かされると感じている若手技術者の割合は90%以上となった。本プログラムはSECIモデルを導入した最初の試みであるため内面化の過程には至っていないが、今後、所属する会社やPDRGにおいて実践することで内面化が行われ、個人と組織の知的財産である新たな暗黙知が生み出されると期待できる。
- ④ 北海道内の舗装会社を対象に、所属する技術者の現状や若手技術者の育成方法に関するアンケート調査を実施した結果、回答した会社の多くが慢性的な技術者不足に直面しており、若手技術者の獲得も目標に達していないことが分かった。また、自社において若手技術者の育成が難しいことから、若手技術者育成のための社外プログラムを求めている会社が多いこと、さらに、現場を活用したプログラムや他社の技術者との交流の場を希望する会社もあったことから、北海道内の舗装会社では本プログラムに対するニーズが十分あることが分かった。

なお、技術力の高度化に関して、今後はより多くのデータを蓄積し、交通量や地域条件、ひび割れの発生要因、経年数等の視点で整理する必要があることや、技術の普及に関して、全国的なニーズも調査を行う必要もあることを今後の課題とした。さらに、高度化した技術を普及させることで、より診断力の向上につながると考えられることを今後の展開とした。

1.6 参考文献

- 1) 国土交通省：「国土の長期展望」中間とりまとめ，2011年2月
<https://www.mlit.go.jp/common/000135837.pdf>
- 2) 国土交通省：令和2年度版国土交通白書，p114，2020年
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
- 3) 総務省統計局，労働力調査，2019年．
- 4) 渡邊一弘，久保和幸：舗装の特性を考慮したマネジメント，No.56-4,pp18-21，2014年．
- 5) 公益社団法人日本道路協会：舗装委員会における今後の取り組み－新時代の舗装技術に挑戦する－，p2-20，2020年11月
http://www.road.or.jp/technique/pdf/road_201124_2.pdf
- 6) 国土交通省：社会資本メンテナンス戦略小委員会緊急提言（案），第4回社会資本メンテナンス戦略小委員会，資料3，p2，2013年1月25日
<https://www.mlit.go.jp/common/000986045.pdf>
- 7) 土構造物および基礎委員会 舗装機能評価に関する研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来,土木学会論文集,No.472/V-20,pp.13-28,1993年．
- 8) 社会資本整備審議会 道路分科会 道路メンテナンス技術小委員会：道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて，p2-4，2013年6月．
- 9) 秋葉正一：舗装の点検要領とマネジメント，舗装，Vol.52,No.1,pp.3-4,2017年．
- 10) 国土交通省 道路局：舗装点検要領，2016年10月．
- 11) 武藤聡，久保和幸，藪雅行：舗装点検要領の策定について，舗装，Vol. 52, No. 1, pp. 11-15, 2017年．
- 12) 国土交通省 道路局：道路メンテナンス年報，p51-54，2021年8月．
- 13) 公益社団法人日本道路協会：舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針，2018年9月．
- 14) 岡田貢一：路面性状測定の実況,舗装,51-2,2016年．
- 15) 富田昭：路面凹凸計測の自動化，土木技術資料，第14巻，第3号，pp.20～23，1972年．
- 16) 建設省：路面性状自動測定装置の開発評価書，1985年8月．
- 17) 倉持智明，寺田剛：路面性状自動測定装置の性能確認試験の変遷と現状，土木技術資料，No.63-7，pp60-63，2021年．
- 18) 森石一志，中村博康，渡邊一弘：三次元点群データを用いた新たな路面評価手法の検討，土木学会論文集 E1, Vol.69,No.3, I_9-I_16, 2013年．
- 19) 森石一志，中村博康，渡邊一弘：実路における三次元点群データを用いた路面評価手法の実用性の検討，土木学会論文集 E1, Vol.70, No.3, I_33-I_40, 2014年．
- 20) 全邦釘，井後敦史，南免羅裕治，黒木航汰，大窪和明：車載カメラにより撮影された舗装画像からのディープラーニングによるひび割れ率評価,土木学会論文集 E1, Vol.73,No.3, I_97-I_105, 2017年．
- 21) 米川陽子,熊倉信行,山崎恭彦：路面画像を用いたわだち掘れ判定機能の開発,土木学会第73回年次学術講演会,V-665, 2018年．
- 22) 佐々木博：スマートフォンを活用した道路舗装維持管理業務の効率化，土木学会第73回年次学術講演会,V-655, 2018年．
- 23) 中牟田慎一郎,佐藤研一,藤川拓朗,古賀千佳嗣,北原文章：スマートフォンを用いた道路舗装の健全度評価技術の検討，土木学会第72回年次学術講演会,V-069, 2017年．
- 24) 廣瀬安昭,巻幡憲俊,長山智則：スマートフォンを用いた簡易路面評価方法,第32回

日本道路会議,論文番号 3058, 2017 年.

- 25) 公益社団法人日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧(第 1 分冊), 69-75, 2019 年 3 月.
- 26) 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, 27-33, 2013 年 11 月.
- 27) 亀山修一, 金森弘晃, 井上昌幸, 浅田拓海, 川端伸一郎: 舗装路面の目視点検の精度に関する研究, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.3, I_25-I_30, 2015 年.
- 28) 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, 33-36, 2013 年 11 月.
- 29) 浅井新一朗: 衝撃による地盤支持力の測定について, 土木学会誌, Vol.42, No.5, pp.17-22, 1957 年.
- 30) 笠原篤, 五十嵐光徳: 舗装構造解析へのフォーリング・ウェイト・デフレクトメーターの一利用, 土木学会論文集, 第 420 号, V-13, 1990 年 8 月.
- 31) 丸山輝彦, 姫野賢治, 林正則: FWD たわみ測定による舗装の健全度調査, 舗装, 24-9, pp.3-8, 1988 年.
- 32) 吉村啓之: FWD のたわみ指標によるアスファルト舗装の構造評価について, アスファルト合材, pp41-46, 2011 年 4 月.
- 33) 亀山修一, 松井邦人, 笠原篤, 姫野賢治, 丸山輝彦: FWD センサー位置が逆解析弾性係数に及ぼす影響, 第 1 回舗装工学講演会論文集, pp49-56, 1996 年 12 月.
- 34) 亀山修一, 松井邦人, 笠原篤, 姫野賢治, 丸山輝彦: 測定誤差から見た FWD センサーの最適配置に関する検討, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp233-242, 1997 年 5 月.
- 35) 土井内元, 大手一信: FWD 運用マニュアル, 舗装, 32-2, pp4-6, 1997 年.
- 36) 財団法人道路保全技術センター: 活用しよう! FWD, 2005 年 3 月.
- 37) 丸山輝彦, 阿部長門, 雑賀義夫, 姫野賢治: FWD による舗装の構造評価および補修設計システムの開発, 土木学会論文集, No484, V-22, pp61-68, 1994 年 2 月.
- 38) 公益社団法人土木学会: 舗装工学ライブラリー2 FWD および小型 FWD 運用の手引き, 2002 年 12 月 25 日.
- 39) 佐藤弘, 伊藤与一, 阿部長門, 酒井義郎: 北陸地建における FWD の活用事例, 舗装, 32-2, pp14-21, 1997 年.
- 40) 姫野賢治, 弓削富司夫, 石谷雅彦, 亀山修一, 笠原篤: 支持力を考慮に入れた舗装の維持修繕計画の最適化, 第 2 回舗装工学講演会講演論文集, pp17-22, 1997 年 12 月.
- 41) 阿部勝義, 神谷恵三, 佐藤正和: 高速道路舗装の構造的損傷に関する一考察, 土木学会舗装工学論文集, 第 9 巻, 177-183, 2004 年 12 月.
- 42) 久保田勉, 久保和幸, 野田悦郎: 一般国道 4 号黒磯バイパスにおけるコンクリート舗装の 25 年の供用性 (特集コンクリート舗装の実績と展望), 舗装, pp21-28, 2006 年 6 月.
- 43) 川村和将, 亀山修一, 板倉雄弘, 城本政一: 東名高速道路における舗装の長期供用性に関する考察, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.74, No3, I_37-I_45, 2018 年.
- 44) 川名太, 中村博康, 高橋茂樹, 竹内康, 松井邦人: 接地圧分布を考慮した動的逆解析の適用性に関する検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol71, No3, I_145-I_152, 2015 年.
- 45) 若林由弥, 川名太, 渡邊一弘: アスファルト舗装の層間はく離が内部応力やたわみに及ぼす力学的影響に関する検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol76, No2, I_115-I_122, 2020 年.
- 46) 阿部長門, 丸山輝彦, 姫野賢治, 林正則: たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価,

土木学会論文集, No.460/V-18,pp41-48,1993 年 2 月.

47) 坂本康文: FWD(重錘落下式たわみ測定装置)検定施設, 土木技術資料, No.48-7,pp6-7,2006 年.

48) 株式会社高速道路総合技術研究所: 長寿命舗装の作り方,2018 年 5 月.

49) 寺田剛, 川名太, 久保和幸, 竹内康, 松井邦人: 移動式たわみ測定装置を用いた舗装の健全性評価手法に関する一検討, 土木学会論文集 E1,Vol.68,No.3,p. I_13-I_20,2012 年.

第 2 章

道路舗装の診断技術の高度化

第2章 道路舗装の診断技術の高度化

2.1 緒言

2012年12月2日に発生した笹子トンネル天井板落下事故を受け、2013年2月からは、第三者被害防止の観点から安全性を確認するために道路ストックの集中点検¹⁾が実施された。その後、2013年6月には、点検基準の法定化や国による修繕等代行制度の創設を目的とし道路法が改正され、2014年3月には、定期点検に関する省令・告示が公布²⁾された。これらを背景に、2014年7月より、全ての橋梁、トンネル等について、5年に1度、近接目視で点検が行われている。橋梁では、点検項目の一つに床版や橋脚のひび割れ（亀裂）があり、近接目視によって、発生の有無やその状態を基に損傷の程度を評価している³⁾。また、トンネルも、覆工アーチの上部や、坑門の上部等に対して、橋梁と同様の手法で、ひび割れの有無、生じている場合は位置、長さ、幅等を計測することとしている⁴⁾。

道路舗装においても、効率的な管理を通して長寿命化を図ることを目的に、2016年10月、国土交通省道路局により舗装点検要領^{5)・7)}が策定され、それに準じた点検が実施されている。舗装点検要領では、直轄国道のような損傷の進行が早い道路（アスファルト舗装）に対しては表層の使用目標年数を設定すること、それよりも早期に管理目標値を超過した区間は、修繕後に再び早期劣化させないことが重要とされている⁸⁾。また、同要領では、点検は目視又は機器を用いることとされている。機器を用いた点検では、路面画像を撮影するタイプの路面性状測定車⁹⁾が広く用いられている。点検項目である路面のひび割れ、わだち掘れ、IRIの路面性状3要素の内、ひび割れは、通過車輪による繰返し載荷を経て、1本の線状のひび割れから亀甲状のひび割れに進行する。そのため、ひび割れは路面性状3要素の中でも特に、舗装の構造的健全度と密接な関係があると考えられる。また、発生した路面のひび割れから雨水が内部に浸透することにより、ポットホールの発生¹⁰⁾、路床・路盤の脆弱化¹¹⁾をもたらしことから、舗装の長寿命化・LCCの低減にとって路面のひび割れを適切に評価し、措置を行うことは極めて重要である。

現在、アスファルト舗装のひび割れに関する評価指標として広く用いられているひび割れ率には面積法とメッシュ法があり、面積法はひび割れの幅を0.3mとみなしてひび割れ面積を算出する方法であるが、ひび割れの長さを計測する必要がありひび割れの評価に時間を要する¹²⁾。一方、メッシュ法は、路面画像を0.5m四方に分割したメッシュの中に、幅1mm以上のひび割れを含むメッシュの割合より算出している（以下、 C ）。メッシュ法の場合、ひび割れ率 C を容易に求められるという利点があり、この手法が現在も一般的に用いられている。しかし、0.5mメッシュ（面積 0.25m^2 ）内にひび割れが1本のときはひび割れ面積を 0.15m^2 、2本以上のときは 0.25m^2 として評価し、その数がいかに増えようとも同一の評価となり、ひび割れの延長、形状、複雑さなどの情報を利用していない。また、幅1mm未満の微細なひび割れであっても雨水が路面から内部に浸透し、路盤や路床の脆弱化につながる可能性があるにも関わらず、アスファルト舗装の幅1mm未満の微細なひび割れはひび割れ評価の対象にはなっていない。これは、路面性状測定車が開発された1970年代では、カメラの解像度や情報処理技術に限界があったためと考えられる。撮影技術と情報処理技術が当時と比べ遥かに進歩している現在では、路面に発生した微細なひび割れをも詳細に解析することが可能であり、全ら¹³⁾や浅田ら¹⁴⁾は車載カメラによる路面画像を研究対象に用いており、畠山ら

¹⁵⁾や高橋ら¹⁶⁾は専用の機器による高解像度な路面画像を用いている。

第 1 章でも述べたように、ひび割れ部からの雨水の浸入による構造破壊が早期劣化の主要因であり、その防止が路盤以下の層の保護による長寿命化に資することから、ひび割れに着目し、点検時に取得する路面画像からのひび割れの特徴量から支持力を推定し効率的に診断することで、診断に関する技術の高度化になると考えた。さらに、幅 1mm 未満のひび割れでも雨水の浸入経路になり得ると考え、幅 1mm 未満のひび割れも対象とする必要があると考えた。

そこで、高分解能のラインレーザを搭載した計測装置および新たに開発したひび割れ抽出プログラムを用いて、従来の基準である幅 1mm 以上のひび割れに加え、幅 1mm 未満の微細なひび割れを計測した。計測されたひび割れを、幅 1mm 未満（分類 1）、幅 1～ 2mm（分類 2）、幅 2～ 3mm（分類 3）、幅 3～4mm（分類 4）、幅 4～5mm（分類 5）、幅 5mm 以上（分類 6）の 6 つに分類し、ひび割れの特徴量（交点、分岐数、延長、面積）を求め、それらとひび割れ率の関係、および特徴量同士の関係を明らかにした。さらに、同一地点において FWD 試験を実施し、ひび割れ特徴量と舗装の支持力との関係について検討した。

2.2 微細なひび割れの抽出

舗装点検要領の点検項目であるひび割れ，わだち掘れおよび IRI の 3 要素のうち，アスファルト舗装におけるひび割れの従来の評価方法であるメッシュ法¹²⁾を図-2.1に示す．メッシュ法は，人力によるスケッチまたは機器による点検で得られた画像の評価範囲内を，センターライン側レーンマークの内側から路肩側レーンマークの内側まで路面上に 0.5m ごとのます目を想定し，ます目毎にひび割れ状況进行评估する．先ず，幅 1mm 以上のひび割れが 1 本だけあるます目と 2 本以上あるます目に分けてそれぞれのます目を数える．そして，ひび割れが 1 本だけあるます目を 0.15 m²，2 本以上あるます目では 0.25 m²のひび割れが生じているものとし，それらの合計を評価対象区間面積で除してひび割れ率を算出する．

しかし，舗装路面のひび割れから雨水が浸透することにより，路床・路盤が脆弱化するため，ひび割れを適切に評価することは極めて重要であるが，従来の方法ではアスファルト舗装のひび割れ評価指標であるひび割れ率は幅 1mm 未満を評価しておらず幅を考慮していない．また，同一ます目内に 2 本以上ひび割れが存在した場合は，その数が増えようと同一の評価となり複雑さも考慮していない．

そこで本研究では，写真-2.1 に示すようなトンネル壁面のひび割れ調査^{17)・19)}に用いられている高分解能（縦 0.5mm，横 0.25mm）のラインレーザを搭載した車両（以下，試験車両）を用いて，写真-2.2 に示すようにラインレーザカメラを路面に向けて， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れ（以下， MC ）を測ることとした．

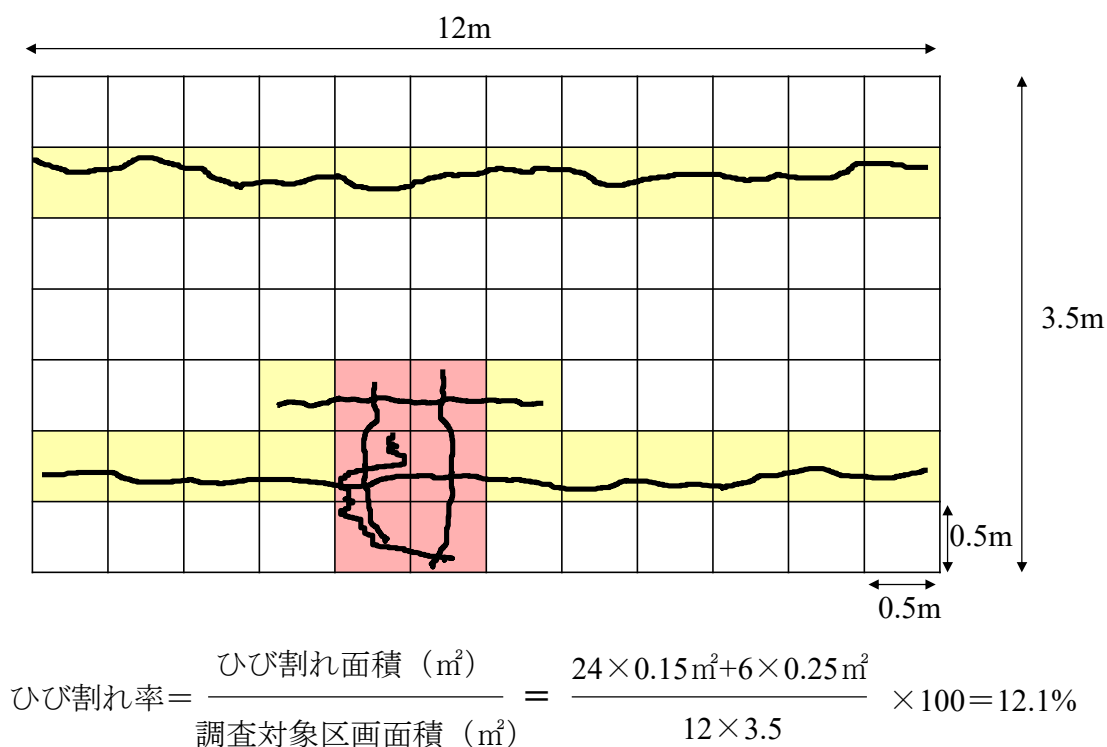


図-2.1 アスファルト舗装におけるひび割れの従来の評価例



写真-2.1 トンネル壁面調査に用いられている測定車両



写真-2.2 試験車両による路面ひび割れ調査

通常, ひび割れはわだち部である外側車輪走行位置(OWP)と内側車輪走行位置(IWP)に発生しやすいが, 試験車両に搭載されたラインレーザカメラでは両方を対象にできないことから, 本研究では OWP を中心に幅 1.638m の路面画像を取得した. 一般的なひび割れ率の評価は 100m 単位であるが評価単位が長くなるほど平均化されてしまうため損傷箇所を特定し難い. また, 舗装点検要領では点検手法が多様なため, その単位は道路管理者に委ねられている. したがって, 調査区間では 100m×1.638m の路面ひび割れ画像が得られることになるが, ひび割れの評価に当たっては, 本研究においてひび割れと構造的健全度との関係をより明確にするために, 図-2.2 に示すように, 路面画像を 10m 毎に 10 分割 (5m 毎に処理した 2 画像を結合) してひび割れ率などのひびわれ評価指標を求め, それらの平均値を用いることとした.

また, 路面に生じるひび割れは舗装の構造的健全度と関係が深いと考え, 写真-2.3 に示す FWD (Falling Weight Deflectometer) 測定を同時期に実施した. FWD は, 重錘を路面に落下させたときに生じる表面たわみを, 載荷板中心を含む複数のセンサで

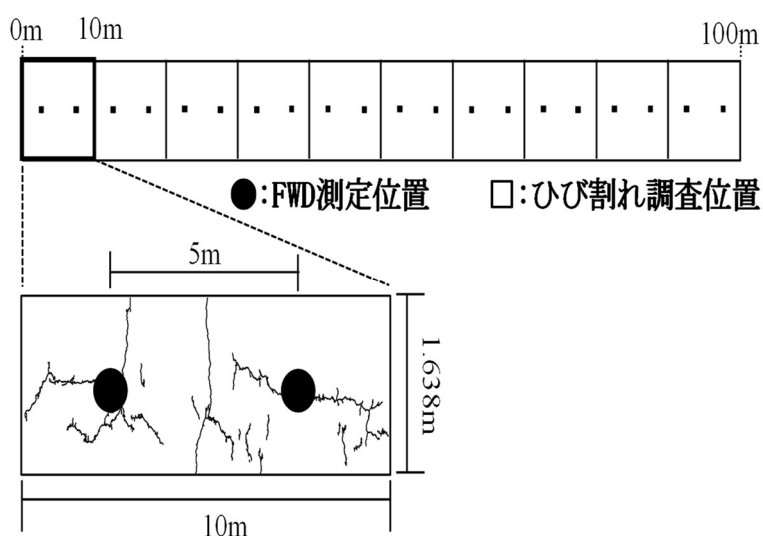


図-2.2 ひび割れ調査および FWD 測定の実施箇所



写真-2.3 調査に用いた FWD

測定する装置である．FWD 測定は，全ての調査区間において，縦断方向に 5m 毎に OWP（横断方向の中心）で実施した（図-2.2）．

試験車両によって撮影された画像からひび割れを抽出するために，CAD 上で稼働する専用ソフト Pavé-CAD を開発した．Pavé-CAD は，SXF 共通ライブラリー Ver.3.20 を使用しているため，SXF Ver3.1 仕様書に準拠した精度を有しており，トレースしたベクトルデータを用いてひび割れの処理を行うシステムである．Pavé-CAD によるひび割れ特徴量の算出過程を図-2.3 に示す．まず，取得された 5m 毎の路面画像（図-2.4）を Pavé-CAD 上に表示させ，CAD の計測コマンドを用いて手動でひび割れ幅を計測する．分岐していないひび割れの場合は両端点の間で，分岐している場合は端点（あるいは分岐点）と分岐点の間でひび割れ幅を計測することとした．次に，計測したひび

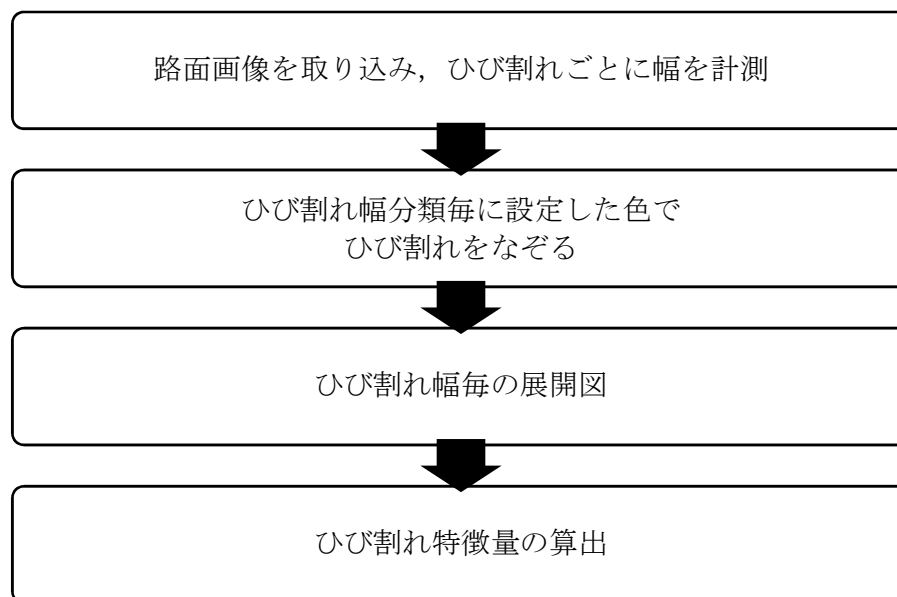


図-2.3 Pavé-CAD によるひび割れ特徴量の算出過程

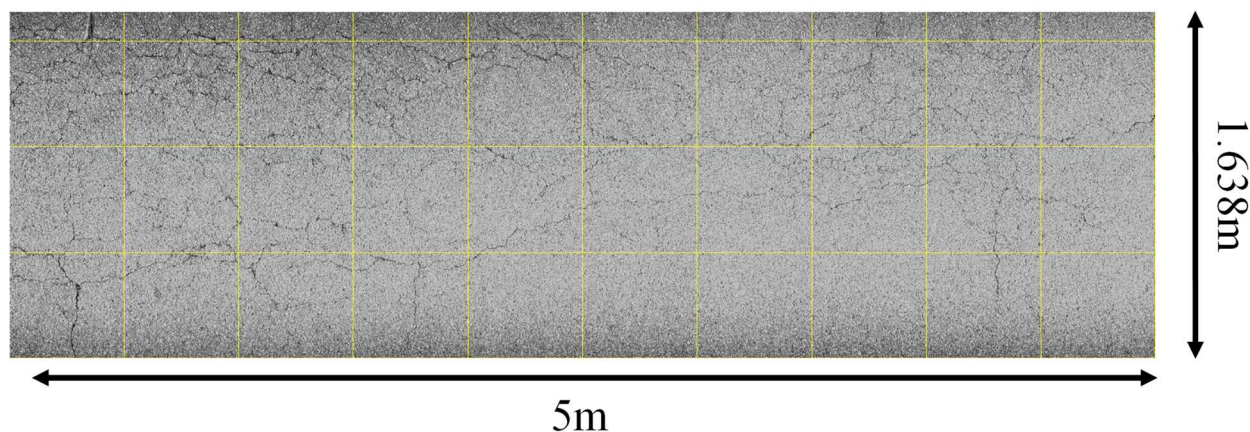


図-2.4 取得路面画像

割れ幅を基に当該ひび割れを表-2.1に示すように分類 1～6 に区分し，CAD のトレース機能を用いて各分類に設定した色でひび割れをなぞる．この操作を画像上の全てのひび割れに対して行うことで，ひび割れ幅の分類毎に階層化された展開図（図-2.5）が作成される．これを基にひび割れ幅分類毎のひび割れ率やひび割れ特徴量を算出することができる．なお，本研究では，分類 1 を $W < 1\text{mm}$ としているが，Pave-CAD によって微細なひび割れをどの程度まで検出可能であるかを前もって明らかにする必要がある．そこで目視によって $W < 1\text{mm}$ のひび割れが多い路面で試行的に $W < 1\text{mm}$ のひび割れを無作為に 75 個抽出したところ， W の最小値は 0.650mm ，平均値は 0.814mm であった．したがって，本手法によって検出できるひび割れの幅は 0.650mm 以上であることが分かった．また，表-2.1 の w_i は各分類の幅の代表値であり，分類 1 の w_i は $W < 1\text{mm}$ の平均値を，分類 2～5 は各分類の範囲の中央値を，分類 6 は 5mm 以上のひび割れの割合は極めて少ないと考え 5.50mm とした．

表-2.1 ひび割れ幅分類

分類 (i)	ひび割れ幅範囲	w_i
1	$W < 1\text{mm}$	0.81mm
2	$1\text{mm} \leq W < 2\text{mm}$	1.50mm
3	$2\text{mm} \leq W < 3\text{mm}$	2.50mm
4	$3\text{mm} \leq W < 4\text{mm}$	3.50mm
5	$4\text{mm} \leq W < 5\text{mm}$	4.50mm
6	$5\text{mm} \leq W$	5.50mm

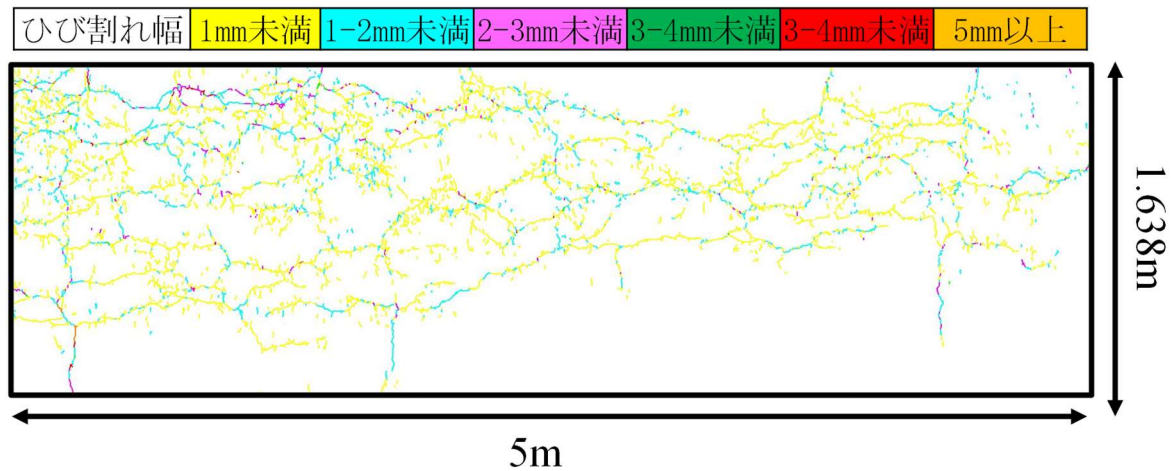


図-2.5 ひび割れ幅分類毎に階層化された展開図

2.3 ひび割れ特徴量の概要

取得したひび割れを評価する特徴量として、検証区間内でのひび割れの発生状況を、単位面積あたりのひび割れ延長の累積から「ひび割れ延長 L 」として整理した(式-2.1)。また、ひび割れが交差する数として、単位面積あたりの「交点数 N 」も整理した(式-2.2)。さらに、1本の線状ひび割れから亀甲状へ進展する際に分岐する単位面積当たりの数を「分岐数 M 」と定義し整理した(式-2.3)。加えて、得られたひび割れ延長 L とひび割れ幅 W によって「ひび割れ面積 S 」を整理した(式-2.4)。例えば、図-2.6に示すように、全ての分類を統合した展開図から交点数(N) (図-2.6の場合、 $N=1$)と分岐数(M) (図-2.6の場合、 $M=2$)を、分類毎(i)の展開図からひび割れ延長(l_i)とひび割れ面(s_i)を求めた(m^2 当たり)。なお、ひび割れ面積(s_i)は、ひび割れ延長(l_i)と表-2.1に示すひび割れ幅の代表値(w_i)の積($s_i = l_i \times w_i$)とした。さらに、得られた分類1~6の10m区間での l_i の合計をひび割れ総延長(L) ($L = \sum l_i$)、 s_i の合計をひび割れ総面積(S) ($S = \sum s_i$)とした。

$$\text{ひび割れ延長 } l_i \text{ (m/m}^2\text{)} = \frac{\text{ひび割れ延長の累積}}{\text{調査区間面積}} \quad (\text{式-2.1})$$

$$\text{交点数 } N \text{ (個/m}^2\text{)} = \frac{\text{ひび割れ交点数}}{\text{調査区間面積}} \quad (\text{式-2.2})$$

$$\text{分岐数 } M \text{ (個/m}^2\text{)} = \frac{\text{ひび割れ延長の又数}}{\text{調査区間面積}} \quad (\text{式-2.3})$$

$$\text{面積 } S_i \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = \frac{\text{ひび割れ延長} L \times \text{ひび割れ幅 } W}{\text{調査区間面積}} \quad (\text{式-2.4})$$

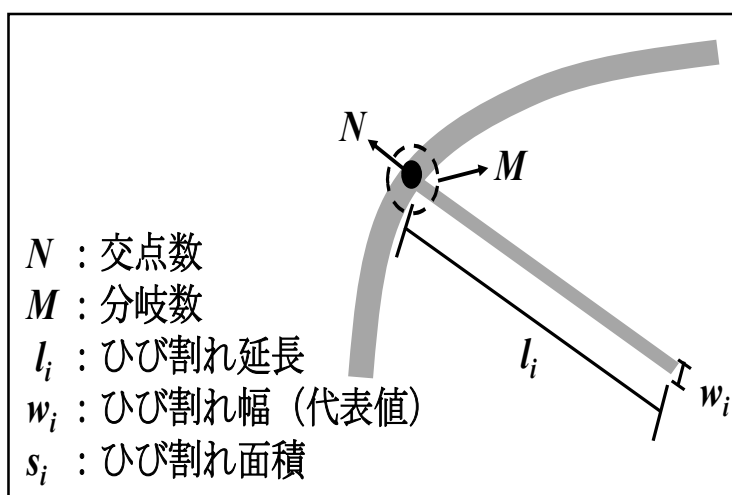


図-2.6 ひび割れ特徴量

2.4 微細なひび割れが多い現場における検証

2.4.1 調査概要

微細なひび割れが多い現場として、民間有料道路である芦ノ湖スカイライン（延長10km）を調査路線とし2019年12月に調査を実施した。この有料道路は夜間（19時～7時）通行止めであり、その間は規制が不要であることから、実道での調査を容易に実施することができる。調査路線では、表層に密粒度アスファルト混合物が用いられており、舗装構成は一律で、アスファルト混合物層全体の平均厚さは15cmである。なお、路床の設計CBRは建設当初の記録が無いため不明であり、大型車交通量区分はN₂である。調査路線から、表層の供用年数や道路土工が異なる延長100mの4つの調査区間を選定した（表-2.2）。表層の供用年数は区間1が6年で最も短く、区間4では21年であった。また、区間2と3は全面盛土であり、区間1と4には切土と盛土の境界が存在する。

表-2.2 調査区間の表層の供用年数と道路土工

調査区間	表層の供用年数	道路土工
区間 1	6 年 (2013 年修繕)	前半 35m：盛土 後半 65m：切土
区間 2	15 年 (2004 年修繕)	全面盛土
区間 3	9 年 (2010 年修繕)	
区間 4	21 年 (1998 年修繕)	前半 10m：切土 後半 90m：盛土

2.4.2 ひび割れ抽出の再現性

前述したとおり、従来の $W \geq 1\text{mm}$ に加え、 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れも対象として求めたひび割れ総延長は、舗装の支持力を反映したひび割れ評価指標であることが分かったものの、人によるひび割れ抽出は個人差が生じられることから、抽出結果のバラツキを把握し、それを小さくするための方法を確認する必要がある。

そこで、高解像度カメラで撮影された路面のひび割れ画像から、複数の解析者が微細なひび割れを抽出し、得られた結果のバラツキを明らかにするとともに、それを小さくするための方法について検討した。検討は、表-2.2 に示す区間の中で最もひび割れ率が高く、かつ微細なひび割れの割合が高かった区間3で行った。区間3の路面画像（5m/枚、全20枚）の中で目視によって最もひび割れが多く発生していると判断された5mの画像Aを対象に、解析者A、B、Cの3人によるひび割れ抽出（1回目）を行い、それを表-2.3に示すように1～6のひび割れ幅に分類し、分類毎にひび割れ延長（ $l_1 \sim l_6$ ）を求めた。

得られた各ひび割れ分類のひび割れ延長（ $l_1 \sim l_6$ ）の合計（ひび割れ総延長 L ）を図-2.7に示す。最も多くひび割れを抽出したのは解析者Aの11.89m/m²で、最も少なか

った解析者 B の 5.37 m/m^2 と大きな差が生じた．また，図-2.8 に示すように，解析者 B は解析者 A および C と比べて，ひび割れ幅が 1mm 未満の微細なひび割れ（分類 1）の抽出力が小さかったことが分かる．このように，抽出されるひび割れの質と量が解析

表-2.3 ひび割れ幅分類

分類	ひび割れ幅範囲	ひび割れ延長(m/m^2)
1	$W < 1\text{mm}$	l_1
2	$1\text{mm} \leq W < 2\text{mm}$	l_2
3	$2\text{mm} \leq W < 3\text{mm}$	l_3
4	$3\text{mm} \leq W < 4\text{mm}$	l_4
5	$4\text{mm} \leq W < 5\text{mm}$	l_5
6	$5\text{mm} \leq W$	l_6

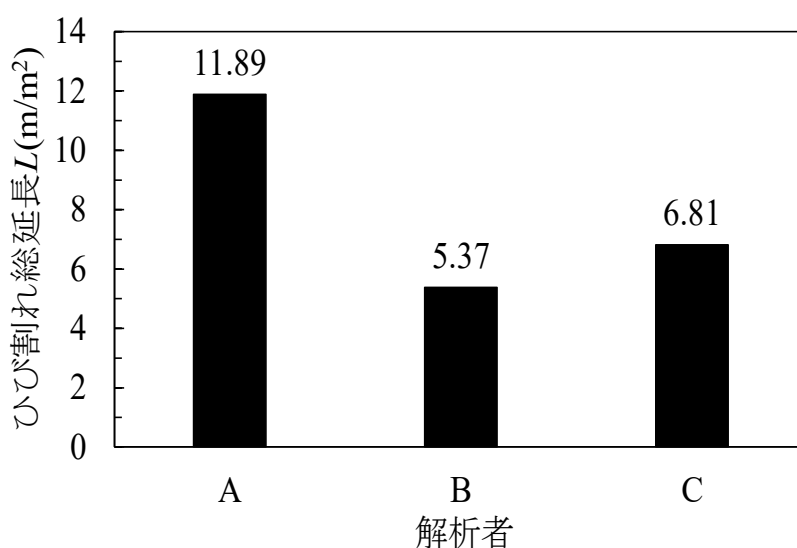


図-2.7 ひび割れの抽出結果（1回目）

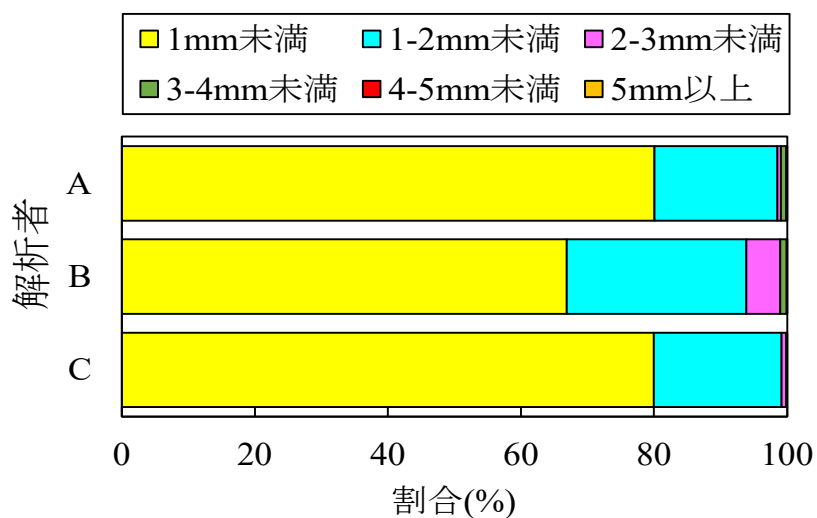


図-2.8 ひび割れ分類の割合（1回目）

者によって大きく異なることから、微細なひび割れの抽出を行う際には、ひび割れ抽出の基準を明確にするとともに、抽出結果が等しくなるよう解析者に学習させる必要がある。そこで、解析者 A, B, C の 3 人に対し、図-2.9 に示す過程でひび割れ抽出を学習させた。まず、個人が Pavé-CAD を用いて路面画像をトレースしてひび割れ総延長 L を求め、次に 3 人のバラツキ（標準偏差）を求める。標準偏差が前回の抽出結果よりも大きい場合は、解析者の間で抽出基準を照合・調整し、もう一度ひび割れ抽出を行う。これを標準偏差が同程度になるまで繰り返した。この学習方法を行った結果を図-2.10 示す。1 回目ではひび割れ総延長 L の標準偏差は 2.79 m/m^2 と非常に大きな値であっ

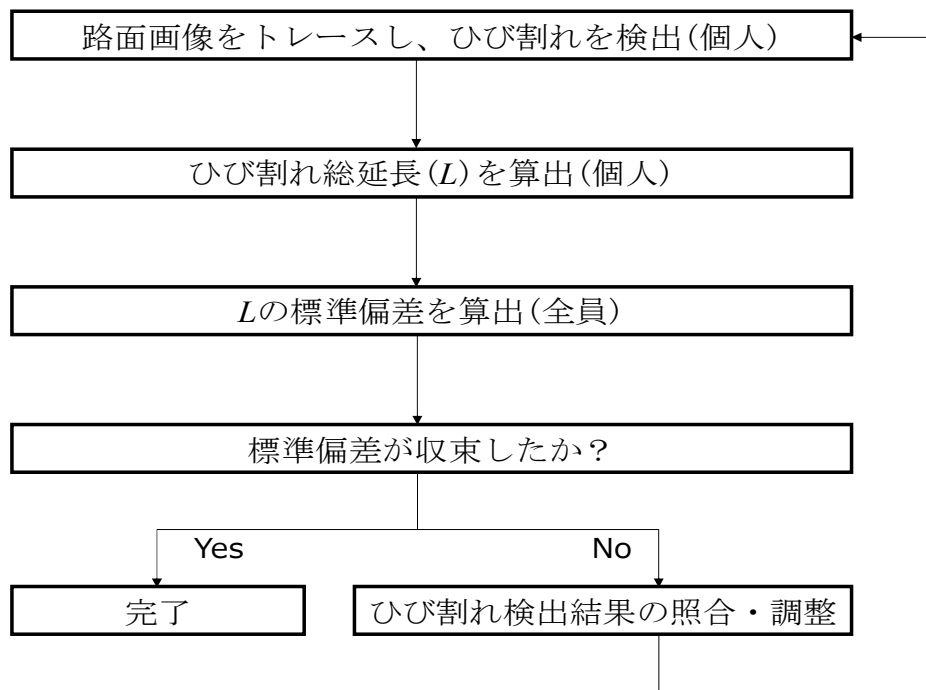


図-2.9 ひび割れ抽出の学習過程

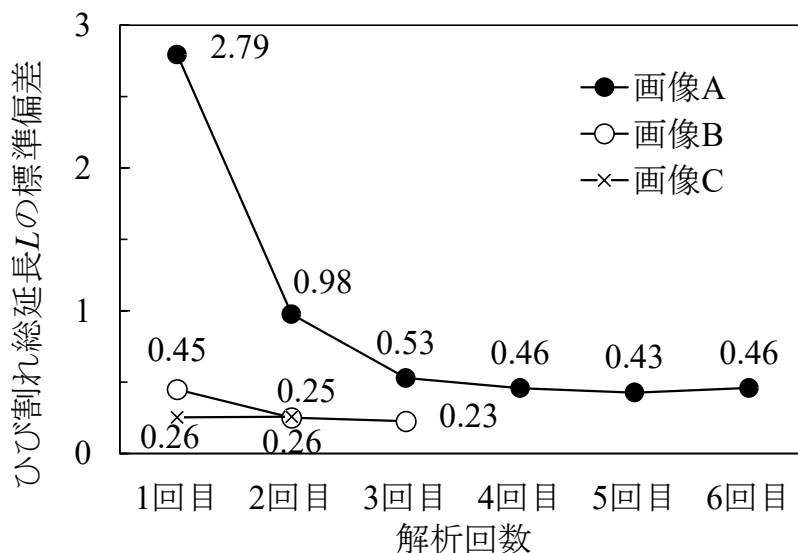


図-2.10 ひび割れ総延長の標準偏差の変化

たが、2 回目では 0.98 m/m^2 （約 70%減）となり、4 回目以降は約 0.46 m/m^2 （約 85%

減) でほぼ一定となった. 4 回目のときのひび割れ総延長とひび割れ分類を図-2.11 および図-2.12 に示す. 3 人の解析者によって抽出されたひび割れの総延長と分類はほとんど等しくなった. また, 区間 3 において最もひび割れが多かった画像 A の後に, 次に多かった画像 B, その次に多かった画像 C の順で同様に学習を行ったところ, 図-2.10 に示すように, ひび割れ総延長 L の標準偏差は画像 B では 2 回目, 画像 C では 1 回目で収束した. 以上のことから, 実施した学習方法を 4 回繰り返したことで, 解析者のひび割れ抽出能力が統一されたと言える.

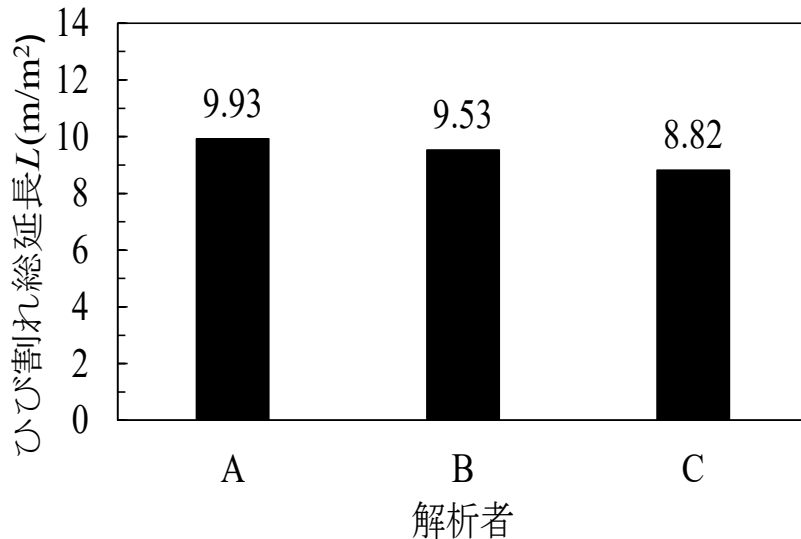


図-2.11 画像 A のひび割れ総延長 (4 回目)

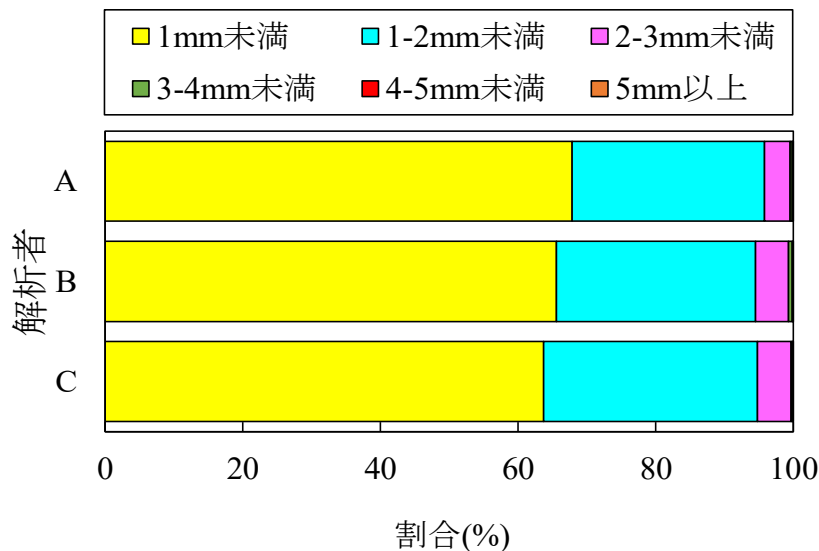


図-2.12 画像 A のひび割れ分類の割合 (4 回目)

以上の学習を経た解析者 A, B, C の 3 人が調査区間の全ての画像についてひび割れ抽出を行った．ひび割れ総延長 L とその標準偏差の関係を図-2.13 に示す．その結果，ひび割れ総延長 L が大きくなるほど標準偏差が大きくなる，すなわちひび割れが多くなるほど，抽出結果のバラツキが大きくなる傾向があることが分かった．そして，学習を行うことで精度の高いひび割れ抽出が行えることが分かった．よって，本研究では，初めに学習を経て精度を高めてからひび割れの抽出を行うこととした．

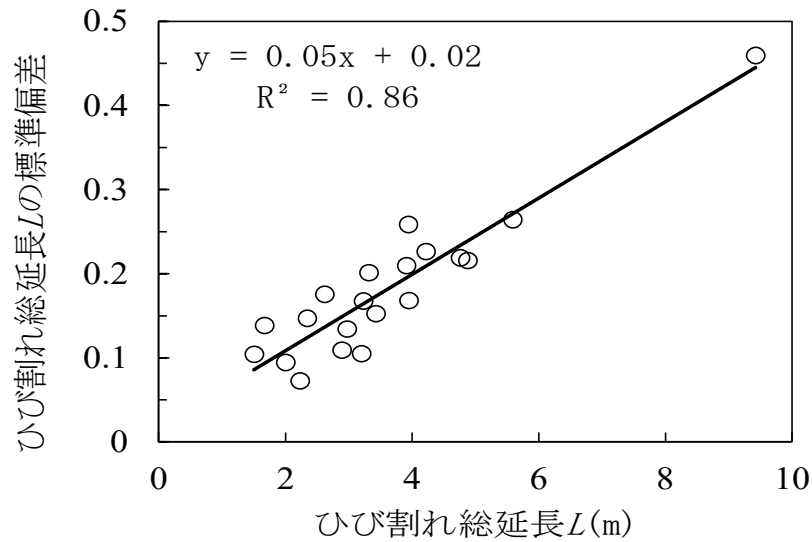


図-2.13 ひび割れ総延長 L とひび割れ総延長 L の標準偏差の関係

2.4.3 ひび割れの抽出

調査区間1～4における $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率(以下, MC)の変動を図-2.14 に、ひび割れ幅分類の割合を図-2.15 に示す。

区間1では、 MC は20%～80%と大きく変動しており、その要因として $W < 1\text{mm}$ の割合が約70%と、発生しているひび割れの多くが微細なひび割れであることが挙げられ、さらにひび割れの多い箇所と少ない箇所が混在していることが分かる。従来用いられているひび割れ率(従来方法)は $W \geq 1\text{mm}$ を対象としているため、この方法では路面に生じるひび割れをかなり過小評価している恐れがある。

区間2では、 MC は約80%でバラツキが小さいことから、区間内では一様にひび割れが生じていることが分かる。ひび割れ幅の分類は $W < 1\text{mm}$ が約50%であることから、従来方法($W \geq 1\text{mm}$)だとひび割れ率はその半分の40%程度になる。

区間3では、 MC は80%以上となりほぼ全面でひび割れが発生しているが、そのほとんどは $W < 1\text{mm}$ であることから、従来方法だとひび割れ率は非常に小さくなり、路面に生じているひび割れの実態を表していない。

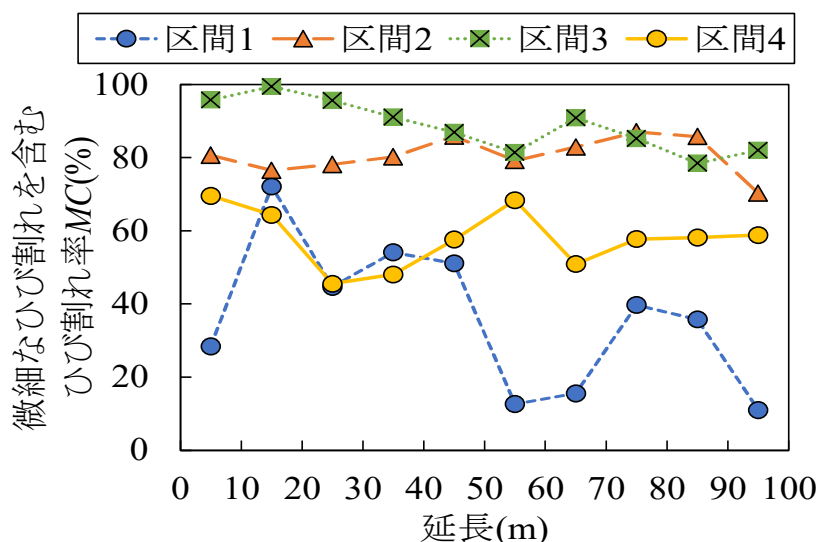


図-2.14 調査区間における $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含んだひび割れ率 MC の変動

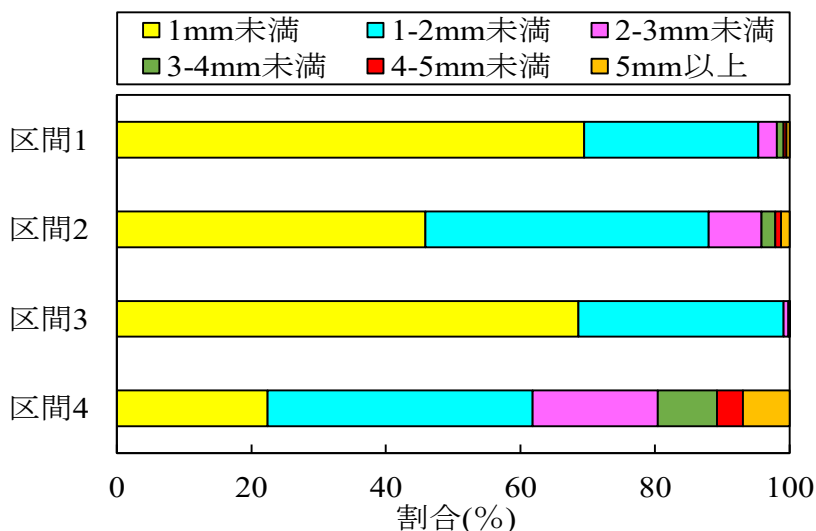


図-2.15 調査区間におけるひび割れ幅分類の割合

一方, 区間 4 では, $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れの割合が 20%程度と小さいことから, 従来方法によるひび割れ率を用いても実態との乖離は小さいと考えられる.

さらに, 表-2.2 および図-2.15 より, 表層の供用年数が長くなるほど, $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れの割合が減少し, 幅が広がっていく傾向にあることが分かる.

$W \geq 1\text{mm}$ のひび割れが取得可能な性能確認試験に合格している従来 of 路面性状測定車と, 本研究で用いた高分解能ラインレーザカメラを搭載した試験車両で測定した結果との違いを表-2.4 に示す. 従来 of 路面性状測定車による $W \geq 1\text{mm}$ ひび割れによるひび割れ率 C と高分解能ラインレーザカメラで取得した $W \geq 1\text{mm}$ のひび割れによるひび割れ率 MC では 6.3%の差が発生した (①-③). このわずかな差は, 高分解能ラインレーザカメラの感度によるものと考ええる. さらに, 高分解能ラインレーザカメラで取得した画像における $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と従来 of 路面性状測定車による $W \geq 1\text{mm}$ ひび割れによるひび割れ率 C を比較したところ, 差は 1.6%~20.1%であり, 区間 $W < 1\text{mm}$ のひび割れの割合が多い順に差が大きいことを確認した (②-③). このことから, 高分解能ラインレーザカメラを搭載した試験車両で取得する路面画像を本研究に用いることはふさわしいと考えられる.

表-2.4 従来 of ひび割れ率 C と $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC との関係

比較内容			区間1	区間2	区間3	区間4
No.	測定車	評価指標				
①	従来の路面性状測定車	幅1mm以上のひび割れによるひび割れ率 C （従来法）	—	—	—	47.5
②	高分解能ラインレーザカメラ搭載車両	幅1mm未満のひび割れを含むひび割れ率 MC	41.3	80.7	88.7	55.4
③		幅1mm以上のひび割れによるひび割れ率 C （従来法）	29.3	76.0	68.6	53.8
差(①-③)(%)			—	—	—	-6.3
差(②-③)(%)			12.0	4.7	20.1	1.6

$W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含むひび割れ率 MC とひび割れ特徴量との関係を表-2.5 に示す．最も強い相関が得られたのはひび割れ総延長 L であったが， R^2 値は 0.41 と高くはない．両者の間には，図-2.16 のように， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含むひび割れ率 MC が大きくなるとひび割れ総延長 L も大きくなる傾向が見られるが，バラツキが大きく明確な関係を確認することはできなかった．

表-2.5 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含むひび割れ率 MC とひび割れ特徴量の関係 (R^2 値)

R^2 値	総延長 L	交点数 N	分岐数 M	総面積 S
MC	0.41	0.12	0.12	0.25

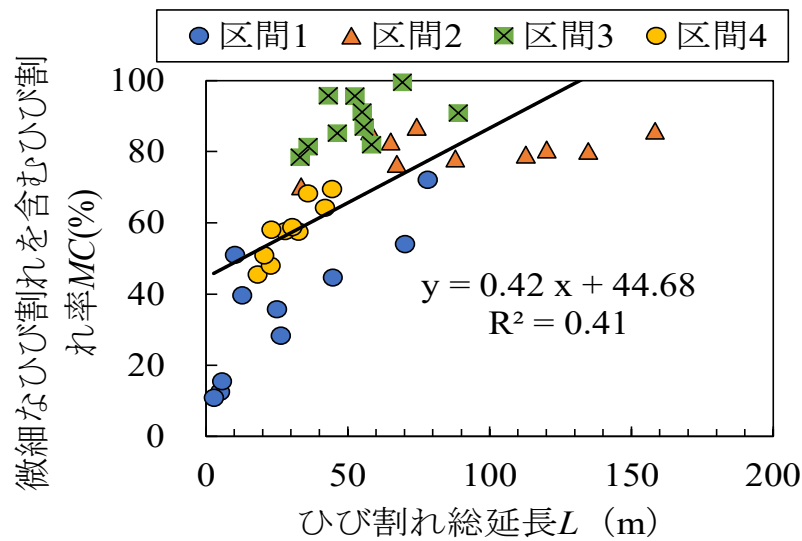


図-2.16 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含むひび割れ率 MC とひび割れ総延長 L の関係

2.4.4 ひび割れ特徴量同士の関係

ひび割れ特徴量同士の関係を表-2.6 に、ひび割れ総延長 L と交点数 N の関係を図-2.17 に、ひび割れ総延長 L と分岐数 M の関係を図-2.18 に、ひび割れ総延長 L と総面積 S の関係を図-2.19 に、交点数 N と分岐数 M の関係を図-2.20 に、交点数 N と総面積 S の関係を図-2.21 に、 M と S の関係を図-2.22 に示す。交点数 N と分岐数 M の R^2 値は 1.00 となったが、これは、調査区間における約 95% が 2 分岐であったためである。これ以外では、ひび割れ総延長 L と交点数 N 、分岐数 M 、ひび割れ総面積 S の間に強い相関が見られた。図-2.17～図-2.19 より、ひび割れ総延長 L が増えると交点数 N と分岐数 M と総面積 S が直線的に増加する傾向が見られることから、本研究では、ひび割れ延長 L を特徴量の代表とすることとした。

表-2.6 ひび割れ特徴量同士の関係 (R^2 値)

R^2 値	総延長 L	交点数 N	分岐数 M	総面積 S
総延長 L		0.74	0.73	0.73
交点数 N			1.00	0.66
分岐数 M				0.65
総面積 S				

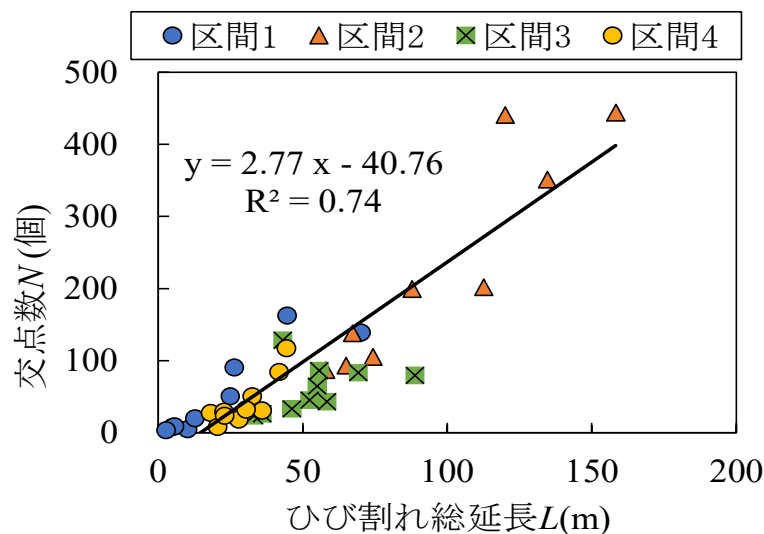


図-2.17 ひび割れ総延長 L と交点数 N の関係

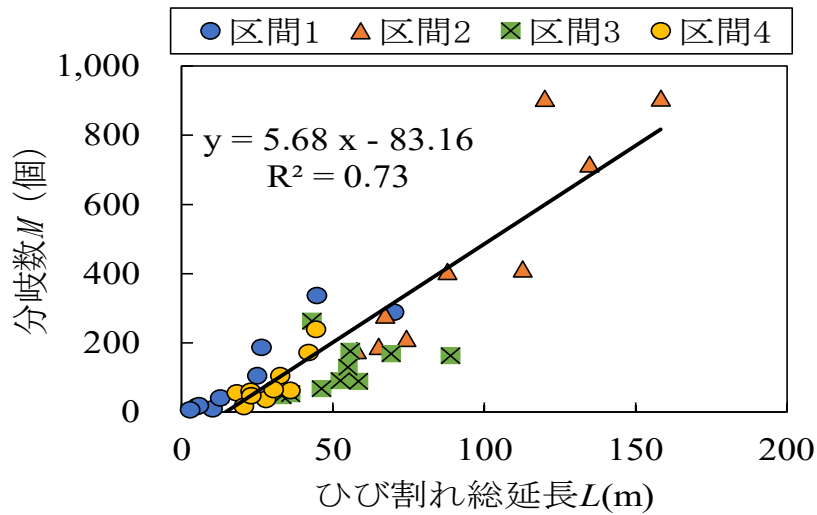


図-2.18 ひび割れ総延長 L と分岐数 M の関係

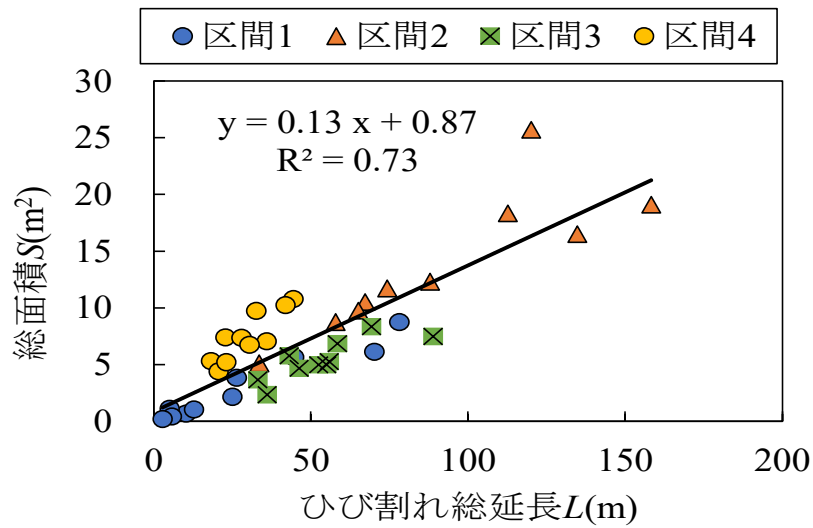


図-2.19 ひび割れ総延長 L と総面積 S の関係

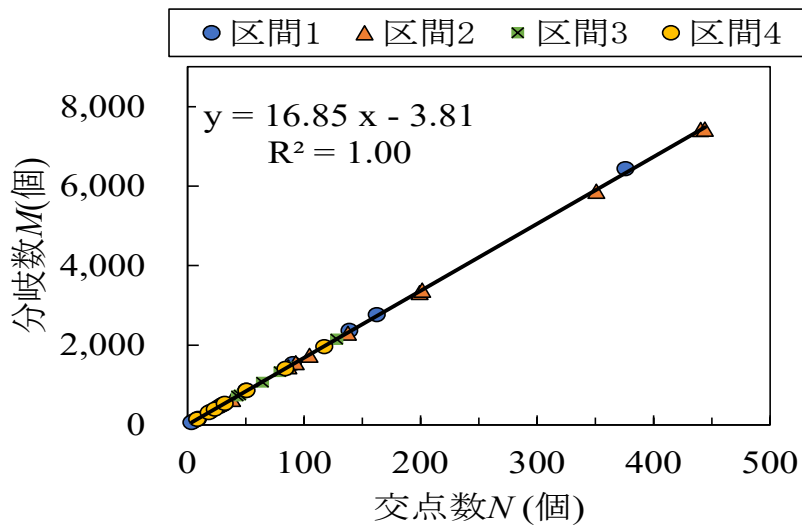
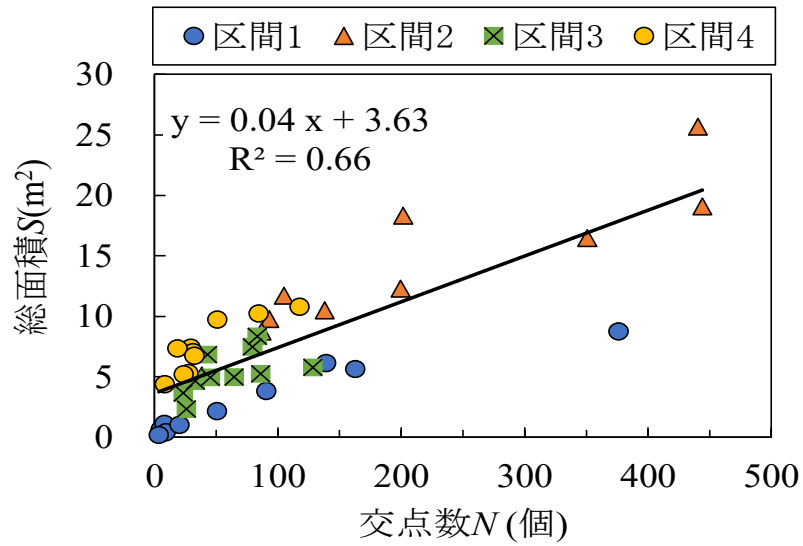


図-2.20 交点数 N と分岐数 M の関係



2.4.5 FWD を用いたたわみ量調査

調査区間では舗装の支持力を評価するため FWD を用いたたわみ量調査を 5m 間隔で実施し，得られたたわみ量に対して荷重補正と温度補正（49kN，20℃）を行った²⁰⁾．本研究では，舗装全体の支持力を評価する指標として広く用いられる載荷板直下のたわみ D_0 (μm)に加え，式-2.5 から算出されるアスファルト混合物層の弾性係数 E (MPa)，式-2.6 から推定される路床の CBR (%)，式-2.7 から得られる残存等値換算厚 T_{A0} (cm) を求めた．図-2.1 に示すように，1 枚の路面画像の範囲（10m）では 2 箇所 FWD 測定を行っているが，渡邊らの研究²¹⁾では測定間隔を 1.2～1.8m と極めて短くしたことで結果的に測定位置のズレによる影響が生じたと報告されており，本研究では全体の傾向を把握するために，解析に当たっては 2 箇所のたわみの平均値を用いることとした．

$$E=2,352\left((D_0 - D_{200})/10^3\right)^{-1.25} / h_1 \quad (\text{式-2.5})$$

ここで，

E ：アスファルト混合物層の弾性係数 (MPa)

D_0 ：載荷板中心のたわみ (μm)

D_{200} ：載荷板中心から 200mm のたわみ (μm)

h_1 ：アスファルト混合物層の厚さ (cm)

$$CBR = 1,000/D_{1500} \quad (\text{式-2.6})$$

ここで，

CBR ：路床の CBR (%)

D_{1500} ：載荷板中心から 1500mm のたわみ (μm)

$$T_{A0} = -25.8\log(D_0 - D_{1500})/10^3 + 11.1 \quad (\text{式-2.7})$$

ここで，

T_{A0} ：残存等値換算厚 (cm)

D_0 ：載荷板中心のたわみ量 (μm)

D_{1500} ：載荷板中心から 1500mm のたわみ (μm)

2.4.6 ひび割れ特徴量と FWD たわみの関係

$W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC と舗装の支持力との関係を表-2.7, 図-2.23 および図-2.24 に示す. 載荷板直下のたわみ量 D_0 と残存等値換算厚 T_{A0} の R^2 値は 0.4 程度であり, アスファルト混合物層の弾性係数 E と路床の推定 CBR の R^2 値はそれよりもさらに低い. 同表の中で R^2 値が高かった $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れ

表-2.7 $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と支持力の関係 (R^2 値)

R^2 値	たわみ量 D_0	アスファルト混合物層の弾性係数 E	路床の推定 CBR	残存等値換算厚 T_{A0}
$W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC	0.39	0.22	0.04	0.44

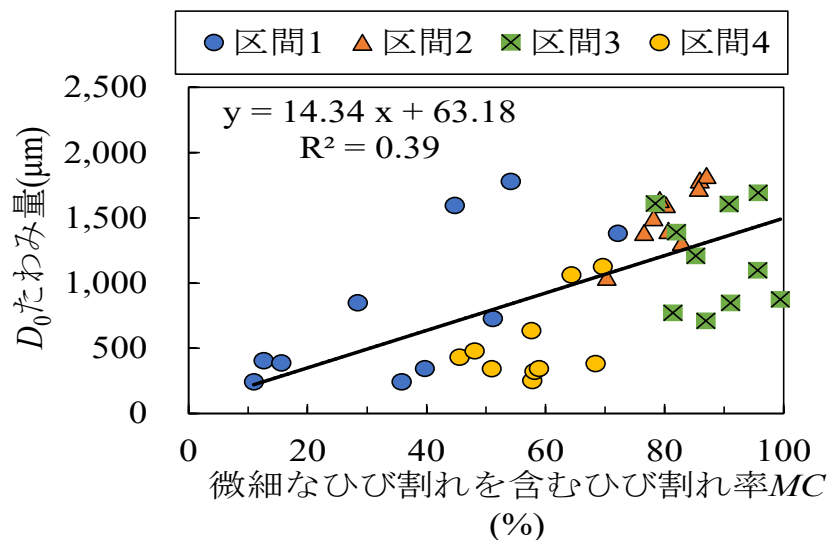


図-2.23 $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と D_0 たわみ量の関係

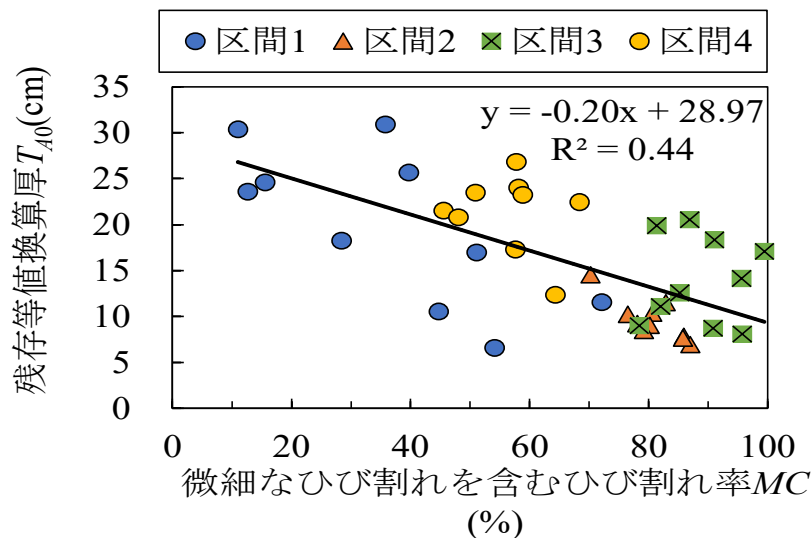


図-2.24 $W < 1\text{mm}$ のひび割れを含むひび割れ率 MC と残存等値換算厚 T_{A0} の関係

を含んだひび割れ率 MC と D_0 たわみ量の間では， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC の増加とともに D_0 たわみ量も増加する傾向が見られた．同様に， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC と T_{A0} の間では， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC の増加とともに T_{A0} が減少する傾向が見られたが， T_{A0} は求めるのに D_0 たわみ量を必要とすることから， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC と D_0 たわみ量の関係と類似する．

本研究では，路面に発生したひび割れがひび割れ幅に応じて分類されていることから，評価対象とするひび割れの幅を変化させた場合のひび割れ率を求めることができる．全てのひび割れを対象とした場合（以後， W_{all} ），および対象とするひび割れの幅を 1mm ずつ大きくした場合におけるひび割れ率と D_0 たわみ量の R^2 値を図-2.25 に示す．その結果， W_{all} と D_0 たわみ量の R^2 は 0.39 で $W \geq 1\text{mm}$ と D_0 たわみ量の R^2 は 0.37 と同程度であり大きく変わらなかった．

続いて， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含む全てのひび割れを対象とした場合のひび割れ特徴量と舗装の支持力の関係を表-2.8 に示す．ひび割れ総延長 L の R^2 値が他の特徴量（交点数 N ，分岐数 M ，総面積 S ）よりも高くなり，その中でもひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の相関が最も高い．これは，渡邊・久保の研究²²⁾と類似した結果である．ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係は図-2.26 のようになり，ひび割れ総延長 L の増加とともに D_0 たわみ量が直線的に増加する傾向が見られ，バラツキも小さい．図-2.25 と同様に，全てのひび割れを対象とした場合（ W_{all} ），および評価対象とするひび割れの幅を 1mm ずつ大きくした場合におけるひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の R^2 値を図-2.27 に示す． $W \geq 1\text{mm}$ の R^2 値は W_{all} よりもかなり低くなったことから， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れと舗装の支持力は密接に関係していると考えられる．したがって，従来の $W \geq 1\text{mm}$ に加え， $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れも対象として求めたひび割れ総延長は，舗装の支持力を反映したひび割れ評価指標であると考えられる．

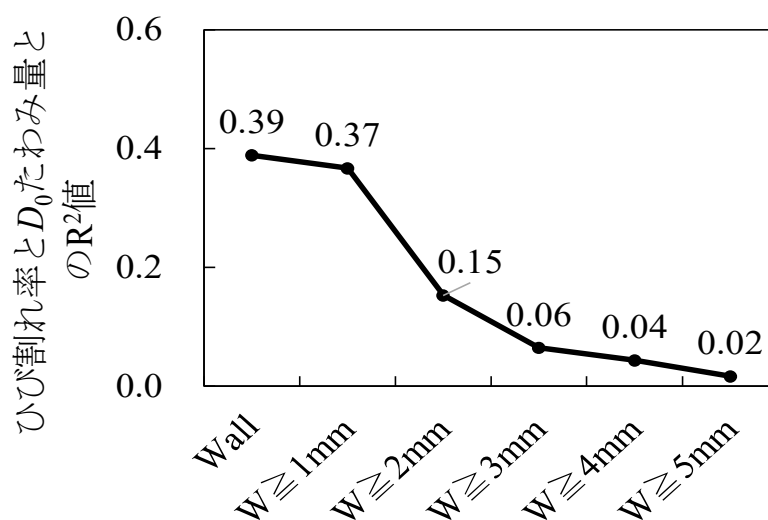


図-2.25 ひび割れ率と D_0 たわみ量との R^2 値とひび割れ幅の関係

表-2.8 ひび割れ特徴量と支持力の関係 (R^2 値)

R^2 値	たわみ量 D_0	アスファルト混合 物層の弾性係数 E	路床の推定 CBR	残存等値換 算厚 T_{A0}
総延長 L	0.54	0.27	0.09	0.50
交点数 N	0.36	0.15	0.08	0.32
分岐数 M	0.36	0.15	0.08	0.31
総面積 S	0.31	0.27	0.01	0.34

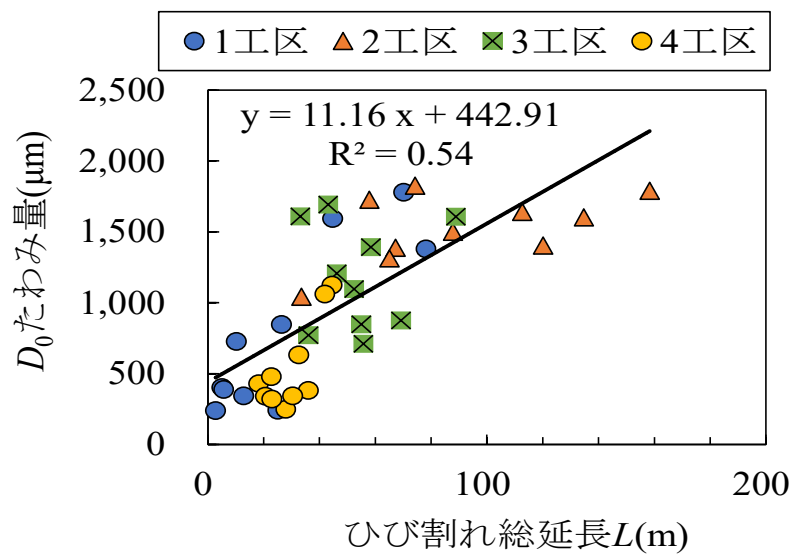


図-2.26 ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係

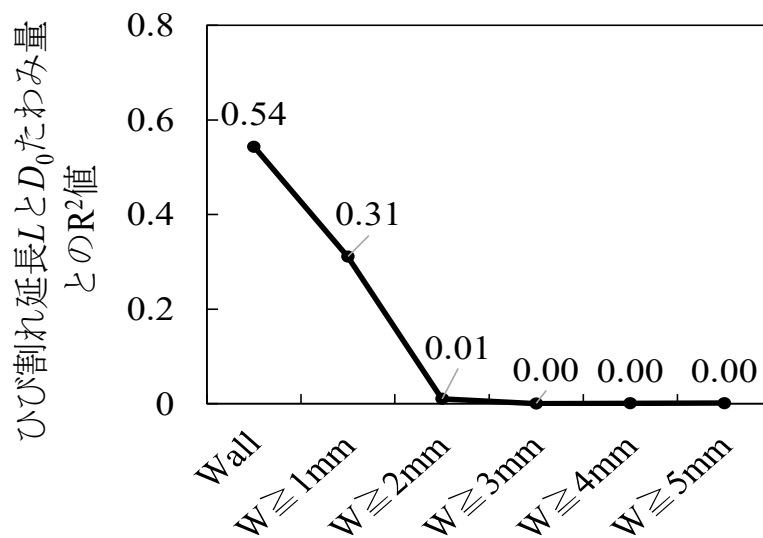


図-2.27 ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との R^2 値とひび割れ幅の関係

2.5 微細なひび割れが少ない現場における検証

2.5.1 調査概要

前述したとおり，微細なひび割れが多い現場においては舗装路面のひび割れ特徴量であるひび割れ総延長 L と舗装全体の支持力である D_0 たわみ量の関係が確認された．しかしながら，研究対象とした現場は $W < 2\text{mm}$ のひび割れが多くを占めていたため， $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れと支持力の関係は明らかになっていない．そのため， $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多く発生している現場において路面を撮影し，Pave-CAD を用いてひび割れ総延長 L を求めた．さらに，FWD による D_0 たわみ量から，ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係を整理し，舗装路面のひび割れ特徴量と舗装の支持力の関係に関して，より信頼性の高い関係性を整理した．

調査対象は $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多く発生している現場として，北海道石狩郡新篠津村近郊の道道において全長 200m の区間を選定し，選定した現場において路面の撮影と舗装の支持力の評価を行った．調査路線では，表層に密粒度アスファルト混合物が用いられており，舗装構成は一律で，アスファルト混合物層全体の平均厚さは 12cm で盛土区間である．なお，表層の供用年数は 15 年で，路床の設計 CBR は建設当初の記録が無いため不明であり，大型車交通量区分は N_2 である．

路面の撮影は写真-2.4 に示す高解像度カメラを搭載した路面性状測定車を用い連続的に 200m 実施し，測定位置は外側車輪走行位置において微細なひび割れが多い現場と同じように幅 1.638m で実施した．得られた 200m の路面画像において評価区間長を 10m とし，評価区間ごとに路面画像からひび割れを抽出し，抽出したひび割れの総延長をひび割れ総延長 L とした．一方，舗装の支持力の評価には FWD を用い，10m の評価区間において D_0 たわみ量を 2 測点で得られるように 5m 間隔で実施した．なお，2 測点で得られた載荷板直下の D_0 たわみ量の平均を求め，それを当該区間の D_0 たわみ量とした．



写真-2.4 使用した路面性状測定車の調査状況

2.5.2 ひび割れの抽出

ひび割れは現場で得られた 0～200m の路面画像から抽出し、微細なひび割れが多い現場と同様ひび割れ幅を 6 つに分類した結果を図-2.28 に示す。図-2.28 より、路面を撮影した現場は $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが 6 割以上を占めていることが分かった。これは、図-2.8 に示した微細なひび割れが多い現場におけるひび割れ幅分類の割合では、最も区間では 9 割以上、最も少ない区間でも 6 割以上の $W < 2\text{mm}$ のひび割れがあったものの、図-2.28 では 4 割にも満たないことから、本現場は微細なひび割れが少なく $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れを多く含む現場であると言える。

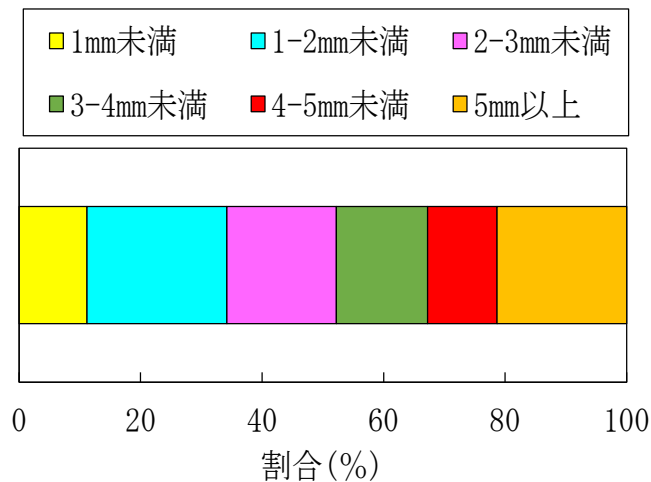


図-2.28 調査区間におけるひび割れ幅分類の割合

2.5.3 ひび割れ特徴量と FWD たわみの関係

10m の評価区間長ごとに延長 200m の路面画像より抽出した全ひび割れ幅 (W_{all}) のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係を図-2.29 に示す。図-2.29 より、 W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係はひび割れ総延長 L が長くなるほど D_0 たわみ量も大きくなり決定係数 (R^2) が 0.68 であることから、 W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量には関係があることが分かった。そこで、対象とする W を 1mm ずつ変化させた場合におけるひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係性を整理した。 $W \geq 1\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係を図-2.30 に、 $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係を図-2.31 に示す。図-2.30 および図-2.31 より、ひび割れ総延長 L が長くなるほど D_0 たわみ量も大きくなり、ともにひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量には関係性が見られるものの、ひび割れ総延長 L が $10 \sim 20\text{m/m}^2$ 付近に多く、その中で D_0 たわみ量が分散しているため決定係数 (R^2) が小さくなり、 W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量よりもその関係性は低くなることが分かった。

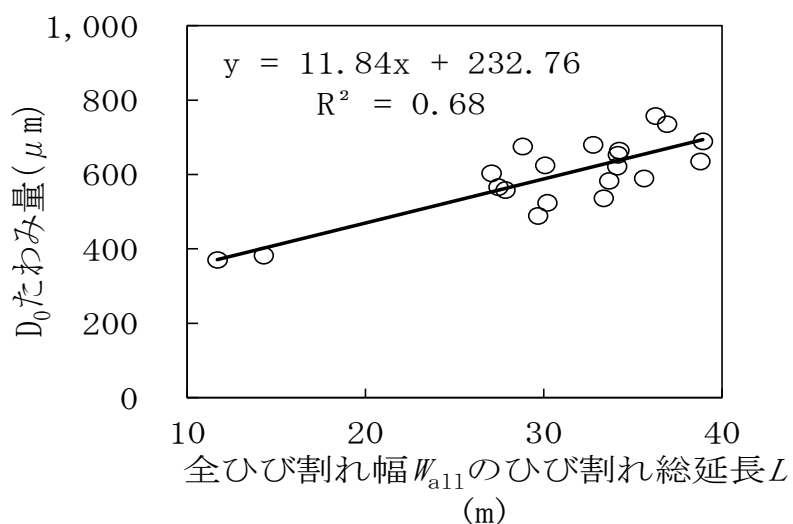


図-2.29 全ひび割れ幅 W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係

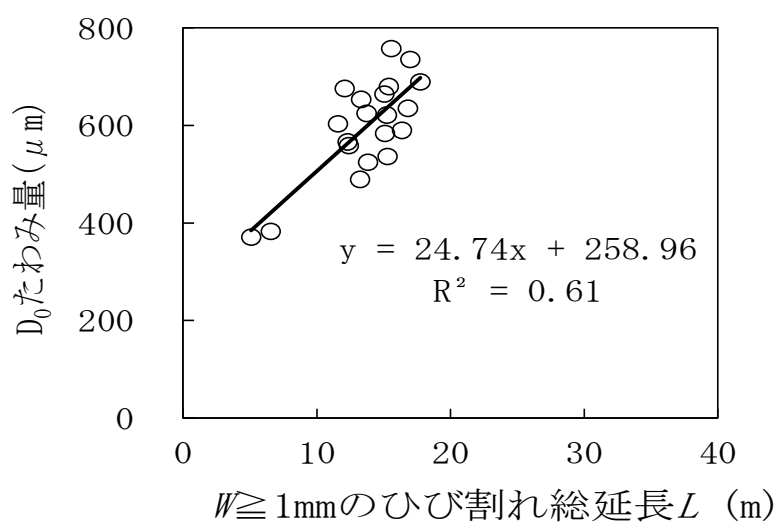


図-2.30 $W \geq 1\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係

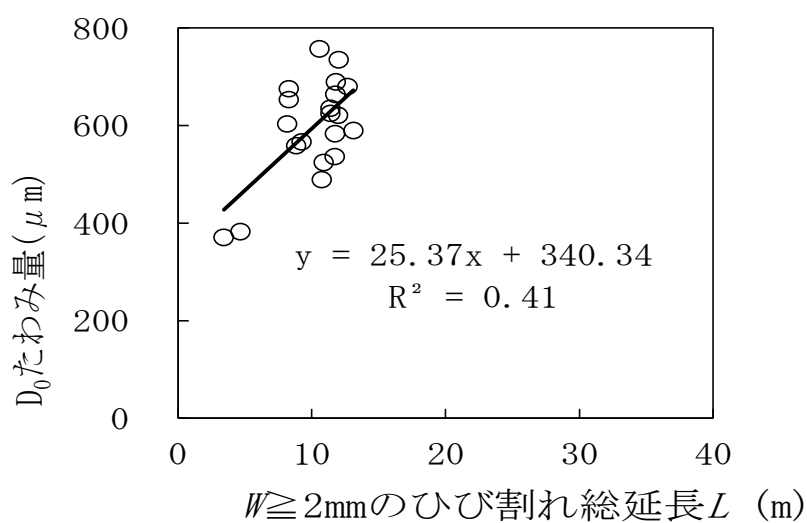


図-2.31 $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係

さらに、 $W \geq 3\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係を図-2.32 に示す。図-2.32 より、 $W \geq 3\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係は、 $W \geq 2\text{mm}$ よりもひび割れ総延長 L の範囲が集中しているため決定係数 (R^2) が 0.20 となり、 $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量よりもさらに関係性は低くなることが分かった。加えて、 $W \geq 4\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係を図-2.33 に示す。図-2.33 より、ひび割れ総延長 L が 5m/m^2 未満付近に多く、その中で D_0 たわみ量が約 $400 \sim 800 \mu\text{m}$ で広く分散しているため決定係数 (R^2) が 0.1 以下となり、 $W \geq 3\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量よりもその関係性は著しく低くなることが分かった。

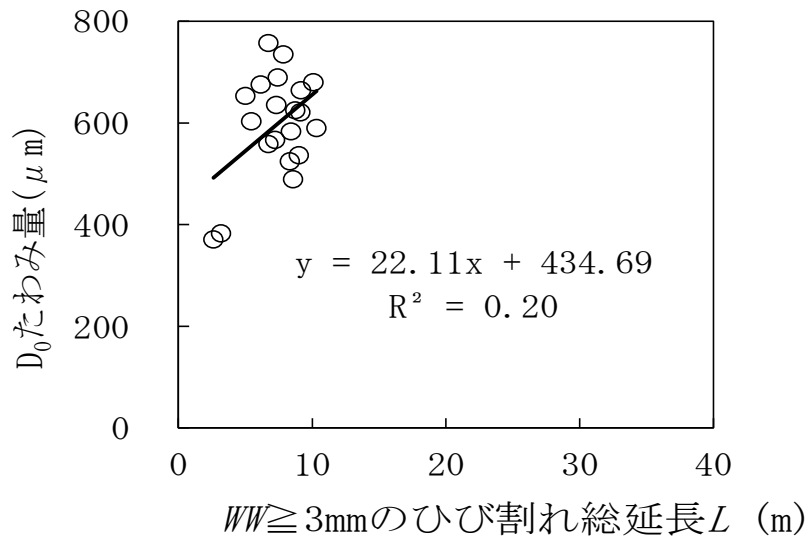


図-2.32 $W \geq 3\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係

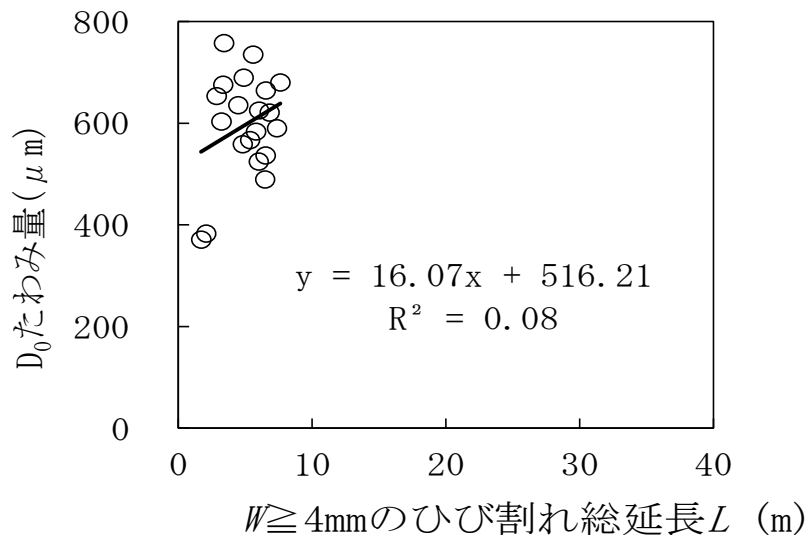


図-2.33 $W \geq 4\text{mm}$ のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係

W_{all} および W_{all} から 1mm ずつ対象の W を変化させた場合におけるひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係性を図-2.34 に示す. 図-2.34 より, W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の決定係数 (R^2) が最も高く, そこから, 対象とする W を 1mm ずつ狭くさせると, 徐々に決定係数 (R^2) が低くなることが分かった. このことから, W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量には関係があるものの, より W が狭いひび割れが舗装の支持力との関係が高いことが分かった. よって, $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多い現場においても, ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係は同様の傾向であることが確認された.

また, 微細なひび割れが多い現場 (1~4 工区) と微細なひび割れが少ない現場 (石狩) の併せた結果を図-2.35 に示す. 図-2.35 より, これらの現場の結果を併せても, W_{all} のひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の決定係数 (R^2) が高いことが確認された.

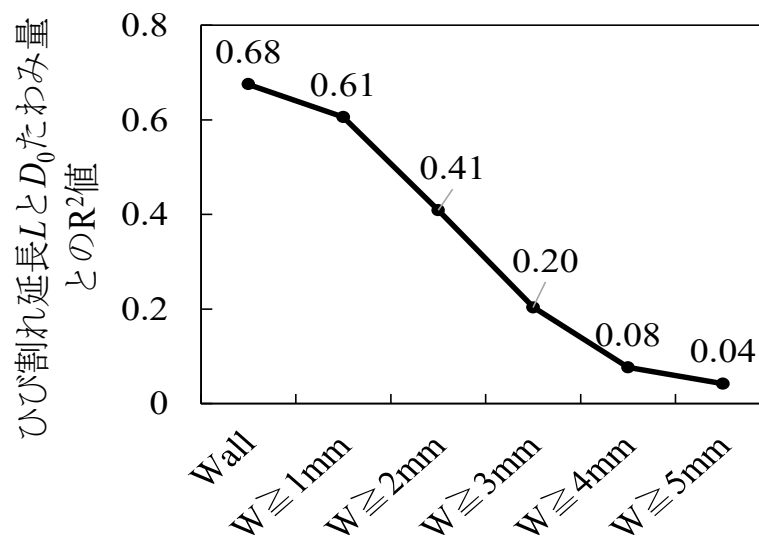


図-2.34 ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との R^2 値とのひび割れ幅の関係

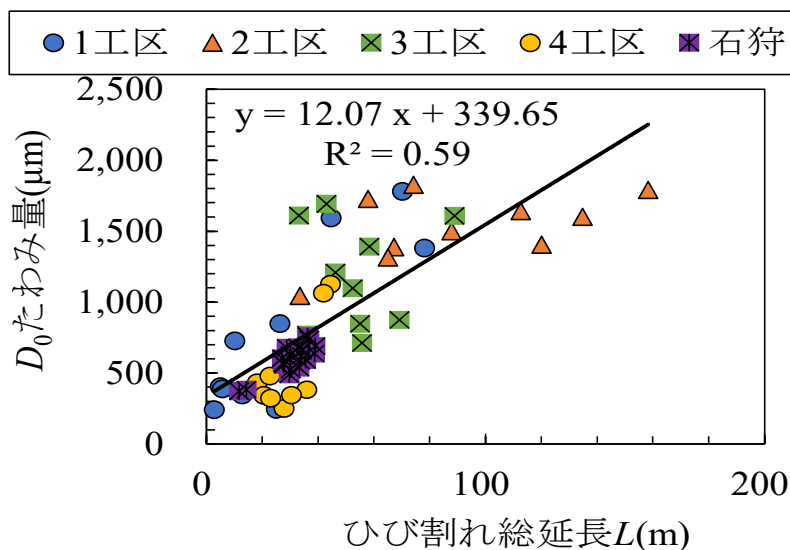


図-2.35 微細なひび割れが多い現場と微細なひび割れが少ない現場を併せたひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量との関係

2.6 第2章の結論

第2章では、高分解能のラインレーザを搭載した計測装置を用いて、従来の基準である $W \geq 1\text{mm}$ のひび割れに加え、 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れの計測を試みた。新たに開発した Pave-CAD を用いて計測されたひび割れをひび割れ幅 W に応じて $W < 1\text{mm}$, $1\text{mm} \leq W < 2\text{mm}$, $2\text{mm} \leq W < 3\text{mm}$, $3\text{mm} \leq W < 4\text{mm}$, $4\text{mm} \leq W < 5\text{mm}$, $W \geq 5\text{mm}$ に分類し、ひび割れ特徴量（交点 N , 分岐数 M , 総延長 L , 総面積 S ）を求め、 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC との関係、および特徴量同士の関係について分析した。さらに、同一地点において実施した FWD 試験の結果から、ひび割れ特徴量と舗装の支持力の関係について検討した。得られた結論は以下の通りである。

- 高分解能ラインレーザを搭載した装置を用いることで $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れ（最小ひび割れ幅 0.650mm ）を検出することができた。
- $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC とひび割れ特徴量（交点 N , 分岐数 M , 総延長 L , 総面積 S ）の間にはほとんど相関は見られなかった。一方、ひび割れ特徴量同士の関係では、ひび割れ総延長 L と交点数 N , 分岐数 M , ひび割れ総面積 S の間に強い相関が見られた。
- $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れ MC と D_0 たわみ量の間には相関は見られなかったが、ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の R^2 値は 0.54 となり、両者には強い相関が見られた。また、ひび割れ総延長 L を算出する対象のひび割れの幅を $W \geq 1\text{mm}$ とすると、 R^2 値が低下したことから、 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを計測することで、より適切に舗装の支持力を評価できることを示唆していると考えられる。
- 以上に加え、例えば $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れであっても、雨水が浸入し路盤や路床の脆弱化をもたらす可能性があることから、従来のひび割れ評価に用いられている $W \geq 1\text{mm}$ のひび割れのみを対象とするのではなく、加えて $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れも評価対象とし、評価指標としては、ひび割れ率ではなくひび割れ総延長 L を用いることが望ましい。
- 異なる解析者が同一の路面画像を用いひび割れを検出した際の抽出結果の違いや学習過程を経ることによる抽出精度の変化を検討した結果、微細なひび割れの抽出を行う際には、解析者によってバラツキが生じることが分かった。さらに、学習過程を設け異なる解析者間で認識のすり合わせを行うことで、抽出するひび割れの精度が向上しバラツキが収束するだけでなく、学習過程を経ることによってバラツキが収束するまでに必要な解析の回数も少なくなることが分かった。加えて、ひび割れ総延長 L が長いほどひび割れ総延長 L の標準偏差も大きくなることが分かった。
- $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多い現場においても、ひび割れ総延長 L と舗装の支持力 D_0 たわみ量の関係性を整理した。その結果、 $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多い現場においても、 W が狭くなるほどひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係性は高くなることが確認された。

2.7 第2章の参考文献

- 1) 新倉芳樹：道路の点検について，舗装，Vol. 49, No. 1, pp. 7-8, 2014 年.
- 2) 吉沢仁：道路インフラを取り巻く現状，道路，Vol. 936, pp. 26-29, 2014 年 3 月.
- 3) 国道交通省 道路局：道路橋定期点検要領，pp18, 2019 年 2 月
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf
- 4) 国道交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領，pp35, 2019 年 2 月
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_2.pdf
- 5) 国道交通省 道路局：舗装点検要領，
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_10.pdf
- 6) 武藤聡，久保和幸，藪雅行：舗装点検要領の策定について，アスファルト，第 59 巻,232 号,pp31-35, 2016 年.
- 7) 藪雅行：舗装点検要領とこれからの点検・診断技術，道路建設，771 巻,pp33-40, 2018 年.
- 8) 桑原正明：アスファルト，第 61 巻,234 号,pp21-24, 2018 年.
- 9) 国土交通省：『路面性状を簡易に把握可能な技術』の試験結果 別紙-2, pp1-2
<http://www.mlit.go.jp/common/001267623.pdf>
- 10) 丸山記美雄，安倍隆二，熊谷政行：融雪期に発生する舗装のポットホールの実態と発生メカニズムの検討，寒地土木研究所月報，No. 730, pp. 2-13, 2014 年.
- 11) 橋爪謙治，橋本和明，明石行雄，全邦釘：排水性舗装の基層以深の劣化を要因としたポットホール発生予測手法の一提案，舗装工学論文集，Vol. 70, No. 3, pp. I_17-I_24, 2014 年.
- 12) 公益社団法人日本道路協会：道路調査・試験法便覧（平成 31 年度版）〔第 1 分冊〕，pp. 215-225, 2019 年.
- 13) 全邦釘，井後敦史，南免羅祐治，黒木航汰，大窪和明：車載カメラにより撮影された舗装画像からのディープラーニングによるひび割れ率評価，舗装工学論文集，Vol. 73, No. 3, pp. I_97-I_105, 2017 年.
- 14) 浅田拓海，亀山修一，川端伸一郎，佐々木克典：走行車両から撮影した路面画像を用いた舗装のひび割れ評価手法の開発，舗装工学論文集，Vol. 70, No. 3, pp. I_9-I_16, 2014 年.
- 15) 畠山仁，千坂俊治，千坂俊治，高橋基夫：アスファルト舗装におけるひび割れ深さ推定手法の検討，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-040, 2016 年 9 月.
- 16) 高橋基夫，公平学，畠山仁：レーザーを用いた路面ひび割れ計測システムとひび割れ情報の見える化について，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-042, 2016 年 9 月.
- 17) 伊藤哲男，馬場弘二，城間博通，吉武勇，中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ形態調査による剥落危険性評価，土木学会論文集，No. 763/VI-63, pp. 87-93, 2004 年 6 月.
- 18) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武勇，中川浩二：ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価法，土木学会論文集 F, Vol. 62, No.4, pp. 628-632, 2006 年 10 月.
- 19) 伊藤哲男，馬場弘二：レーザを用いたトンネル覆工コンクリート測定車，建設の機械化，No. 632, pp. 14-19, 2002 年 10 月.
- 20) (財)道路保全技術センター：活用しよう！FWD，pp18-22, 2005 年.
- 21) 渡邊一弘，増戸洋幸，篠塚政則，上島壯：短い測定間隔による修繕前後の FWD 構造評価結果，舗装工学論文集，Vol. 72, No. 3, pp. I_177-I_185, 2016 年.
- 22) 渡邊一弘，久保和幸：アスファルト舗装のひび割れに関する新たな評価指標の提案，土木技術資料，Vol. 52, No. 11, pp. 32-35, 2010 年 11 月

第 3 章

道路舗装の診断技術の普及

第3章 道路舗装の診断技術の普及

3.1 緒言

わが国では、道路ストックの老朽化が進行し、修繕や更新の時期を迎えている。道路構造物の中でも、舗装はストック量が膨大であるため、近年の厳しい予算制約の下、舗装の維持管理を効率的に行うためには、点検→診断→措置→記録のメンテナンスサイクルを構築し、舗装の長寿命化を図ることによってライフサイクルコスト（以下、LCC）を削減することが重要である¹⁾。

舗装点検要領^{2)・5)}では、直轄国道のような損傷の進行が早いアスファルト舗装においては、表層を供用し続ける期間（使用目標年数）を設定し、これよりも早く劣化した（早期劣化）区間では、修繕後に再び早期劣化が起こらないように詳細調査を実施し、その結果に基づいて修繕設計を行い、措置を講じることとされている⁶⁾。そのためには、舗装の診断と修繕設計を適切に行うことができる技術者が必要不可欠である。

建設業全体に目を向けると、第1章で述べたように、建設業就業者数は近年大きく減少し、29歳以下の建設業就業者の割合も急激に減少している⁷⁾。加えて、55歳以上の建設業就業者の割合は急増し、全産業を大きく上回るペースで高齢化が進んでいることから、次世代への技術承継が大きな課題となっている。

建設業は国の重要な社会基盤を支え、災害時はもとより日常生活においても人々の生活を守るために必要不可欠な基幹産業である。現在の厳しい財政状況下において、過去に整備された膨大な社会資本を維持し続けるためには、効率的な維持管理方法の確立に加え、それを担う若手技術者の育成が極めて重要である。

そこで、特定非営利活動法人(NPO 法人)舗装診断研究会⁸⁻¹⁴⁾（以下、PDRG）が2019年7月から行った舗装の早期劣化区間における詳細調査において、若手舗装技術者の育成を目的としたプログラムを実行した。詳細調査には舗装の調査や診断の経験が少ない若手技術者が多く参加したことから、プログラムにはナレッジマネジメントのSECIモデル^{15),16)}を導入し、その特長である「共同化」、「表出化」、「連結化」に対応するような内容とした。本プログラム終了後に、参加者に対して実施したアンケート調査からSECIモデルの効果および若手舗装技術者に及ぼした影響を明らかにした。さらに、舗装を主たる事業とする北海道の建設会社を対象にアンケート調査を行い、若手技術者の確保と育成に関する状況を分析し、本プログラムのような技術者育成プログラムに対するニーズを明らかにした。なお、国土交通省が試行中の若手技術者活用評価型の総合評価落札方式¹⁷⁾では、若手技術者として加点される主任技術者の年齢を40歳未満としているケースが多いことから、本研究では若手の定義を40歳未満とした。

3.2 詳細調査における若手技術者育成プログラム

3.2.1 舗装の詳細調査のメンバ

舗装点検要領では，早期劣化区間においては劣化要因を調べるために詳細調査を実施し，その結果に基づいて修繕設計を行い，措置を講じることが望ましいとされている．詳細調査としては，コア抜き調査，FWD によるたわみ量調査，開削調査等があるが，調査方法や評価手法について確立されているとは言えない．そこで，PDRG は，早期劣化区間における詳細調査の計画・実施・分析に関する情報を収集することを目的に，2019 年 12 月，道路管理者の協力の下，舗装早期劣化区間において詳細調査を実施した．

PDRG が実施した詳細調査の流れを図-3.1 に示す．ステップ 1 では，調査区間において現場踏査を行い，早期劣化要因に関する仮説を立て，それを証明するために必要な詳細調査の内，FWD，電磁波レーダ，熱赤外線等の非破壊調査の計画を立てる．

ステップ 2 では，非破壊調査を実施し，その結果を基に，仮説を証明するために必要な破壊調査の計画を立てる．破壊調査は，アスファルト混合物層（表層・基層・アスファルト安定処理層）を対象としたコア抜き調査と表層から路床上面までの開削調査である．

ステップ 3 では，現場において破壊調査を実施し，目視，現場試験，材料試験等によって舗装に生じている損傷を把握し，さらにその要因についても検討する．具体的には，コア抜き調査では採取したコアから，アスファルト混合物層の層厚やひび割れの状態，層間剥離の有無，土砂化の状況等を観察する．開削調査ではアスファルト混合物層の状態（コア抜き調査の観察項目に加えて水の浸入など）の観察，路盤および路床の状態（含水比，粒度）の把握と支持力評価等の現場試験を行う．

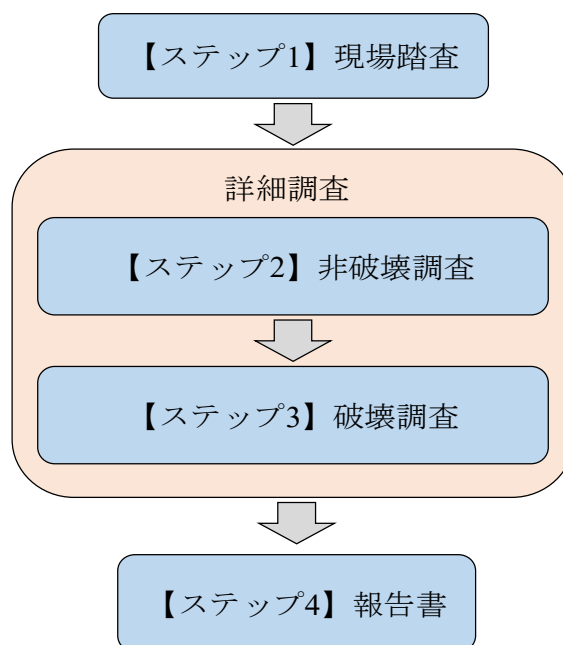


図-3.1 舗装の詳細調査の流れ

最後に、ステップ 4 では、ステップ 1 からステップ 3 で得られた成果を取りまとめ、劣化要因の考察や修繕工法の提案等を記載した報告書を作成する。

今回の詳細調査は、現道において大規模なものとなることから、PDRG は、詳細調査に関わる作業を担当するワーキンググループ（WG）を立ち上げた。WG のメンバは総勢 24 人（男性 23 人、女性 1 人）であり、民間会社の技術者で構成される。WG メンバの年齢構成を図-3.2 に、開削調査の経験数を図-3.3 に示す。40 歳未満の若手技術者が約 4 割、その内開削調査の経験が無い者は 6 割であった。一方、WG には開削調査の経験が豊富な 40 歳以上の熟練技術者が約 3 割いることから、WG の活動では、彼らに過去の経験を活かして中心的な役割を担ってもらうことにした。

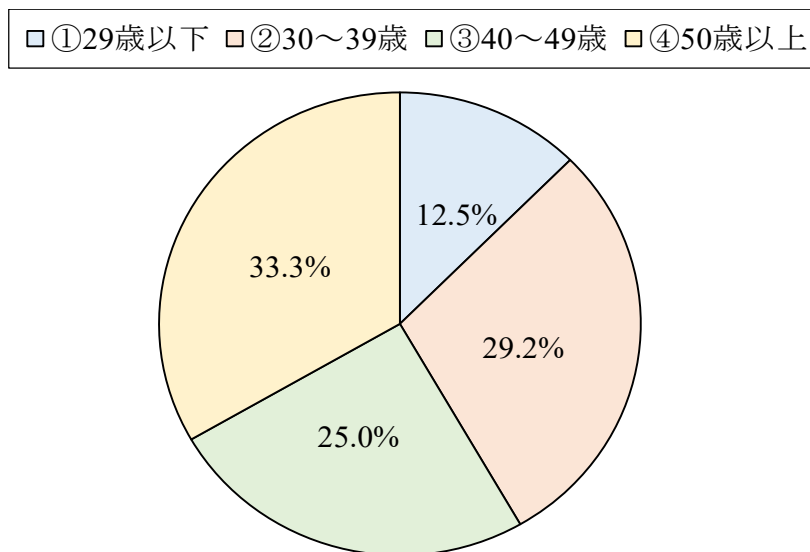


図-3.2 WG メンバの年齢構成

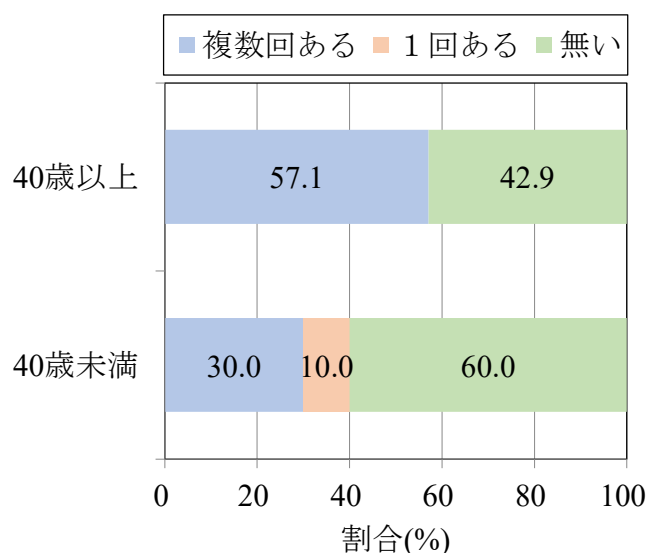


図-3.3 開削調査の経験数

3.2.2 SECI モデルの適用

若手技術者の育成は企業内において行われる場合が多く、従来用いられている手法としては OJT (On-The-Job Training)、メンタリングなどがある。OJT は、職場における熟練技術者が若手技術者に対して具体的な仕事を与え、その仕事を通して、知識・技術・技能・態度などを修得させることを目的とする。メンタリングは、豊富な知識と経験を有した先輩社員(メンター)が後輩社員に対して行う個別支援活動(指導・支援・保護)であり、上司の指示通りに動く人材ではなく、自ら考え判断する能力を育成することを目的とする。これらの方法では、若手技術者と指導役が一对一の関係となるため、指導役の負担が増える、指導役の知識や経験によって効果に差が生じるなどの問題がある。さらに、上述したように、建設業は慢性的な人手不足であることから、指導役の確保が難しいという問題もある。

このような問題への対処法としてナレッジマネジメントを取り入れた人材育成方法が注目されている。人材の育成には、図-3.4 に示すように、個人が身に着けた知識を活用し、さらに実践知を生み出し価値を創り出すことが重要である。そのため、知識を活用するためには、先ず個人の知識を蓄え、それを多くの人で共有し、組織レベルでの知識とし、組織レベルの知識から個人がさらに使える知識を蓄えるというナレッジマネジメントの考えが重要である。ナレッジマネジメントは、知識を活用して経営を管理する手法であり、組織に属する個人がノウハウや経験などの知的資産を組織内全体で共有することで知識の属人化を防ぎ、生産性を高めることを目的とする。ナレッジマネジメントを実現する場合には、主に SECI モデルが用いられる。SECI モデルには、図-3.5 に示すように、共同化、表出化、連結化、内面化の4段階のプロセスがある。ナレッジマネジメントを若手技術者育成に導入することによって、熟練技術者が保持している知識やノウハウといった言語化できない「暗黙知」を、数字や図で表される「形式知」に変換し、それを組織で共有することによって、組織に所属する個人全員の能力水準を向上することができる。通常、対象とする組織は一つの企業であるが、建設業が直面している現状を考えると、同業他社や産学官連携にも適用を広げることで、最も厳しい人材不足に直面している、中小企業を含む多くの企業が、現場に関する知識のみならず研究・開発などを含む多様な知識を共有することが可能となる。

共同化とは、共通体験を通じて個人から個人へ暗黙知を伝達・獲得する過程である。暗黙知は、熟練者の経験知識やノウハウなど個人が持っている言語化されていない知識のことである。暗黙知は体験を共有しなければ獲得が難しいと言われているため、熟

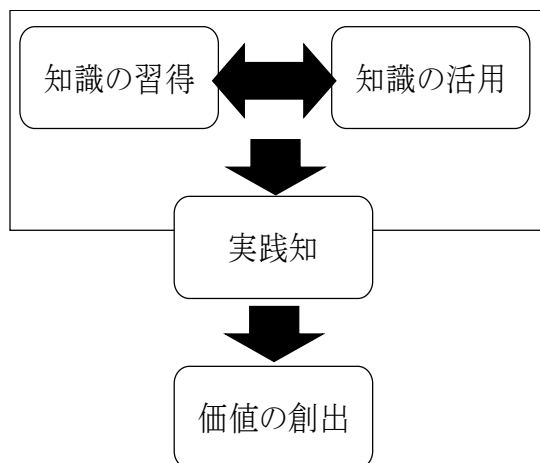


図-3.4 知識習得から価値の創出へのイメージ

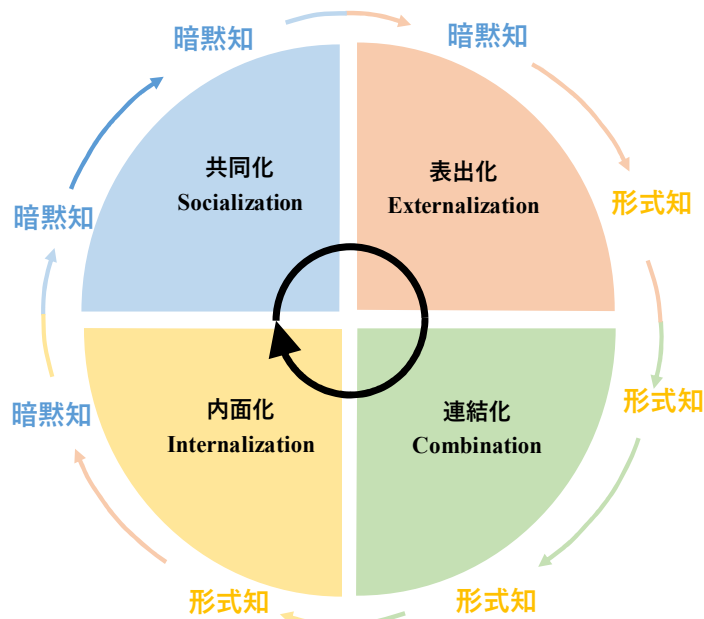


図-3.5 SECI モデル

練者との共通体験を重ねることが重要である。

表出化とは、暗黙知を形式知に変換する過程である。複数人とディスカッションすることや、言葉・文章・図式で表すことで形式知へと変換する。

連結化とは、形式知と他の形式知を連結させることで新たな知識体系を作る過程である。この過程で初めて個人の暗黙知が組織の知的財産へと変換することになる。

内面化とは、新たな知識体系として作られた形式知を共有し、経験や認知を通じて新たな暗黙知を生み出す過程である。暗黙知は個人と組織の知的財産となり、そして再び共同化により他人と暗黙知の共有を図るサイクルを繰り返すことによってより洗練されたナレッジとなる。

図-3.2 および図-3.3 に示したように、WG には、40 歳未満で開削調査の経験に乏しいメンバが多く存在すること、その一方で、開削調査の経験が豊富な熟練技術者も存在することから、熟練技術者をナレッジホルダとし、SECI モデルを適用した若手舗装技術者育成プログラムを考案した。本プログラムは詳細調査のステップ 1～4 に沿って組み立てられており、図-3.6 に示すように、ステップ 1～3 では SECI モデルにおける共同化→表出化の過程、ステップ 4 ではステップ 1～3 の表出化で得られる形式知を連結する連結化に対応する。

ステップ 1 の現場踏査では、熟練技術者と若手技術者が共に現場に赴き、路面損傷の状態や現場条件（地形・線形・交通量等）を把握し、当該箇所の劣化要因の推定を行った。これは、SECI モデルの共同化に対応しており、共通体験を通じて熟練技術者から若手技術者への暗黙知の伝達・獲得過程である。さらに、熟練技術者と共に現場踏査で得られた結果に基づいて非破壊調査の実施計画書を作成する過程は、暗黙知を言葉・文章・図式で表すことで形式知へと変換する表出化に対応する。

ステップ 2 の非破壊調査では、共同化は FWD・電磁波レーダ・熱赤外線等の非破壊試験に関する暗黙知（原理・測定方法・分析方法）を熟練技術者から伝達される過程に、表出化は非破壊調査結果の分析・考察およびそれらに基づいて詳細調査（破壊調査）の

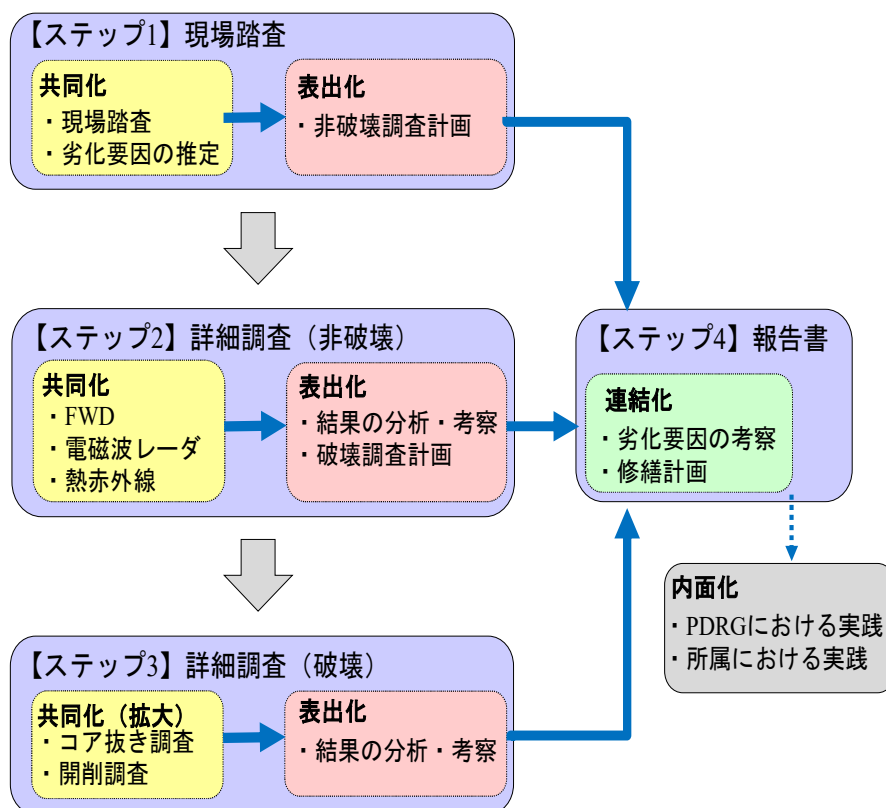


図-3.6 SECIモデルを適用した若手舗装技術者育成プログラム

実施計画書を作成する作業に対応する。

ステップ3の破壊調査（コア抜き調査と開削調査）では，豊富な経験と知識を有するより多くの熟練技術者の暗黙知が必要と考え，PDRGの会員以外の技術者や研究者にも参加を呼び掛けた．その結果，2日間で延べ50人の熟練技術者が参加し，現場において，若手技術者を交えたディスカッション（写真-3.1 および写真-3.2）が行われた．表出化では，破壊調査で得られた結果を分析・考察することで，暗黙知から形式知へと変換される．



写真-3.1 ナレッジホルダと若手技術者のディスカッション状況（その1）



写真-3.2 ナレッジホルダと若手技術者のディスカッション状況（その 2）

ステップ 4 は SECI モデルにおける連結化に対応する．劣化要因の考察や修繕工法の提案等に関する報告書の作成を通して，現場踏査，非破壊調査，破壊調査の各ステップの表出化で得られた形式知を統合する．

SECI モデルにおける内面化は，連結化によって作られた形式知を共有し，経験や認知を通じて新たな暗黙知を生み出す過程である．図-3.7 に示すように，得た知識が自社で生かされることによって，共有された形式知が内面化され，今後，同様の損傷が生じている早期劣化区間において各々が知識やノウハウとして使える暗黙知にまで高められると考えられる．また，参加したメンバが得られた知識を各々の職場に還元し実践および活用することによって，この新たな暗黙知はいずれ共同化によって他の技術者に伝わり，新たな価値を生むものとする．本プログラムの場合では，ステップ 4 で得られた新たな形式知を他の詳細調査にも適用して新たな暗黙知を獲得することに対応する．しかしながら，本プログラムは最初の試みであることから，未だ内面化の過程には至っていない．今後，本プログラムを経験した若手技術者が，PDRG あるいは所属会社において詳細調査の経験を積むことで内面化が完了し，次のサイクルの共同化に繋がるものとする．

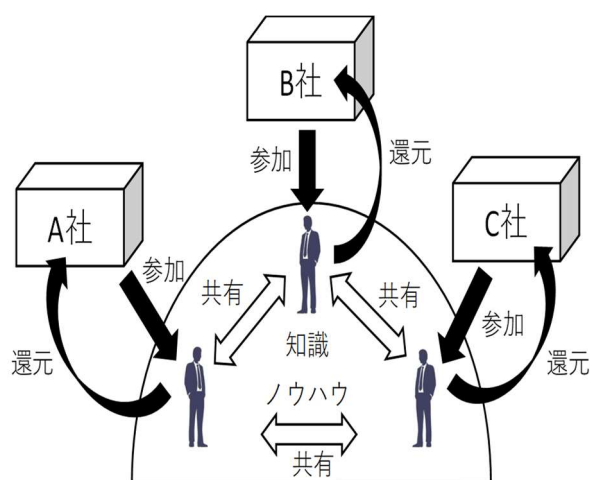


図-3.7 SECI モデルによる人材育成のイメージ

3.3 若手技術者育成の効果の検証

本プログラムが若手技術者に及ぼした影響を明らかにするために、プログラム終了直後に第1回アンケート調査を実施した。さらに、SECIモデルにおける「共同化」「表出化」「連結化」「内面化」の具体的な効果を明らかにするためにプログラム終了から2年後に第2回アンケート調査を実施した。

3.3.1 第1回アンケート調査（プログラム終了直後）

第1回アンケート調査は、プログラム終了直後（2020年1月29日～2月14日）に実施した。対象者は、本プログラムの全ての過程に参加した詳細調査WGメンバー23人（40歳以上13人、40歳未満10人）である。アンケートの質問事項と選択肢を表-3.1に示す。選択式の設問は4問（設問1～設問4）であり、設問3のみ複数回答を認めた。本プログラムに対する感想は自由記述である。

表-3.1 第1回アンケート調査の項目

設問	質問事項および選択肢		複数回答
1	質問事項	他人の知識が自身に与えた影響について	不可
	選択肢	①非常にためになった	
		②多少ためになった	
		③どちらともいえない	
		④ためにならなかった	
2	質問事項	舗装診断に関する自身の知識の変化について	不可
	選択肢	①多くなった	
		②変わらない	
3	質問事項	設問2で①多くなったと回答したその理由について	可
	選択肢	①現場であったため	
		②有識者がいたため	
		③参加型のプロジェクトであったため	
		④知識やデータを共有できたため	
		⑤年齢構成が良かったため	
		⑥その他	
4	質問事項	本プログラムで得た知識の今後の活用について	不可
	選択肢	①活かされると思う	
		②どちらともいえない	
		③活かされないと思う	
その他	質問事項	本プログラムに対する感想	—
	自由記述		

設問 1 に関する回答を図-3.8 に示す。「他人の知識がためになった」と回答した割合は 40 歳未満では 100%となったことから、若手技術者に有用な知識が伝達されたことが分かる。

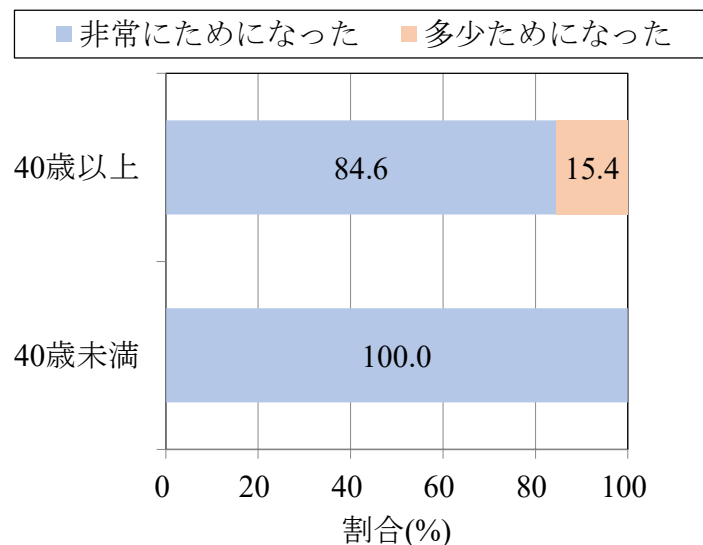


図-3.8 人の知識が自身に与えた影響（設問 1）

設問 2 に対する回答を図-3.9 示す。本プログラムによって知識が多くなったと回答した割合は 40 歳未満の若手技術者では 100%であったことから、若手技術者は、ステップ 1～3 の表出化およびステップ 4 の連結化によって新たな知識（形式知）が得られたことが分かる。

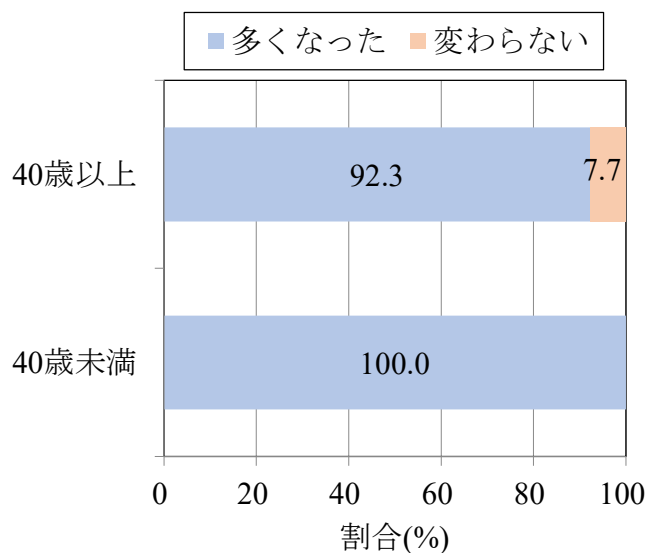


図-3.9 装診断に関する自身の知識の変化（設問 2）

設問 2 で知識が多くなったと回答した人に対して，その理由を尋ねた結果を図-3.10 に示す．新しい知識の習得には，有識者などのナレッジホルダの存在，および知識とデータの共有が重要であることが分かる．また，「現場であったため」という回答が多く見られたことから，講習会や資料・報文等による自学自習よりも実際に見て触れることのできる現場でのプログラムが求められていることが伺える．

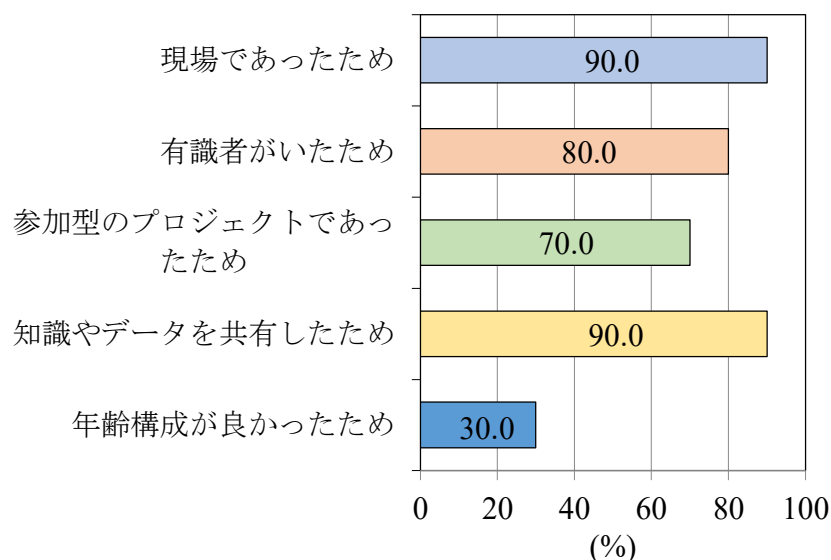


図-3.10 知識が多くなった理由（設問 3）

設問 4 の結果を図-3.11 に示す．本プログラムで得た新しい知識が所属会社における今後の業務に活かされると感じている技術者の割合は年齢を問わず 90%以上となった．

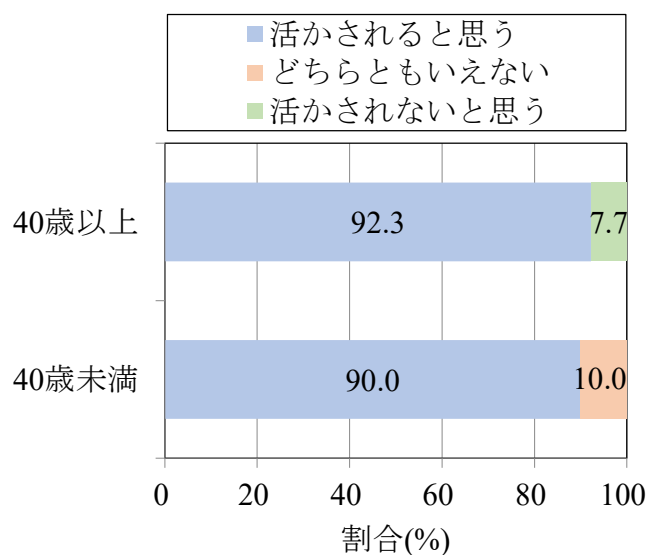


図-3.11 得られた知識の活用（設問 4）

その他の質問として、本プログラムに対する感想では、「自分が分かっていたようで分かっていなかったことが多く、知識が不足していたことを痛感した」、「詳細調査で得られた知識や経験を基に技術者として成長したい」などの前向きな意見が多く寄せられた。また、「今回のようなプログラムは若手技術者の育成（技術面と意欲）にとって極めて有効であるので、是非、全国各地で実施してもらいたい」といった前向きな意見が多く寄せられた。このことより、近年、舗装の診断に対する需要が高い中で、今回のような様々な詳細調査手法を経験できたことが如何に貴重であったかが分かる。その一方で、「時間が無かったため、熟練技術者とのディスカッションができなかった」という意見があったことから、今後はディスカッションの機会だけでなく、十分な時間も確保する必要があることが分かった。

3.3.2 第2回アンケート調査（プログラム終了から2年後）

第1回アンケート調査では、「共同化」「表出化」「連結化」で得られた効果を詳細に確認していなかったこと、さらに、本プログラムによって得られた「内面化」の効果を確認することを目的に、プログラム終了から2年後（2021年12月20日～12月28日）に第2回アンケート調査を実施した。

第2回アンケートの設問を表-3.2に示す。調査対象は、本プログラムの全てのステップに参加した詳細調査WGメンバーの若手技術者10名（第1回アンケート調査の若手技術者と同じ）とした。調査に当たって、回答者に図-3.1に示す詳細調査の4つのステップを明示し、各ステップにおいて熟練技術者からどのような知識を、どのような手段で得たのかを問うた。

表-3.2 第2回アンケート調査の項目

設問	質問事項	
1	質問事項	ステップ1において、熟練技術者からどのような知識を得ましたか？
	自由記述	
2	質問事項	ステップ1で得られた知識はどのような手段で得られましたか？
	選択肢	a：ディスカッション
		b：図表作成等
		c：その他
3	質問事項	ステップ2において、熟練技術者からどのような知識を得ましたか？
	自由記述	
4	質問事項	ステップ2で得られた知識はどのような手段で得られましたか？
	選択肢	a：ディスカッション
		b：図表作成等
		c：その他
5	質問事項	ステップ3において、熟練技術者からどのような知識を得ましたか？
	自由記述	
6	質問事項	ステップ3で得られた知識はどのような手段で得られましたか？
	選択肢	a：ディスカッション
		b：図表作成等
		c：その他
7	質問事項	ステップ4において、熟練技術者からどのような知識を得ましたか？
	自由記述	
8	質問事項	今回のプロジェクトで得られた知識がその後の業務役立っている場合、どのような場面ですか？
	自由記述	

ステップ 1：現場踏査において得られた知識に対する回答（設問 1）に対する回答を表-3.3 に示す。回答を整理すると、ステップ 1 で知識は、「分類 A：劣化要因の推定」と「分類 B：非破壊調査の実施計画」に分類できた。分類 A と回答した人は全員、分類 B と回答した人 10 人中 7 人であった。分類 A は、ステップ 1 における熟練技術者とのディスカッションによる暗黙知の伝達・獲得過程であり、SECI モデルの「共同化」に対応し、分類 B は、共同化で得られた暗黙知を言葉・文章・図式で表し形式知へと変換する「表出化」に対応している。また、ステップ 1 で得られた知識の獲得手段（設問 2）に対する回答では、a：ディスカッションが 9 人、b：図表作成等が 1 人であり、回答者の 9 割がディスカッションであった。したがって、ステップ 1 における「共同化」「表出化」は、主にディスカッションによって得られたことが分かる。

表-3.3 回答のまとめ（設問 1 および設問 2）

回答者	設問1の回答	分類	設問2の回答
1	劣化要因の考え方について	A：劣化要因の推定	a：ディス カッション
	詳細調査実施の箇所選定について	B：非破壊調査の実 施計画	
2	早期劣化要因を事前に推定する際 の考え方	A：劣化要因の推定	a：ディス カッション
	推定した早期劣化要因からの非破 壊調査のイメージ	B：非破壊調査の実 施計画	
3	地形等実際の現場状況から劣化要 因の推察ができること	A：劣化要因の推定	a：ディス カッション
4	早期劣化要因を推定するうえで必 要な考え方	A：劣化要因の推定	a：ディス カッション
	詳細調査実施箇所の選定の着眼点	B：非破壊調査の実 施計画	
5	詳細調査項目の設定	B：非破壊調査の実 施計画	a：ディス カッション
	交通や気象環境など舗装損傷の原 因となる要因	A：劣化要因の推定	
	早期劣化要因を推定するうえでの 着眼点	A：劣化要因の推定	
6	現地の地形や沿線の状況からの開 削箇所の選定の考え方	B：非破壊調査の実 施計画	a：ディス カッション
7	必要な調査方法の選択	B：非破壊調査の実 施計画	a：ディス カッション
	早期劣化要因を推定する際の着眼 点	A：劣化要因の推定	
8	地形等実際の現場状況から劣化要 因の推察ができること	A：劣化要因の推定	b：図表作成 等
9	早期劣化要因を推定するうえでの ヒント	A：劣化要因の推定	a：ディス カッション
	詳細調査実施箇所の選定の着眼点	B：非破壊調査の実 施計画	
10	切土盛土，地下水などを踏まえて 劣化要因を考察するという観点	A：劣化要因の推定	a：ディス カッション
合計		分類数 A:10 B:7	回答数 a:9 b:1

ステップ 2：詳細調査（非破壊）で得られた知識（設問 3）と獲得手段（設問 4）に対する回答を表-3.4 に示す。ステップ 2 の回答は、「分類 C：FWD の活用」、「分類 D：FWD 以外の非破壊試験の活用」、「分類 E：詳細調査（破壊）の実施計画」の 3 つに分類できた。分類 C と分類 D は、熟練技術者から非破壊試験や解析に関する知識やノウハウを得る「共同化」と、解析結果の図表化や考察の作成などの「表出化」の両方に対応し、分類 E は、文章や図表で表した実施計画書の策定であることから「表出化」に対応する。分類 C は 3 人、分類 D は 9 人、分類 E は 3 人であった。分類 D が最多となったのは、FWD 以外の電磁波レーダや熱赤外線が新しい非破壊試験装置であるからと考えられる。分類 C には、回答者 10 のような「共同化」と回答者 3, 9 のような「表出化」が含まれ、分類 D では、回答者 5,7,10 のような「共同化」と、回答者 1,2,3,4,8 のような「表出化」が含まれていた。また、設問 4 では、知識の獲得手段は、a：ディスカッションが 3 人に対し、b：図表作成等と回答したのは 7 人であった。したがって、ステップ 2 では、ステップ 1 とは異なり、「共同化」「表出化」は、主に図表作成等を通して得られたことが分かる。

表-3.4 回答のまとめ（設問 3 および設問 4）

回答者	設問3の回答	分類	設問4の回答
1	非破壊試験方法の概要、分析の仕方について	D：FWD以外の非破壊試験の活用	b：図表作成等
2	FWD以外の非破壊試験の概要、解析方法	D：FWD以外の非破壊試験の活用	b：図表作成等
	開削調査実施箇所を選定するうえでの考え方	E：詳細調査（破壊）の実施計画	
3	非破壊試験の測定から結果の考察まで	D：FWD以外の非破壊試験の活用	b：図表作成等
	FWDの有効性	C：FWDの活用	
4	非破壊試験結果の整理および分析の方法	D：FWD以外の非破壊試験の活用	b：図表作成等
5	非破壊技術の活用方法と得れる情報	D：FWD以外の非破壊試験の活用	a：ディスカッション
6	熱赤外カメラのメリットデメリット	D：FWD以外の非破壊試験の活用	b：図表作成等
	FWDによる開削箇所の選定方法	E：詳細調査（破壊）の実施計画	
7	非破壊試験の測定や分析の方法、調査結果の考察	D：FWD以外の非破壊試験の活用	a：ディスカッション
8	非破壊試験に用いた試験の概要、分析の仕方	D：FWD以外の非破壊試験の活用	b：図表作成等
9	FWDの測定方法やたわみ量の整理の仕方	C：FWDの活用	b：図表作成等
	開削調査実施箇所の選定方法	E：詳細調査（破壊）の実施計画	
10	FWDでは細かくデータを取ることが有効であること	C：FWDの活用	a：ディスカッション
	電磁波測定の事前に厚さを把握しておくこと	D：FWD以外の非破壊試験の活用	
合計		分類数 C:3 D:9 E:3	回答数 a:3 b:7

ステップ3：詳細調査（破壊）で得られた知識（設問5）と獲得手段（設問6）に対する回答を表-3.5に示す。ステップ3の回答は、「分類F：採取したブロック・コアの判定」、「分類G：開削調査の試験手順や着眼点」、「分類H：損傷原因の推定」の3つに分類できた。分類Gは、熟練技術者から知識・経験・ノウハウを得る「共同化」に対応し、分類Fと分類Hは、「共同化」と、調査結果の図表化や考察の作成などの「表出化」の両方に対応する。回答結果では、分類Fは6人、分類Gは7人、分類Hは6人となり、ほぼ同じ割合であった。分類Fの中には、回答者2,3,4,9のような「共同化」と回答者1,8のような「表出化」が含まれ、分類Hでは、回答者2,3,4,5,6のような「共同化」と回答者10のような「表出化」が含まれていた。設問6では、知識の獲得手段は、a：ディスカッションが7人に対し、b：図表作成等と回答したのは3人であった。したがって、ステップ1と同様、ステップ3における「共同化」「表出化」は、主にディスカッションを通して得られると考えられる。

表-3.5 回答のまとめ（設問5および設問6）

回答者	設問5の回答	分類	設問6の回答
1	開削ブロックと採取コアの判定方法	F：採取したブロック・コアの判定	b：図表作成等
	色水浸透試験箇所の選び方について	G：開削調査の試験手順や着眼点	
2	採取したコアの観察の仕方	F：採取したブロック・コアの判定	a：ディスカッション
	破壊調査での色水浸透試験の方法	G：開削調査の試験手順や着眼点	
	破壊断面や各層の状態の見方	H：損傷原因の推定	
3	舗装体ブロックの採取方法、観察方法	F：採取したブロック・コアの判定	a：ディスカッション
	色水試験の観察方法	H：損傷原因の推定	
4	採取したコアからの分析方法と着眼点	F：採取したブロック・コアの判定	a：ディスカッション
	開削部分の状態の見方と早期劣化要因への紐づけ方	H：損傷原因の推定	
	適切な破壊調査の規模	G：開削調査の試験手順や着眼点	
5	舗装各層における損傷の発生形態	H：損傷原因の推定	a：ディスカッション
6	切り取りブロックからの損傷の進展や、劣化原因推察の着眼点	H：損傷原因の推定	a：ディスカッション
7	開削断面を確認する際の着目点	G：開削調査の試験手順や着眼点	a：ディスカッション
8	採取したコアからの分析方法	F：採取したブロック・コアの判定	b：図表作成等
	適切な破壊調査の規模や手順	G：開削調査の試験手順や着眼点	
	色水試験の観察方法	G：開削調査の試験手順や着眼点	
9	採取したコアやブロックの観察の仕方	F：採取したブロック・コアの判定	a：ディスカッション
	破壊調査を行った際の断面や各層の状態の見方	G：開削調査の試験手順や着眼点	
10	層間剥離が発生すると、基層以下で交通荷重を支持するという知識	H：損傷原因の推定	b：図表作成等
合計		分類数 F:6 G:7 H:6	回答数 a:7 b:3

ステップ 4：報告書の作成で得られた知識（設問 7）に対する回答を表-3.6 に示す。設問 7 に対する回答は、「分類 I：劣化要因とそれに対応した詳細調査方法」，「分類 J：再発防止のための修繕方法」，「分類 K：舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定」の 3 つに分類できた。分類 I は 9 人と最も多く，分類 J が 7 人，分類 K が 6 人であった。分類 I は，「ステップ 1：劣化要因の推定」，「ステップ 2：詳細調査（非破壊）」，「ステップ 3：詳細調査（非破壊）」で得られた形式知が，「ステップ 4：報告書の作成」において「連結化」された結果であり，分類 J と分類 K は，ステップ 2 とステップ 3 で得られた形式知がステップ 4 で「連結化」されて得られたと考えられる。

表-3.6 回答のまとめ（設問 7）

回答者	設問7の回答	分類
1	劣化推定から試験調査と結果考察までの流れが整理できた	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
2	現場踏査と非破壊調査と破壊調査の結果からの適切な修繕方法の考え方	J:再発防止のための修繕方法
	劣化要因を把握するうえでの適切な詳細調査方法の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
	断面や各層の状態からの劣化要因の考え方	K:舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定
3	修繕方法の立案	J:再発防止のための修繕方法
	劣化要因を把握するうえでの適切な詳細調査方法の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
4	診断結果からの適切な修繕方法の考え方	J:再発防止のための修繕方法
	劣化要因を把握するうえでの適切な詳細調査方法の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
	コア採取およびFWDの結果からの劣化要因の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
5	診断結果に対応した措置工法	J:再発防止のための修繕方法
	舗装各層の診断に必要な視点	K:舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定
	表層とそれ以下の層損傷の関係性	K:舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定
6	適切な修繕方法や予防保全の考え方	J:再発防止のための修繕方法
7	診断結果から修繕方法の提案の方法	J:再発防止のための修繕方法
	調査結果からの分析方法、分析に基づく劣化要因の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
8	診断結果からの適切な修繕方法の考え方	J:再発防止のための修繕方法
	劣化要因を把握するうえでの適切な詳細調査方法の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
	断面や各層の状態からの劣化要因の考え方	K:舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定
9	劣化要因を把握するうえでの適切な詳細調査方法の考え方	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
	断面や各層の状態からの劣化要因の考え方	K:舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定
10	路盤に水を入れないという基本的な考え方や簡単に手を付けられない路盤路床から強固な設計にしていこうという考え方	K:舗装の損傷状態に基づく劣化要因推定
	効果的な詳細調査の実施方法	I:劣化要因とそれに対応した詳細調査方法
合計		分類数 I:9 J:7 K:6

本プログラムで得られた知識の活用に関する（設問 8）に対する回答を表-3.7 に示す。得られた回答は、所属組織における同種の診断業務、後進の育成、診断技術の研究開発への活用などの「分類 L：組織内での活用」と「分類 M：個人の技術向上」の 2 つに分類できた。回答者全員（10 人）の回答に分類 L が含まれることから、本プログラムで得られた新たな形式知は組織で活用・共有される「内面化」に至ったと考えられる。また、後進の育成や新入社員研修等でも活用しているとの回答があったことから、本プログラムに参加した技術者だけでなく、その技術者が所属する組織の若手技術者にも有効であることが分かった。得られた知識（形式知）は新たな暗黙知を生み出し、今後ナレッジマネジメントを継続することによって、組織全体の技術レベル向上へと繋がることが期待される。

表-3.7 回答のまとめ（設問 8）

回答者	設問8の回答	分類
1	今後業務のための育成	L:組織内での活用
	舗装診断方法について	L:組織内での活用
2	後進の育成	L:組織内での活用
	同様の診断業務	L:組織内での活用
	資格試験	M:個人の技術向上
3	調査、診断業務	L:組織内での活用
	資格試験に向けての学習	M:個人の技術向上
4	後進の育成	L:組織内での活用
5	教育研究への事例活用	L:組織内での活用
	これからの舗装診断技術の開発	L:組織内での活用
6	新入社員研修の講師	L:組織内での活用
	研究	L:組織内での活用
7	日常の診断業務	L:組織内での活用
	資格試験	M:個人の技術向上
8	社内への情報共有	L:組織内での活用
	日常の診断業務	L:組織内での活用
9	後進の育成	L:組織内での活用
	同様の診断業務	L:組織内での活用
10	舗装維持修繕計画策定業務における自治体との打ち合わせの場面	L:組織内での活用
合計		分類数 L:16 M:3

以上のように、アンケート調査の結果から、本プログラムでは、ステップ 1～4 の過程で「共同化」「表出化」「連結化」が着実に進められて新たな形式知が形成され、その後、所属組織内で活用・共有される「内面化」に至ったことが明らかになったことから、本プロジェクトは、参加した若手技術者のみならず、彼らが所属する組織の若手技術者育成にとっても大きな効果があったと言える。

なお、第 1 回アンケート調査の自由意見で寄せられたように、プログラムの初期に若手技術者自身が知識を如何に整理しておくか、プログラムを通じて得た知識を如何に自身のノウハウに変えるかが非常に重要であると考えます。また、プログラムの実践の場が業界全体の横断的な組織であった場合は効率よく共同化する必要があり、そのためには、共同化の前に自身の知識や意識を整理することも必要と考えます。さらに、他人から新たに得られた知識やノウハウを自身や自社のものに価値を創出するためには、自身が成長し成熟化することも必要である。そのため、今回のように横断的な組織で実道という場において技術者を育成するためには、ナレッジマネジメントモデルを事前に技術者に示すことが重要と考えますそのうえで、SECI モデルの共同化より前に自分の暗黙知を提供するために整理することが必要であると考えます。今回は、本プログラムの実施に当たって若手技術者に SECI モデルのことは一切周知しなかったが、事前に SECI モデルの仕組みや詳細調査の各ステップとの対応を説明することで、効果がさらに高まると思われる。これは、若手技術者のみならず、ナレッジホルダである熟練技術者にとっても同様であり、事前に SECI モデルを理解することで、各ステップにおいて自分の果たすべき役割を強く意識し、若手技術者に技術を伝えることができる。

以上より、SECI モデルは道路舗装業界の人材育成としても非常に有効であることが分かった。今後、外国人労働者や ICT 技術により人材不足が解消しても、建設産業が人々の生活に利便性や安心感を与え高度経済成長期から日本の屋台骨を支える業種であることは不変である。今後、限りある担い手で生産性を向上させるためにも、ナレッジマネジメントモデルを活用した人材育成は必要であると考えます。

3.4 若手技術者育成プログラムの普及

3.4.1 技術者の現状

人口問題研究所の報告書¹⁸⁾によると、北海道では、2045年の人口は2015年の74.4%である400万人にまで減少し、人口が5,000人以下の市町村の割合は2045年には67%（全国平均26.4%）に達し、他地域よりも過疎化の進行が早いと予測されている。さらに、65歳以上の人口割合が50%以上となる市町村は2045年には44.7%（全国平均27.7%）まで増加すると予測されている。このように、北海道では過疎化と高齢化（生産年齢人口の減少）が急速に進行すると予想され、若手技術者の獲得と育成が喫緊の課題となっている。そこで、北海道内の中小規模の舗装会社を対象に、所属する技術者の現状や若手技術者の育成方法に関するアンケート調査を実施した。

アンケート調査は、2020年4月10日～4月24日に実施した。回答者は、一般社団法人北海道舗装事業協会（<https://hoso-jigyo.or.jp/>）に所属し、道内に本社を構える舗装会社26社である。アンケートの質問事項と選択肢を表-3.8に示す。

表-3.8 技術者の現状や若手技術者の育成方法に関するアンケート調査の項目

設問	質問事項および選択肢	
1	質問事項	技術系従業員の年齢内訳
	選択肢	①25歳未満
		②25歳以上30歳未満
		③30歳以上35歳未満
		④35歳以上40歳未満
		⑤40歳以上45歳未満
2	質問事項	⑥45歳以上50歳未満
		⑦50歳以上55歳未満
		⑧55歳以上60歳未満
		⑨60歳以上65歳未満
		⑩65歳以上
	選択肢	
3	質問事項	技術系従業員数の現状
	選択肢	①非常に不足
		②少し不足
		③ちょうどよい
		④少し多い
		⑤多すぎる
4	質問事項	過去5年間の技術系従業員の募集人数と採用人数 （高卒・大卒・社会人・その他）
	選択肢	①2015年
		②2016年
		③2017年
		④2018年
		⑤2019年
5	質問事項	実施している若手技術者の育成方法について（複数回答可）
	選択肢	①メンター制度
		②ブラザー・シスター制度
		③OJT
		④特になし
		⑤その他
6	質問事項	若手技術者育成のための社外プログラムへの参加について
	選択肢	①参加させたい
		②参加させたくない
		③どちらとも言えない
		④参加させたい社外プログラムの形式について
		①土木や舗装等の基本的な勉強会
7	選択肢	②舗装開削調査などの現場を活用したプログラム
		③土木や舗装等の資格対策講習会
		④他者技術者との交流の場
		⑤その他

アンケートに回答した 26 社と、それを札幌圏（札幌市内に本社を置く）9 社と札幌圏外（札幌市外に本社を構える会社）17 社に分類した場合の技術者の年齢構成を図-3.12 に示す。26 社全体では、40 歳未満の若手技術者の割合は 27%であるのに対し、50 歳以上は 49%、60 歳以上は 23%にも及ぶ。5 年以内に 60 歳以上の熟練技術者が定年を迎えることを考えると、それまでに入職者を獲得するとともに、熟練技術者から若手技術者に技術を伝えなければならない。また、札幌圏と札幌圏外を比較すると、札幌圏外の方が若手技術者は少なく、技術者の高齢化が進んでいることが分かる。

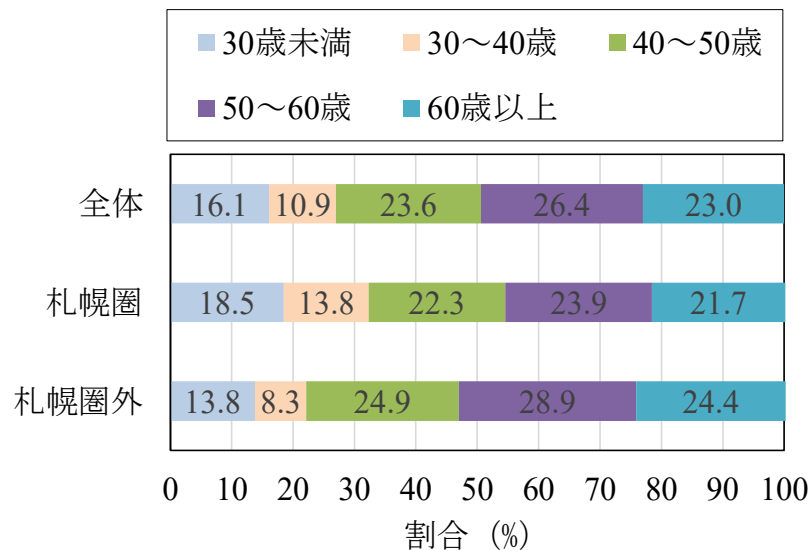


図-3.12 技術者の年齢構成

次に、現状所属している技術者数に関する回答を図-3.13 に示す。札幌圏外では「満足している」と回答した会社が僅かにあるが、札幌圏・札幌圏外いずれでも、「不足している」と回答した割合は 90%を超える。

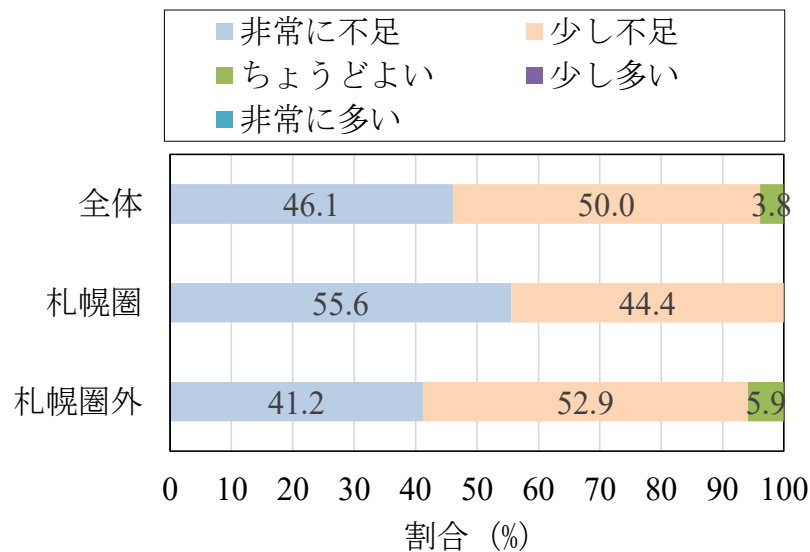


図-3.13 技術者の数

さらに、「ちょうどよい」「少し不足」「非常に不足」と回答した会社の技術者の年齢構成（平均）を図-3.14に示す。技術者数は、「非常に不足」>「少し不足」>「ちょうどよい」の順であり、規模が大きい会社ほど技術者不足を感じている。また、「不足している」と回答した会社では、若手技術者の中でも、特に30～40歳の割合が少ないことも大きな特徴である。

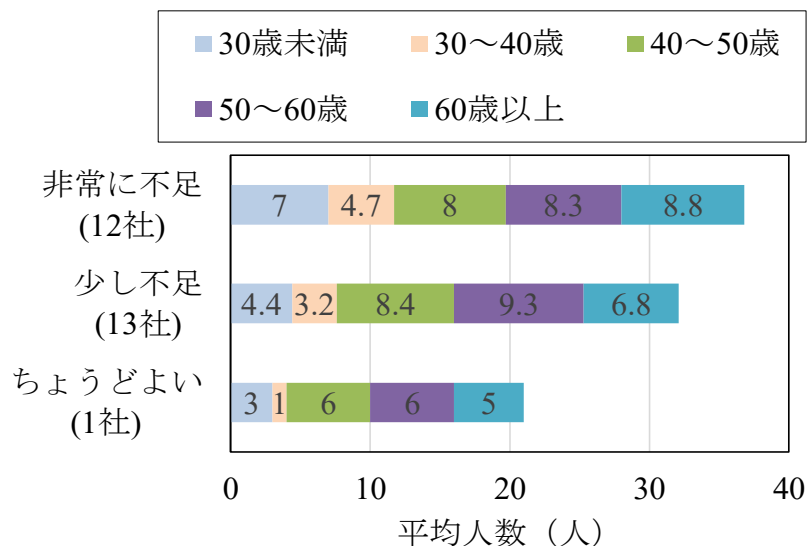


図-3.14 技術者の年齢構成の比較

2015～2019年の5年間に於ける、募集人数と採用人数の合計を図-3.15に示す。募集人数は、2015～2017年はほぼ同じであったが、2018年からは急増している。これに応じて採用人数も2017年以降は右肩上がりで増えているが、募集人数との間には依然として大きな開きがある。採用人数の内訳を見ると、近年は高校・大学の新卒採用では募集枠を満たすことができないため、社会人の中途採用とその他（外国人労働者・再雇用）が増加している。以上のことから、北海道内の中小舗装会社は慢性的な技術者不足に直面しており、若手技術者の獲得も目標に達していないことが明らかになった。

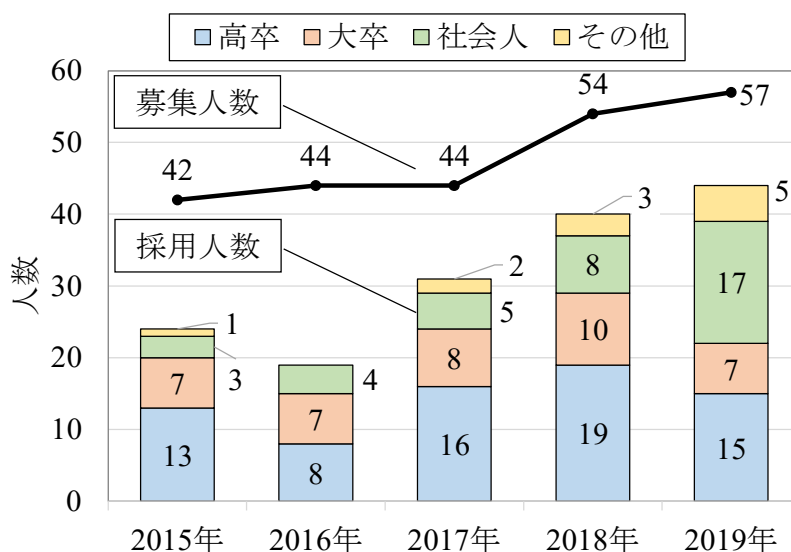


図-3.15 募集人数と採用人数

3.4.2 若手技術者の育成

実施している若手技術者の育成方法について尋ねた結果を図-3.16に示す。若手技術者の成長と定着を目的とした育成制度である「メンター制度」や「ブラザー・シスター制度」を採用している会社は7社（約27%）と少なく、「OJT」を導入している会社が15社（約58%）で最多となった。これは、技術者不足に直面している会社が現場等での即戦力を欲しており、定着よりも業務習得の早期化に重きを置かざるを得ないためと考えられる。また、次いで多かったのは「特になし」であり、自社で技術者の育成方法が確立していない会社も存在することが分かった。

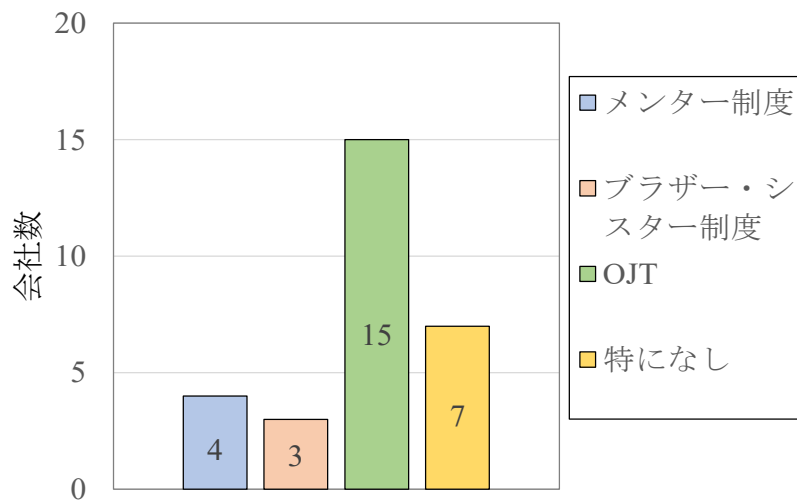


図-3.16 若手技術者の育成方法

若手技術者育成のための社外プログラムが開催された場合の参加意思について尋ねたところ、20社（約77%）が参加したいと回答した。さらに、その20社に対して、どのような社外プログラムを希望するか尋ねた結果を図-3.17に示す。土木・舗装に関する勉強会や資格取得のための講習会といった座学を中心とした従来型のプログラムを希望する声が最も多かったものの、現場（実道）を活用したプログラム13社（65%）や他社の技術者との交流の場5社（25%）を希望する会社もあった。

地方の舗装会社における人材育成の現状をアンケートの結果から整理することにより、企業では高齢化が進み入職者が十分に確保できておらず、技術者が不足していることが分かった。さらに、自社で技術者の育成手法が確立しておらず、その解決策として、講習会や現場を活用した技術の伝承に資するプログラムが望まれていることが分かった。以上より、地方の舗装会社では、現場および他の技術者との交流を含有するプログラムに対するニーズがあると言える。

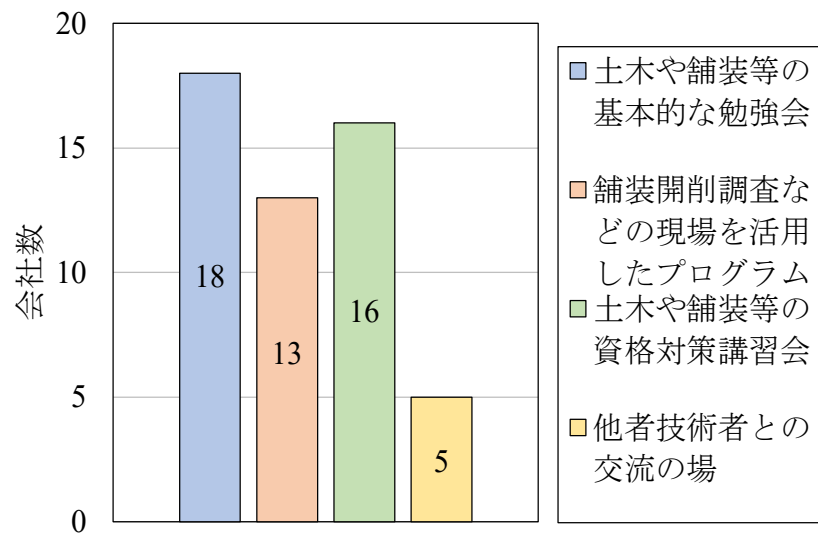


図-3.17 希望する社外プログラム

3.5 第3章の結論

第3章では、舗装の早期劣化区間における詳細調査において実施した、若手舗装技術者の育成を目的としたプログラムに関して述べた。本プログラムにはナレッジマネジメントの SECI モデルを導入し、若手技術者は熟練技術者と共に詳細調査の経験を積むことで暗黙知を獲得し（共同化）、各種調査結果の分析・考察を通してそれを形式知に変換し（表出化）、報告書を作成することで新しい形式知を得る（連結化）という過程を経ることで、若手技術者の育成に効果があることを明らかにした。また、北海道の中小規模の舗装会社を対象に若手技術者の現状と育成方法に関するアンケート調査を行ったところ、本プログラムに対するニーズがあることが分かった。得られた結論は以下の通りである。

- 本プログラムは、ステップ1：現場踏査、ステップ2：詳細調査（非破壊調査）、ステップ3：詳細調査（破壊調査）、ステップ4：報告書の作成、の4つのステップで構成される。ステップ1～3はSECIモデルの共同化と表出化の過程に対応し、ステップ4はステップ1～3の表出化で得られる形式知を統合し、新しい形式知を得る連結化に対応する。
- 詳細調査終了後に行ったアンケート調査を分析した結果、本プログラムでは、ステップ1～4の過程で「共同化」「表出化」「連結化」が着実に行われて新たな形式知が形成されたこと、その後、得られた形式知が所属組織内で活用・共有される「内面化」に至ったことが確認できた。したがって、本プロジェクトは、参加した若手技術者のみならず、彼らが所属する組織の若手技術者育成にとっても大きな効果をもたらしたことが分かった。
- 北海道内の舗装会社を対象に、所属する技術者の現状や若手技術者の育成方法に関するアンケート調査を実施した。その結果、回答した会社の多くが慢性的な技術者不足に直面しており、若手技術者の獲得も目標に達していないことが分かった。また、自社において若手技術者の育成が難しいことから、若手技術者育成のための社外プログラムを求めている会社が多いこと、さらに、現場を活用したプログラムや他社の技術者との交流の場を希望する会社もあったことから、過疎化と高齢化（生産年齢人口の減少）が急速に進行する地方では本プログラムに対するニーズがあることが分かった。なお、今回のニーズ調査は北海道内の舗装会社を対象としたものであるため、得られた結果が全国的なものであるのかを検討するために他の地域においても調査を行う必要がある。

3.6 第3章の参考文献

- 1) 社会資本整備審議会 道路分科会 道路メンテナンス技術小委員会：道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて，p2-4，2013年6月．
- 2) 秋葉正一：舗装の点検要領とマネジメント，舗装，Vol.52,No.1,pp.3-4，2017年．
- 3) 国土交通省 道路局：舗装点検要領，2016年10月．
- 4) 武藤聡，久保和幸，藪雅行：舗装点検要領の策定について，舗装，Vol. 52, No. 1, pp. 11-15，2017年．
- 5) 国土交通省 道路局：道路メンテナンス年報，p51-54，2021年8月．
- 6) 公益社団法人日本道路協会：舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針，2018年9月．
- 7) 総務省統計局，労働力調査，2019年．
- 8) 姫野賢治：舗装診断研究会について，舗装，Vol.46,No.7,pp.3-5，2011年．
- 9) 中村博康，富山和也，城本政一，増戸洋幸，渡邊一弘：IRI 共通試験（TRUE プロジェクト）実施報告，アスファルト，第57巻，230号，2014年．
- 10) 中村博康，富山和也，城本政一，増戸洋幸，渡邊一弘：IRI 共通試験（TRUE プロジェクト）実施報告，アスファルト，第57巻，230号，2014年．
- 11) 富山和也，中村博康，増戸洋幸，城本政一，渡邊一弘：共通試験結果に基づく路面プロファイラの有効性とその検証方法，土木学会論文集 E1, Vol.71, No.3, pp9-16，2015年．
- 12) 中村博康，富山和也，渡邊一弘，城本政一，増戸洋幸，亀山修一：IRI 共通試験における基準プロファイルの測定方法および路面プロファイラの有効性，舗装，Vol.51, No.6,pp3-8,2016年6月．
- 13) 富山和也，増戸洋幸，中村博康，城本政一，森石一志，亀山修一：IRI 共通試験における基準プロファイルの測定方法，舗装，Vol.54,No.1,pp.9-14，2019年．
- 14) 富山和也，中村博康，増戸洋幸：IRI 共通試験における計測機器の変遷と調和，舗装，Vol.56,No.3,pp.31-36，2021年．
- 15) 橋本鋼太郎：変化する時代の土木のあり方，公益社団法人土木学会 土木学会誌 論説，2009年12月．
- 16) 野中郁次郎，梅本勝博：知識管理から知識経営へ，人工知能学会誌 Vol.16, No.1, pp4-14,2001年1月．
- 17) 国土交通省：「総合評価方式の活用・改善等による品質確保に関する懇談会」，2016年3月1日．
- 18) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口，人口問題研究資料第340号，2018年12月25日．

第 4 章

結論

第4章 結論

厳しい財政状況や人材不足にある舗装分野において、過去に整備された膨大な社会資本を維持し続けるためには、効率的な維持管理に取組み、点検→診断→措置→記録のメンテナンスサイクルの構築において、適切な診断を行うことが重要である。

本研究では、適切な診断には、診断に必要な詳細調査の効率化等の技術力をより高める必要があり、加えて、診断に必要な専門的な知識や経験を有した技術者が増えることで、舗装の損傷の要因を総合的に特定する力（舗装診断力）が向上し、それによってより適切な診断や措置が可能となり、延いては長寿命化につながると考えた。そのため、舗装診断力を向上させることを目的に、診断の効率化による技術力の高度化を検討しつつ、併せて技術の伝承・普及も検討した。

●道路舗装の診断技術の高度化（第2章）

- 1) 微細なひび割れに着目し、ひび割れからその特徴量（交点 N 、分岐数 M 、総延長 L 、総面積 S ）を求め、それらと $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC との関係、および特徴量同士の関係について分析した。その結果、 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC とひび割れ特徴量（交点 N 、分岐数 M 、総延長 L 、総面積 S ）との間にはほとんど相関は見られなかった。一方、ひび割れ特徴量同士の関係では、ひび割れ総延長 L と交点数 N 、分岐数 M 、ひび割れ総面積 S の間に強い相関が見られた。
- 2) $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを含んだひび割れ率 MC と D_0 の間には相関は見られなかったが、ひび割れ総延長 L と D_0 の R^2 値は 0.54 となり、両者には強い相関が見られた。また、ひび割れ総延長 L を算出する対象のひび割れの幅を $W \geq 1\text{mm}$ とすると、 R^2 値が低下したことから、 $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れを計測することで、より適切に舗装の支持力を評価できることを示唆していると考えられる。
- 3) Pave-CAD によって、異なる解析者が同一の路面画像を用いひび割れを検出した際の抽出結果の違いや学習過程を経ることによる抽出精度の変化を検討した結果、微細なひび割れの抽出を行う際には、解析者によってバラツキが生じることが分かった。さらに、学習過程を設け異なる解析者間で認識のすり合わせを行うことで、抽出するひび割れの精度が向上しバラツキが収束するだけでなく、学習過程を経ることによってバラツキが収束するまでに必要な解析の回数も少なくなることが分かった。加えて、ひび割れ総延長 L が長いほどひび割れ総延長 L の標準偏差も大きくなることが分かった。
- 4) $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多い現場においても、ひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係性を整理した。その結果、 $W \geq 2\text{mm}$ のひび割れが多い現場においても、 W が狭くなるほどひび割れ総延長 L と D_0 たわみ量の関係性は高くなることが確認された。

例え $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れであっても、雨水が浸入し路盤や路床の脆弱化をもたらす可能性があることから、従来のひび割れ評価に用いられている $W \geq 1\text{mm}$ のひび割れのみを対象とするのではなく、加えて $W < 1\text{mm}$ の微細なひび割れも評価対象とすることが望ましい。また、舗装の支持力評価の観点から、評価指標としては、ひび割れ率ではなくひび割れ総延長 L を用いることが望ましい。

●道路舗装の診断技術の普及（第3章）

- 若手技術者の育成を目的としたプログラムは、ステップ1：現場踏査、ステップ2：詳細調査（非破壊調査）、ステップ3：詳細調査（破壊調査）、ステップ4：報告書の作成、の4つのステップで構成され、ステップ1～3はナレッジマネジメント（SECIモデル）の共同化と表出化の過程に対応し、ステップ4はステップ1～3の表出化で得られる形式知を統合し、新しい形式知を得る連結化に対応する。
- 詳細調査終了後に行ったアンケート調査を分析した結果、本プログラムでは、ステップ1～4の過程で「共同化」「表出化」「連結化」が着実に進められて新たな形式知が形成されたこと、その後、得られた形式知が所属組織内で活用・共有される「内面化」に至ったことが確認できた。したがって、本プロジェクトは、参加した若手技術者のみならず、彼らが所属する組織の若手技術者育成にとっても大きな効果をもたらしたことが分かった。
- 北海道内の舗装会社を対象に、所属する技術者の現状や若手技術者の育成方法に関するアンケート調査を実施した結果、回答した会社の多くが慢性的な技術者不足に直面しており、若手技術者の獲得も目標に達していないことが分かった。
- 自社において若手技術者の育成が難しいことから、若手技術者育成のための社外プログラムを求めている会社が多いこと、さらに、現場を活用したプログラムや他社の技術者との交流の場を希望する会社もあったことから、北海道内の舗装会社では本プログラムに対するニーズがあることが分かった。

今回、若手技術者の育成を目的とした適用したナレッジマネジメント（SECIモデル）によるプログラムは、今後、所属する会社等において実践することで内面化が行われ、個人と組織の知的財産である新たな暗黙知が生み出されると期待できると考える。

●まとめ

厳しい財政状況や人材不足にある舗装分野において、今後も長寿命化に向けて効率的なメンテナンスサイクルを構築し続けることが重要である。そのため、本研究で得られた診断技術の高度化に関する知見が、効率的かつ効果的なメンテナンスサイクルの構築に資するものと考ええる。

そして、診断技術の高度化に加えて、本研究で得られた技術の普及に関する知見によって診断に必要な専門的な知識や経験を有した技術者が増えることで、舗装の損傷の要因を総合的に特定する力（舗装診断力）が向上し、それによってより適切な診断や措置が可能となり、延いては早期劣化の再発防止や長寿命化につながると考える。

●今後の課題と展開

診断技術の高度化に関して、本研究では限定的な現場での検証による結果であるため、今後はより多くのデータを蓄積し、交通量や地域条件、ひび割れの発生要因、経年数等の視点で整理する必要があると考える。

また、道路舗装の診断技術の普及に関して、本プログラムに対するニーズ調査は北海道内の舗装会社を対象としたものであるため、得られた結果が全国的なものであるのかを検討するために他の地域においても調査を行う必要もあると考える。

なお、今後の展開として、高度化した技術を普及させることで、より診断力の向上につながると考えられる。

謝 辭