

博士論文

高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価の精度向上に
関する研究

(Study on Improvement of Accuracy concerning Inspection Technique
and Health Evaluation for Expressway Tunnel Lining)

2020年3月

海 瀬 忍

山口大学大学院創成科学研究科

目 次

第1章 緒論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 道路トンネルの維持管理における基準類.....	3
1.3 道路トンネルの維持管理の流れ.....	3
1.4 道路トンネルの健全度診断.....	5
1.5 高速道路トンネルの維持管理.....	7
1.5.1 点検 A.....	11
1.5.2 点検 B.....	11
1.5.3 ひびわれ指数 TCI.....	15
1.6 本研究の目的.....	18
1.6.1 トンネル覆工表面画像撮影技術による点検技術の精度向上の可能性に関する検証....	18
1.6.2 既設トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証.....	18
1.6.3 トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証.....	19
1.7 本論文の構成.....	20
参考文献.....	21
第2章 トンネルの点検技術に関する既往研究.....	22
2.1 既存のトンネル点検技術の概要.....	22
2.2 新規開発されたトンネル点検技術の概要.....	23
2.2.1 走行型覆工画像撮影技術.....	23
2.2.2 覆工の変形測定技術.....	26
2.2.3 維持管理システム.....	26
2.2.4 ひびわれの自動抽出技術.....	28
2.2.5 打音点検に代わる点検手法.....	30
2.3 海外における点検技術.....	35
2.3.1 海外における点検状況.....	35
2.3.2 非破壊検査の実施例.....	36
2.4 高速道路トンネルにおけるトンネル点検技術に関する既往研究.....	38
2.4.1 トンネル点検手法に関する既往研究.....	38
2.4.2 トンネル覆工コンクリートの健全度評価手法に関する既往研究.....	39
2.5 まとめ.....	41
参考文献.....	42

第3章 トンネル覆工表面画像撮影技術による	
点検技術の精度向上の可能性に関する検証.....	45
3.1 目的.....	45
3.2 覆工画像による近接目視点検の代替手法の検討.....	45
3.2.1 検討イメージ.....	45
3.2.2 実施方針.....	46
3.2.3 実施内容.....	46
3.2.4 試行試験概要.....	50
3.2.5 試行試験実施結果.....	52
3.3 ひびわれ検出精度（評価項目 I）検証.....	57
3.3.1 ひびわれ検出精度検証結果.....	57
3.4 漏水等（評価項目 II）、特記事項（評価項目 III）検証.....	67
3.5 まとめ.....	69
参考文献.....	71
第4章 既設トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証.....	72
4.1 目的.....	72
4.2 高速道路トンネルの覆工点検結果の整理.....	72
4.2.1 対象トンネル.....	72
4.2.2 外力評価点およびはく落評価点.....	73
4.3 評価点および健全度ランクの分析.....	77
4.3.1 点検 A、B の評価点のずれ.....	77
4.3.2 健全度ランク.....	85
4.4 閾値の検証.....	86
4.4.1 点検 A の結果に基づく点検 B の実施状況.....	86
4.4.2 外力評価点の閾値の妥当性.....	88
4.4.3 はく落評価点の閾値の妥当性.....	90
4.5 まとめ.....	98
4.5.1 点検結果の整理.....	98
4.5.2 評価点および健全度ランク分析.....	98
4.5.3 閾値の検証.....	98
参考文献.....	100
第5章 トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証.....	101
5.1 目的.....	101
5.2 ひびわれ進行性の評価法の検討.....	101

5.2.1	進行性の評価フロー.....	101
5.2.2	F_0 の変動要因.....	102
5.2.3	進行性の評価方針.....	104
5.2.4	点検間隔の違いによる差の補正.....	105
5.2.5	ΔF_0 算出における誤差の補正.....	105
5.2.6	ひびわれの抽出による誤差の補正.....	107
5.3	点検データの検証.....	110
5.4	まとめ.....	114
	参考文献.....	115
第6章	結 論.....	116
6.1	本研究のまとめ.....	116
6.2	トンネル覆工表面画像撮影技術および トンネル健全度の定量的評価の適用と今後の課題.....	119
6.2.1	トンネル覆工表面画像撮影技術による点検技術の精度向上の可能性に関する検証...	120
6.2.2	既設トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証.....	121
6.2.3	トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証.....	122
6.3	目標とする点検技術および健全度評価.....	122
6.4	おわりに.....	124
	参考文献.....	125
謝 辞	126

第1章 緒論

1.1 研究の背景

わが国の道路トンネルは、高度成長期における道路整備の進捗とトンネル技術の進歩とともに建設が進み、**図-1.1**に示すとおり1960（昭和35）年以降にその資産数量が大幅に増加してきている。その資産数量は2017（平成29）年3月末時点で約10,400本¹⁾、総延長約4,600km¹⁾に達している。建設年次で見ると、建設後50年を経過する道路トンネルの割合は、現在のところ約20%であるが、10年後には34%となり、今後、1960（昭和35）年以降の資産数量が大幅に増加する年次に本格的に入ってくることから老朽化が早いペースで進んでいくことは明らかである。今後も、道路整備にともないトンネル延長や本数が増加する中で、これら膨大なトンネル資産を健全かつ安全に運用するためには、維持管理を適切に行う必要があるため、維持管理計画の立案にあたっての基礎となる点検については高精度で効率的な手法（点検手法、点検結果の評価手法）の開発が強く望まれている。

道路トンネルを管理者別、道路種別にみると、**図-1.2**、**図-1.3**の示すとおり、管理者別では高速道路会社が18%、道路種別で高速自動車国道が15%となる。また、高速道路は、**図-1.4**に示すとおり都道府県間・ブロック間の輸送トンキロ（全国）ベースで約7割と日本国内の自動車による交通物流の重要な位置を占め、経済活動に大きく貢献する役割を担っており、高速道路のトンネルが重要なことを示している。また、管理者別のトンネル延長分布を見ると、トンネル延長1,000m以上のトンネルは**図-1.5**に示すとおり国土交通省、高速道路会社で多くなっており、特に高速道路会社においては約30%以上がトンネル延長1,000m以上となっており、防災施設の設置状況や延長が長いことによる車線規制の問題等によりトンネルの維持管理がより難しい課題となっている。

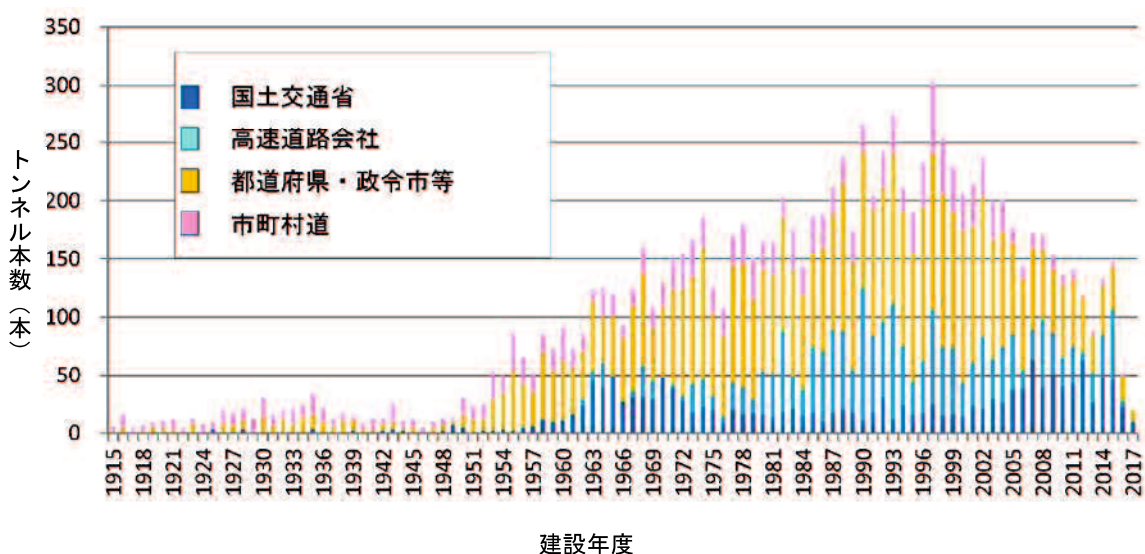


図-1.1 建設年度別道路トンネル数¹⁾

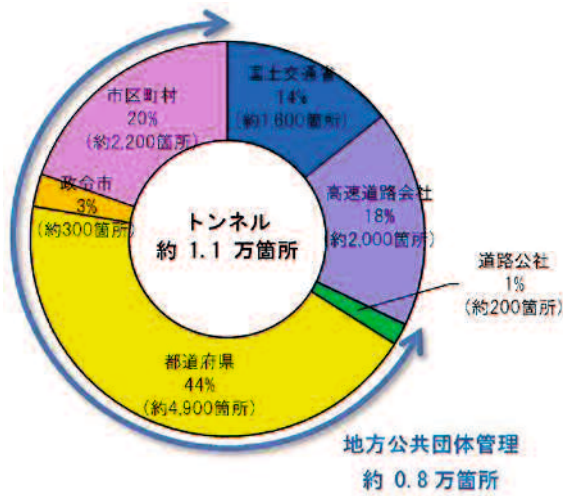


図-1.2 道路管理者別トンネル数¹⁾

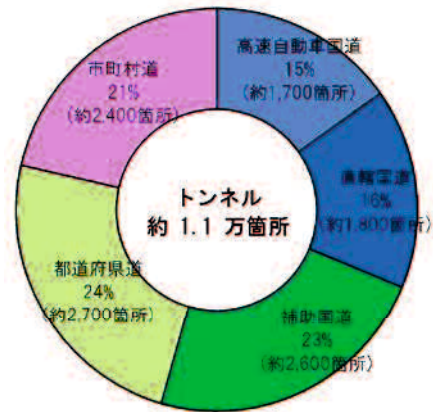


図-1.3 道路種別トンネル数¹⁾

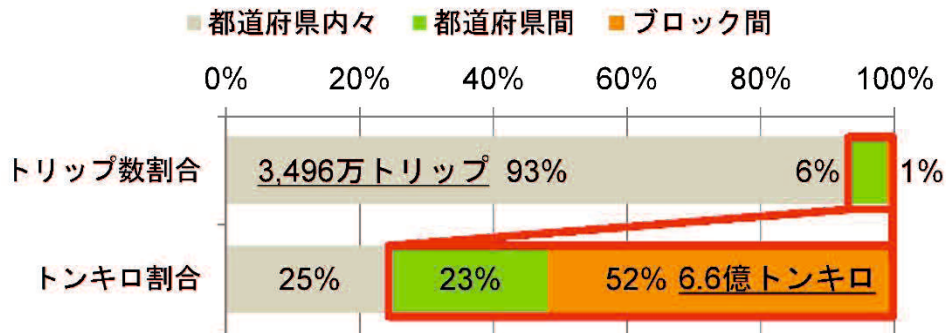


図-1.4 自動車による貨物の輸送状況²⁾

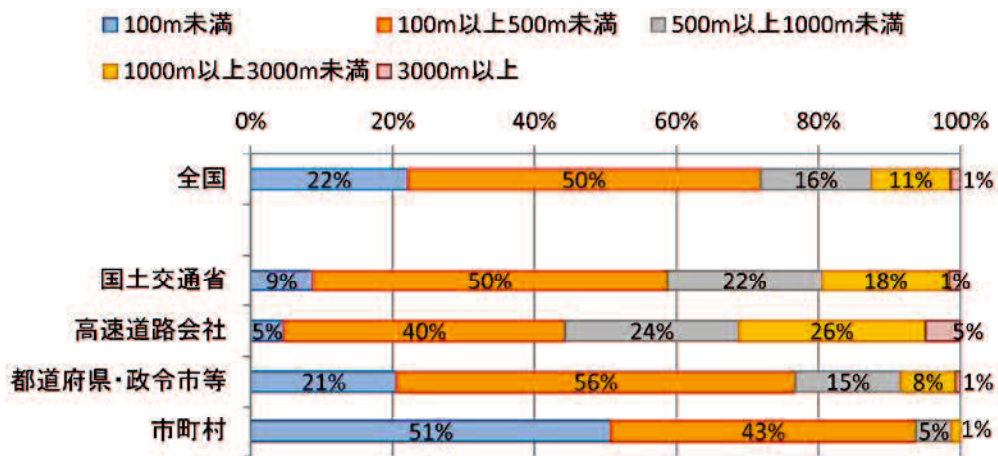


図-1.5 管理者別のトンネル延長分布¹⁾

1.2 道路トンネルの維持管理における基準類

道路トンネルの維持管理を行ううえでの基準類として、日本道路協会より、1993（平成5）年に、これまでの経験と研究成果を結集して「道路トンネル維持管理便覧」が刊行された。その後、2012（平成24）年12月の笹子トンネルの天井板崩落事故の発生を受け、2014（平成26）年6月に「道路トンネル定期点検要領【全国版】【直轄版】」が国土交通省より発行され、点検手法や点検頻度等が具体的に定められた。この定期点検要領を補完することを基本に、トンネル本体工および付属施設にそれぞれの最新の知見および事例を盛り込み、2015（平成27）年6月に「道路トンネル維持管理便覧（本体工編）」、2016（平成28）年11月に「道路トンネル維持管理便覧（付属施設編）」として「道路トンネル維持管理便覧」が改正された。また、2014年の発刊から5年が経ち、1回目の点検サイクルの終了に合わせて、2019（平成31）年2月に道路トンネル定期点検要領【全国版】、平成31年3月に道路トンネル定期点検要領【直轄版】の改正が行われた。

1.3 道路トンネルの維持管理の流れ

トンネル構造別では、最も資産量が多い山岳トンネルについてみると、橋梁等他の構造物同様、山岳トンネルも建設の時代から維持管理の時代へと移行しており、トンネルを今後も安全かつ快適に利用できる状態に維持するための技術開発が行われている³⁾。

図-1.6に、国土交通省「道路トンネル定期点検要領」【直轄版】に示される、道路トンネルの定期点検を対象としたメンテナンスサイクルの基本的なフローを示す。定期的な点検により、トンネルの状態を確認し、健全度を判定し、必要により措置し、管理記録を行うことの繰り返しにより、トンネルの維持管理がなされている。なお、点検間隔は1回/5年が基本となっている。

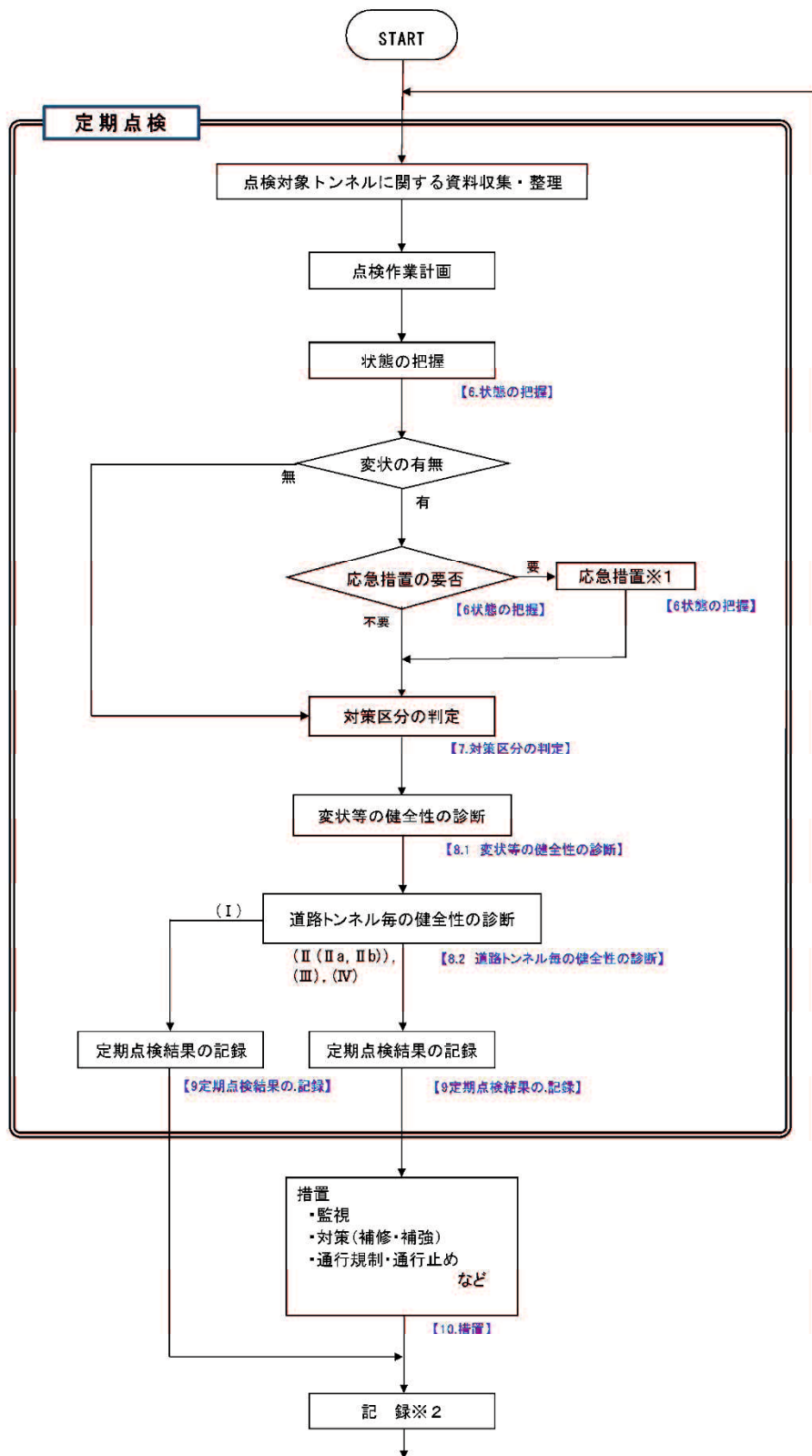


図-1.6 定期点検を対象としたメンテナンスサイクルの基本的なフロー⁴⁾

1.4 道路トンネルの健全性診断

トンネル点検における健全度の診断は、現地で実施された定期点検の結果より、変状ごとに表-1.1に示す対策区分判定を行い、次に変状ごとの健全性診断を表-1.2、表-1.3等を参考に行ったのち、スパン毎およびトンネルごとに表-1.4の判定区分により行うことが、国土交通省「道路トンネル定期点検要領」【直轄版】に示されている。これら表に示されている定義や変状概要は定性的な評価が行われている。また、その点検手法も目視や打音が主体であるため、担当者の経験や判断力に依存する部分がある。

表-1.1 対策区分⁴⁾

判定区分		定義
I		利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態。
II	II b	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態。
	II a	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態。
III		将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、早期に措置を講じる必要がある状態。
IV		利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態。

表-1.2 圧ぎ、ひびわれに対する判定区分⁴⁾

判定区分		変状概要
I		ひびわれが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
II	II b	ひびわれがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	II a	ひびわれがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から措置を必要とする状態
III		ひびわれが密集している、またはせん断ひびわれ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に措置を講じる必要がある状態
IV		ひびわれが密集している、またはせん断ひびわれ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ぎがあり、緊急に措置を講じる必要がある状態

表-1.3 うき，はく離に対する判定区分⁴⁾

判定区分		変状概要
I		ひびわれ等によるうき，はく離の兆候がないもの，またはたたき落としにより除去できたため，落下する可能性がなく，措置を必要としない状態
II	II b	ひびわれ等により覆工コンクリート等にうき，はく離の兆候があり，将来的に落下する可能性があるために，監視を必要とする状態
	II a	ひびわれ等により覆工コンクリート等にうき，はく離の兆候があり，将来的に落下する可能性があるために，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III		ひびわれ等により覆工コンクリート等にうき，はく離の兆候があり，落下する可能性があるために，早期に措置を講じる必要がある状態
IV		ひびわれ等により覆工コンクリート等にうき，はく離の兆候があり，落下する可能性があるために，緊急に対策を講じる必要がある状態

表-1.4 判定区分⁴⁾

判定区分		定義
I	健全	道路トンネルの機能に支障が生じていない状態.
II	予防保全段階	道路トンネルの機能に支障が生じていないが，予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態.
III	早期措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じる可能性があり，早期に措置を講ずべき状態.
IV	緊急措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じている，又は生じる可能性が著しく高く，緊急に措置を講ずべき状態.

1.5 高速道路トンネルの維持管理

東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下“NEXCO”という）が管理する高速道路トンネルは、NEXCO の前身である日本道路公団が名神高速道路 栗東～尼崎間の管理を開始した 1963（昭和 38）年から 2018（平成 30）年 3 月末現在で、**図-1.7** に示す 1,856 本、総延長 1,760km が管理の対象である。これらの膨大なトンネル資産を網羅的にかつ高精度で管理・点検をおこなう統一的な点検手法の確立が喫緊の課題となっている。

そのため、NEXCO が管理する高速道路トンネルの詳細点検は、2012（平成 24）年より、供用前に実施される初期点検以降は、**図-1.8**、**図-1.9** のトンネル詳細点検の流れに示す走行型の覆工表面画像撮影記録に基づく詳細点検が導入された。この詳細点検は、**表-1.5** に示す覆工の健全度ランクによりスパンごとに評価したうえで、問題があると判断されるスパンを抽出する机上点検（以下“点検 A”という）での一次判定を行い、現地での詳細点検（以下“点検 B”という）を行う点検システムである。この詳細は後述する。

しかし、道路法の改正により、2015（平成 27）年からは、近接目視点検の実施が義務付けされたため、現在、点検 A として覆工表面画像撮影記録によりスパンごとに重点点検個所の抽出と覆工の評価を行った上で、点検 B を行うと同時に、現地で近接目視点検を全スパンで実施している。

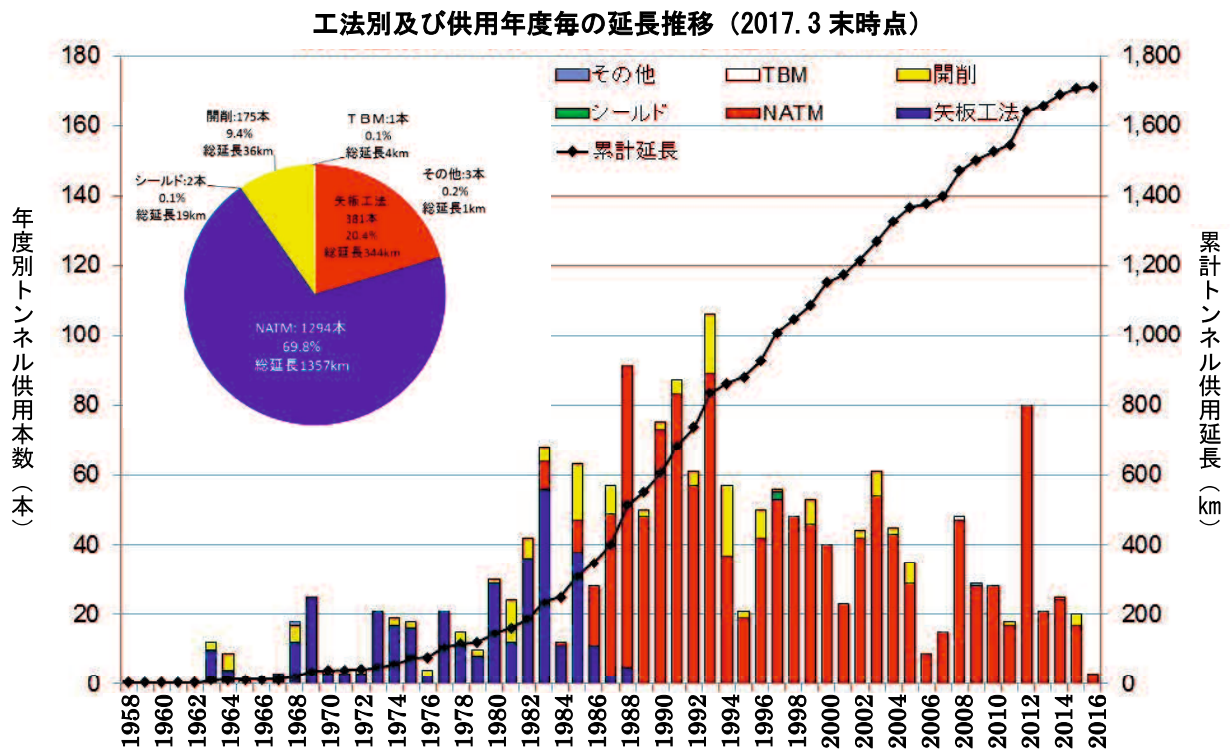


図-1.7 トンネル管理数量の推移（平成 30 年 3 月現在）

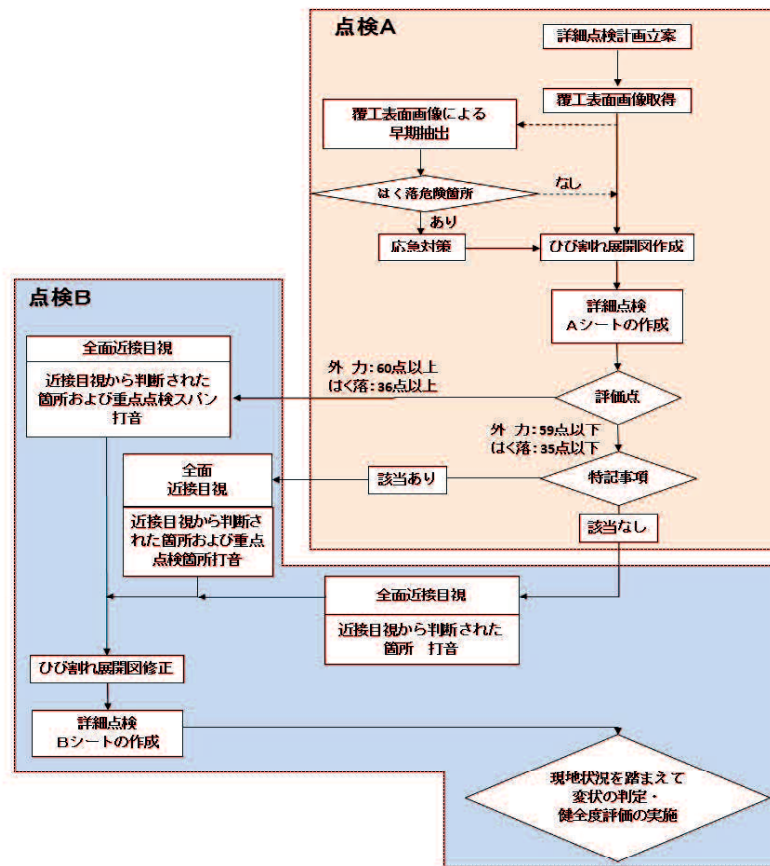


図-1.8 トンネル詳細点検の流れ (その 1) 5)

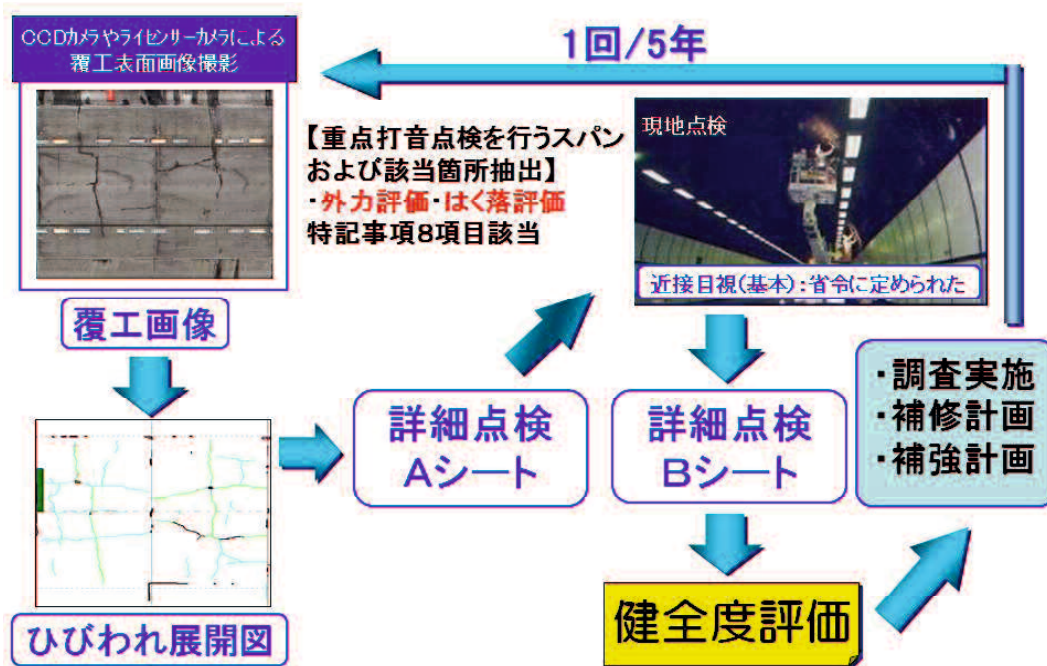


図-1.9 トンネル詳細点検の流れ (その 2)

表-1.5 健全度ランクの標準（トンネル）⁵⁾

点検箇所	変状の種類	評価の標準					
		I	II	III-1	III-2	IV	V
覆工	外力による変状	・変状が無い か、若しくは 軽微なもの ・評価点で 30 点以下	・評価点で 31 ～59 点	・評価点が 60 点以上である が、進行性が 緩やかなもの	・健全度ラ ンク III-1 の状況か ら進行して いるよう にみられ る	・放射状ひ び割れが 見られる ・圧ぎが見 られる ・5mm 以上 の段差、ず れのあるひ び割れが見 られる	・変状の進 行が極めて 著しく みられる
		・進行性が見 られないもの	・継続的に監 視を行う程 度のもの				

トンネル覆工の点検手法は、鉄道系、道路系、水路などの電力系など、トンネルを維持・管理する組織により管理手法が異なる。主に高速道路を管理する NEXCO のトンネルの点検手順は、先に述べたように図-1.9 に概述するようにレーザー、CCD カメラ、ラインセンサーカメラ等による覆工表面画像取得システムによる覆工表面画像撮影記録を基にしている。

覆工表面画像撮影記録から何らかの問題があると判断される箇所およびスパンを表-1.6、表-1.7 に示す特記事項および閾値を用いて、重点点検箇所として抽出する点検 A、そして、点検 A の判定結果に基づき、現地での近接目視点検、打音点検等の重点点検を実施する点検 B により構成されている。他機関の詳細点検においても、覆工表面画像撮影技術として NEXCO と同様の覆工表面画像取得システムの一部が導入されている他、鉄道会社などでは赤外線による覆工表面のうき・はく離の抽出技術の活用^{6) 7)}が検討されている。しかし、これら各種点検機器を用いず、技術者による近接目視点検および打音点検のみで覆工点検が実施されている機関が多くを占めており、どの機関とも限られた予算内で多数のトンネルを統一的に管理するには、効率的な維持管理計画を立てる必要に迫られている。

NEXCO が管理するトンネルは、トンネルの施工法が鋼製支保工と矢板を主たる支保部材とする矢板工法から、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工等を主な支保部材とする山岳トンネル工法に移行している上に、その判定方法も他機関と同様に定性的な表現⁸⁾が多く、技術者の経験的判断によるところが大きかった。そこで、より効率的な定量的健全度評価を目指して NEXCO は 2012（平成 24）年から覆工点検手法を変更した。以降、NEXCO が提案している覆工点検手法の概略とそこで用いられているひびわれ指数 TCI（Tunnel-lining Crack Index）について述べる。

また、表-1.6 に示すように、閾値として「外力評価点」と「はく落評価点」という評価点を用いている。「外力評価点」とは、現状のひびわれ状態が外力の作用を受けているものなのか否かの判定を実施するための評価点を表し、「はく落評価点」とは、はく落につながる

可能性があるひびわれか否かを判定する評価点をいう。1 スパンに対して「外力評価点」と「はく落評価点」の両項目について実施することより、どちらの事象がより卓越しているか知ることができる。

表-1.6 外力評価点・はく落評価点の閾値⁵⁾

閾値設定項目	閾値の評価点内容
覆工画像判定より 覆工全面の入念な 打音実施スパン抽出	「入念な覆工全面の打音実施スパン対象条件」 ・外力評価点「60 点以上」 ・はく落評価点「36 点以上」のいずれかのスパン ※現在、覆工全面において近接目視かつ打音を基本としているが、入念に覆工全面の打音を実施するスパン抽出に活用
健全度ランク評価 の目安	健全度ランク I：変状がない、もしくは軽微なもの 健全度ランク I の該当スパン：外力評価点「30 点以下」
	健全度ランク II：変状があるが、現状は継続的に監視を行う必要があるもの 健全度ランク II の該当スパン：外力評価点「31 点～59 点」
	健全度ランク III-1：変状はあるが、進行が緩やか 健全度ランク III-1 の該当スパン：外力評価点「60 点以上」 健全度ランク III-2, IV, V の該当スパン：外力評価点「60 点以上」で変状が進行しているもので IV, V については、外力評価点「60 点以上」「変状が進行」+ α の条件

表-1.7 特記事項^{5) 8)}

特記事項（重点点検箇所）
<ul style="list-style-type: none"> ・ ひび割れ幅 2mm 程度のひび割れが連続して 3m 以上ある。 ・ ひび割れ幅 3mm 程度以上のひび割れがある。 ・ 打継ぎ目部に三日月型のひび割れがある。 ・ 添架物（ジェットファン、標識等）のアンカー部およびその周辺に放射状のひび割れがある。 ・ モルタル系の補修材による既対策箇所がある。 ・ 豆板、ジャンカ等があり、浮き・はく離の危険性がある。 ・ 構造上問題があると判断されるひび割れがある。 ・ 健全度ランク III-1, III-2, IV, V に対し、前回点検時から補修・補強が実施されていない。

1.5.1 点検 A

点検 A では、覆工画像撮影記録を基に既設コンクリート覆工のひびわれ展開図を作成し、問題箇所および重点点検スパンを抽出する。この点検は、覆工画像取得の良否がその後の評価に大きく影響を与えるものの、高速道路利用者のサービスレベルを低下させないことを最重要事項とし、画像取得にあたっては計測車両の走行速度は原則 50km/h 以上で実施している。また、覆工画像撮影記録の精度は、作業効率やひびわれなどの認識精度を考慮し、0.5mm 程度のひびわれ幅を認識できるものとし、撮影に用いる機器の仕様について具体的に定め適用している⁹⁾。図-1.10 に覆工画像撮影例、図-1.11 に点検 A および B により作成したひびわれ展開図の例を示す。覆工画像撮影後に、机上点検により、図-1.12 に示す詳細点検 A シート（以下“A シート”という）に、トンネル名、延長、路線名等の「1. トンネル諸元等」、緊急補修・対策工検討を要する項目の「2. 特記事項」、ひびわれやエフロレッセンス、漏水の状況の「3. データシート」にそれぞれ記入し原則として、覆工コンクリートの一打設長であるスパン単位で評価を行う。

1.5.2 点検 B

点検 B では、高所作業車等により技術者が、全線の近接目視かつ打音点検を実施している。この点検は、覆工表面画像撮影では捉え切れない、ひびわれが覆工表面に顕在化してない浮き、排気ガスの煤煙により判別が難しいひびわれ等の把握を行う。また、点検 A での判定結果より、重点点検スパン並びに重点点検箇所として抽出された場所については、とくに入念に打音点検を実施する。具体的には点検に合わせて図-1.13 に示す詳細点検 B シート（以下「B シート」という）に、A シートと同様に、「1. トンネル諸元等」、「3. データシート」と、特記事項に準じた「2. 詳細点検 B 実施理由確認」を記入しスパン単位で評価を行う。また、図-1.12, 1.13 の赤枠部分「1. ひびわれ幅・長さ・分布」、「2. ひびわれの方向性」の 2 項目のひびわれの量の評価は、次節で述べる TCI を用いて、共通の評価をしている。

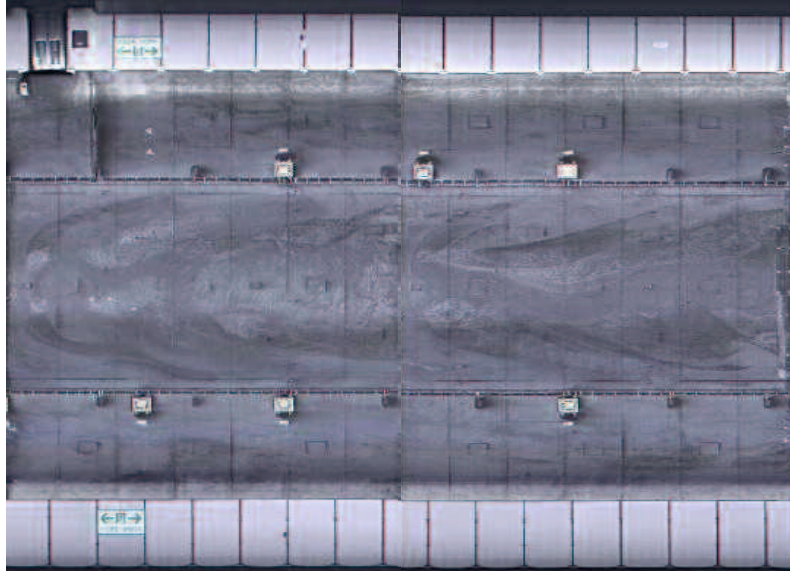


図-1.10 覆工画像撮影例¹⁰⁾

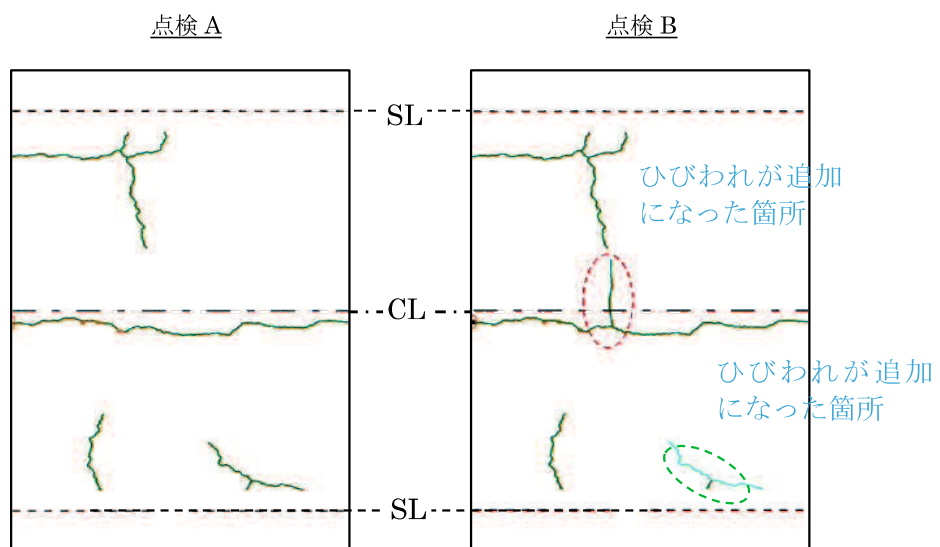


図-1.11 点検 A・B によるひびわれ展開図例¹⁰⁾

詳細点検Aシート

1.トンネル諸元等						スパンNo.	
トンネル名		路線名		管轄			
所在地	自 至	距離帯 (K.P)	自 至	距離帯 (STA)	自 至	IC	自 至
資産番号	上下線区分			工法			
供用年月日	車線数			掘削工法			
延長(m)	設計覆工厚(m)			断面区分			
スパン数	スパンNo			スパン長(m)			
撮影年月日	点検者			シート記入日		記入者	
地山等級	支保パターン			補強鉄筋			
地質	インバート			補助工法			
土被り(m)	インバート厚(m)			覆工コンクリート			

2.特記事項(緊急補修・対策工検討を要する項目)				
ひびわれ	①	幅2mm程度のひびわれが3m以上ある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	②	幅3mm程度のひびわれがある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	③	打ち継ぎ目に三日月型のひびわれがある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	④	J.F、標識等添架施設周辺に放射状のひびわれがある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	⑤	構造上問題があると判断されるひびわれがある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	⑥	モルタル系の補修材による既対策箇所がある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	⑦	豆板(ジャンカ)などがあり、浮き・はく落の危険性がある	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>
	⑧	外力健全度がⅢ-2~Ⅴランクに対し前回点検時から補修補強が実施されていない	点検Bの実施	<input type="checkbox"/>

3.データシート						
【評価は、スプリングライン間のアーチとして一括で行う】						
1	ひびわれ幅・長さ・分布	0	0	0	0	
2	ひびわれの方向性	0	0	0	0	
画像での評価	3. パターン	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	
		亀甲状	1m2未満	<input type="checkbox"/>	7	11
		1m2以上	<input type="checkbox"/>	14	22	
	閉合型	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	
	長辺20cm未満	<input type="checkbox"/>	4	12		
	長辺20cm以上	<input type="checkbox"/>	7	23		
交差・分岐	なし	<input type="checkbox"/>	0	0		
5箇所未満	少ない	<input type="checkbox"/>	2	4		
5~9箇所	中程度	<input type="checkbox"/>	3	8		
10箇所以上	多い	<input type="checkbox"/>	5	12		
4. エフロレッセンス	なし	<input type="checkbox"/>	0	0		
	少ない	<input type="checkbox"/>	1	1		
	中程度(散在)	<input type="checkbox"/>	2	2		
	多い(全面に分布)	<input type="checkbox"/>	3	3		
5. 漏水	なし	<input type="checkbox"/>	0	0		
	あり(対策なし)	<input type="checkbox"/>	2	2		
	あり(対策済み)	<input type="checkbox"/>	2	0		

<p>【外力判定】 I:30以下 II:31~59 60以上 詳細点検B実施</p> <p>【はく落判定】 36以上 詳細点検B実施</p> <p>【漏水判定】 漏水ありの場合は、詳細点検B・Cの段階で確認する。</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>特記事項による点検B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">/100</td> <td style="text-align: center;">/100</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>その他の理由による点検B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>理由</td> </tr> </table>	0	0	<input type="checkbox"/>	特記事項による点検B	/100	/100	<input type="checkbox"/>	その他の理由による点検B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	理由
0	0	<input type="checkbox"/>	特記事項による点検B										
/100	/100	<input type="checkbox"/>	その他の理由による点検B										
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	理由										
コメント													

<p>前回詳細点検結果</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">□ 実施</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">□ 未実施</td> <td style="text-align: center;">/100</td> <td style="text-align: center;">/100</td> <td style="text-align: center;">/100</td> <td style="text-align: center;">/100</td> <td style="text-align: center;">/100</td> </tr> </table>	□ 実施						□ 未実施	/100	/100	/100	/100	/100	<p>注1) 特記事項がある場合は、詳細点検Bを実施する。</p> <p>注2) その他の理由による点検B</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 前回点検時のひびわれ展開図と比較して新たに変状が発生した箇所 2. 前回点検時に打音を実施している箇所 3. 前回点検以降の補修・補強箇所およびその周辺 4. 水平打ち継ぎ目・横断目地部およびその周辺 5. その他
□ 実施													
□ 未実施	/100	/100	/100	/100	/100								
<p>詳細点検結果</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"> <input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III-1 <input type="checkbox"/> III-2 <input type="checkbox"/> IV <input type="checkbox"/> V </td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"> <input type="checkbox"/> 特記事項 </td> </tr> </table> <p>注4) 上記特記事項には「その他の理由」も含む</p>		<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III-1 <input type="checkbox"/> III-2 <input type="checkbox"/> IV <input type="checkbox"/> V				<input type="checkbox"/> 特記事項	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> 画像チェック </td> <td style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> </td> </tr> </table> <p>注3) ひびわれ展開図などは作成せずに、覆工画像のみからの確認を行った場合にチェックを入れる</p>	<input type="checkbox"/> 画像チェック	<input type="checkbox"/>				
	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III-1 <input type="checkbox"/> III-2 <input type="checkbox"/> IV <input type="checkbox"/> V				<input type="checkbox"/> 特記事項								
<input type="checkbox"/> 画像チェック	<input type="checkbox"/>												

図-1.12 詳細点検 A シート様式 11)

詳細点検Bシート

1.トンネル諸元等

スパンNo.

トンネル名	路線名		管轄		IC	自 至
所在地	距離標 (K.P)	自 至	距離標 (STA)	自 至		
資産番号	上下線区分		工法			
供用年月日	車線数		掘削工法			
延長(m)	設計覆工厚(m)		断面区分			
スパン数	スパンNo		スパン長(m)			
点検実施日	点検者		シート記入日		記入者	
地山等級	支保パターン		補強鉄筋			
地質	インバート		補助工法			
土被り(m)	インバート厚(m)		既工コンクリート			

2.詳細点検B実施理由確認

- 外力評価点60点以上 /100
- はく落評価点96点以上 /100
- 幅2mm以上のひびわれが3m以上ある
- 3mm程度以上のひびわれがある
- 打ち継ぎ目に三日月状のひびわれがある
- J.F.標識等添架施設周辺に放射状ひびわれがある
- 構造上の問題があると判断されるひびわれがある
- モルタル系の補修材による既対策箇所が見られる
- 豆板、ジャンカなどがあり、浮き・はく落の危険性がある
- 外力健全度がⅢ-2～Ⅴランクに対し前回点検時から補修補強が実施されていない
- その他の理由

2.2評価点検B実施チェック

- /100
- /100
- 本
- 本
- 箇所(本)
- 箇所(本)
- 箇所(本)
- 箇所
- 箇所
- 箇所

3.データシート

【評価は、スプリングライン間のアーチとして一括で行う】

種別		スパンNo		検出箇所		評価	
		内装目録参照					
1.ひびわれ幅・長さ・分布				0	0		
2.ひびわれの方向性				0	0		
現状での評価	3. パターン	亀甲状	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	
			1m2未満	<input type="checkbox"/>	7	11	
		1m2以上	<input type="checkbox"/>	14	22		
		閉合型	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	
		長辺20cm未満	<input type="checkbox"/>	4	12		
		長辺20cm以上	<input type="checkbox"/>	7	23		
	交差・分岐	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	
		5箇所未満	少ない	<input type="checkbox"/>	2	4	
		5～9箇所	中程度	<input type="checkbox"/>	3	8	
		10箇所以上	多い	<input type="checkbox"/>	5	12	
4. エフロレッセンス	なし		<input type="checkbox"/>	0	0		
	少ない		<input type="checkbox"/>	1	1		
	中程度(散在)		<input type="checkbox"/>	2	2		
	多い(全面に分布)		<input type="checkbox"/>	3	3		
5. 漏水	なし		<input type="checkbox"/>	0	0		
	あり(対策なし)		<input type="checkbox"/>	2	2		
	あり(対策済み)		<input type="checkbox"/>	2	0		

4.外力健全度判定

- 放射状ひびわれが見られる
 - 圧ざが見られる
 - 緑石、排水施設に変状が見られる
 - 5mm以上の段差、ずれのあるひびが見られる
- 健全度ランクⅣ
- 変位速度を測定しなければならない場合
- 要調査

※進行の確認は、外力評価点により詳細点検Bを実施する場合のみ行う。
 進行性がないときは、前回のひびわれ展開図と比較して明らかに進行性が無いものをいう。
 ただし、変状事例集のⅢ-2～Ⅴに該当する場合は変位速度計測を実施。
 ※変位速度での判定が必要な場合、健全度ランクは要調査とする。

変位速度			
測定開始 年月日	測定日	測定値 (mm)	測定値(mm/年)

※既存データがある場合、その結果を流用してもよい。

0	0	<input type="checkbox"/> 全面点検
/100	/100	<input type="checkbox"/> 特異箇所のみ点検

外 力	
プログラムによる 自動判定健全度ランク	

下記基準で自動判定
 30点以下: I
 31点～59点: II
 60点以上: III～I

外 力	
健全度ランク	

「プログラムによる自動判定健全度ランク」を
 参考に点検者が判定した確定ランク

図-1.13 詳細点検 B シート様式 11)

1.5.3 ひびわれ指数 TCI

NEXCO では、これまで述べた二段階の詳細点検の主要要素として、覆工の健全度を数値的に評価する指標としてひびわれ指数 TCI (以下、「TCI」という)を導入している。TCI¹²⁾¹³⁾の考え方を以下に示す。

TCI は、覆工に発生するひびわれを定量的に評価するために、岩石のひびわれの密度や方向、幅を総括的に定量化する指標であるクラックテンソルを援用し、覆工の定量的健全性評価法として提案された指標¹²⁾¹³⁾である。TCI の基礎式を式(1.1)に示すとともに、その概念図を図-1.14 に示す。式で示す F_{11} 、 F_{22} は、それぞれ TCI の縦断成分、横断成分を示すものである。覆工コンクリートの劣化の指標 F_0 は、テンソルの一次不変量として縦断・横断成分の和($F_0 = F_{11} + F_{22}$)として表され、この F_0 を「TCI」と呼び数量的「覆工の劣化度」としている。それに対し、 F_{12} は TCI の対角項成分であり、ひびわれの斜め方向成分の多さを表すものである。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (t^{(k)})^\alpha (l^{(k)})^\beta \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1.1)$$

A : 覆工コンクリートの面積 ($A = L_s \times L_a$) (m²)

L_s : 覆工コンクリートの縦断延長 (m)
(通常はスパン長)

L_a : 覆工コンクリートの横断延長 (m)

n : ひびわれの本数 (本)

$l(k)$: ひびわれ k の長さ (m)

$t(k)$: ひびわれ k の幅 (m)

$i(k)$: ひびわれ k の法線ベクトルが x_i 軸となす角度 (度)

$j(k)$: ひびわれ k の法線ベクトルが x_j 軸となす角度 (度)

α : ひびわれ幅の重み付けに関する係数 (既往の研究¹⁴⁾より、NEXCO では $\alpha=1$ としている)

β : ひびわれ長さの重み付けに関する係数 (既往の研究¹⁴⁾より、NEXCO では $\beta=1$ としている)

F_0 : TCI の大きさ

F_{11} : TCI の縦断方向成分

F_{22} : TCI の横断方向成分

$F_{12} = F_{21}$: TCI のせん断方向成分

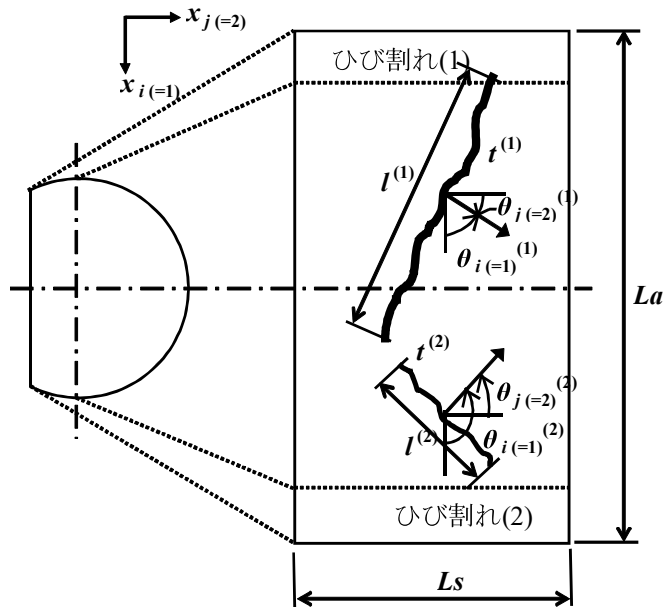


図-1.14 トンネル詳細点検の流れ¹⁵⁾

また、式(1)から明らかなように TCI は 2 階のテンソルであり、ひびわれデータから算出した TCI の各成分 (F_{11} , F_{22} , F_{12} , F_{21}) により、あたかも「モールの応力円」のような円を描くことが可能であり、覆工のひびわれ展開図からひびわれの主方向を定めることができる。式(1.2)にひびわれ主方向の算出式を示す¹⁵⁾。 図-1.15 に、実トンネルにおけるそれぞれのスパン毎のひびわれ主方向の算出結果を示す。

$$\theta = \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{F_{12}}{r + (F_{11} - (F_0/2))} \right) \quad (1.2)$$

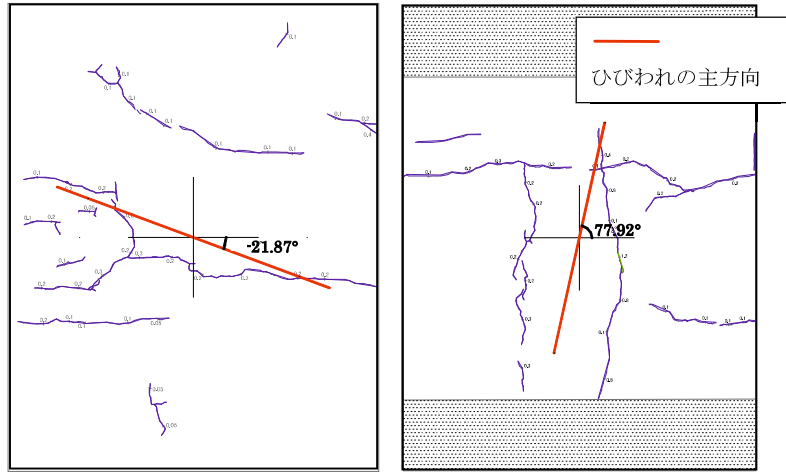
ここで、

θ : ひびわれの主方向

α : TCI の円が x 軸と交わる点と点

(F_{11}, F_{12}) を結ぶ直線と x 軸のなす角

r : ($F_{11} \cdot F_{22}$) の絶対値



a トンネル

b トンネル

図-1.15 ひびわれの主方向 ¹⁵⁾

1.6 本研究の目的

わが国の道路トンネルの現況として、その資産数量は2017（平成29）年3月に末時点で約10,400本、総延長約4,600kmに達しており、今後、老朽化が早いペースで進んでいく。特に、日本国内の交通物流の重要な位置を占める高速道路トンネルは、道路トンネル資産の約15%と多くを占めるだけでなく、総延長の約30%以上がトンネル延長1,000m以上となっており、これは、防災施設の設置状況や延長が長いことによる車線規制の問題を抱えている。また、高速道路は設計速度が速く、覆工コンクリート片のはく落等の不具合事象の発生が大きな事故を誘発する可能性が高い等、トンネルの維持管理がより難しいものとなっている。また、2012（平成24）年12月の笹子トンネルの天井板崩落事故の発生を受けて、2014（平成26）年に行われた道路法の改正に伴い、点検に関する業務量が増大し、トンネルの補修・補強対策へのリソースが十分に確保することが困難な状況がみられる。

今後も、高速道路網の整備にともない維持管理の難しい高速道路トンネルの延長や本数が増加する中で、これら膨大な高速道路トンネル資産を適切に維持するために、現状のトンネル点検システムの課題を抽出して、その課題を解決することによる、高精度で効率的な手法の開発が強く望まれている。

本研究は、現状の高速道路トンネルの点検において抽出された課題を解決することにより、高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価技術の向上を目的に取り組んだものである。

具体的には以下の3つの研究を行った。

1.6.1 トンネル覆工表面画像撮影技術による点検技術の精度向上の可能性に関する検証

技術者による近接目視点検の代替として走行型の覆工画像撮影技術の適用による点検技術向上の可能性について検討した。供用中の高速道路トンネルを利用し、人が行う通常近接目視点検で作成した通常展開図と、走行型覆工表面画像撮影技術による覆工画像から作成した画像展開図について、画像展開図を基に現地での点検時間をかけて作成した詳細展開図を正解のひびわれ展開図とし、精度を検証した。これにより健全度や特記事項の有無に応じて近接目視や打音点検を行う箇所限定化を行い、現場での点検時間を削減しつつ、従来と同等以上の精度を確保した健全性診断技術の代替による点検技術の向上を目的とした。

1.6.2 既設トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証

NEXCOが管理する85,000スパンを超えるトンネル覆工点検データを分析した。覆工表面画像撮影技術による展開図を用いる机上点検である点検Aと現地における実施点検である点検Bの比較、健全性評価の基本となる外力評価点およびはく落評価点と健全度ランクの関連性、外力およびはく落評価点の閾値の分析から、NEXCOで導入されているトンネル健全性の定量的評価手法の妥当性を検証した。

1.6.3 トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証

現状の覆工の健全度評価では、変状の進行性に関する定量的な評価指標は組み込まれていない。しかし、覆工の変状を評価するうえで、ひびわれ進行性は重要な評価項目であることから、その進行性について評価できれば、変状自体の進行性について評価できると考えられる。したがって、ひびわれの進行性を評価するために、覆工の健全度算出に活用している、覆工ひびわれ指数（TCI）の F_0 の時系列的な変動に着目した、ひびわれ進行性の定量的評価手法を検証した。

1.7 本論文の構成

本論文の構成を図-1.16 に示す。

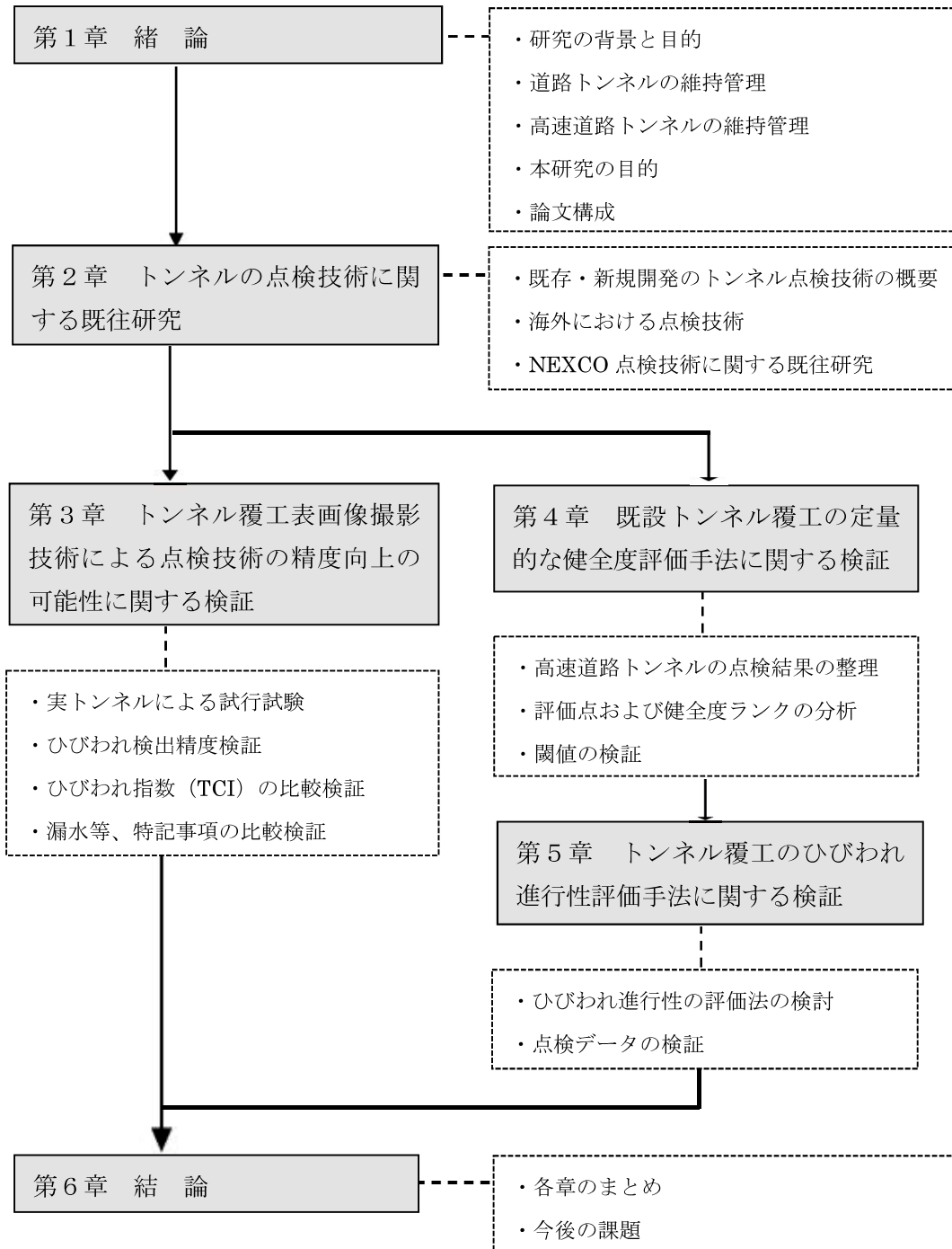


図-1.16 本論文の構成

【参考文献】

- 1) 国土交通省 道路局：道路メンテナンス年報，pp.32-34，2018.
- 2) 国土交通省ホームページ，<<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/nls/pdf01/04.pdf>>，2019.8.11 アクセス
- 3) 鈴木俊雄，木村定雄，定司 肇：高性能計測技術によるトンネル覆工点検の信頼性向上に関する検証，土木学会地下空間シンポジウム・報告集，第 22 巻，pp.67-70，2017.
- 4) 国土交通省 道路局 国道・技術課：道路トンネル定期点検要領，pp.5-48，2019.
- 5) 東日本・中日本・西日本高速道路（株）：保全点検要領 構造物編，p.137-158，2017.
- 6) 川上浩一，小西真治，村上哲哉，久保昌史，中山聡子：赤外線熱計測による地下鉄シールドトンネル内中子型セグメント表層コンクリートの浮き検出，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.71，No.3（特集号），pp.I_112-I_121，2015.
- 7) 三浦孝智，川上幸一，小西真治，篠原秀明：地下鉄トンネル覆工の浮き・剥離の可視化による検出システムの検討，トンネルと地下，第 47 巻 11 号，pp.41-46，2016.
- 8) 山田隆昭，佐野信夫，馬場弘二，吉武 勇，中川浩二：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準，土木学会論文集 F，Vol.63，No.1，pp.86-96，2007.
- 9) 佐野信夫，馬場弘二，山田隆昭，吉武 勇，中川浩二，西村和夫：高速道路トンネルの合理的な点検システムの提案，土木学会論文集 D，Vol.63 No.3，pp.391-400，2007.
- 10) 海瀬 忍，伊藤哲男，八木 弘，水野希典，前田洗樹，進士正人：トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.74，No.1，pp.1-14，2018.
- 11) 海瀬 忍，伊藤哲男，八木 弘，水野希典，前田洗樹，進士正人：トンネル覆工のひびわれ進行性評価方法に関する検証，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.73，No.3（特集号），I_10-I_20，2017.
- 12) 大場 論，亀村勝美，重田佳幸，進士正人，中川浩二：トンネル覆工健全度評価のためのクラックテンソルの適用性の検討，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第 13 巻（47），pp.371-376，2003.
- 13) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武 勇，中川浩二：ひびわれ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価，土木学会論文集 F，Vol.62，No.4，pp.628-632，2006.
- 14) 山田隆昭，佐野信夫，重田佳幸，吉武 勇，西村和夫：ひび割れ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築，土木学会論文集 F，Vol.65，No.1，pp.11-16，2009.
- 15) 中野清人，佐伯 徹，重田佳幸，大場 論，西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひびわれ指数 (TCI) の適用可能性について，土木学会トンネル工学報告集，No.20，pp.239-243，2010.

第2章 トンネルの点検技術に関する既往研究

2.1 既存のトンネル点検技術の概要

他のコンクリート構造物同様，トンネルの維持管理は点検が基本となる．その点検の流れは各管理組織により若干の違いがみられるが，おおむね「1.3 道路トンネルの維持管理の流れ」で記した点検種別に沿った形で行われている．

トンネルの維持管理において，点検の必要が認められ点検が開始された当初より，点検手法は，目視点検（遠望・近接目視）と打音点検が基本となっており，図-2.1 に示すように主に高所作業車を利用しての点検を実施している．

2014（平成26）年6月に国土交通省より発出された道路トンネル定期点検要領の【全国版】・【直轄版】においても，5年に1度の頻度で行う定期点検は，基本としてトンネル本体工の変状を近接目視点検により観察し，覆工表面のうき・剥離等が懸念される箇所に対し，うき・はく離の有無および範囲等を把握するための打音点検が定められている．これら点検のうち，初回点検においては，トンネル全延長に対して近接目視点検により状況を観察すると共に覆工表面を全面的に打音点検することを標準とし，二回目以降の点検においては，トンネル全延長に対して近接目視を行うとともに，必要に応じて打音検査を併用することを基本としている．なお，ここでいう近接目視点検とは，肉眼により部材の変状等の状態を把握し評価が行える距離まで接近して目視を行うことを想定されている．

また，「新技術の導入については，今後，調査技術者が近接目視点検によって行う評価と同等の評価が行えると判断できる新技術が開発された場合は，新技術の併用を妨げるものではない」と定められており，トンネルの点検に機械等使用した点検の導入についても記されている．

また，2019（平成31）年2月に道路トンネル定期点検要領の【全国版】，平成31年3月に道路トンネル定期点検要領の【直轄版】が改正され，点検箇所の一部等で近接目視によら



図-2.1 トンネル点検の状況

ないときの扱いが定められた。新技術の導入については「管理者自らが近接目視によるときと同等の健全性の診断を行うことができると定期点検を行うものが判断した場合には、その他の方法についても、近接目視を基本とする範囲と考えてよい。その他の方法を用いるときは、定期点検を行うものが定期点検の目的を満足するように、かつ、その方法を用いる目的や必要な精度等を踏まえて適切に選ぶものである。必要に応じて遡って検証ができるように、近接目視によらないとき、その部位の選定の考え方や状態把握の方法の妥当性に関する所見を記録に残すようにするとよい。」²⁾と定められ、新技術の導入がより容易になった。

併せて、実務として道路管理者が新技術を導入しやすくするために、2019（平成31）年2月に新技術導入時の留意点等が記され「新技術利用のガイドライン（案）」と、技術ごとの性能を記載した「点検支援技術 性能カタログ（案）」もまとめられた。

2.2 新規開発されたトンネル点検技術の概要

2.2.1 走行型覆工画像撮影技術

新規に開発されたトンネル点検技術として、レーザー、CCDカメラ、ラインセンサーカメラ等による各種走行型覆工画像撮影技術が開発され、実務で用いられている³⁾。現地での詳細点検に活用できるように、点検前に覆工表面画像を撮影（ひびわれ幅の認識精度0.5mm程度）し、これを基にひびわれ展開図を作成することができる。作業時間の短縮をはかり、利用者のサービスレベルを極力低下させないように、計測車両の走行速度も比較的高速（50km/h以上等）である。走行型覆工画像撮影技術による覆工画像の例を図-2.2に示す。

近年、走行型覆工画像撮影技術の開発は積極的に進められており⁵⁾⁶⁾、点検の高精度化および効率化を目指して技術開発および現地適用が進んでいる。

2019（平成31）年2月の道路トンネル定期点検要領の【全国版】の改正と併せて、実務として道路管理者が新技術を導入しやすくするために、技術ごとの性能をまとめた「点検支

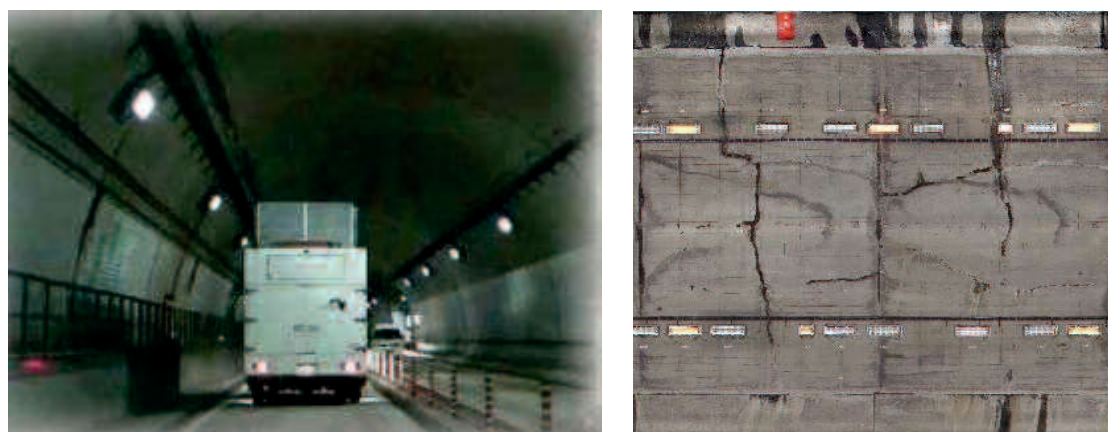


図-2.2 走行型覆工画像撮影技術による覆工画像例⁴⁾

援技術 性能カタログ（案 7）」には、トンネル（覆工画像計測技術）として4技術が掲載され表-2.1 に示すように仕様確認結果がまとめられている。掲載されている4技術のうち3技術については高速道路トンネル点検での使用実績がある。

表-2.1 技術の仕様確認結果【トンネル（覆工画像計測技術）】7)を加筆修正

ユースケースの前提		点検員等がチョーキング(ひび割れ幅0.3～3.0mmのひび割れ、うき・はく離の打音異常の有無及び範囲、鋼材腐食の範囲)した後、ロボットによる写真撮影を実施。点検員等がロボットにより取得した変状写真を見て、記録調書を作成。 ※上記とは別に、専門的な知識と技能を有する技術者が近接目視を行った上で健全性の診断を行う。												
技術名	走行型高速3Dトンネル点検システム MMM-R (ミーム・アール)			走行型高精細画像計測システム(トンネルレーサー)			道路性状測定車両イーグル(L&Lシステム)			トンネル覆工コンクリート内部・表面調査システム				
開発者	パシフィックコンサルタンツ株式会社			中外テクノス株式会社			西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社			三井造船株式会社(現:株式会社三井E&Sマシナリー)				
共同開発者	計測検査株式会社、システムリサーチ株式会社、株式会社ウォールナット			—			—			—				
NETIS番号	KK-130026-V			CB-180027-A			SK-160013-A			KT-140074-A				
技術概要	トンネル覆工壁面の連続画像撮影システム、高精度3次元レーザ計測システム、非接触レーザー探査システムを車両に搭載し、覆工表面ひび割れ、漏水等の変状と、トンネル断面形状、厚巻、背面空洞等を計測するもので、走行型であるため計測時の交通規制が不要となる。この統合型計測システムにより従来点検前に計測し、近接目視、打音検査の併用技術として支援するとともに、取得した3D可視化情報を総合的に活用し健全性診断を支援することにより、トンネル点検全般の高度化、効率化、省力化、安全性向上、コスト削減を図れる。			民生用4Kビデオカメラを使用した高解像度の覆工画像を取得するシステム。民生機を使用することで、装置全体をコンパクトにできる。カメラの配置により撮影範囲及び解像度を自在に変更でき、狭隘な水路トンネル等への対応が可能。覆工表面を高い解像度で撮影することで、発生している変状を正確に記録する。交通規制なしで撮影ができ、50km/hの速度では0.3mm以上のひび割れを検知する。交通規制内の低速撮影では画像は近接点検時と同等の解像感のある高精細な画像が得られ、覆工面の状態をより正確に記録することができる。			カラーラインセンサカメラによる高精細な可視画像撮影システムと、光切断法による3次元形状計測技術を併用して、覆工コンクリートの表面状態と形状を、同時に計測、解析する。これにより、覆工コンクリートのひび割れと、剥離の萌芽である段差を検出し、コンクリート片が剥落する恐れのある箇所を非接触かつ定量的に検出する技術である。将来的に、現状のトンネルの損傷評価だけでなく、定期的に計測を行うことにより劣化進行を定期的に把握できる技術を目指している。			打音検査では検知困難だった変状(空洞や豆板など)を、マルチバスレーダ(MPLレーダ)により3次元で映像化するシステム。専用支持装置に架装したレーダを車両に搭載し、最高速度3.5km/hでの連続走行計測が可能である。マルチバスレーダによる計測データを覆工表面レーザ計測車(細トノックス製)による展開画像データと総合することで、トンネル覆工コンクリートの表面と内部状況を同時に把握し、総合的な判定・管理が可能となる。				
概要図														
計測対象部位	トンネル本体工覆工(アーチ、側壁)			トンネル本体工覆工(アーチ、側壁)			トンネル本体工覆工(アーチ、側壁)			トンネル本体工覆工(アーチ、側壁)				
技術の特徴	必要な機器・装置等		CCDカメラ(38万画素)X20台 画像合成ソフト			4kカメラ(830万画素):11台 画像合成ソフト			ラインセンサカメラ(4096画素/ライン:4台) 画像合成ソフト			レーザ照射装置=アルゴンイオンガスレーザ (出力4W)x6面体スキャナ レーザスキャン性能=21,000回転/分x6(レーザ 走査線数) 画像合成ソフト		
	車両寸法	車両幅	2.08m			1.67m			2.18m			2.26m		
		車両高さ	3.63m			2.80m			3.14m			3.20m		
	適用条件	計測時の走行速度条件	80km/h以下			5～80km/h			100km/h以下(壁面撮影の場合)			60km/h以下		
	断面形状の制約	短形断面など対象構造物に応じて対応可能			大きな断面変化がないこと			短形断面など対象構造物に応じて対応可能			短径断面も計測可能(断面形状に応じて、レーザ照射器を要位置調整)			
検証結果	[A]精度	判読可能性	ひび割れ	幅0.3～3.0mm (0.1mm単位)	【レベル1】 ひび割れを示すチョーキングを判別	【レベル2】 ひび割れそのものを判別	【レベル1】 ひび割れを示すチョーキングを判別	【レベル2】 ひび割れそのものを判別	【レベル1】 ひび割れを示すチョーキングを判別	【レベル2】 ひび割れそのものを判別	【レベル1】 ひび割れを示すチョーキングを判別	【レベル2】 ひび割れそのものを判別		
				100%(76箇所/76箇所)	(非申請)	100%(76箇所/76箇所)	(非申請)	100%(76箇所/76箇所)	(非申請)	100%(76箇所/76箇所)	(非申請)			
				幅3.0mm以上 (0.5mm単位)	100%(14箇所/14箇所)	100%(14箇所/14箇所)	100%(14箇所/14箇所)	100%(14箇所/14箇所)	未検証(0箇所)					
				打音異常の有無と範囲を示す チョーキング	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)					
	ひび割れ等の状況	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)	100%(47箇所/47箇所)								
	漏水等による変状	部位	アーチ	側壁	路面	アーチ	側壁	路面	アーチ	側壁	路面	アーチ	側壁	路面
	漏水(有無及び範囲)		100%(71箇所/71箇所)	(非申請)	100%(71箇所/71箇所)	(非申請)	100%(71箇所/71箇所)	(非申請)	100%(71箇所/71箇所)	(非申請)	100%(71箇所/71箇所)	(非申請)	100%(71箇所/71箇所)	(非申請)
高速道路トンネルでの実績		○												

2.2.2 覆工の変形測定技術

トンネルの外力変状に対する評価の客観性向上を目的として、2.2.1 で示した画像取得装置(Mobile Imaging)に加えて、レーザーによるトンネル壁面の変形計測装置(Mobile Mapping)を搭載した車両(MIMM)も開発されている(表-2.1 一番左参照)。MIMMは、外力変状の疑いのあるトンネルについて、高速走行しながら、精度の良い客観的な変状把握を行うことができる。変形モード解析図の例を図-2.3 に示す。

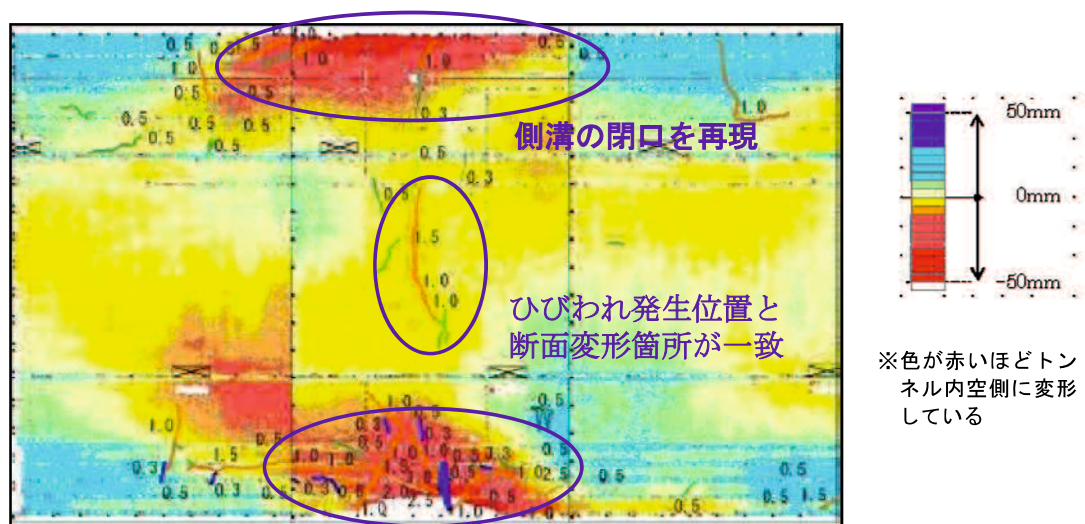


図-2.3 MMIMによる変形モード解析図例⁸⁾

2.2.3 維持管理システム

トンネルは長期にわたり供用されるものであり、適切で効率的な維持管理のためには、維持管理情報をデジタル化した上で一元管理することが有効である。特に、2.2.1、2.2.2 で取り上げた新しい維持管理技術においては点検結果がデジタル情報の形で出力される。これに従来の目視点検情報を加え、また補修の情報も取り込み、維持管理情報を一元管理するシステムが各事業者により開発されてきている⁹⁾。また、システムによっては、維持管理情報の集約・一元管理だけにとどまらず、これらの情報を元にトンネルの健全度の判定を補助する機能を付加したものもある^{10) 11)}。

維持管理システムの例として、NEXCO ではトンネル・マネジメント・システム(以下“TMS : Tunnel Management System”という)を活用している。TMS⁴⁾は、点検や補修においてひびわれ展開図の作成や各種帳票の作成を行う「ひびわれ点検支援システム」と、「ひびわれ点検支援システム」で作成されたデータを取り込んで、変状原因の推定や対策工の選定等を行う「マネジメントシステム」の2種類のシステムで構成される。ひびわれ点数の作成状況を図-2.4、TMSの機能概要図を図-2.5に示す。担当者の技能によるところを出るだけ排除し、定量的な評価を行うための支援と統一的なフォーマットによる確実な点検を目的としている。

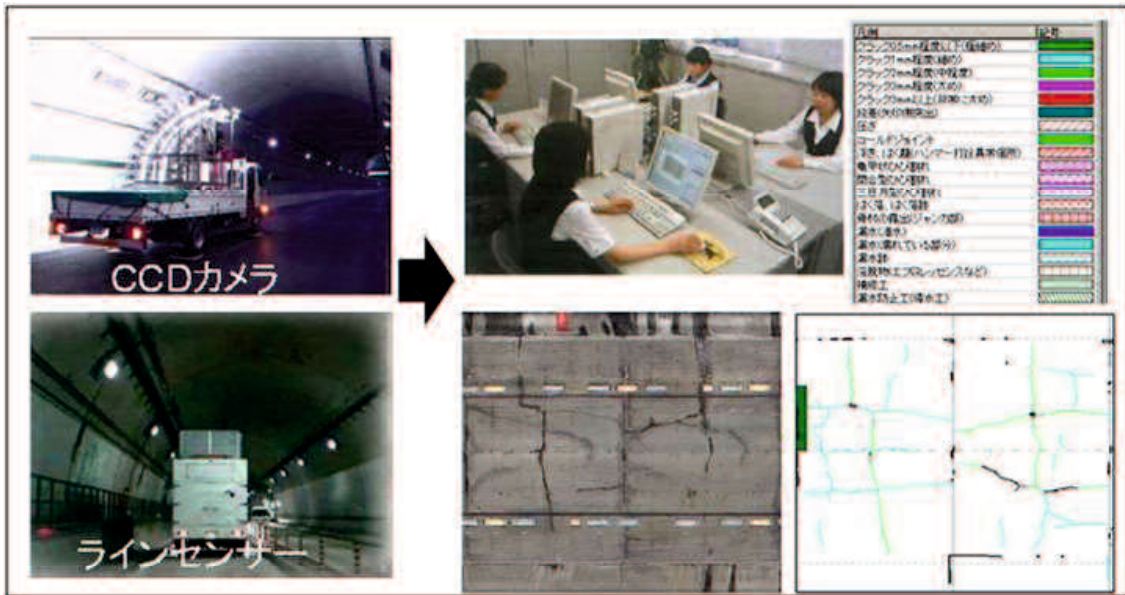


図-2.4 ひびわれ展開図の作成状況 4)

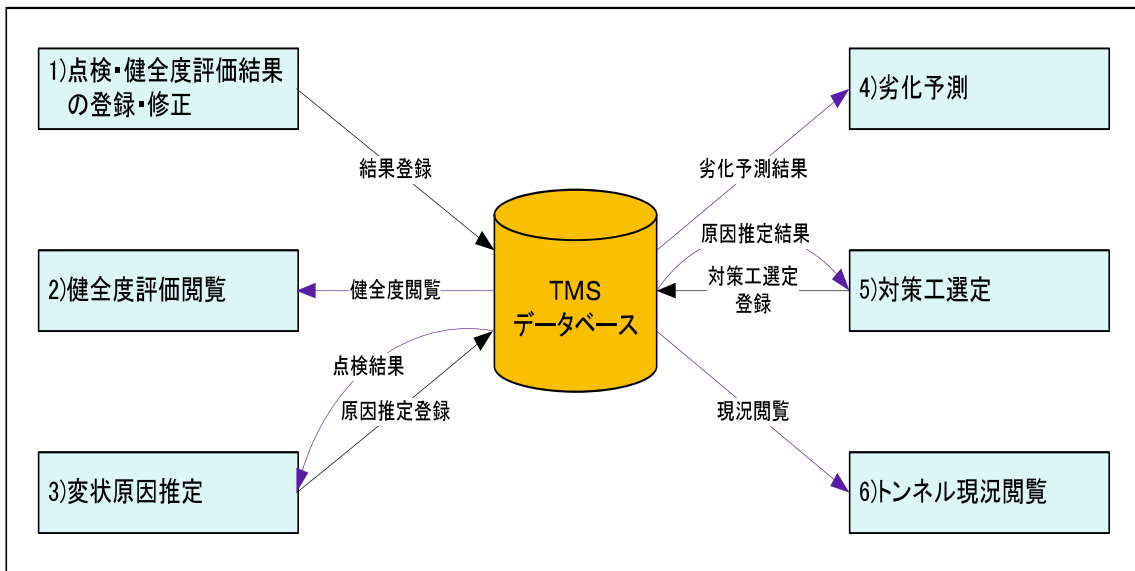


図-2.5 TMS 機能概要 4)

2.2.4 ひびわれの自動抽出技術

覆工の変状状況を判断するうえで重要なひびわれを自動に抽出する技術としては、画像上のひびわれとひびわれ以外の領域に分ける二値化処理を行い、自動でひびわれを抽出する技術や、技術進歩が著しい AI を利用したひびわれ抽出技術などに関する研究が大学や民間企業を中心に盛んに行われてきている^{12) 13) 14)}。図-2.6 に機械学習によるひびわれ抽出例を示す。これら研究初期の段階では型枠跡、コンクリート壁面の汚れ、キズなどの誤検出が多く、点検実務に全面的に活用できるレベルには至っていなかった。

しかし、近年、AI によるひびわれ自動抽出技術の研究が進み、開発されたものの中からサービスを開始した技術も出てきており、公表されているものの中で、今後の開発によっては広く適用できる可能性があるいくつかの技術について表-2.2、2.3 に示す。

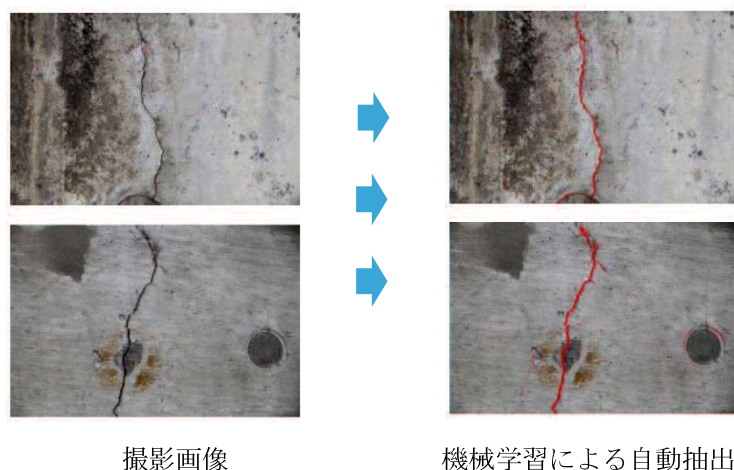


図-2.6 機械学習によるひびわれ抽出例¹⁴⁾を加筆修正

表-2.2 AI によるひびわれ抽出技術^{15) 16) 17) 18)}

システム		開発状況など	サービス形態	備考
①	A システム	・研究、開発中であり、サービス化を検討中。 ・2018 年 7 月のインフラ検査・維持管理展で技術紹介があった。	未定	
②	B システム	点検事業者を対象とした試験利用向けに、ひびわれ点検支援システムを Web 上で無料公開し、検出精度や作業効率などの有効性を検証中。（正式サービスではない）	クラウドサービス	
③	C システム	2018（平成 30）年 4 月 3 日 正式サービス開始	画像合成込みのクラウドサービス	

表-2.3 AIによるひびわれ抽出技術の主な仕様^{15) 16) 17) 18)}

システム		対象構造物	撮影方法や画像の条件	ひび割れ検出精度等
①	A システム	トンネル、 橋梁、ダム、 その他コン クリート構 造物	<ul style="list-style-type: none"> ・撮影方法やカメラに制約なし ・検知精度は画質、解像度に依存する 	公表データなし
②	B システム	コンクリー ト構造物	詳細は不明であるが、撮影方法やカメラに制約はないと思われる	※公表されている情報 <ul style="list-style-type: none"> ・幅 0.2 mm以上のコンクリートひび割れを、 80%以上の高精度で検出 ・従来技術（画像認識技術によるひび割れ 検知）より、誤検出が少ない
③	C システム	橋梁等	公表されている推奨カメラ設定など <ul style="list-style-type: none"> ・カメラは、一眼レフ ・撮影モードは絞り優先モード、ISO感度 200 以下 ・三脚使用、レリーズ使用（手動シャッター非推奨） ・撮影は被写体に対して正対しなければならない（±5° 以内） ・画像ラップ率 30%以上、推奨解像度 0.3mm/pix ・画像合成前の 1 枚当たりの画像サイズ上限は、約 9000pix × 6000pix まで 	※公表されている情報 <ul style="list-style-type: none"> ・幅 0.1mm 以上のひび割れの高精度な自動 検出結果を得ることが可能 （条件：0.1mm 幅の解析には、画像解像度 0.3mm/pix） ※誤検出率は公表なし

2.2.5 打音点検に代わる点検手法

打音点検は、点検対象物の内部欠陥等の発見のため、従来から簡易な非破壊診断法として利用されてきた方法の一つであるが、点検領域が広範囲におよぶ場合は、点検員の労力が非常に大きく、熟練者の経験的な感覚で打音の音質の違いから異常の有無を判断するケースが多く、定量的な判断が行われているとは言いがたかった。また、その点検方法が接触式であることから点検対象物に近接しなければならないため、高所や狭隘部等での点検では安全面での課題もあった。そのため、これら課題を克服するために打音点検に代わる点検手法の開発が行われてきている。

これら開発技術のうち、打音点検に代わりうる点検手法として、用いるシステムが小規模な「回転式打音検査法」と、「レーザー欠陥検出法」の二つの点検法（検出法）についてその概要を示す。

(1) 回転式打音検査法

回転式打音点検法は従来のテストハンマーを用いた打音点検の点検効率の悪さという短所を改善するために開発されたもので、その特徴として、ロッド先端部が回転しながら連続的に打撃をコンクリート面に与えることで、広範囲の点検領域から欠陥箇所を短時間に抽出できることが挙げられる（図-2.7）。



図-2.7 回転式打音検査器の例¹⁹⁾

回転式打音点検法は、点検者の聴覚によって健全部と欠陥部の打撃音の違いを判断する点は従来の打音法と同じである。しかし、園田ら²⁰⁾の回転式打音点検法の活用研究より、従来のテストハンマーによる点検と比較して、欠陥部の音圧もバラツキが特に小さいこと(表-2.4)が示された。また、周波数スペクトル差の違いについて着目すると、健全部と欠陥部で比較した場合の周波数スペクトル差の平均が回転式打音点検法の方が大きく(図-2.8, 表-2.5)、健全音から欠陥音に変わる再の音色の変化が大きいことが分かり、回転式打音点検法の方が、欠陥箇所を識別する点は優れていることが報告されている。

表-2.4 最大音圧の測定結果²⁰⁾

		音圧(Pa)							欠陥平均/健全平均
		A橋	B橋	C橋	D橋	最大-最小	標準偏差	全橋平均	
テストハンマー	健全部	1.85~7.5	3.5~6.5	1.1~6.8	2.7~5.6	6.4	1.7	4.3	6.7
	欠陥部	20.7~53.4	15.1~64.7	29.4~40.6	13.5~35.5	51.2	5.8	28.8	
回転式打音検査器	健全部	0.58~1.9	1.8~2.6	0.61~1.33	0.81~1.3	2.0	0.64	1.3	5.1
	欠陥部	8.3~19.5	3.9~10.7	4.4~6.0	4.6~15.7	15.6	1.4	6.6	

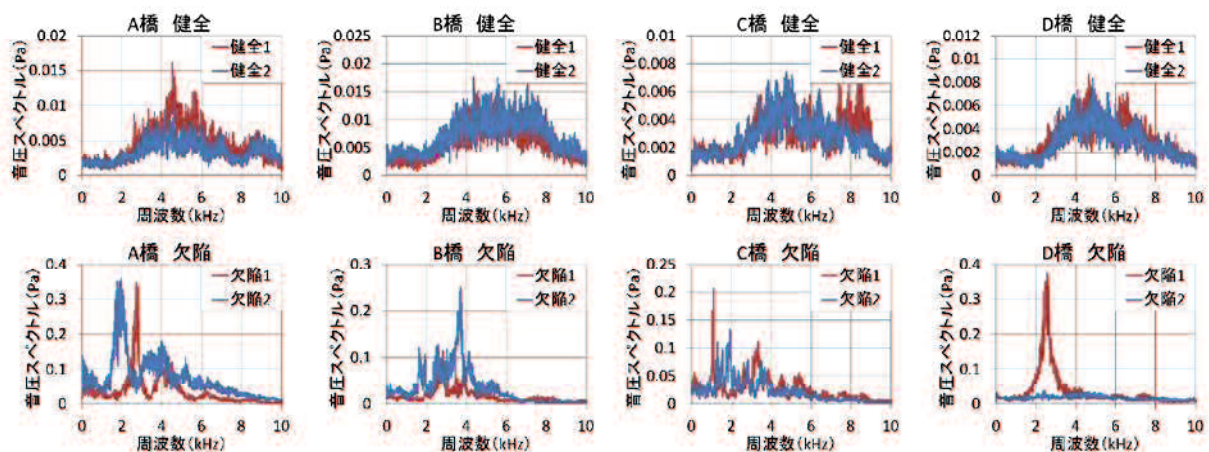
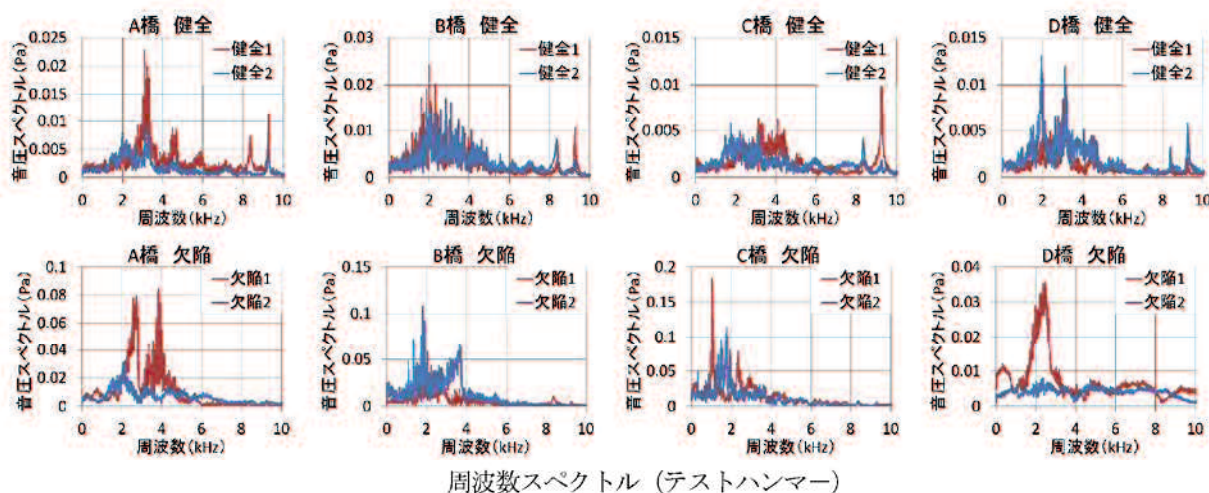


図-2.8 周波数スペクトル (回転式打音検査器)²⁰⁾

表-2.5 周波数スペクトル差（健全部と欠陥部の比較）²⁰⁾

橋梁	比較対象1	比較対象2	周波数スペクトル差(Pa)		回転式打音器検査/テストハンマー
			回転式打音検査器	テストハンマー	
A	健全1	欠陥1	1.73	0.53	3.28
		欠陥2	2.87	0.19	14.79
B	健全1	欠陥1	0.57	0.21	2.71
		欠陥2	1.50	0.53	2.83
C	健全1	欠陥1	0.98	0.66	1.49
		欠陥2	0.88	0.57	1.55
D	健全1	欠陥1	2.01	0.27	7.47
		欠陥2	0.46	0.10	4.69
		平均	1.08	0.40	3.80

(2) レーザー欠陥検出法^{21),22)}

レーザー欠陥検出法は、人の手による打音点検で使用するハンマーをレーザーに置換えたもので原理は同じである。本手法はレーザーで行う、遠隔・非接触による打音検査の一種であり、表面を振動させる振動励起レーザー、振動を計測するレーザー計測システムの2つから構成される。打音点検のハンマーによる打撃の代替にレーザーを用いてコンクリート表面を振動させるには、約1秒/億の短い時間内に、エネルギーを集中させることができるパルスレーザーが適しており、照射するパルスレーザーがコンクリートに吸収されることにより表面の温度が急激に上昇して衝撃波が起これ、表面が振動する。振動を確実にコンクリート表面に発生させるためには、直径5mm程度の広い範囲に渡ってレーザーを当てることも必要となるため、パルス当りのエネルギーは1ジュール以上の高いレベルを求められる。また、これらにより発生するコンクリートの振動は非常に微小であるため、これを計測するためにレーザー干渉計が用いられる。レーザー干渉計では、連続発振しているレーザーを2つに分け、一方を計測対象のコンクリートに照射し、もう一方は参照光として用いる。コンクリート表面で反射された信号光の光は、表面の微小振動により周波数が変化し、信号光と参照光を重ね合わせることで、信号光と参照光の差分であるコンクリートの振動周波数のみを取り出して計測することができ、内部に欠陥のある場合は特定の振動周波数が強くなり、このことから欠陥の有無を判定することができる。本手法は従来の打音点検の感覚的な判定を定量化することができ、また、非接触式であるため現場での点検員の安全性も向上させることができる。

レーザー欠陥検出法は、西日本旅客鉄道、鉄道総合技術研究所とレーザー技術総合研究所らにより、鉄道トンネルのコンクリート検査における実証実験が進められている²¹⁾ (図-2.9, 2.10)。また、その計測スピードを2秒間に1回(検出速度:0.5 Hz)から、その50倍に相当するという1秒間に25回(検出速度:25 Hz)を可能にする「高速掃引レーザー欠陥検出装置」をレーザー技術総合研究所、日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所、理化学研究所などの合同研究グループが、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)からの委託研究の一環として開発されている²²⁾ (図-2.11)。



図-2.9 トンネル内での試験状況²¹⁾

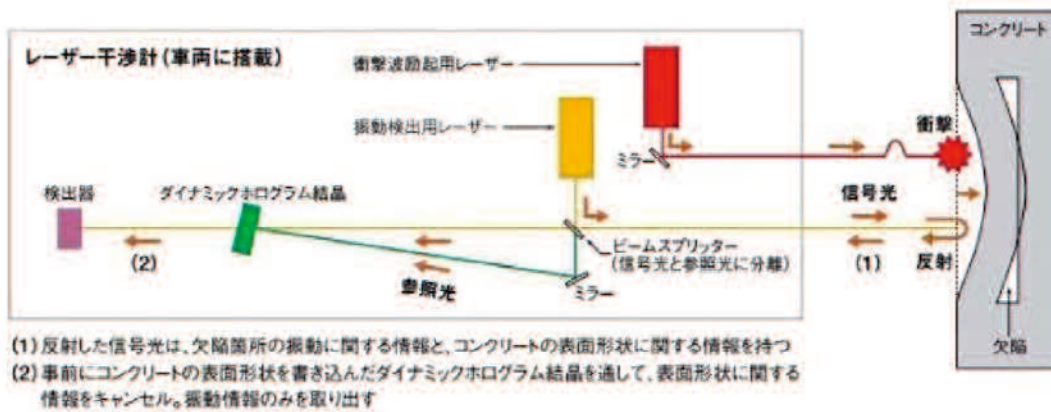


図-2.10 レーザーを用いたコンクリート健全度評価装置の仕組み²¹⁾

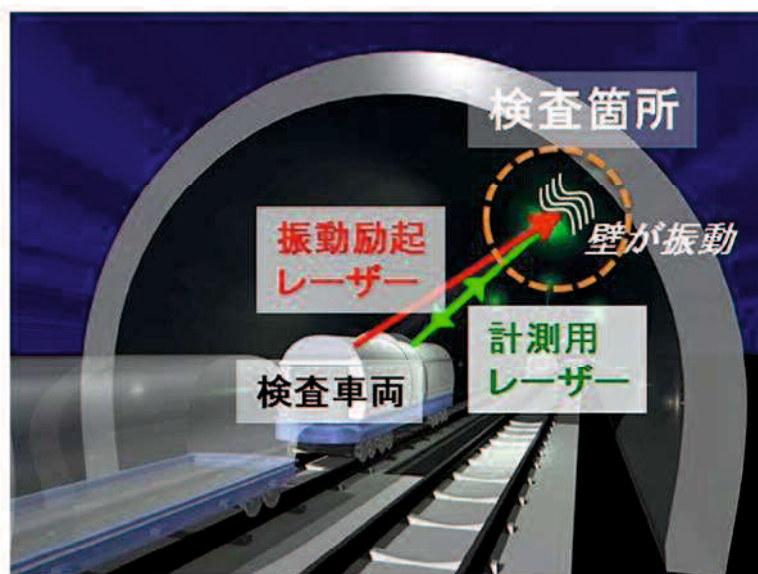


図-2.11 レーザ欠陥検出部のイメージ図²²⁾

(3) 新技術のまとめ

打音点検は従来から簡易な非破壊診断法として利用されてきた方法の一つであるが、点検領域が広範囲に及ぶ場合、点検員の労力が非常に大きく、従来の打音検査では、熟練者の経験的な感覚で打音の音質の相違から異常の有無を判断することが多く、理論的な裏付けがほとんどなされていないという問題点があった。これら問題点に対して、解決を図るために、回転式打音検査法のように従来の点検ハンマーの延長線上に位置するものから、レーザー欠陥検出法のように検出の原理自体は同じだが大規模なシステムを構築するもの等、多面的なアプローチにより解決を図ろうとされてきている。しかし、打音点検は構造物の種類、形状、置かれている状況にかかわらず、簡易に低コストで点検できるその利便性から完全には代替できるところまでは至っていない。

今後は、音圧や周波数解析により定めた閾値による評価の定量化²³⁾や、大幅に自動化されたシステムにより構造物全体の内部欠陥を把握し、システムでは把握しきれない部分や、叩き落としが必要な部分はテストハンマーによる打音点検を行うなど、お互いの長所を生かしつつ、短所を補完するように技術の並行適用を行う方向で技術開発が進んでいくと考えられる。

2.3 海外における点検技術

2.3.1 海外における点検状況

海外における点検状況は、トンネルは橋梁と同じ構造物としてグループ化され、日本のようにトンネルの特殊性から橋梁と大きく点検の考え方や技術が違うということは一般的にはない状況である。そのため、点検の考え方や技術は橋梁の延長線上に位置すると考えられており、橋梁に関するものが主を占める。

海外のトンネル点検基準としてアメリカの状況は、トンネル点検のガイドラインとしては、アメリカ合衆国運輸省 DOT (U.S.Department of Transportation) が定めるガイドライン「National Tunnel Inspection Standards (NTIS : 全国トンネル点検基準) ²⁴⁾」をベースに、連邦高速道路局 FHWA (Federal Highway Administration) が発行した「Specifications for the National Tunnel Inventory (SNTI : 全国供用トンネル仕様書) ²⁵⁾」(主に建設関係)と「Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation (TOMIE) Manual (トンネルの運用, 保守, 検査, 評価マニュアル) ²⁶⁾」(主に保全関係)に示された点検項目, 点検の評価方法に従って実施・報告することになっている。また, これらは全国的な標準であるため, これらをもとに, 地域ごとに基準を設けて点検を実施している。

トンネル点検の方針は, トンネル構造に関するすべてを対象として, 1回/2年の頻度で点検を実施する。ただし, トンネル構造に対して重要な問題が発見された場合には, 24時間以内に報告することになっている。それ以外においては, トンネル天井板の点検は毎年, トンネル構造上特別な部位や事故や火災等により損傷を受けた部分については適宜点検を実施している。なお, これらの報告は QA (Quality Assurance : 品質確保) と QC (Quality Control : 品質管理) のプロセスを経て作成提出される。点検は, 資格を持った専門技術者が実施することになっており, 基本的に目視点検および打音点検による結果から判断している。また, 特別な点検手法の必要性や技術があれば別途検討される。

日本とアメリカの道路トンネルの点検状況を表-2.6に示す。アメリカも日本も点検方法は「近接目視」と「打音点検」であり, 基本的な点検方法に違いはない。

表-2.6 海外(アメリカ)と日本の道路トンネルの点検状況の違い

項目	日本 (直轄国道)	日本 (直轄国道以外)	NEXCO (高速道路)	米国
点検の基準	道路トンネル定期点検要領【直轄版】	道路トンネル定期点検要領【全国版】	保全点検要領構造物編	全国トンネル点検基準 (NTIS)
点検名称	定期点検	定期点検	詳細点検	定期点検
点検頻度	5年毎(状況により点検間隔を短くする)	5年毎(状況により点検間隔を短くする)	5年毎(状況により点検間隔を短くする)	2年毎(状況により点検間隔を短くする)
主な点検方法	近接目視 ・打音点検	近接目視 ・打音点検	近接目視 ・打音点検	近接目視 ・打音点検

2.3.2 非破壊検査の実施例等

海外のトンネル専門紙である「Tunnelling and Underground Space Tecnology」に、掲載されているものとして、ITA（International Tunneling Association：国際トンネル協会）の「The maintenance and repair of underground structures：地下構造の保守と補修」WGのメンバーである南アフリカから、WGでの活動報告²⁷⁾がある。これはトンネルの供用年数が進む中で、地下構造物の点検と補修は困難であることから、設計段階から点検と補修を考慮しなければならないと提言されている。点検技術については、目視および打音点検を基本としつつ、新技術として覆工表面画像撮影技術、赤外線サーモグラフィによる欠陥部抽出技術、電磁波による覆工厚の測定技術等が網羅的に紹介されており、今後はこれら非破壊検査が現地での試験的な適用が進むだろうとされている。

また、パリの地下鉄の石積の覆工トンネルの点検についての報告があり、**図-2.12**に示すハンマーによる打音点検時の振動の計測システムや、ボアホールカメラを用いて内部の劣化状況をモニタリングするシステム²⁸⁾が報告されている。日本より古い構造のトンネルが現代においても使用されていることから、コンクリート以外の点検手法についても研究・開発が進められているとされている。

国土交通省において開催されている「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会」（委員長：関西大学環境都市工学部客員教授 京都大学名誉教授 大西有三）の第5回【2015（平成27）年3月6日開催】において海外のモニタリング技術について「海外事例に関する調査」²⁹⁾として報告されている。この中で、31事例が紹介されているが、トンネルに関しては**図-2.13**～**2.15**に示す部材厚を測定するための、衝撃応答法と超音波表面波法が研究レベルの一事例として橋梁と合わせて紹介されているだけである。ちなみに、この報告では橋梁の事例が最多となる17事例が紹介されおり、長大橋などの特殊な橋梁等に振動特性などを把握するために加速度センサーや変位計を設置する事例はあるが通常の中小橋に設置する例はあまりなく、中小橋にはロボットやUAV等を活用した定期的な



図-2.12 モニタリング手法（テストハンマー・ボアホールカメラ）²⁸⁾

モニタリングの事例が多いことが報告されている。現時点では、トンネル・橋梁等含め、各種非破壊検査技術やモニタリング技術が体系化され、基準等が整備されている事例は無く、各国において様々な技術が研究段階から実用段階に移行しつつあるとされている。



図-2.13 試験床版²⁹⁾



図-2.14 ハンギング湖トンネル²⁹⁾

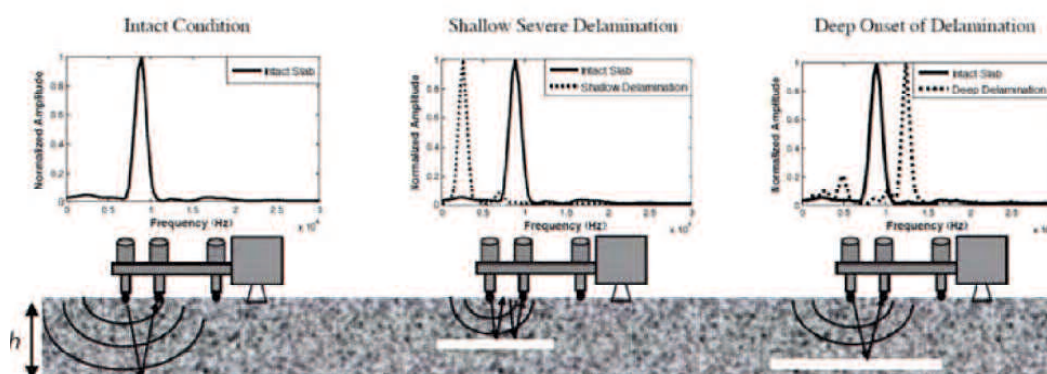


図-2.15 衝撃応答法 (IE) の概念図²⁹⁾

2.4 高速道路トンネルにおけるトンネル点検技術に関する既往研究

2.4.1 トンネル点検手法に関する既往研究

道路トンネルの点検にあつては、2.1 既存のトンネル技術点検技術等に示すとおり、技術者による現地での近接目視点検が一般的な中、走行型覆工表面画像撮影技術に代表される機械化を標準的に導入しているのは NEXCO のみである。

機械化にあつて、佐野ら³⁰⁾は、レーザー光線等を用いた点検の計測システムから得られる覆工表面の連続印刷画像を、技術者が机上にて解析する場合の推定精度および業務経験に応じて設定した資格の影響について検討を行った。その結果、連続印刷画像解析は、現地での近接目視点検に対しても、比較的精度よくひびわれの状況を求めることができ、その精度は技術者の資格によって異なることを示した。

また、佐野ら³¹⁾は従来の技術者による現地での近接目視点検に替わる点検システムとして、60km/h 程度の速度で覆工表面を計測できる車両を活用した新点検システムの提案が行われた。その結果、①計測車両を用いて覆工コンクリートの表面状態を計測し、②得られた連続印刷画像を机上にて目視点検する、③評価点と健全度の閾値を照合することにより、要現地点検の判定、④現地点検が必要と判断されたスパンは、近接目視・打音点検を適用し、⑤変状状態を現地で再確認し、健全度判定や進行性を勘案した上で、健全度ランクを判定するシステムとして図-2.16 が示され、①～③の作業を点検 A、④⑤の作業を点検 B と称した。

この 2 段階の新点検システムは、健全度評価基準を整備することにより、点検 A で覆工コンクリートの健全度評価を机上にて定量的に行い、点検 B で現地点検を必要とするスパンの抽出を行ふことで、数量の把握が容易であり効率的な現地点検計画を立案できるとした。

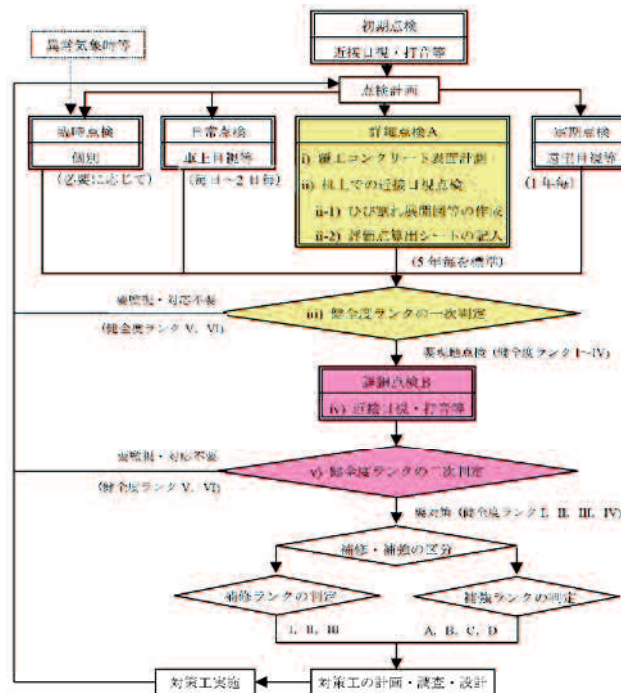


図-2.16 高速道路トンネルの新点検システム³¹⁾

2.4.2 トンネル覆工コンクリートの健全度評価手法に関する既往研究

トンネルの健全度評価の中心となるトンネル覆工コンクリートの健全度評価は、1.3 道路トンネルの維持管理の流れに示すように、定性的評価が一般的である。そのような中、NEXCO では定量的な評価手法として、岩盤力学の分野で用いられている、クラックテンソル理論に基づき算出した、クラックテンソルを援用した TCI を用いることにより、トンネル覆工コンクリートの健全度評価の定量化が図られている。

大場ら³²⁾や重田ら³³⁾により、事業者ごとに制定されている健全度評価とクラックテンソルには相関があることが示された。従来の諸基準であるひびわれ幅、長さや密度に着目してトンネル覆工コンクリートの健全度を大まかに分類する評価に代わり、健全度を数値化して表現できるため、効率的な維持計画に寄与できるとした。

山田ら³⁴⁾は、トンネル覆工コンクリートの健全度を示す複数の観察項目と評価区分を設定し、各評価項目に対して熟練技術者を対象に階層化意思決定法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) を用いて点数付けを行った。この手法は、各評価項目の重み付けを行い数値化したことにより、熟練点検技術者による評価を反映できるとともに、点検技術者の個人依存性も小さくしており、より適切かつ詳細に健全度を評価することが可能になるとされる。本研究の結果、現在のひびわれ状態が外力の作用を受けているものか否かの判定を実施するために外力評価点と、はく落につながる可能性があるひびわれか否かの判定を実施するはく落評価点に分けて、評価項目ごとに重み付けを行った評価点算出シートの記入例として表-2.7 が示された。

表-2.7 評価点算出シートの記入例³⁴⁾

観察項目	評価区分		Check	外力判定 用評価点	はく落判定 用評価点
	数値算出結果の評価	画像目視の評価			
1. 最大ひび 割れ幅	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
	最大1mm程度がある	細め	<input type="checkbox"/>	4	3
	最大2mm程度がある	中程度	<input checked="" type="checkbox"/>	8	5
	最大3mm程度がある	太め	<input type="checkbox"/>	11	8
	3mm程度以上	非常に太め	<input type="checkbox"/>	15	10
2. 最大ひび 割れ幅の 長さ (連続して いる箇所)	横断	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
		1/4アーチ長未満	<input type="checkbox"/>	3	1
		1/4～1/2アーチ長未満	<input type="checkbox"/>	5	3
		1/2～1アーチ長未満	<input type="checkbox"/>	8	4
		1アーチ長	<input checked="" type="checkbox"/>	10	5
	縦断	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
		1/4スパン長未満	<input type="checkbox"/>	6	2
		1/4～1/2スパン長未満	<input type="checkbox"/>	12	3
		1/2～1スパン長未満	<input checked="" type="checkbox"/>	17	5
		1スパン長	<input type="checkbox"/>	23	6
3. 力方向性	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
	70%以上が縦断方向	横断・斜断型	<input type="checkbox"/>	4	2
	縦断方向が各々50%程度	縦断・斜断型	<input type="checkbox"/>	7	4
	70%以上が縦断・斜め方向	縦断・斜め中絶型	<input checked="" type="checkbox"/>	11	6
4. ひび割れ の分布	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
	密度「～20cm ² /m ² 」	局部に発生している	<input checked="" type="checkbox"/>	3	4
	密度「20～50cm ² /m ² 」	全域に分散し発生している	<input type="checkbox"/>	7	7
	密度「50cm ² /m ² 以上」	全域に発生している	<input type="checkbox"/>	10	11
5. パター ン	亀甲状	なし	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
	1m未満	なし	<input type="checkbox"/>	7	11
	1m以上	なし	<input type="checkbox"/>	14	22
	閉合型	なし	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
6. 遊離ひ び	なし	なし	<input type="checkbox"/>	4	12
	長さ20cm未満	長さ20cm以上	<input type="checkbox"/>	7	23
	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
	5箇所未満	少ない	<input checked="" type="checkbox"/>	2	4
7. 漏水	5～9箇所	中程度	<input type="checkbox"/>	3	8
	10箇所以上	多い	<input type="checkbox"/>	5	12
	なし or (局所止水板等で補修済み)	なし	<input type="checkbox"/>	0	0
8. 遊離ひ び	ひび割れ延長の20%程度	少ない	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
	ひび割れ延長の50%程度	中程度 (散在)	<input type="checkbox"/>	2	2
	ひび割れ延長の70%程度	多い (全面に分布)	<input type="checkbox"/>	3	3
9. 漏水	なし	なし	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
	あり	あり	<input type="checkbox"/>	2	2

また、山田ら³⁵⁾は、健全度評価シートの観察項目のうち、ひびわれ情報から数値化される「1.最大ひびわれ幅」、「2.最大ひびわれ幅の長さ」、「3.ひびわれ分布」、「4.方向性」について、クラックテンソルの考えを導入した TCI によるひびわれ評価の点数化が検討され、TCI の F_0 を健全度評価基準のひびわれ評価点に換算できる簡易手法が示された。本研究では山田ら²⁵⁾の研究で示された評価点算出シートより、外力評価点は 58 点、はく落評価点は 32 点が上限値とされた。また、式 (1.1) に示される、ひびわれ幅の重み付けに関する係数 a と、ひびわれ長さの重み付けに関する係数 β は、それぞれ 0.5~2.0 を組み合わせた TCI を算定し、健全度評価との相関性を調べた結果、1.0 がもっとも高い相関性が示された。ひびわれ評価点と TCI の関連性については、評価点に上限値を設けたことから、比較的簡易な収束関数であるゴーラル関数を用いて、式 (2.1)³⁵⁾ に示されるゴーラル曲線式にて回帰を行い、外力評価点は図-2.17、はく落評価点は図-2.18 に示す TCI との関係を得た。方向性については、TCI 中の横断成分 F_{22} が F_0 中に占める割合 (F_{22}/F_0) を基に設定された。

これにより、「1.最大ひびわれ幅」、「2.最大ひびわれ幅の長さ」、「3.ひびわれ分布」、「4.方向性」の TCI による点数付けについては、山田ら³⁴⁾により、提言された健全度評価シートと概ね同等の健全度ランクを導くことが可能であるとされた。

$$\frac{y}{b} = \frac{F_0}{F_0 + a} \quad (2.1)$$

y : ひびわれ評価点

b : ひびわれ評価点の上限値 (外力: 58, はく落: 32)

a : 曲線を表す係数

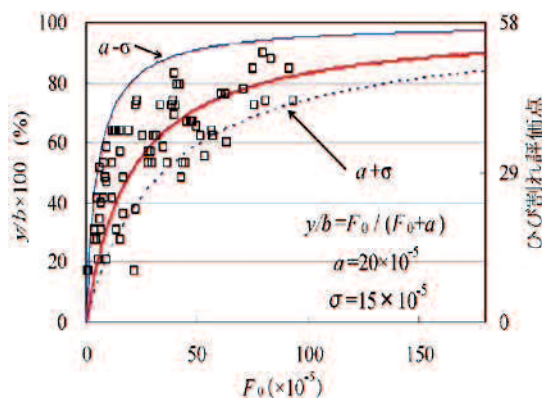


図-2.17 ひびわれ評価点 (外力) と TCI の関係³⁵⁾

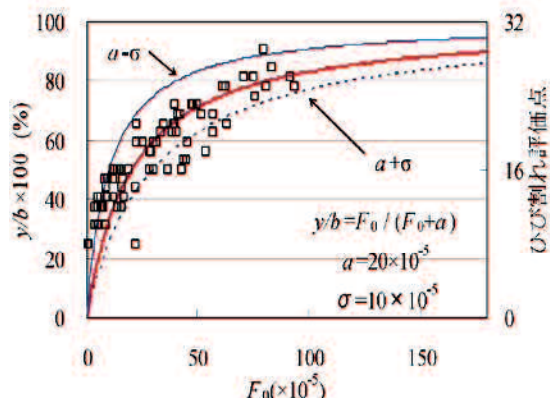


図-2.18 ひびわれ評価点 (はく落) と TCI の関係³⁵⁾

2.5 まとめ

国内、海外ともにトンネル覆工の点検手法は、過去において点検の必要性が認められてから目視（遠望・近接目視）点検および打音点検を行うことが基本であり、今現在においてもそれについては変わってはいない。海外では、一部、古い構造である石積覆工トンネルの検査技術が開発されてきているが、同一断面での線状構造物であり、覆工がほぼ無筋構造である等の、トンネルの特殊性が考慮された点検技術の適用開発はあまり進んでおらず、日本で開発されている点検技術が海外に展開することは可能であろう。

国内では道路法の改正により定期点検の実施が明確に制度化されたことから点検業務が増大したことにより、点検の高精度化・効率化が急務となっている。そのため効率化等を目指した機械化技術の開発が盛んに進められているが、今現在のところ従来の点検に変わる方法として全面的な適用には至っていない。既往の研究の結果、機械化を導入した点検システムおよび定量的な健全度評価手法を積極的に取り入れている NEXCO においても、全面的な適用には至っていない。

今後、トンネル資産の劣化が急速に進む中で、点検技術者の高齢化および技術者不足による点検業務の技術力低下は、現在進行形で進んでおり、今後より大きな問題となることは間違いない状況である。

このような点検技術等の現状から、解決が必要となる課題はソフト・ハード面から以下のように考えられる。

- i. 定性的な表現が多く、判定に個人差が出やすいトンネル健全度の判定区分の定量的評価の確立
- ii. トンネル健全度の定量的評価に必要となる変状の進行性の把握手法の確立
- iii. 技術者による近接目視点検・打音点検に替わる点検手法として、機械化による点検の高精度化・効率化
- iv. 点検により得られたデータを活用したマネジメントシステムの技術開発。撮影画像からのひびわれの抽出およびその抽出したひびわれ等からの健全度判定に、近年急速に発展している AI 技術の活用による、一層の高度化・効率化を目指したマネジメントシステム構築

これら課題のなかでも、i～iiiに関しては、第1章での述べたとおり、トンネル資産の増加および老朽化、それらに伴う点検業務の増大から、研究・開発の必要性が特に高い課題であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 国土交通省 道路局 国道・防災課：道路トンネル定期点検要領， p.10， 2014.
- 2) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領， pp.12-13， 2019.
- 3) 海瀬 忍，伊藤哲男，八木 弘，水野希典，前田洗樹，進士正人：トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.74，No.1，pp.1-14，2018.
- 4) 「トンネル新技術への挑戦」連載講座小委員会：トンネル新技術への挑戦(15)ー道路トンネルの点検システムー，トンネルと地下，vol.48，no.2，pp.61-68，2017.
- 5) 国土交通省：2015年度 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進，トンネル維持管理技術の現場検証・評価の結果，2015.
- 6) 水口尚司，大西有三，西山 哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究），Vol.71，No.1，pp.20-30，2015.
- 7) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ（案）， p.110， 2019.
- 8) 重田佳幸，岡本直樹，前田洗樹，八木 弘，水野希典，前田佳克，海瀬 忍：横断方向ひびわれと走行型計測の変形モード解析による外力変状の評価について，土木学会第 72 回年次学術講演会，Ⅲ-362，pp.723-724，2017.
- 9) 小島芳之，青木俊朗，松村卓郎，海瀬 忍：トンネル診断のシステム化に関する現状と課題，土木学会地下空間シンポジウム論文・報告書，第 5 巻，pp.223-230，2000.
- 10) 川上幸一，小西真治，三浦孝智，篠崎真澄，福中公輔：地下鉄トンネルの全般検査データによる維持管理指標の研究，土木学会トンネル工学報告集，第 25 巻，IV-1，2015.
- 11) 篠崎真澄，小西真治，川上幸一，三浦孝智，田口真澄，村田利文，石川雄章：画像認識技術を利用したはく落要注意箇所自動抽出システムの開発，土木学会トンネル工学報告集，第 26 巻，Ⅲ-2，2016.
- 12) 藤田悠介，中村秀明，浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出，土木学会論文集 F，Vol.66，No.3，pp.459-470，2010.
- 13) 河村 圭，村上彗季，塩崎正人：対話型遺伝的アルゴリズムを用いたひび割れ半自動抽出手法の研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.71，No.2，I_114-122，2015.
- 14) 全 邦釘，井後敦史：Random Forest によるコンクリート表面ひび割れの検出，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.71，No.2，I_1-I_8，2015.
- 15) BUILT ホームページ，
<<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1808/06/news014.html>>，2019.8.19 アクセス.
- 16) キヤノンホームページ(株)，
<<https://cweb.canon.jp/newsrelease/2018-07/pr-infra.html>>，2019.8.19 アクセス.
- 17) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所ホームページ，

- < https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170803/pr20170803.html >, 2019.8.19 アクセス.
- 18) 富士フイルム(株)ホームページ,
< <https://fujifilm.jp/business/material/infraservice/> >, 2019.8.19 アクセス.
- 19) (株)NEXCO 東日本グループ技術商品サイトホームページ,
< <http://www.e-nexco-tech-service.jp/details/nee-023.html> >, 2019.8.19 アクセス.
- 20) 園田佳巨, 渡邊達郎: 回転式打音検査の欠陥検出能力に関する定量的評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.59A, pp682-692, 2013.
- 21) 日経 XTECH ホームページ,
< <https://tech.nikkeibp.co.jp/kn/article/const/column/20141104/682273/> >, 2018.7.8 アクセス.
- 22) 国立研究開発法人 科学技術振興機構ホームページ (JST),
< <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160111/index.html> >, 2019.8.19 アクセス.
- 23) 佐藤元紀, 大塚弘貴, 岡屋 治: トンネル点検における打音検査の定量化に関する取り組み, 土木学会トンネル工学報告集, 第 28 巻, I-13, 2018.
- 24) U.S.Department of Transportation (DOT) Federal Highway Administration : National Tunnel Inspection Standards (NTIS), 2015.
- 25) Federal Highway Administration (FHWA) : Specifications for the National Tunnel Inventory, 2015.
- 26) Federal Highway Administration (FHWA) : Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation (TOMIE) Manual, 2015.
- 27) J. A. Richards : Inspection maintenance and repair of Tunnels : International lessons and practice, Tunneling and Underground Space Tecnology, Vol.13, pp.369-375, 1998.
- 28) Daniel Llanca, Pierre Breul, Claude Bacconnet : Improving the diagnosis methodology for masonry tunnels, Tunneling and Underground Space Tecnology, Vol.70, pp.55-64, 2017.
- 29) 国土交通省 : 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会 (第 5 回), 資料 4 海外事例に関する調査, 2015.
- 30) 佐野信夫, 伊藤哲男, 馬場弘二, 西村和夫, 吉武 勇, 中川浩二 : 連続印刷画像を用いたトンネル覆工コンクリートのひび割れ評価におよぼす技術者資格の影響, 土木学会論文集 F, Vol.62 No.3, pp.558-566, 2006.
- 31) 佐野信夫, 馬場弘二, 山田隆昭, 吉武 勇, 中川浩二, 西村和夫 : 高速道路トンネルの合理的な点検システムの提案, 土木学会論文集 D, Vol.63 No.3, pp.391-400, 2007.
- 32) 大場 諭, 亀村勝美, 重田佳幸, 進士正人, 中川浩二 : トンネル覆工健全度評価のためのクラックテンソルの適用性の検討, 土木学会トンネル工学研究論文, 第 13 号, 報告(47),

pp.371-376, 2003.

- 33) 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, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.628-632, 2006.
- 34) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 吉武 勇, 中川浩二: トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.86-96, 2007.
- 35) 山田隆昭, 佐野信夫, 重田佳幸, 吉武 勇, 西村和夫: ひび割れ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.11-16, 2009.

第3章 トンネル覆工表面画像撮影技術による点検技術の精度向上の可能性に関する検証

3.1 目的

図-1.8, 図-1.9 に示すように, NEXCO の覆工詳細点検システムは走行車両を用いた覆工表面画像撮影技術(以下“画像撮影”と呼ぶ)による覆工表面画像撮影記録(以下“覆工画像”と呼ぶ)を使用して行う机上点検の点検 A と, 点検 A の評価により実施される現場での点検 B の組合せで構成されている。しかし, 道路法の改訂により, 2015(平成 27)年からは, 覆工画像に基づき重点点検個所の抽出と健全度評価を行い, 近接目視点検を全線で実施しており, 走行型覆工表面画像撮影技術を導入しているメリットが生かされていない。そこで, 点検の効率化を目的に現在, 標準的に導入されている走行型覆工表面画像撮影技術を用いた近接目視点検の代替による点検技術の精度向上の可能性について検証する。

3.2 覆工画像による近接目視点検の代替手法の検討

3.2.1 検討イメージ

走行型の覆工表面画像撮影が近接目視点検の代替技術として適用できるか検証するため, 覆工画像による覆工の問題箇所の抽出結果と近接目視点検の抽出結果の比較を, 実際のトンネルを利用したの現地試験により実施した。試験を実施するにあたり図-3.1 に精度検証のイメージ図を示す。

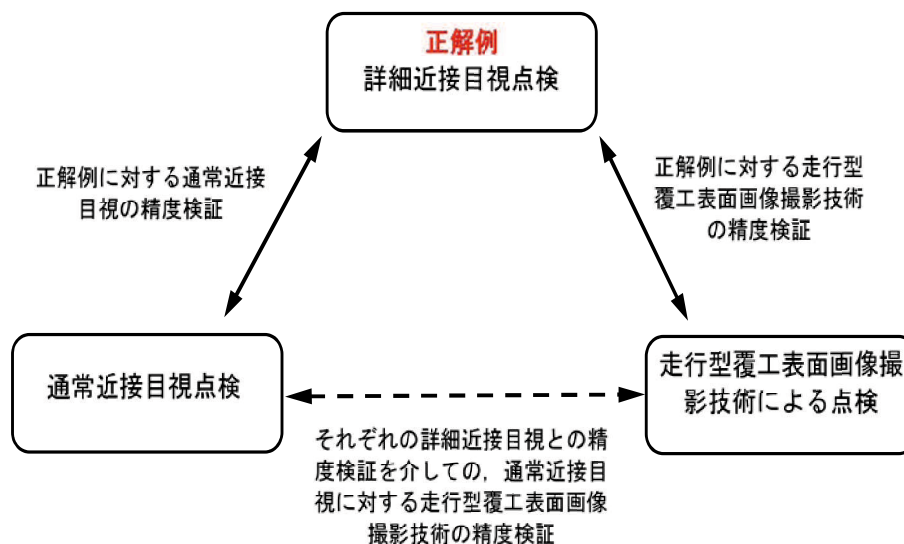


図-3.1 精度検証のイメージ図

3.2.2 実施方針

図-3.2 に、試行試験の実施フローを示す。試行試験では、「走行型覆工表面画像撮影技術による点検」、「詳細近接目視点検」、「通常近接目視点検」の3種類の点検を実施し、それぞれの点検で作成した変状展開図の精度を比較検証する。検証項目については、国土交通省「道路トンネル定期点検要領」および図-1.12、図-1.13のNEXCO点検要領で示されている詳細点検シートより覆工の点検時に把握しなければならない項目として評価項目Ⅰ、Ⅱ、Ⅲを設定し、その評価結果を点検手法別に検証を行う。

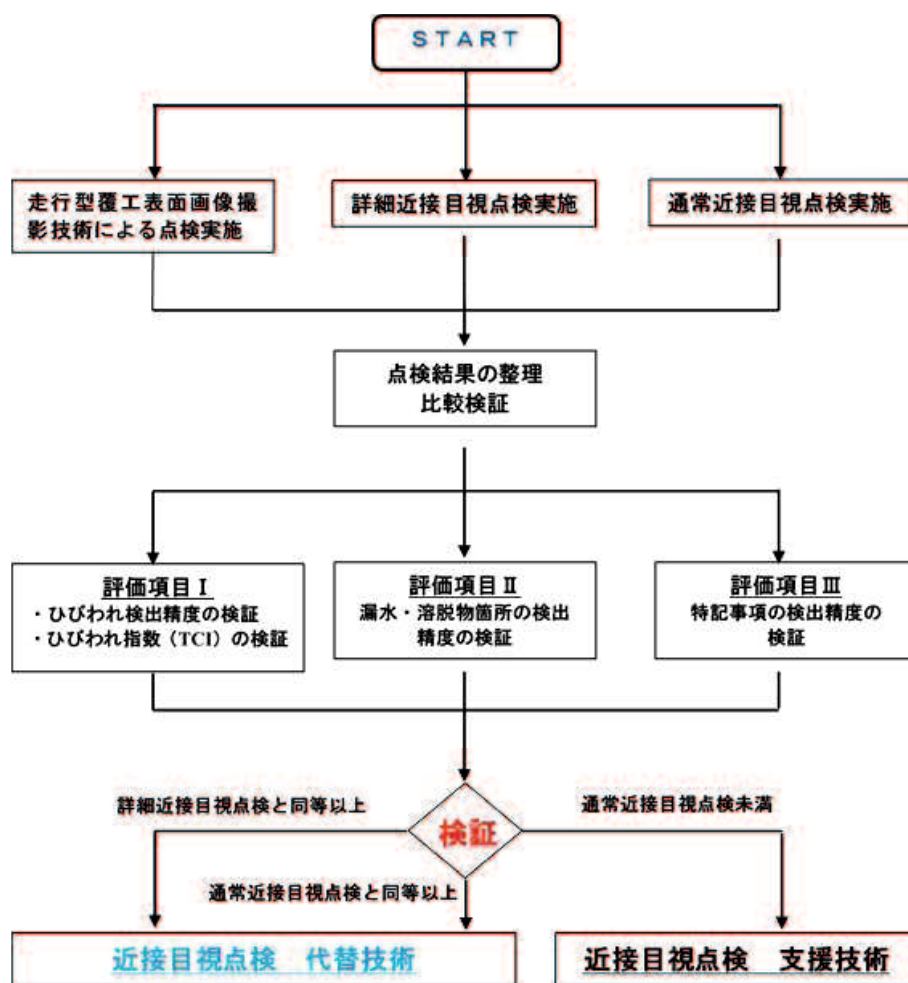


図-3.2 試験点検実施フロー

3.2.3 実施内容

試行試験で実施する3種類の点検について、以下にその詳細を述べる。

(1) 走行型覆工表面画像撮影技術による点検

走行型覆工表面画像撮影技術による点検とは、現在NEXCOで定める仕様を満たす、交通規制の必要がなく、走行しながらの覆工画像撮影が可能な撮影技術をいう。この点検では、

図-3.3 に示す時速 70～80km で走行しながら 1 ピクセル 1.5mm～2.0mm の精度で覆工画像撮影が可能な走行型計測技術²⁾³⁾を用いて実施する。得られた覆工画像をパソコンの画面上から確認しながら、ひびわれ、うき、はく離、漏水等の変状を自動抽出ではなく、人により抽出し、画像に変状部分を重ねるように記録して変状展開図を作成する。本点検により撮影された覆工画像から作成した変状展開図を、以下「画像展開図」と呼ぶ。



図-3.3 走行型覆工表面画像撮影技術による点検



図-3.4 通常近接目視による点検

(2) 詳細近接目視点検

詳細近接目視点検とは、通常近接目視点検よりも点検時間をかけて、丁寧に変状展開図を作成する詳細点検である。

詳細目視点検時は、(1) 走行型覆工表面画像撮影技術による点検で作成され、変状の位置情報を正確に捉えられた画像展開図を現地に持参して活用しながらの近接目視点検により、詳細なひびわれ幅、延長の把握し、合わせて全面打音検査等を実施し、変状展開図を作成する。詳細近接目視点検により作成した変状展開図を、以下「詳細展開図」と呼ぶ。

(3) 通常近接目視点検

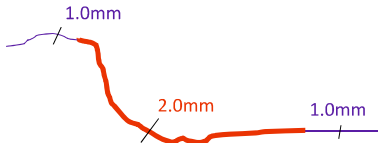
通常近接目視点検とは、主に 5 年に 1 回の頻度で実施する近接目視点検を想定したものである。点検時間に比例して把握できる損傷が多くなると考えられことから、ひびわれ密度によって掛かる人工が設定されている国土交通省の歩掛りを参考⁴⁾に、過去の点検実績も考慮し、試験を実施したトンネルのひびわれ密度から 1 スパンあたりの点検時間を算出し、それを参考に点検を実施する。図-3.4 に通常近接目視点検の実施状況を示す。

通常近接目視点検時は、1 回目の近接目視点検を想定して、過年度点検データならびに覆工画像から作成した変状展開図等を携行せず、最初から技術者がスケッチを行い、1 スパン分の覆工変状展開図を作成する、通常近接目視点検により作成した変状展開図を、以下「通常展開図」と呼ぶ。

精度検証では、詳細展開図を正解値と考え、画像展開図と通常展開図との点検精度の比較検証を行う。

上記 3 種類の点検方法および内容の違いを表-3.1 に示す。

表-3.1 点検方法および内容の違い

点検の種類 (展開図)	走行型覆工表面画像 撮影技術による点検 (画像展開図)	通常近接目視点検 (通常展開図)	詳細近接目視点検 (詳細展開図)
ひびわれ幅 の読み取り 精度	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0.3mm ▪ 0.5mm ▪ 1.0mm ▪ 2.0mm ▪ 3.0mm ▪ 3.0mm 以上 		
ひびわれ幅 の測定	ひびわれ 1 本の中で、 変化を入れる※1	最大幅	ひびわれ 1 本の中 で、変化を入れる※1
スケッチの 正確さ	撮影画像から作成	人力のみで作成	画像展開図を基に作 成
打音検査	実施不能	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 横断目地、水平目 地沿い ▪ ひび割れ沿い ▪ 重点点検箇所 	覆工全面
変状写真	覆工全面	異常箇所	異常箇所
時間制約	なし	100m/日	30m/日
<p>※1) ひび割れ幅の測定</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>■通常展開図の場合</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>■画像展開図、詳細展開図の場合</p>  </div> </div>			

3.2.4 試行試験概要

(1) トンネル概要

高速自動車国道 A トンネル (下り線)

断面：二車線，一方向，延長：L=3,069m

施工工法：山岳トンネル工法 (NATM)

供用年月：1984年3月

試験スパン：スパン 07, 60, 67 の 3 スパン

(2) 試行スパンの選定条件

試行スパンの選定については、国土交通省の道路トンネル定期点検業務積算資料 (暫定版)⁴⁾ (以下“積算資料”という) おいて、点検ひびわれ密度 (m/m^2) : C の 5 つの分類, 「 $0 \leq C \leq 0.1$ 」, 「 $0.1 < C \leq 0.2$ 」, 「 $0.2 < C \leq 0.3$ 」, 「 $0.3 < C \leq 0.4$ 」, 「 $0.4 < C$ 」の真中のグレードである「 $0.2 < C \leq 0.3$ 」を平均的な損傷と考え、該当するスパンをトンネル全スパンの中から抽出した。検証スパン数は現地規制時間の制限を考慮して 3 スパン選定した。また、点検時の作業条件をできるだけ同一とするように、スパンを走行車線側、追越車線側に 2 分割して、3 スパンそれぞれの車線側を同一日に点検を実施した。

(3) 点検員構成と点検所要時間

表-3.2 に示す通り、点検員は 1 チーム 4 名構成とし、3 名がアーチ部点検、1 名が高所作業車運転者として点検を行った。

また、スパンあたりの点検所要時間は、積算資料を参考に以下の式(3.1)により算出した。

$$T = T_1 / 10,000 \times A \times \alpha \times \beta \quad (3.1)$$

T : 1 スパンあたりの点検時間 (分)

T_1 : 10,000 m^2 あたりの点検時間 (日)

A : 1 スパンあたりの点検面積 (m^2)

α : 点検時間割合 (%)

β : 1 日あたりの稼働時間 (分/日)

積算資料より、 T_1 は、ひびわれ密度が「 $0.2 < C \leq 0.3$ 」の場合トンネル全断面で 10 日となっており今回はアーチ部のみの点検のため半分の 5 日とした。 A は 1 スパン $L=10.5m$, $W=20m$ から面積約 210 m^2 , α は積算資料の点検時間には打音検査 (叩き落とし) および照明点検の作業時間も含むため、過去の点検実績から 1 スパンあたりの点検にかかる時間割合を「近接目視 : 打音検査 : 照明点検 = 6 : 3 : 1」と想定し 60%, また、 β は一般的な稼働時間である 7 時間で算出したところ約 26 分となった。

表-3.3 に、3 スパンのそれぞれのひびわれ密度、積算資料による点検時間および試行点検で近接目視点検に実際に要した点検時間を示す。これによると通常近接目視は国土交通省

の歩掛から算出した時間以内ではほぼ点検できたことがわかる。このことより、点検技術者の職種⁵⁾も積算資料と合致していることから、実施した通常目視点検は国土交通省が想定している点検精度を有していると考えられる。

また、表-3.4 に、各展開図の作成時間を示す。画像展開図は画像貼合せおよび変状展開図作成時間を分けて示している。詳細展開図は画像展開図を用いて近接目視を行ったため、机上時間は画像展開図の貼合せ時間および（画像展開図の変状展開図作成時間）＋（現地近接目視の図化データの整理）を示す。なお、通常展開図は、現地作業時に図化を終えているため、机上作業は図化データの整理のみの時間である。

表-3.2 点検員構成

点検員	技術者の職種 ⁵⁾	年齢	経験年数	備考
点検員 1	技師 B	55	8	アーチ部点検
点検員 2	技師 C	26	7	アーチ部点検
点検員 3	技術員	33	4	アーチ部点検
点検員 4	技術員	65	2	高所作業車運転者

表-3.3 点検所要時間の比較

	通常近接目視点検 (分)			詳細近接目視点検 (分)		
	走行	追越	計	走行	追越	計
国土交通省歩掛 ($0.2 < C \leq 0.3$)	13	13	26	—	—	—
スパン 07 ($C = 0.262 \text{ m/m}^2$)	8	8	16	40	35	75
スパン 60 ($C = 0.262 \text{ m/m}^2$)	15	10	25	30	30	60
スパン 67 ($C = 0.246 \text{ m/m}^2$)	15	10	25	25	25	50

表-3.4 各展開図の作成時間の比較（机上作業）

1 スパン当り	画像展開図	詳細展開図	通常展開図
展開図	画像貼合せ 125 分	画像貼合せ 125 分	—
作成時間	変状展開図 100 分	変状展開図 135 分	25 分
合計	225 分	260 分	25 分

3.2.5 試行試験実施結果

今回の試行試験結果の検証には、**図-3.5**の展開図に記載する凡例および**図-3.2**試行試験実施フローに示される「走行型覆工表面画像撮影技術」により取得された**図-3.6**に示す覆工画像から作成された変状展開図を画像展開図として検証に使用する。また、**図-3.6**は詳細展開図作成時の現地詳細点検時のベースとしても使用する。通常展開図は本覆工画像は使用せず、現地での近接目視点検により直接変状展開図を作成する。**図-3.7**、**図-3.8**、**図-3.9**に対象スパンの[ひびわれ]、[漏水、溶脱物]、[うき、はく落、補修工]の変状展開図を画像展開図、通常展開図、詳細展開図、通常展開図ごと、**表-3.4**、**表-3.5**、**表-3.6**に各評価項目の検出比較結果をそれぞれ示す。

凡 例	
表 示	目視点検での変状種類
——	施工目地
	補修工
ひびわれ0.3mm以下(≤0.3)	モルタル系補修工
0.5 ひびわれ0.5mm程度(0.3mm<t≤0.7mm) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	漏水防止工(導水工)
1.0 ひびわれ1.0mm程度(0.7mm<t≤1.2mm) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	打音点検箇所
1.5 ひびわれ1.5mm程度(1.2mm<t≤1.7mm) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	内装工損傷
2.0 ひびわれ2.0mm程度(1.7mm<t≤2.2mm) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	漏水防止樋損傷
2.5 ひびわれ2.5mm程度(2.2mm<t≤2.7mm) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	排水施設損傷
3.0 ひびわれ3.0mm程度(2.7mm<t≤3.2mm) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	舗装損傷
3.5 ひびわれ3.5mm程度以上(3.2mm<t) 数値はひびわれ最大開口幅(mm)	トンネル坑門工損傷
	段差 矢印側突出、数値は段差(mm)
	圧ざ
	コールドジョイント (CJ)
	うき・はく離 (ハンマー打診異常箇所)
	亀甲状ひびわれ
	閉合型ひびわれ
	三日月型ひびわれ
	はく落(はく落跡)
	骨材の露出(ジャンカ部)
	漏水滴水 リットル/分
	漏水(濡れている部分)
	漏水跡
	溶脱物(エフロレッセンスなど)
	(a) 濁音(ポコポコ)がし、はく落の可能性ある。 (b) 濁音がする。 (c) 静音を発生し、反発がある。 打音検査により推定できる深さ方向のひび割れの表示方法 (表示方法)

図-3.5 変状展開図の凡例

※凡例では、「うき・はく離」は打音点検時の異常箇所（うきを点検時にたたき落としたものがはく離）、「はく落（はく落後）」は、うきの状態の箇所が落下した状態およびはく離箇所の次回点検箇所を示すことになっており、点検時の状態により「a: 濁音がし、はく落の可能性ある」、「b: 濁音がする」、「c: 静音を発生し、反発がある」の3種類の情報を必要に応じて付与することになっている。



図-3.6 検証に用いた覆工画像

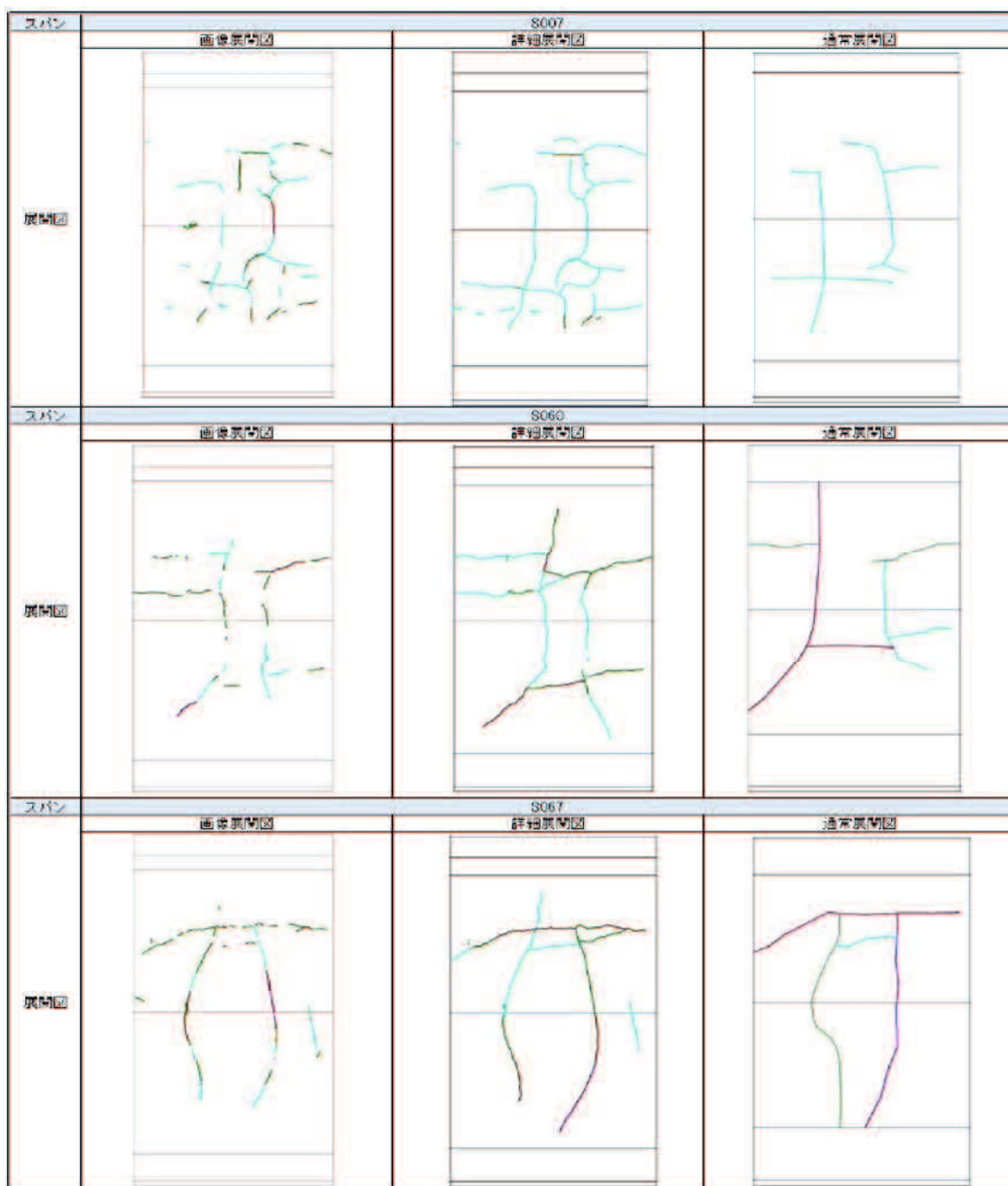


図-3.7 ひびわれ展開図

表-3.4 ひびわれ検出に関する検出比較結果

ひびわれ		画像展開図			詳細展開図			通常展開図		
		箇所	幅一致	延長(m)	箇所	幅一致	延長(m)	箇所	幅一致	延長(m)
スパン07	検出数	35	29	34.98	43	43	56.78	30	30	29.7
	一致率	81.4%	67.4%	61.6%	100.0%	100.0%	100.0%	69.8%	69.8%	52.3%
スパン60	検出数	21	14	26.1	26	26	44.3	18	11	36.1
	一致率	80.8%	53.8%	58.9%	100.0%	100.0%	100.0%	69.2%	42.3%	81.5%
スパン67	検出数	24	15	29.08	26	26	49.34	22	11	27.6
	一致率	92.3%	57.7%	58.9%	100.0%	100.0%	100.0%	84.6%	42.3%	55.9%
合計	検出数	80	58	90.16	95	95	150.42	70	52	93.4
	一致率	84.2%	61.1%	59.9%	100.0%	100.0%	100.0%	73.7%	54.7%	62.1%

※幅一致とは詳細展開図との幅が一致

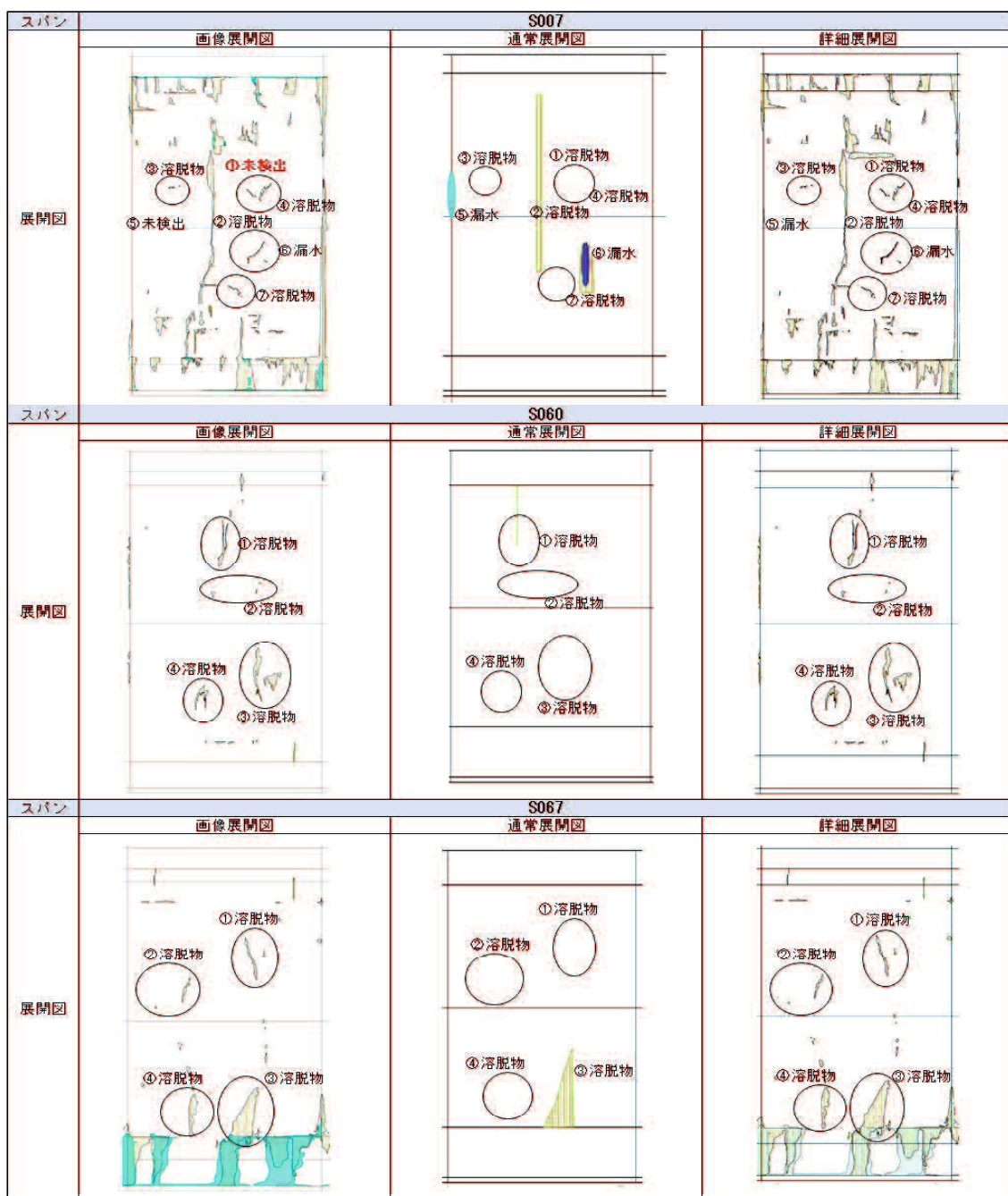


図-3.8 漏水・溶脱物展開図

表-3.5 漏水・溶脱物に関する検出比較結果

漏水・溶脱物	画像展開図		詳細展開図		通常展開図	
	箇所	面積(m ²)	箇所	面積(m ²)	箇所	面積(m ²)
スパン07	検出数	5	7	2.0773	3	2.9535
	検出率	71.4%	100.0%	100.0%	42.9%	100.0%
スパン60	検出数	4	4	1.3139	1	0.0352
	検出率	100.0%	100.0%	100.0%	25.0%	2.7%
スパン67	検出数	4	4	3.0729	1	3.4035
	検出率	100.0%	100.0%	100.0%	25.0%	100.0%
合計	検出数	13	15	6.4641	5	5.1854
	検出率	86.7%	100.0%	100.0%	33.3%	80.2%

※詳細展開図以上の面積部分は詳細点検図面積を最大として取扱う

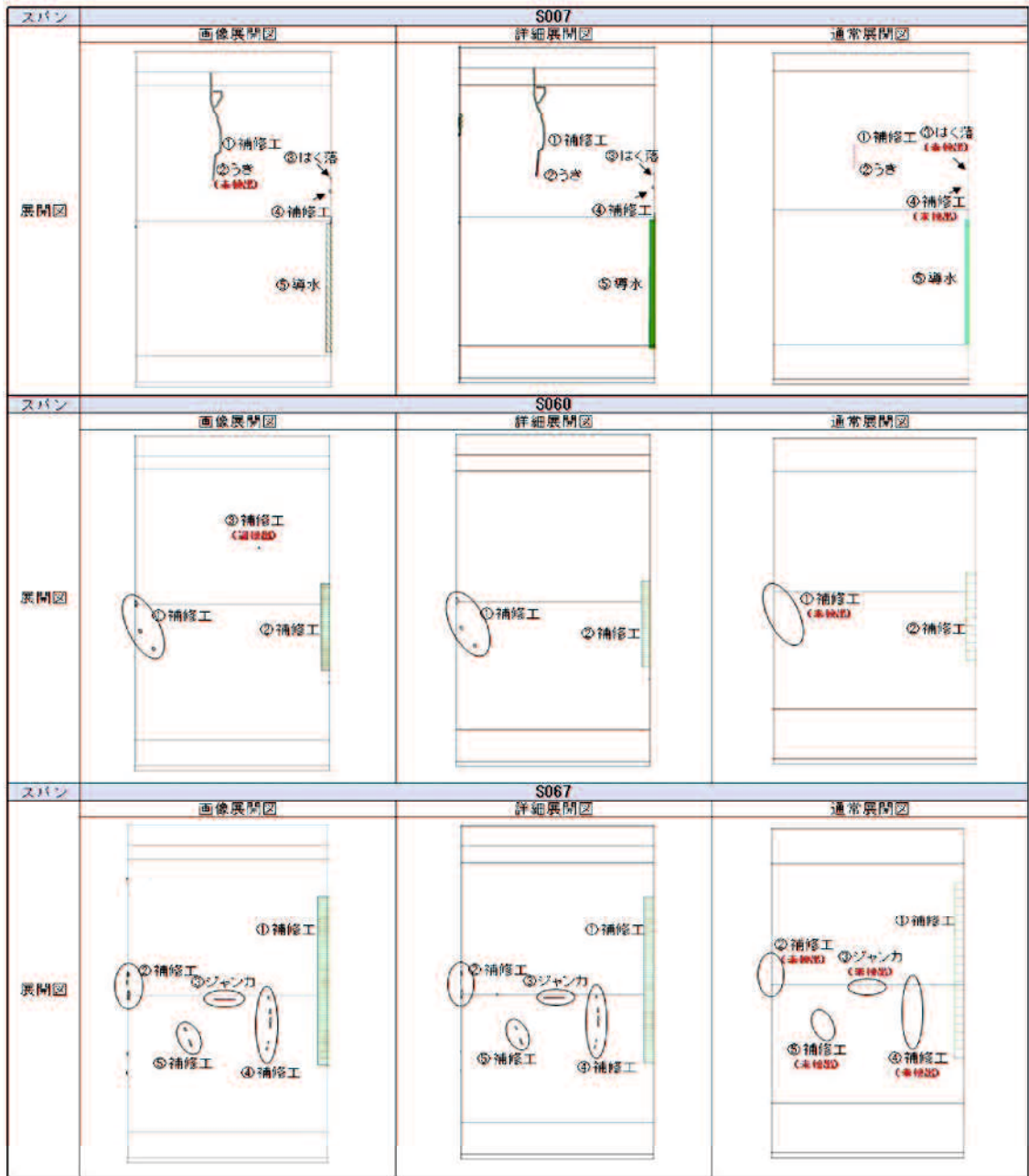


図-3.9 うき・はく落・補修工展開図

表-3.6 うき・はく落・補修工に関する検出比較結果

うき・はく落、補修工	画像展開図		詳細展開図		通常展開図	
	全数(箇所)	うき・はく落(箇所)	全数(箇所)	うき・はく落(箇所)	全数(箇所)	うき・はく落(箇所)
スパン07	検出数 4	1	5	2	3	1
	検出率 80.0%	50.0%	100.0%	100.0%	60.0%	50.0%
スパン60	検出数 3	0	2	0	1	0
	検出率 100.0%	-	100.0%	-	50.0%	-
スパン67	検出数 5	1	5	1	1	0
	検出率 100.0%	-	100.0%	-	20.0%	-
合計	検出数 11	2	12	3	5	1
	検出率 91.7%	66.7%	100.0%	100.0%	41.7%	33.3%

※詳細展開図以上の箇所部分は詳細点検箇所を最大として取扱う

3.3 ひびわれ検出精度（評価項目 I）検証

各点検の精度検証にあたり、ひびわれ幅の比較検証について下記条件を設定した。

- ・詳細展開図を使い、対象ひびわれの箇所、幅および延長の正解値を決定する。
- ・対象範囲におけるひびわれの箇所、幅および延長を画像展開図および通常展開図で算出する。
- ・画像展開図、通常展開図から検出したひびわれのうち正解としている詳細展開図のひびわれ箇所に該当する箇所を抽出しそれを検出数とし、詳細展開図での検出数に対する率を検出率とする。詳細展開図のひびわれ位置から大きく外れた位置のひびわれは、次回点検時に新規に発生したひびわれかどうか判断することが困難となるため、誤検出として検出数とはしない。
- ・画像展開図および詳細展開図のひびわれ幅は、ひびわれ延長のうち最大割合を占めるひびわれ幅とする。

表-3.1 に示すように、例えば、ひびわれ延長 5m のうち、ひびわれ幅 0.5mm が 1m、1.0mm が 3m、1.5mm が 1m の場合、そのひびわれのひびわれ幅は、最大延長である 3m のひびわれ幅 1.0mm とする。

- ・ひびわれ幅が詳細展開図と同値のものを正解とし、上記 3 項目目のひびわれ箇所で抽出したひびわれのうちひびわれ幅が詳細展開図と同じ箇所を検出数とし、詳細展開図での検出数に対する率を一致率とする。ひびわれ幅の評価は、ひびわれ延長とは切り離して評価する。

3.3.1 ひびわれ検出精度検証結果

ひびわれの検出精度を検証するにあたり、ひびわれの箇所、幅、延長の 3 つの項目について検証を行う。ひびわれ検出率算定で対象とするひびわれ幅は、道路トンネル維持管理便覧【本体工編】⁶⁾のひびわれ密度の算出に用いられる、ひびわれ幅 0.3mm 以下も比較検証の対象とする。検証データは、時間をかけた詳細点検の結果である詳細展開図を正解値として、画像展開図、詳細展開図、通常展開図のひびわれ箇所、ひびわれ幅、ひびわれ延長の検出数および一致率を算出し、表-3.4 にとりまとめて各展開図の比較を行う。

表-3.4 のひびわれ検出に関する検出比較表から、図-3.10、図-3.12、図-3.14 にひびわれ箇所数、ひびわれ幅、ひびわれ延長の各スパンの点検手法別による比較検証結果を示す。そして、図-3.11、図-3.13、図-3.15 に各スパン、図-3.16 に 3 スパン平均の詳細展開図の精度を 100%とした場合の画像展開図と通常展開図の検出率および一致率を示す。

以下に各検討の項目毎にその評価を述べる。

(1) ひびわれ箇所検出数に関する評価

図-3.10 に、点検手法の違いによる検証を行った 3 スパンに対し、ひびわれ箇所検出数の比較結果を示す。また、図-3.11 に、詳細展開図を 100%とした時の覆工画像撮影結果から

得られた画像展開図ならびに通常近接目視点検から得られた通常展開図によるひびわれ箇所検出数の比率である検出率を示す。この図から明らかなように、覆工画像撮影および通常近接目視点検は、どのスパンとも詳細近接目視点検よりも検出割合は低下する。しかし、覆工画像撮影結果から得られた画像展開図によるひびわれ箇所検出率の3スパン平均は84.2%であり、通常展開図の3スパン平均一致率である73.7%に比べ高い精度で検出できていることがわかった。すなわち、走行型覆工表面画像撮影技術により取得された画像データから作成された展開図は、通常の近接目視点検により作成された展開図より、詳細展開図に近いことからその信頼度が高い結果となった。

また、表-3.7に示すとおり、覆工の健全度の程度を把握するうえで重要となる1.0mm以上の幅があるひびわれの検出率は、詳細展開図で検出したひびわれに限定した場合は、画像展開図、通常展開図ともほぼ同等の検出数となったが、1.0mm以上として検出した全数においては、画像展開図が1.5倍程度に対して通常展開図は2.2倍以上となった。

これは、詳細展開図は、ひびわれの位置情報がしっかりしている画像展開図を持参した上で、時間もかけて現地で近接目視点検を行い作成するのに対して、画像展開図は現地での確認がとれないというリスクを、通常展開図は現地での点検時間の制約および車線規制下での上向きの点検作業による近接目視点検での見間違いによるリスクを考え、ひびわれ幅を大きく判断する傾向があると考えられる。特に通常展開図は画像展開図よりリスクが大きく影響しており、検出数が画像展開図より多くなっていると考えられる。このため、画像展開図の方が通常展開図より詳細展開図の検出率に近く、画像展開図はトンネル覆工の健全度について、通常展開図より、詳細展開図に近い高い精度で評価できることがわかる。

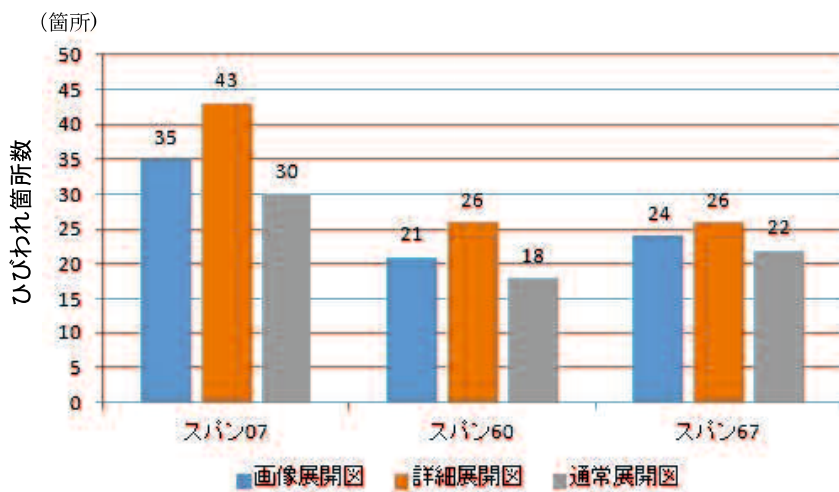


図-3.10 各スパンひびわれ箇所数の点検手法別比較結果

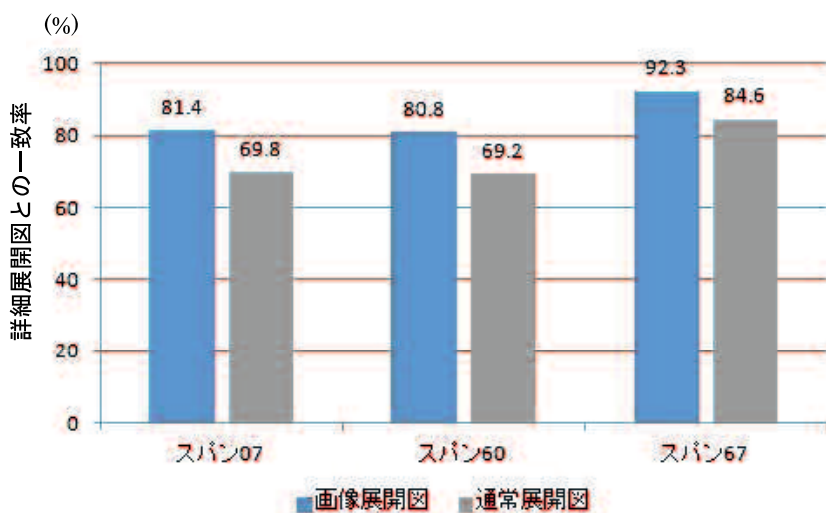


図-3.11 各スパンひびわれ箇所数の詳細展開図との比較結果

表-3.7 ひびわれ幅 1.0mm 以上の検出率

1.0mm 以上	画像展開図	詳細展開図	通常展開図
検出数	9(4)	5	16(5)
検出率	150.0%	100.0%	216.7%

() : 詳細展開図で検出したひびわれのうち、各展開図での検出数

(2) ひびわれ幅検出の評価

表-3.1 に示すひびわれ幅の測定の考え方により計測したひびわれ幅について、一致率を比較した。図-3.12 に、検証を行った 3 スパンに対し点検手法の違いによるひびわれ幅の一致数を示す。また、図-3.13 に、詳細展開図を 100%とした時の覆工画像撮影結果から得られた画像展開図ならびに通常近接目視点検から得られた通常展開図によるひびわれ幅の一致率を示す。これらの図からわかるように、どのスパンとも、画像展開図および通常展開図の一致割合は、詳細展開図よりは少ない結果となった。しかし、覆工画像撮影結果から得られた画像展開図によるひびわれ箇所検出比率の 3 スパン平均は 61.1%であり、通常展開図の 3 スパン平均一致率である 54.7%に比べ高い精度で検出できていることがわかった。すなわち、ひびわれ箇所数の検出と同様に走行型覆工表面画像撮影技術により作成された展開図が、通常の近接目視点検により作成された展開図より、詳細展開図に近いことからその信頼度は高い結果となった。

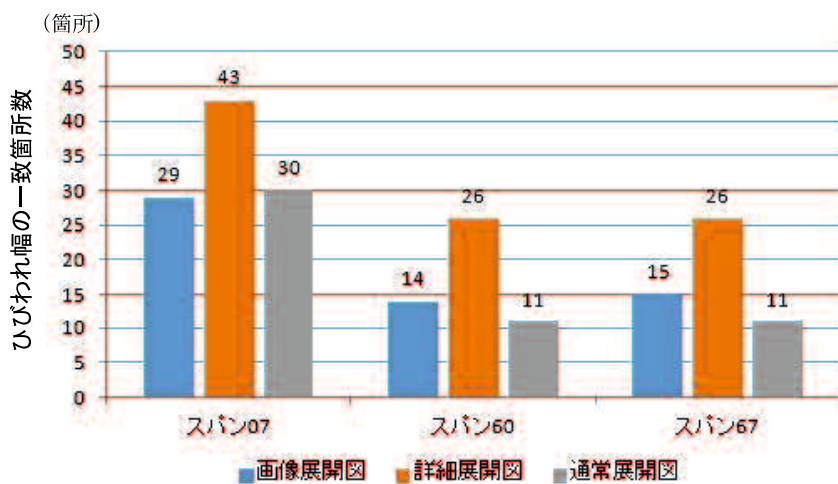


図-3.12 点検手法別ひびわれ幅が詳細展開図と一致している数の比較結果

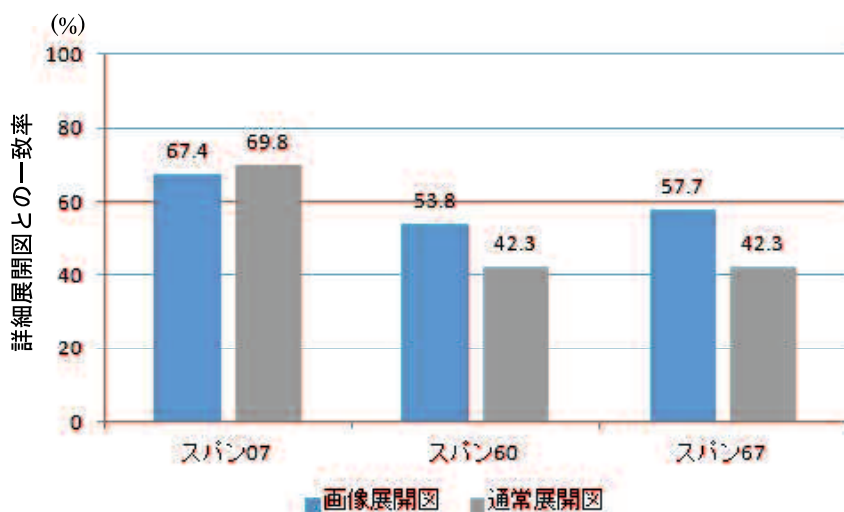


図-3.13 各スパンひびわれ幅の詳細展開図との一致率比較結果

(3) ひびわれ延長検出の評価

図-3.14 に、検証を行った 3 スパンに対し、点検手法の違いによるひびわれ延長検出に関する比較結果を示す。ひびわれ延長の測定については、ひびわれ 1 本ごとの延長を測定して比較することも考えられるが、詳細展開図のひびわれに対して位置の精度の関係でずれているものが、誤検出なのか、ひびわれ位置がずれているだけなのか判別が困難であるため、大きく外れた位置のひびわれは除いたスパン内のひびわれの総延長としている（重岡ら⁷⁾の研究においても同様な比較が行われている）。また、図-3.15 に、詳細展開図のひびわれ延長を 100%とした時の覆工画像撮影結果から得られた画像展開図ならびに通常近接目視点検から得られた通常展開図によるひびわれ延長の比較を示す。図-3.15 から明らかなように、画像展開図のひびわれ延長は、各スパンとも詳細展開図より少なく、検出率も図-3.16 に示すように平均 59.9%となり、ひびわれの箇所、幅と同様に詳細展開図より低い結果となった。特に、スパン 60 では、通常展開図と比較して検出延長が少なく、3 スパン平均の一致率も通常展開図の 62.1%よりわずかだが低い結果となった。ひびわれ長さの検出は、画像展開図を持参して現地で近接目視点検を行う詳細展開図が、画像展開図、通常展開図と比較して検出長さをもっとも長くなり、次に現地での近接目視点検では見逃してしまうひびわれも検出できる画像展開図の検出長さが長くなると考えられる。しかし、スパン 60 は、画像展開図作成時に遊離石灰の影響等によりひびわれを一部判別できず、一本のひびわれを複数本のひびわれと評価したことにより、ひびわれの間の延長が検出できていないこと等が原因として考えられる。すなわち、通常点検では点検員の過去の経験からひびわれ箇所が 1 本の線上に複数あると判断される場合は、ひびわれを近接目視点検上確認できなくても、ひびわれを短絡する傾向が影響していることがわかる。これは、近接目視点検では把握しきれないひびわれを把握できる場合も有るが、逆に存在しないひびわれを検出してしまいう可能性もあり、なおかつ、経験年数によっても違う恐れがあるため、データの精度に疑問が出る結果となる。

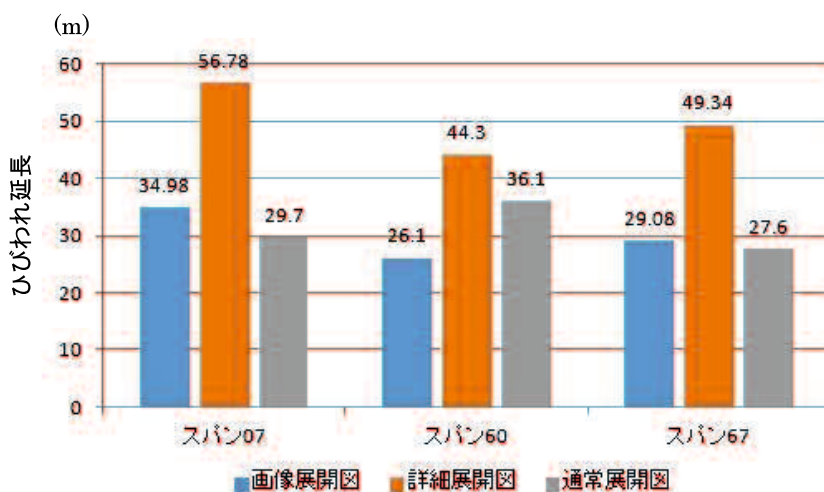


図-3.14 各スパンひびわれ延長の点検手法別比較結果

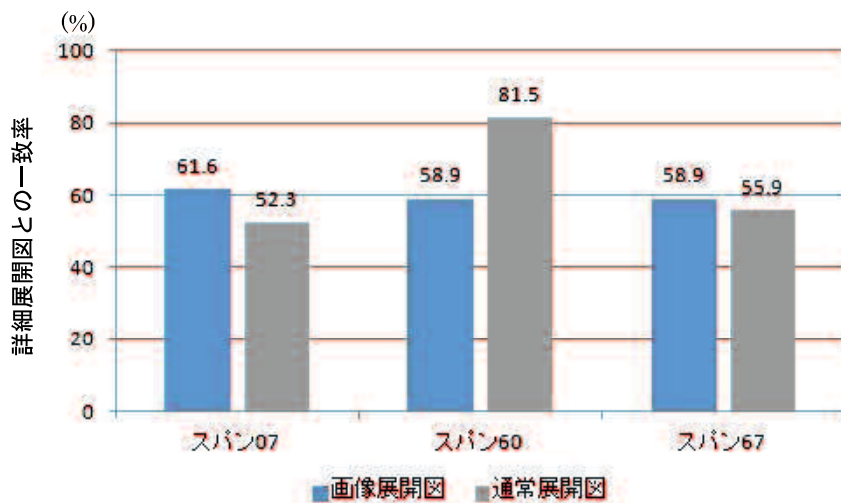


図-3.15 各スパンひびわれ延長の詳細展開図との比較結果

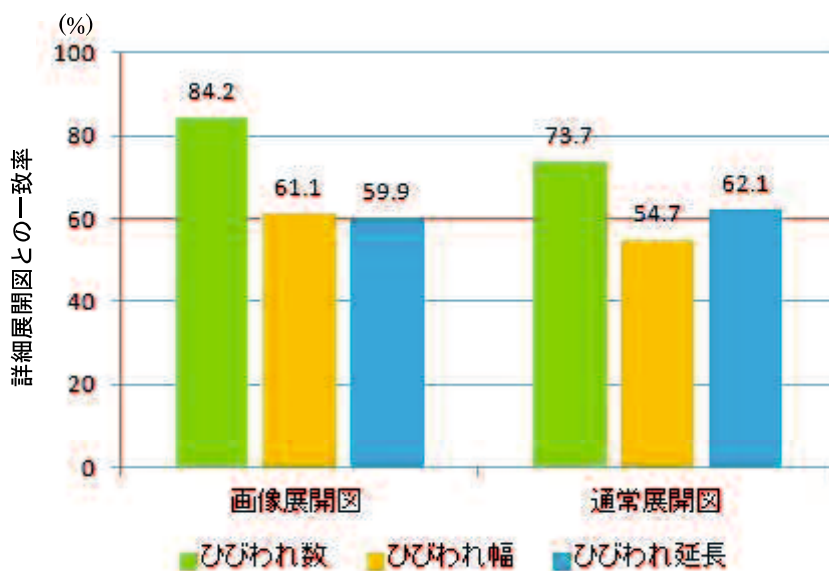


図-3.16 手法別平均ひびわれ一致率の詳細展開図との比較結果

表-3.8 に示すように、ひびわれ幅を、詳細展開図では 0.5mm と判定したものの、画像展開図では 0.7mm と過大に判定したような、構造物管理的には安全側に評価をしたものは、詳細展開図における総ひびわれ本数を基準に比較すると画像展開図で 78.9%，通常展開図で 66.3%となった。その反対に、ひびわれ幅を、詳細展開図では 0.7mm と判定したものの、画像展開図では 0.5mm と過少に判定したような、構造物管理的には危険側に評価をしたものは、表-3.9 で示すように、詳細展開図における総ひびわれ本数を基準に比較すると画像展開図で 21.1%，通常展開図で 33.7%となった

また、表-3.10 に NEXCO の走行型覆工展開画像撮影技術の仕様として定めている幅 0.5mm 以上のひびわれに限定しその検出率を算定すると、詳細展開図における幅 0.5mm 以上のひびわれ本数を 100% としてと画像展開図で 95.8%、通常展開図は 79.2% であった。同様に、表-3.11 にひびわれ幅 0.5mm 以上のひびわれに限定しその延長の検出率を算定すると、詳細展開図における幅 0.5mm 以上のひびわれ延長を 100% としてと画像展開図で 54.5%、通常展開図は 114.3% であった。

これらから、ひびわれ幅 0.5mm 以上のひびわれ延長の検出だけ、画像展開図が通常展開図よりも検出率が低い危険側の結果となったが、これは 3.3.1(3) のひびわれ延長検出の評価で述べたとおり、通常点検では、点検員が過去の経験からひびわれ箇所が 1 本の線上に複数あると判断される場合はひびわれとひびわれを、短絡する傾向が影響していると考えられ、なおかつひびわれ幅 0.5mm 以上と比較的ひびわれ幅が大きくなると見間違いのリスクを考え、延長を長くとってしまうことが影響していると考えられる。

表-3.8 ひびわれ幅の安全側評価の検出率（箇所）

安全側評価	画像展開図	詳細展開図	通常展開図
検出数*	75	95	63
検出率	78.9%	100.0%	66.3%

※検出数には表-3.4 の一致数を含む

表-3.9 ひびわれ幅の危険側評価の検出率（箇所）

危険側評価	画像展開図	詳細展開図	通常展開図
検出数	20	95	32
検出率	21.1%	100.0%	33.7%

表-3.10 ひびわれ幅 0.5mm 以上の検出率（箇所）

0.5mm 以上	画像展開図	詳細展開図	通常展開図
検出数	23	24	19
検出率	95.8%	100.0%	79.2%

表-3.11 ひびわれ幅 0.5mm 以上の検出率（延長）

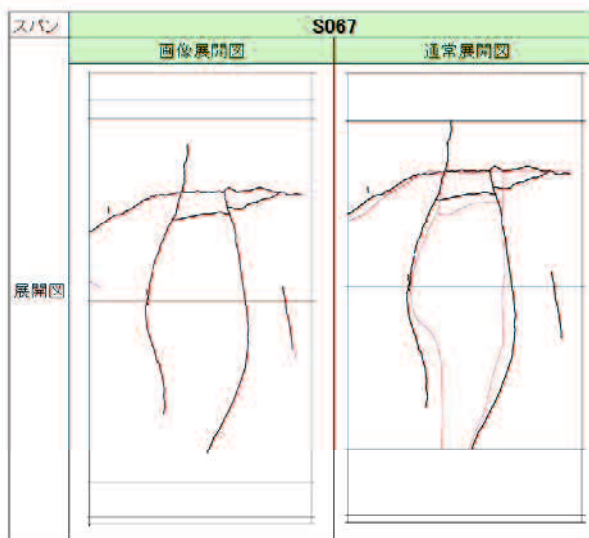
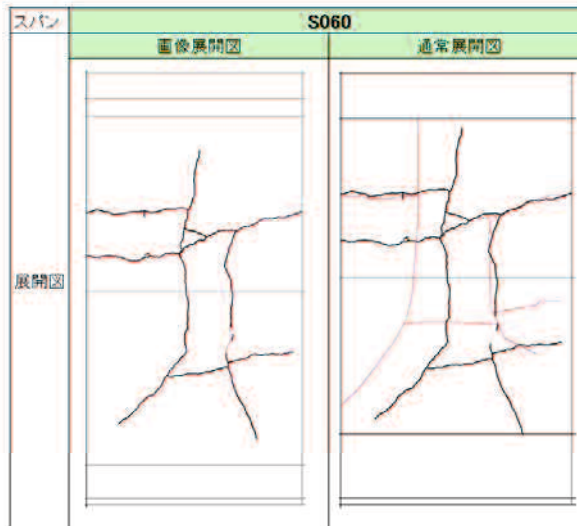
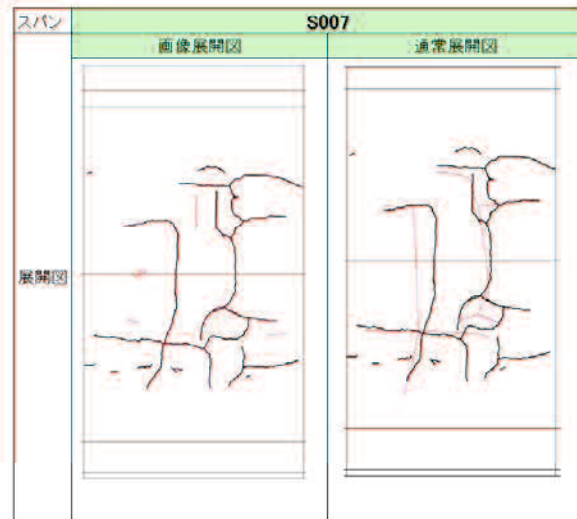
0.5mm 以上	画像展開図	詳細展開図	通常展開図
検出延長（m）	21.0	38.4	43.9
検出率	54.5%	100.0%	114.3%

さらに、**図-3.17**に詳細展開図に、画像展開図と通常展開図のひびわれ位置の重ね合わせを示す。これにより画像展開図と詳細展開図のひびわれ位置はほぼ一致するのに対して、通常展開図はこの2つの展開図と比べるとひびわれ発生位置が大きく異なる。

これは、画像展開図を使用しない通常展開図ではスパン内のひびわれの位置の把握は困難だが、画像展開図および詳細展開図では画像からひびわれ位置が正確に把握できると考えられる。

このことは、複数回の詳細点検を実施するにあたり、前回点検時に把握したひびわれ箇所以外にひびわれが存在した場合、覆工画像を用いた変状展開図を使用していればそのひびわれが新規に発生したものなのか、前回点検時にスケッチしたひびわれの位置が違ったものなのか判別が困難となる事象の発生を未然に防ぐことができることを意味している。

また、トンネルの健全性を評価するうえで、ひびわれ位置を正確に把握できるということは、変状の進行性を客観的、定量的に把握する重要な点であると考えられる。ひびわれ位置の正確な把握は、複数回の点検結果の比較等により、ひびわれの進行性を評価する場合に、重要な点になるともいえる。



— 画像展開図ひびわれ, 通常展開図ひびわれ
— 詳細展開図ひびわれ

図-3.17 各手法別展開図の重ね合わせ結果

(5) ひびわれ指数(TCI)の比較検証

これまで述べてきているように NEXCO では一部評価項目にひびわれ指数 (TCI) を取り入れている。そのため、TCI の代表値として用いられる、TCI 値 ($\times 10^{-5}$) の全体の大きさを表す 1 次不変量である F_0 の値について比較検証を行う。

表-3.11 に TCI (F_0) の各スパンの TCI 値と一致率、図-3.18 に F_0 の各スパンの点検種別による比較検証結果、図-3.19 に詳細展開図の精度を 100%とした場合の画像展開図と通常展開図の一致率を示す。

これらの比較より、スパン 60 と 67 において、画像展開図は通常展開図よりもひびわれ指数が低い結果となった。そのため、画像展開図は通常展開図より一致率の数値が詳細展開図の数値から離れている。

これは TCI の計算ではひびわれ長さがパラメータとなっており、3.3.1(3) ひびわれ延長検出の評価と同様に、画像展開図作成時に一本のひびわれの一部分をひびわれと認識できず、複数本のひびわれと評価したために、認識できなかったひびわれの延長が TCI の計算に反映できていないことが原因として考えられる。今後、走行型覆工画像撮影技術による点検は 2 回目に入る。1 回目に現地での近接目視点検と全面打音点検を行う点検 B を実施しており、本来一本のひびわれを複数本のひびわれと評価した箇所を修正した展開図が作成されている。2 回目の点検は、これをベースにしての画像撮影による点検 A の実施となり、1 回目の点検 A ではひびわれとして認識できなかった部分も認識することができる。よって、これら点検状況によりひびわれの延長の検出について問題はないと考える。また、本課題は走行型覆工表面画像撮影技術による近接目視の代替を行う場合も、点検回数により近接目視範囲等の点検内容を変えることで問題はないと考えられる。

表-3.11 TCI (F_0) に関する検出比較結果

F0 : TCI ($\times 10^{-5}$)		点検種別		
		画像展開図	詳細展開図	通常展開図
スパン 07	TCI 値	13.45	15.40	8.41
	一致率	87.3%	100.0%	54.6%
スパン 60	TCI 値	7.83	12.72	13.11
	一致率	61.6%	100.0%	103.1%
スパン 67	TCI 値	11.23	16.20	16.06
	一致率	69.3%	100.0%	99.1%

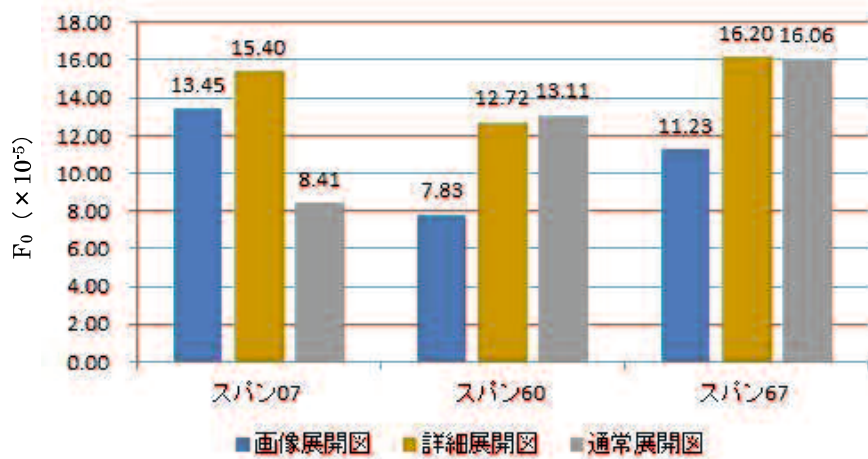


図-3.18 各スパン TCI (F₀) の点検手法別比較結果

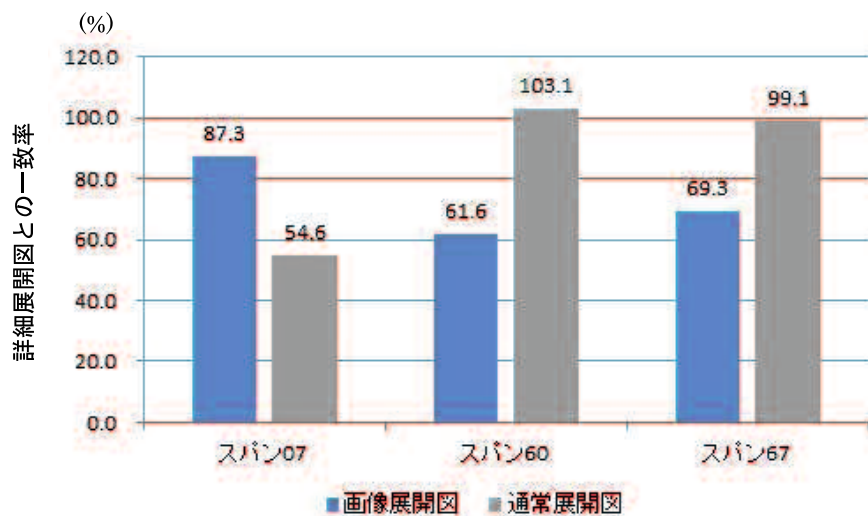


図-3.19 各スパン TCI (F₀) の詳細展開図との一致比較結果

3.4 漏水等（評価項目 II）、特記事項（評価項目 III）検証

図-3.2 試行試験実施フローに示す比較検証を行う評価項目 II と III について、図-3.8 と表-3.5 に漏水・溶脱物（評価項目 II）、図-3.9 と表-3.6 に特記事項のうちひびわれの評価とは直接関係のない、うき、はく離、はく落・補修工（評価項目 III）の展開図と検出比較結果について示す。漏水・溶脱物（評価項目 II）のうち、点検時期により変化する漏水、溶脱物面積を除き、評価項目 II、III とも画像展開図は詳細点検図とほぼ同等であり、通常展開図に比べてすべての項目で高い精度で検出できる結果となった。

しかし、**図-3.20**に示す07のうき（**図-3.9**の②うき）については、打音点検により発見されたものであり、ひびわれ等の変状を伴わない内部欠陥箇所であったため、覆工表面の撮影画像からは他の問題ない箇所との区別がつかず、内部欠陥を発見するための打音点検を行わない画像展開図からは検出することができなかった。今回のうきは建設時に発生した覆工コンクリート内部のジャンカが原因と考えられる。このような覆工表面に損傷の兆候が現れない内部欠陥である建設時におけるコンクリートのジャンカや、防水シートやひびわれ抑制シートがコンクリート打設時の圧力により吹付けコンクリートから剥がれてコンクリート内部に巻き込まれるような初期欠陥の存在は、打音点検が覆工表面画像撮影によってすべてにおいて代替できることではないことを示していると共に、丁寧な初期点検の実施の重要性も明らかにしている。しかし、最近の山岳トンネルでは、施工技術の向上や竣工検査時に初期点検として全面の打音検査を実施しているため、このような覆工材料の初期欠陥に関しての問題は少なくなっている。

初期点検の導入時が比較的新しいため、初期点検により初期欠陥を把握集計したデータはないが、無作為に抽出した矢板工法 15 本、山岳トンネル工法 15 本の合計 30 本の詳細点検データでうき・はく離と判断されたものの中で、覆工表面の損傷の兆候がなく打音点検により判明した箇所を集計すると 45 箇所あり、**図-3.21**に示すように、その全てが天端（35 箇所：77.8%）と肩部（10 箇所：22.2%）であった。これは矢板工法で行われていた、圧縮空気によりコンクリート打設するプレーサー方式や、コンクリートを打ち込みながら配管を引き抜く方式が原因と考えられる。また、山岳トンネル工法での全断面セントルによる吹上げ方式の初期では、コンクリートの材料分離や、施工中断に伴うコールドジョイントが発生しやすかったことから、これも覆工コンクリートの充填不良が原因と考えられる。これら損傷は初期点検で実施する打音点検により把握することができるものと考えられる。また、山岳トンネル工法の損傷数が 8 箇所（17.8%）と矢板工法の 37 箇所（82.2%）に比較して少ないことから山岳トンネル工法が標準となっている現状と併せて、覆工コンクリートに、NEXCO では中流動覆工コンクリート⁸⁾を標準仕様としていることから、初期欠陥の問題は少なくなっていると考えられる。

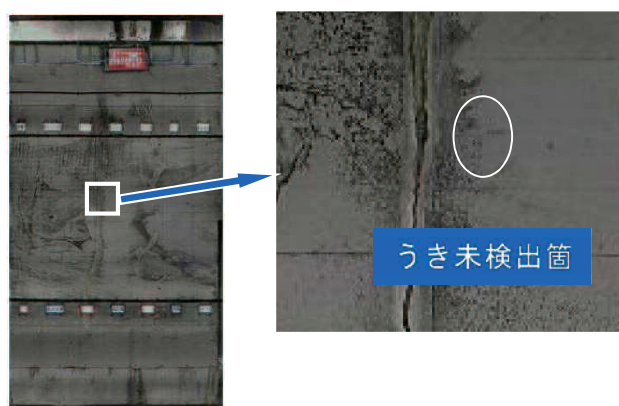


図-3.20 07 画像展開図での未検出のうきの箇所

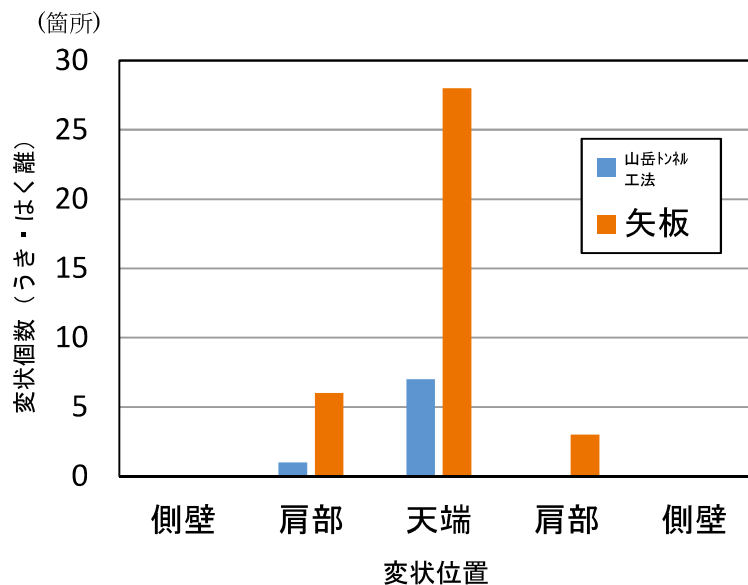


図-3.21 変状箇所（うき・はく離）と変状位置

3.5 まとめ

高速道路トンネルにおいて、3種類の覆工点検を試行し、それぞれの点検方法の現場試験のデータを用いて各種分析および評価を行い、NEXCOが実施しているトンネル覆工点検評価手法について覆工画像技術の近接目視点検の代替技術としての導入の可能性について検証した。具体的には、試行試験では3種類の点検についての精度検証を行い、覆工撮影技術による点検（画像展開図）、通常近接目視点検（通常展開図）、通常近接目視点検よりも点検時間をかけた詳細近接目視点検（詳細展開図）との比較による精度の検証を行った。本研究の調査および結果と考察を以下にまとめて示す。

(1) 各評価項目の検出精度

各項目の検出数ならびに一致率をみると、評価項目の6項目のうち、ひびわれ箇所数、ひびわれ幅、ひびわれ幅の安全側評価、0.5mm以上のひびわれ検出率、ひびわれ発生位置の再現性の5項目は、詳細展開図>画像展開図>通常展開図となった。しかし、ひびわれ延長に関しては詳細展開図>通常展開図>画像展開図となったが、これは3.3.1(3)のひびわれ延長検出の評価で述べたとおり、通常近接目視点検では、点検員が過去の経験からひびわれ箇所が1本の線上に複数あると判断される場合はひびわれとひびわれを、短絡する傾向が影響していると考えられる。

また、ひびわれ延長が影響するひびわれ指数TCI (F_0)の値も同様の傾向もみられるが、今後、覆工画像撮影による点検が2回目に入り、1回目に現地での全面近接目視点検と全面打音点検を行う点検Bを実施した展開図をベースにして覆工画像撮影による点検Aを実施

するため、2回目の点検Aでは1回目の点検Aで認識できなかったひびわれも認識することができる。

これら点検状況を考えると、ひびわれの延長の検出および把握することが困難な遊離石灰部のひびわれや、うき等の内部欠陥の把握についても問題ないと考えられる。

(2) 検出精度からの通常近接目視点検代替の可能性

評価項目を総合的に判断すると、詳細近接目視点検に対し、ひびわれの検出精度から覆工画像技術による点検そのものの精度は低い値を示した。これは、試行試験を実施したAトンネルでは覆工表面にひびわれ沿いに遊離石灰が多く、覆工画像の読み取りが難しかったことが理由としてあげられる。

しかし、通常近接目視点検と比較した場合、覆工画像技術による点検は、唯一精度が低いひびわれ延長の検出については、覆工画像撮影による点検が2回目に入ることより問題ないことから、ひびわれ検出精度は覆工画像技術による点検は、通常近接目視点検と同等以上であると考えられる。また、ひびわれ位置の再現性も非常に高いことが明らかとなり、トンネル覆工の健全度評価の定量化⁹⁾やひびわれの進行性の把握^{10) 11)}等の点検の高度化をもたらす可能性が高いことがわかった。これらのことから、覆工画像技術による点検は、通常近接目視点検の代替とすることは、後述する点検回数による点検内容を変更することにより可能であると考えられる。また、評価項目Ⅰ～Ⅲの変状検出精度およびひびわれ位置の再現性が通常展開図より高いことから通常近接目視点検の代替とすることは点検技術の精度向上になると考えられる。

(3) 点検回数による点検内容の変更

変状が伴わない内部欠陥であるうきや濁音については、当然ではあるが、覆工表面の画像撮影技術ではとらえきれないことが改めて判明し、覆工画像技術は全てにおいて直接打音点検の代替にはならず、打音点検の重要性が再認識された。そのため、内部欠陥を把握するためにも1回目の詳細点検では覆工画像撮影に加えて、「全面近接目視点検+全面打音」を実施し、画像で判別ができなかった変状のない箇所に発生するうき等の内部欠陥について把握を行う。これにより2回目以降の詳細点検は、近接目視点検を覆工画像撮影技術による代替とし、打音点検については全面打音ではなく1回目の詳細点検で把握したうき等の内部欠陥箇所を打音して変状に進行がないか確認する等、詳細点検の内容を実施回数により変更することが考えられる。これにより、一度の画像撮影では捉えきれなかったひびわれの補足および打音点検の限定化を実施できる可能性がある。また、初期欠陥以外の内部損傷としては鉄筋の腐食による損傷が考えられるが、鉄筋の腐食が覆工損傷に与える影響が具体的にはまだ判明していないことおよびトンネル覆工は、無筋構造が基本であり、鉄筋区間が限られていることから、覆工画像撮影による近接目視点検の代替の対象としないことが考えられる。

【参考文献】

- 1) 国土交通省 道路局 国道・技術課：道路トンネル定期点検要領， pp.44-68， 2019.
- 2) 駒村一弥，山本秀樹，重田佳幸，加賀田敬：走行型計測技術を用いたトンネル点検の効率の検討，土木学会第 70 回年次講演会，III-094， pp.187-188， 2015
- 3) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ（案）， p.110， 2019.
- 4) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検業務積算資料（暫定版）， p.6， 2014.
- 5) 国土交通省：平成 31 年度 設計業務委託等技術者単価について， pp.4-5， 2019.
- 6) 公益社団法人 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】， pp.203-205， 2016.
- 7) 重岡 匠，齊藤 仁，吉本正浩，嘉賀大樹，藤原孝明，中川光貴：画像撮影と AI のひび割れ検出による送電トンネルの点検効率化，土木学会トンネル工学報告集，第 29 卷，II-2， 2019.
- 8) 水野希典：トンネル覆工の課題克服に向けた中流動覆工コンクリートの開発，コンクリート工学，第 54 卷 5 号， pp.519-524， 2016.
- 9) 海瀬 忍，伊藤哲男，八木 弘，水野希典，前田洗樹，進士正人：トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.74，No.1， pp.1-14， 2018.
- 10) 海瀬 忍，伊藤哲男，八木 弘，水野希典，前田洗樹，進士正人：トンネル覆工のひびわれ進行性評価方法に関する検証，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.73，No.3（特集号），I_10-I_20， 2017.
- 11) 北村彩絵，森本真吾，進士正人：トンネル健全性評価の精度向上を目的とした覆工ひび割れ指数 TCI 算出法と評価法の改善，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.75，No.1， 1-6， 2019.

第4章 既設トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証

4.1 目的

トンネル覆工の健全度の定量的評価手法の検証を目的に、本章では NEXCO が管理している 8,5000 スパンを超えるトンネル覆工点検結果のデータを分析し、①覆工画像撮影により健全性を診断している点検 A と現地で実施する点検である点検 B の比較分析、②健全性評価の基本となる外力評価点およびはく落評価点と健全度ランクの関連性分析、③外力評価点およびはく落評価点の閾値の分析を行い、NEXCO が導入している点検手法の妥当性を検証した。なお、外力評価点およびはく落評価点とは、TCI を基礎に NEXCO が提案した¹⁾ 覆工の健全度指標である。

4.2 高速道路トンネルの覆工点検結果の整理

4.2.1 対象トンネル

NEXCO では 1983 (昭和 58) 年から山岳トンネル工法がトンネル施工における標準工法となった。それ以前は、矢板工法での施工を行っており鉄道のようなレンガ積みやブロック積みのトンネルは存在しない。本研究で収集し対象とした覆工点検データは、トンネル総延長が 856,953m であり、掘削工法別には山岳トンネル工法が 80% (684,976m)、矢板工法が 20% (171,977m) のデータである。

工法別のスパン数は、総スパン 85,303 に対し、山岳トンネル工法 (68,092 スパン) が 80%、矢板工法 (17,211 スパン) が 20% である。工法別のトンネル数は、山岳トンネル工法 (692 本) が 77%、矢板工法 (207 本) が 23% であり、延長、スパン数、トンネル数の工法別の割合はほぼ同等である。また、図-4.1 に工法別の供用年数の分布を示す。平均供用年数は、山岳トンネル工法が約 18 年、矢板工法が約 36 年と、矢板工法は施工時期が古いため供用年数が 18 年長い結果となった。これらデータを工法別を基本として分析を行う。

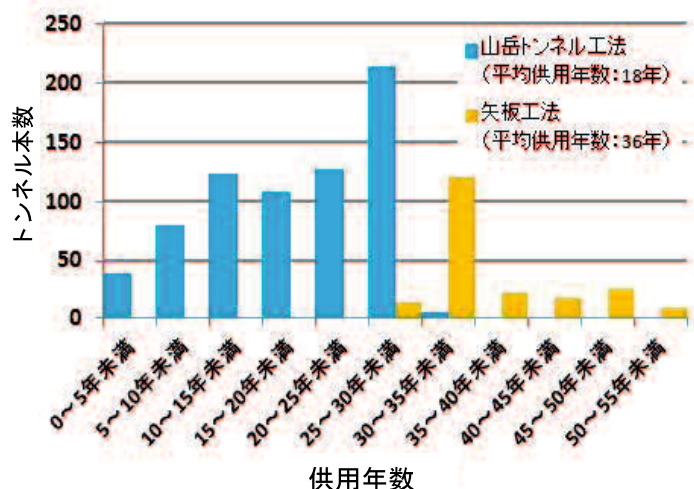


図-41 工法別の供用年数

4.2.2 外力評価点およびはく落評価点

山田らの TCI の活用研究 ¹⁾に基づき、NEXCO では TCI を直接用いるのではなく、覆工に発生しているひびわれの外力作用の有無の程度の判定を行う「外力評価点」および覆工のはく落につながるひびわれの可能性の有無の程度の判定を行う「はく落評価点」を、TCI から以下のように、式(4.1)、式(4.2)を用いて換算して点検シートである図-1.12、図-1.13 の赤枠部分の上部「1. ひびわれの幅・長さ・分布」に用いている。

外力評価点 y_1

$$y_1 = \frac{58 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 10)} \quad (4.1)$$

はく落評価点 y_2

$$y_2 = \frac{32 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 13)} \quad (4.2)$$

ここで、 x :TCI

また、図-1.12、図-1.13 の点検シートの赤枠部分の下部である「2.ひびわれの方向性」に関する判定 ¹⁾は縦断・斜め卓越型、縦横断拮抗型、横断卓越型として式(4.3)の値から表-4.1 のような外力評価点およびはく落評価点を決定している。

ひびわれ方向性 z

$$z = \frac{F_{22}}{F_0} \quad (4.3)$$

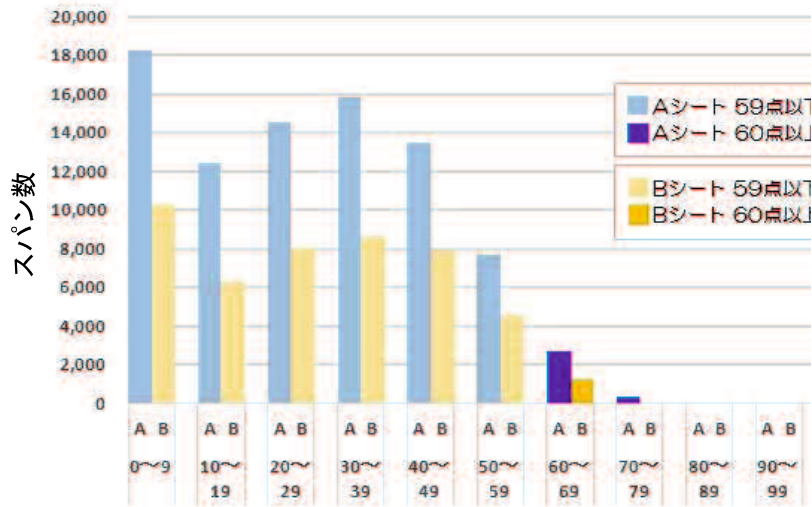
表-4.1 ひびわれの方向性に対する評価点

z	外力評価点 y_1	はく落評価点 y_2	備考
$0 \leq z < 0.3$	11	6	縦断・斜め卓越型
$0.3 \leq z < 0.7$	7	4	縦横断拮抗型
$0.7 \leq z \leq 1.0$	4	2	横断卓越型

表-1.6 に示すように、外力評価点が 60 点以上、もしくは、はく落評価点が 36 点以上の場合に詳細点検に位置づけられる点検 B を行うなかで近接目視および打音点検を重点的に実施されている。

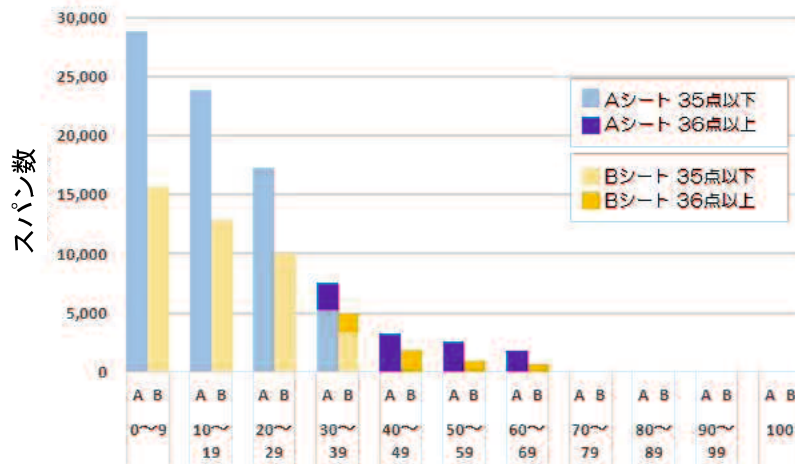
点検 B を実施する要因の分析を行うために、4.2.1 で収集したデータから、点検 A を実施した 85,303 スパン、点検 B まで実施した 47,261 スパンからそれぞれの外力およびはく落の評価点を算出した内訳を図-4.2、図-4.3 に示す。

点検 A において、外力評価点 60 点以上のスパンは 3,061 スパン、はく落評価点 36 点以上のスパンは 10,127 スパンであるが、実際は 47,261 スパンを詳細点検として実施しており、閾値以上のスパン数より、約 4 倍程度のスパンの詳細点検を行っている。これは、評価点が閾値未満のスパンであっても、表-4.3 に示す項目の特記事項に該当する場合には点検 B を行うため、現状では点検 A における閾値以上のスパン数よりも、点検 B を行っているスパン数のほうが圧倒的に多い。また、閾値未満および特記事項がないスパンにおいても、近傍のスパンで点検 B を行った場合は併せて点検を行う事例も十分想定できる。



外力評価点

図-4.2 A・Bシート外力評価点（総スパン内訳）



はく落評価点

図-4.3 A・Bシートはく落評価点（総スパン内訳）

点検 B を実施した 47,261 スパンについて点検 A シートとの評価項目をベン図で分類すると、図-4.4 のように分類される。近傍のスパンということで実施している 24,819 スパンを除く、22,442 スパンのうち特記事項の記載があるものが 20,212 スパンであり全体の約 90%を占めている。また、特記事項の内訳を整理すると、複数の項目にチェックをしている状況で表-4.3 の内訳となり、(7)の「豆板（ジャンカ）などがあり、浮き・はく落の危険性がある」の項目が 11,114 スパン、(3)の「打ち継ぎ目に三日月型のひびわれがある」の項目が 5,920 スパンと、特記事項の記載があるスパンの約 40%、約 21%と高い割合を占めており、第三者被害に直結しやすい特記事項のチェック率が高い結果となった。

特記事項による点検 B の実施が多いことから、今後、より効率的に点検 B を実施するためには、閾値の設定の適正化とともに、特記事項の照査、整理も合わせて重要であることがわかった。

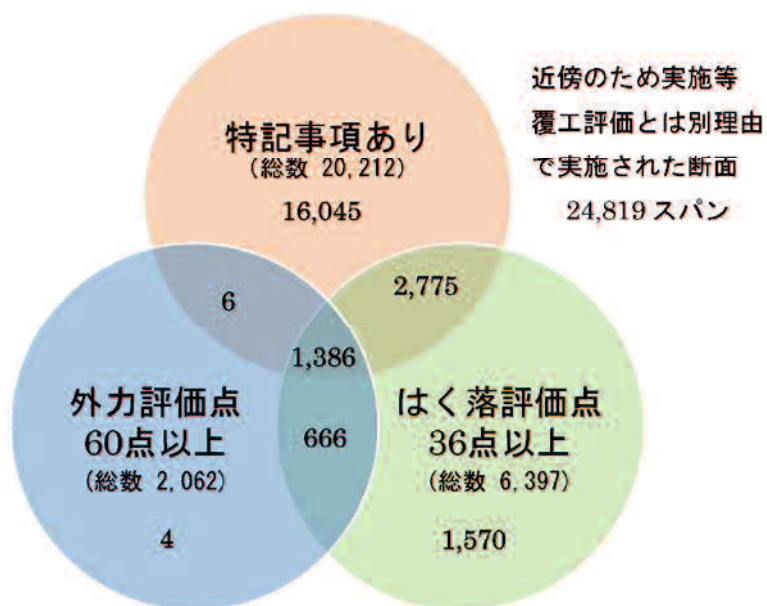


図-4.4 詳細点検 B の実施内訳

表-4.3 特記事項の内訳

項目	評価内容	スパン数	チェック率(%)
(1)	幅2mm程度のひび割れが3m以上ある	2,629	9.5
(2)	幅3mm程度のひび割れがある	565	2.0
(3)	打ち継ぎ目に三日月型のひび割れがある	5,920	21.4
(4)	J.F, 標識等添架施設周辺に放射状のひび割れがある	834	3.0
(5)	構造上問題があると判断されるひび割れがある	2,249	8.1
(6)	モルタル系の補修材による既対策箇所がある	4,202	15.2
(7)	豆板(ジャンカ)などがあり, 浮き・はく落の危険性がある	11,114	40.1
(8)	外力健全度がIII-2~Vランクに対し前回点検時から補修補強が実施されていない	204	0.7
特記事項記載スパン数の合計 ^{※)}		27,717	100.0

※複数の項目にチェックしているスパンがあるため合計は 20,212 にならない

4.3 評価点および健全度ランクの分析

4.3.1 点検 A, B の評価点のずれ

図-1.12, 図-1.13 で示すように, A, B シートの各評価点項目は, TCI に基づき評価される「1. ひびわれ幅・長さ・分布」, 「2. ひびわれ方向性」と, シートの配点により評価される「3. ひびわれのパターン (亀甲状, 閉合, 交差・分岐)」, 「4. エフロレンス (量)」, 「5. 漏水 (量)」の 5 項目で算出される。

机上点検である点検 A と, 詳細点検である点検 B の評価点の関係を分析するため, 横軸を A シートの評価点, 縦軸を B シートの評価点とし, 外力評価点とはく落評価点について工法別にその傾向を分析した。データは, A シートかつ B シートが存在する全スパン 47,261 スパン (山岳トンネル工法 354 本 37,306 スパン, 矢板工法 167 本 9,955 スパン) である。

図-4.7, 図-4.6, 図-4.11, 図-4.13 の破線 (黒) は傾きが 1 の直線であり, この直線付近にプロットされたスパンは, 点検 A と点検 B における評価にずれがないことを表している。また, グラフ中の実線 (黒) は, 要素の回帰直線である。

(1) 外力評価点

図-4.5, 図-4.7 にトンネル施工法別の外力評価点の分析結果および図-4.6, 図-4.8 にデータの分布密度の等高線を入れた図を示す。工法別に見ると点検 A と点検 B の外力評価点の差は, 分布および密度の広がりを見ると山岳トンネル工法が大きい傾向がみられる。そこで, 点検 B の評価点数から点検 A の評価点を引いた差分を算出し, その頻度分布を図-4.9 に示す。この図からわかるように, 外力評価点の差分の標準偏差は山岳トンネル工法が 6.26 で, 矢板工法が 4.88 と山岳トンネル工法が矢板工法に比べ大きく, 山岳トンネル工法の方が点検 A と点検 B の評価点にばらつきがあることがわかる。とくに, 図-4.5 から山岳トンネル工法は, 矢板工法と比較して評価点数が低い側でばらつきが大きい傾向があることがわかる。これは, 山岳トンネル工法は矢板工法と比較してひびわれ幅およびその長さが全体に小さく, 評価点が小さい場合は, とくにひびわれ幅が小さいと考えられるため, このことが工法によるばらつき具合の差に表れたものと考えられる。これは, 図-4.10 に示す工法別の TCI の累積割合分布比較においても, 山岳トンネル工法では, 0.01×10^{-5} 以下 (ほとんどひびわれがない状態) が全体の約 20%, 1.0×10^{-5} 以下が約 40% であるのに対して, 矢板工法は $1.0 \times 10^{-5} \sim 50.0 \times 10^{-5}$ が 90% 以上を占めており, 山岳トンネル工法は矢板工法と比較して TCI が小さく, ひびわれ損傷程度が小さいことを示していると考えられる。すなわち, 山岳トンネル工法は矢板工法と比較してひびわれ延長が短く, 幅も狭いことから点検 A での覆工画像のひびわれの読み取りに関する精度に起因して, 点検 B との評価点の差異が生じると推定される。

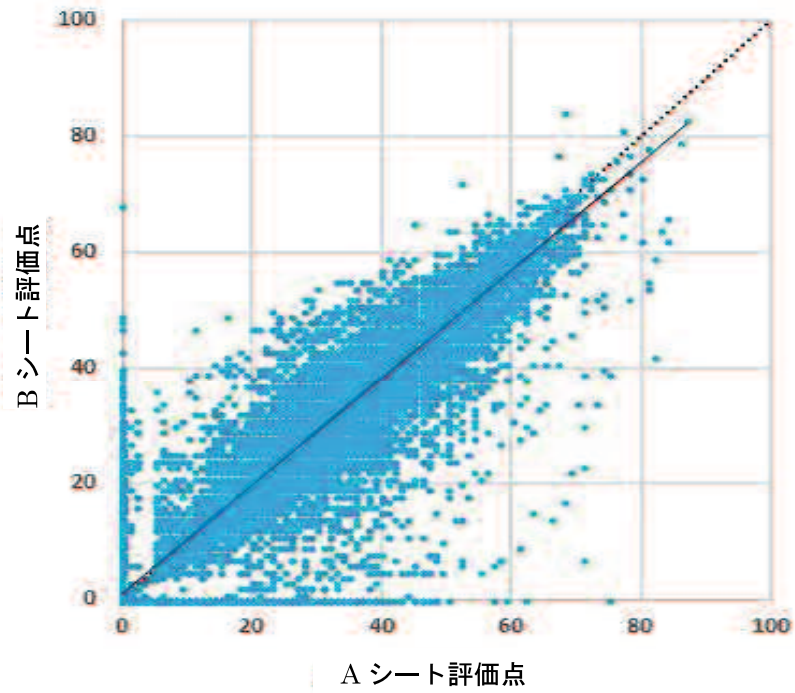


図-4.5 外力評価点の分布（山岳トンネル工法）

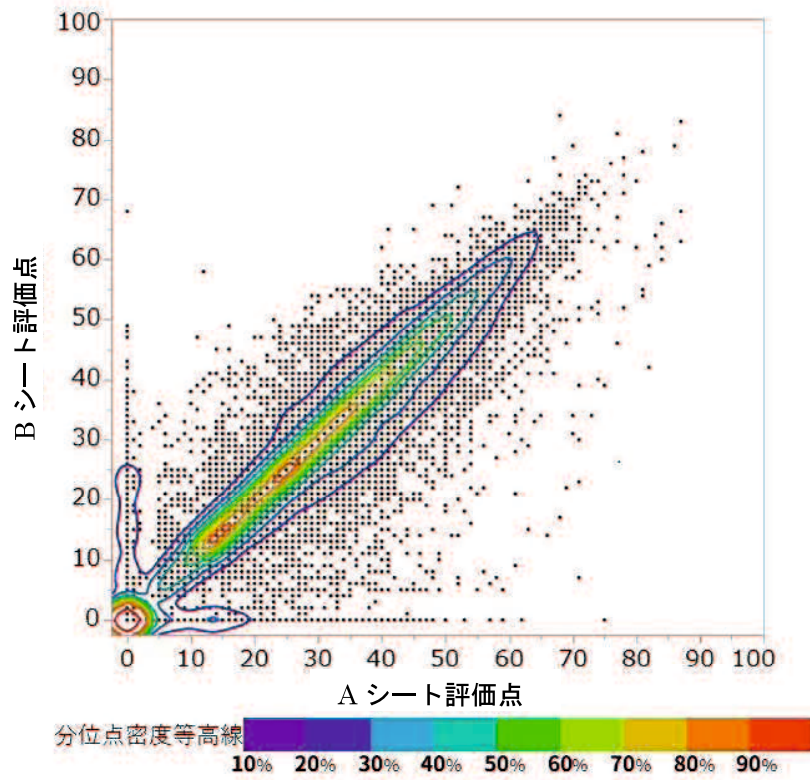


図-4.6 外力評価点の分布密度（山岳トンネル工法）

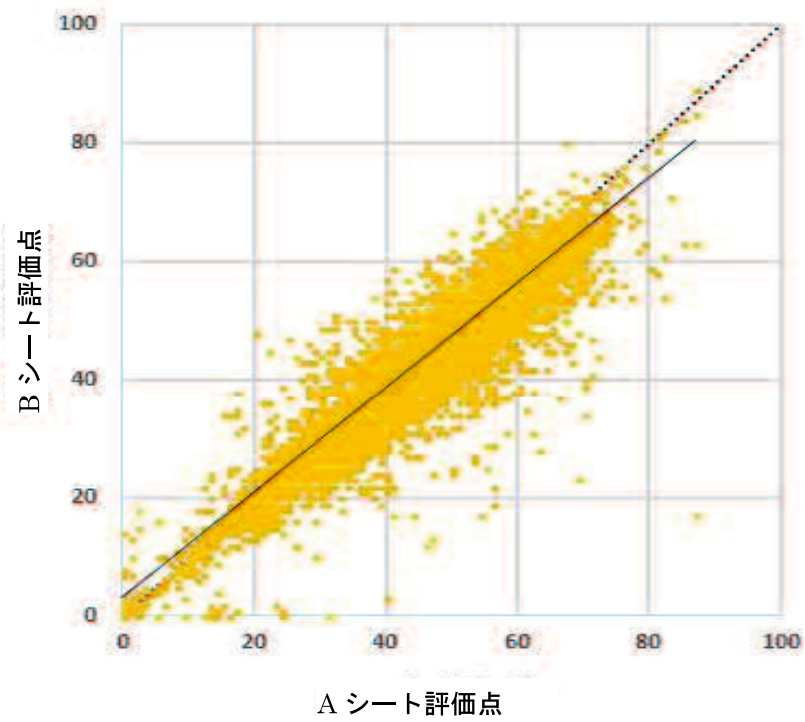


図-4.7 外力評価点の分布（矢板工法）

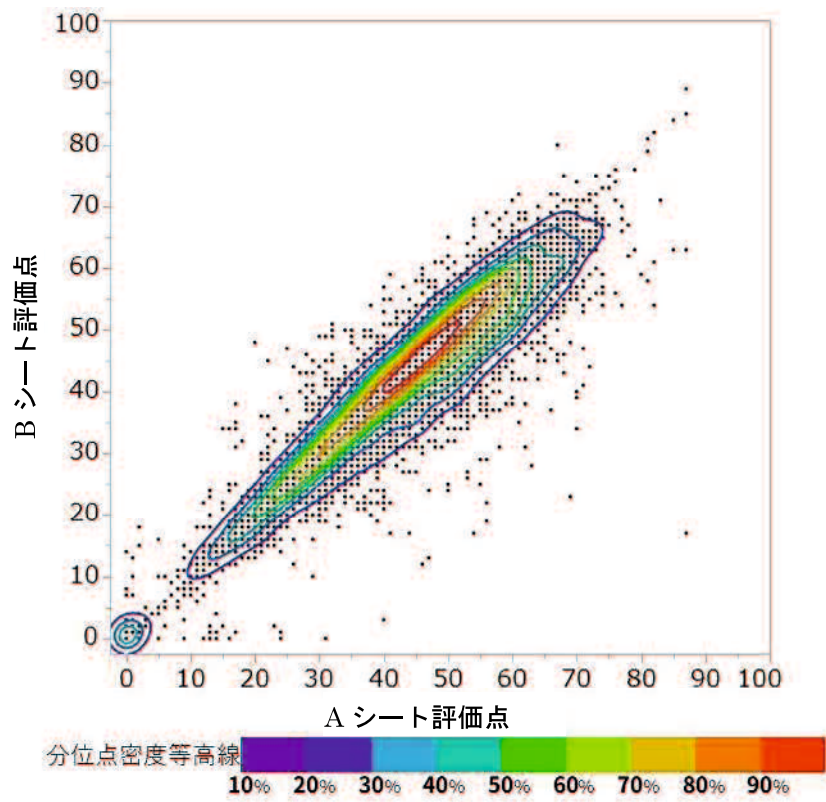


図-4.8 外力評価点の分布密度（矢板工法）

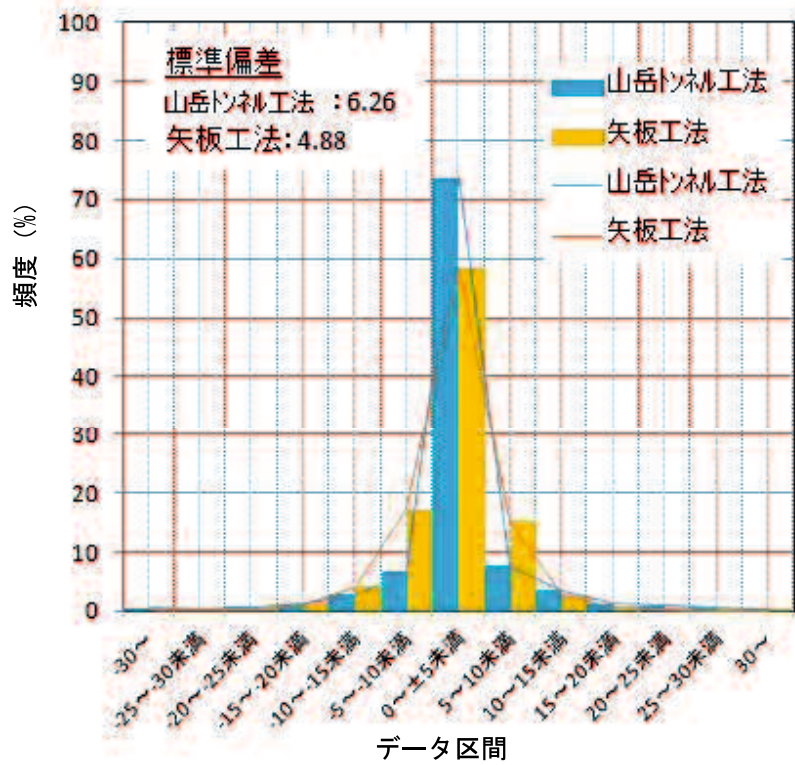


図-4.9 外力評価点の両シートの差分の頻度分布
 (山岳トンネル工法・矢板工法)

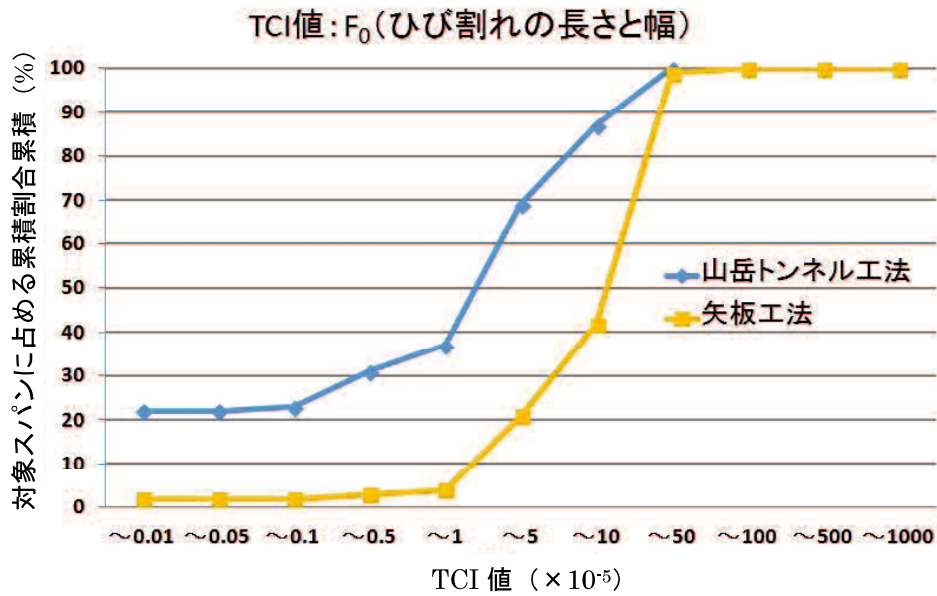


図-4.10 TCI のヒストグラム (山岳トンネル工法・矢板工法)

(2) はく落評価点

図-4.11, 図-4.13 にはく落評価点の分析結果および図-4.12, 図-4.14 にデータの分布密度の等高線を入れた図を示す。工法別に見ると、外力評価点とは逆に矢板工法の方が点検 A と点検 B のはく落評価点の差が大きい傾向を示す。前節と同様それぞれの点検結果の差分の標準偏差を図-4.15 に示す。標準偏差は山岳トンネル工法が 6.10 で、矢板工法が 8.27 と矢板工法が山岳トンネル工法に比べばらつきが大きい。また、図-4.9 と比較して、矢板工法でははく落評価点の標準偏差が 8.27 に対して外力評価点のそれが 4.88 と評価点のばらつきが大きい。これは 4.4.3(2)「はく落評価点におけるひびわれパターンの発生傾向」で後述する、はく落判定におけるひびわれ評価点の配点によると推定され、ひびわれ幅およびその長さが山岳トンネル工法に比較して大きいことが影響していると考えられる。また、はく落評価点は外力評価点と違い、図-4.11, 図-4.13 内に示した青丸で囲んだ部分のように線形に分布するグループが認められ、はく落評価点のばらつきに影響を及ぼしている可能性があることから、上記のばらつきと同様に 4.4.3(2) 「はく落評価点におけるひびわれパターンの発生傾向」で検討を行う。

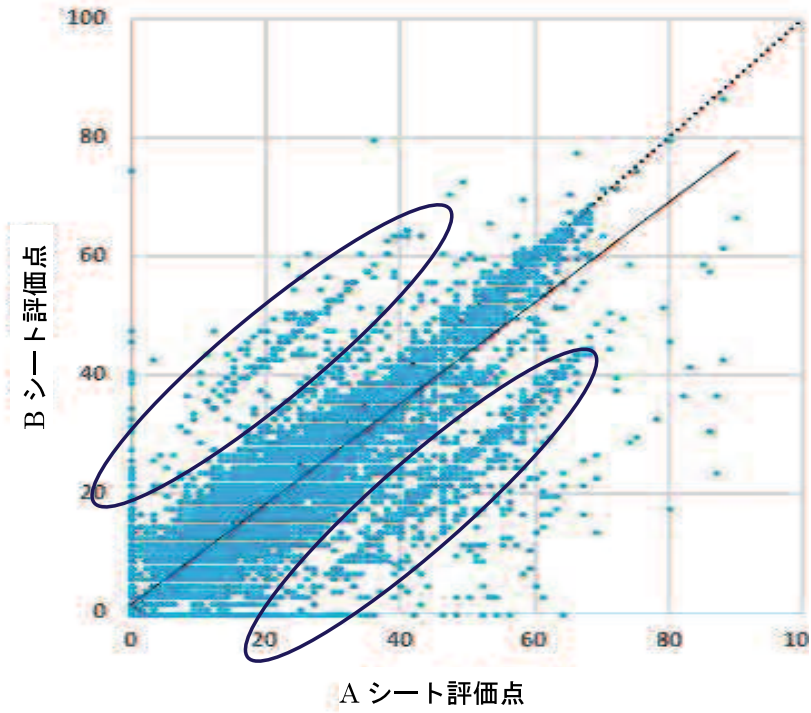


図-4.11 はく落評価点の分布（山岳トンネル工法）

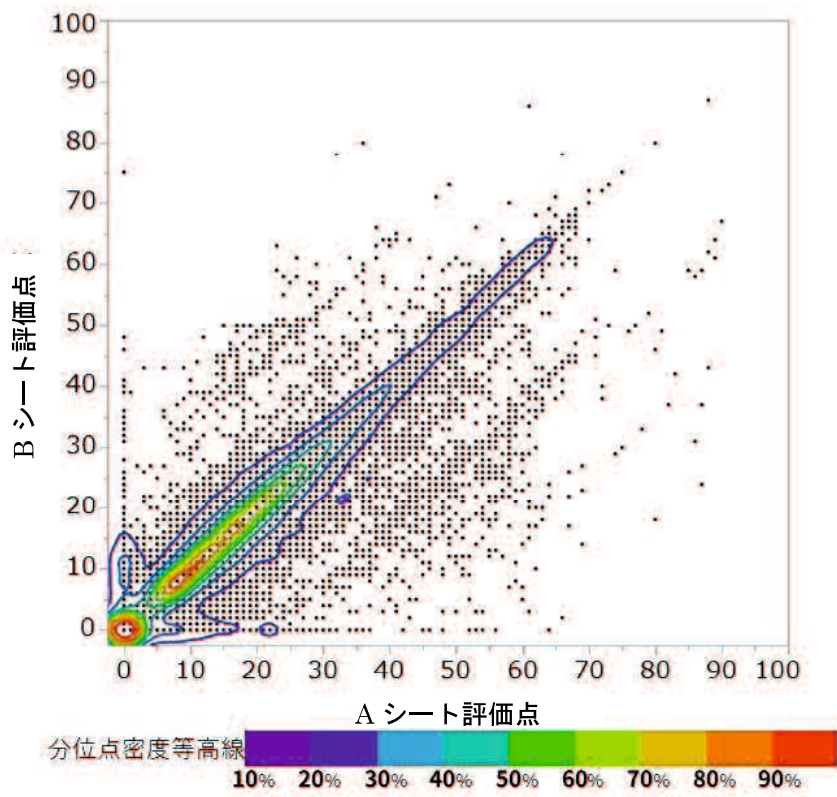


図-4.12 はく落評価点の分布密度（山岳トンネル工法）

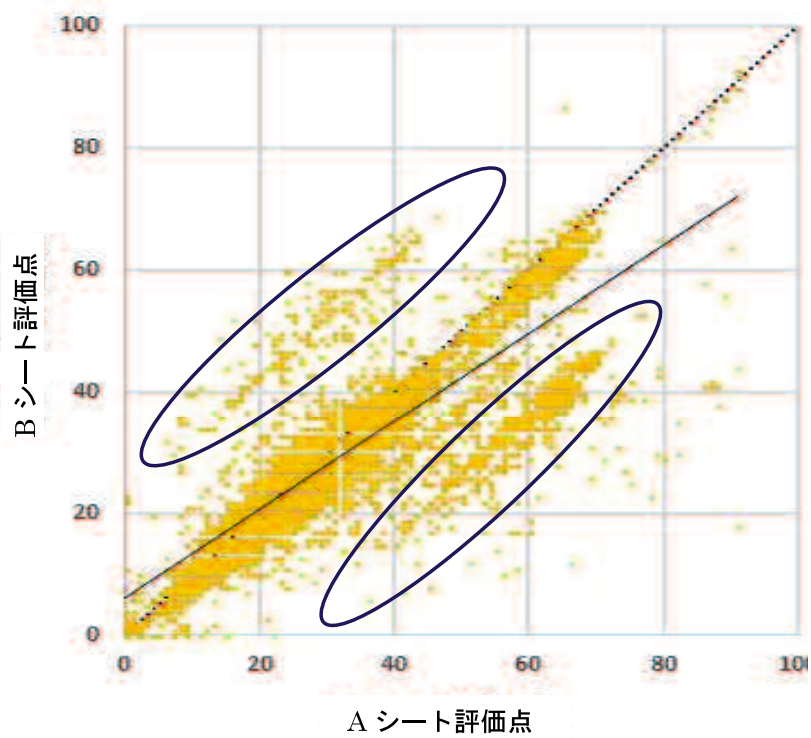


図-4.13 はく落評価点の分布（矢板工法）

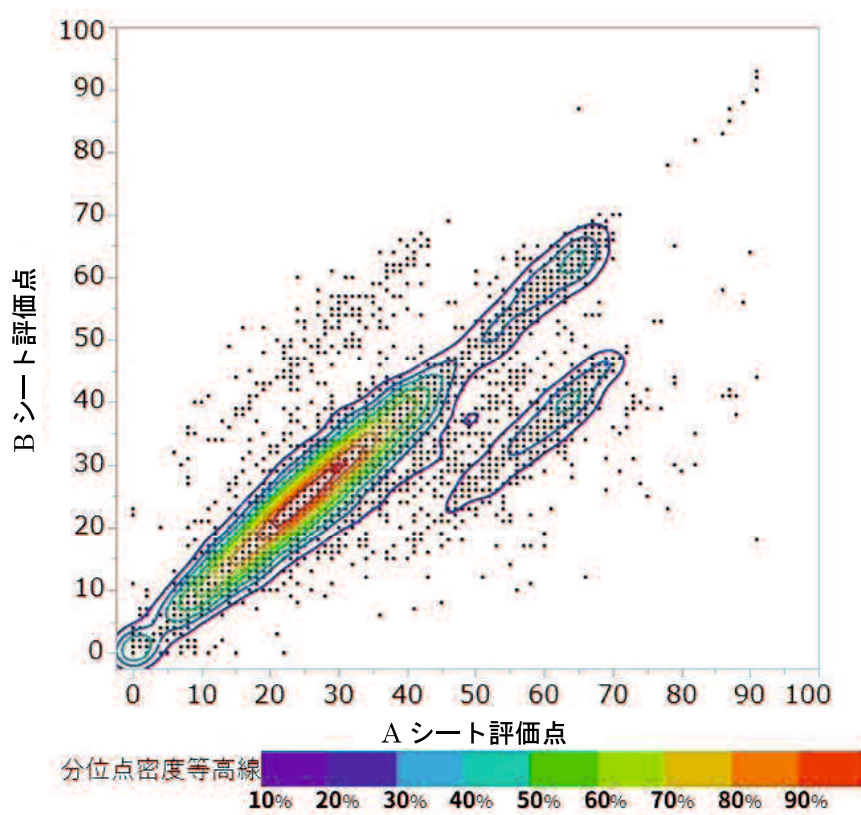


図-4.14 はく落評価点の分布密度（矢板工法）

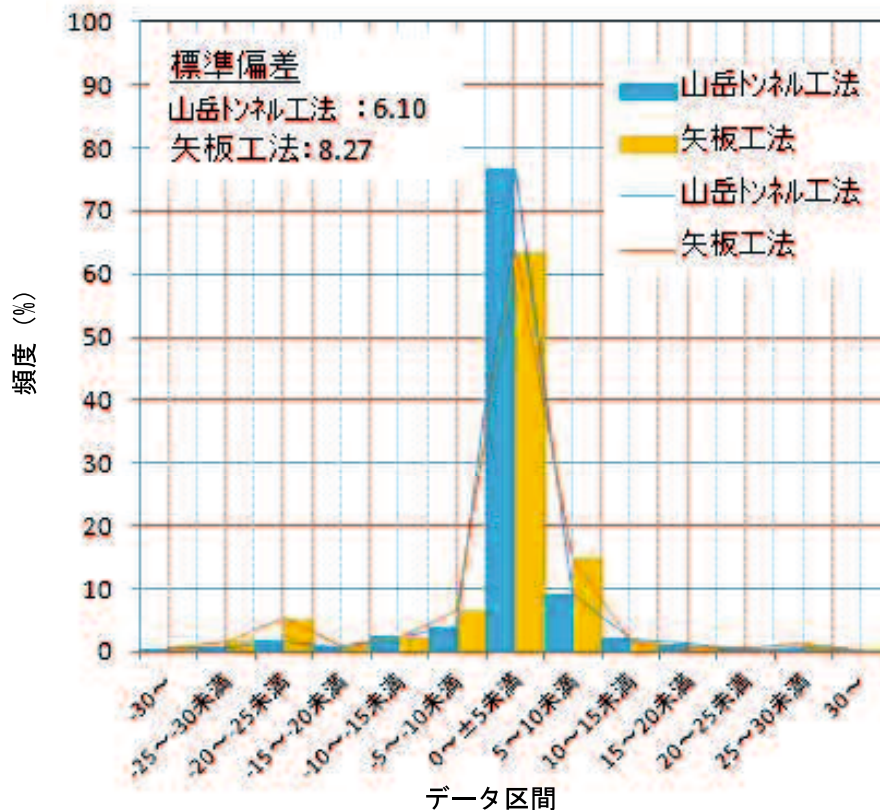


図-4.15 はく落評価点の両シートの差分の頻度分布
 (山岳トンネル工法・矢板工法)

(3) AシートおよびBシートのどちらかが点数0点の事例

図-4.5, 図-4.7, 図-4.11, 図-4.13の中で, Aシートが0点であるものの, Bシートで点数がついている例が, 外力評価点で山岳トンネル工法: 869 スパン, 矢板工法: 37 スパンの合計 906 スパン(全データ数の 1.92%), はく落評価点で山岳トンネル工法: 873 スパン, 矢板工法: 37 スパンの合計 910 スパン(全データ数の 1.93%) 存在する. これは, 覆工画像から展開図作成時にひびわれの確認漏れの事例, 点検 A を実施後, 点検 B を実施するまでに新規の変状発生により, Bシートに点が付いている事例が考えられる.

また, その逆で Aシートに点数がついていたにもかかわらず, Bシートが0点のものが, 外力評価点の場合, 山岳トンネル工法: 1,124 スパン, 矢板工法: 12 スパンの合計 1,136 スパン(全データ数の 2.40%), はく落評価点では, 山岳トンネル工法: 1,130 スパン, 矢板工法: 13 スパンの合計 1,143 スパン(全データ数の 2.42%) 存在する. これは, 各シートを確認すると Aシート作成時に記載された変状が Bシートでは確認されないものがほとんどであった.

これら事象が発生した 4,095 スパン(外力評価点: 2,042 スパン, はく落評価点: 2,053 スパン)の点検年別に発生数は, 2009(平成 21)年が 18 スパン, 年 2010(平成 22)年が 592 スパン, 2011(平成 23)年が 166 スパン, 2012(平成 24)年が 2,266 スパン, 2013

(平成 25) 年が 855 スパン, 2014 年 (平成 26) 年が 198 スパンであった. このことから, 2013 (平成 25) 年までに発生したスパンが 3,897 スパンと全体の 95% を占めており, 点検時期が本点検システムを標準的に導入した 2012 (平成 24) 年頃のものが多いと推測される. このような事例の発生は 2014 (平成 26) 年をピークに急激に減少しており, 画像判定導入から時間が経過した現在はこのような事象の発生は極めて少ないと考えられる.

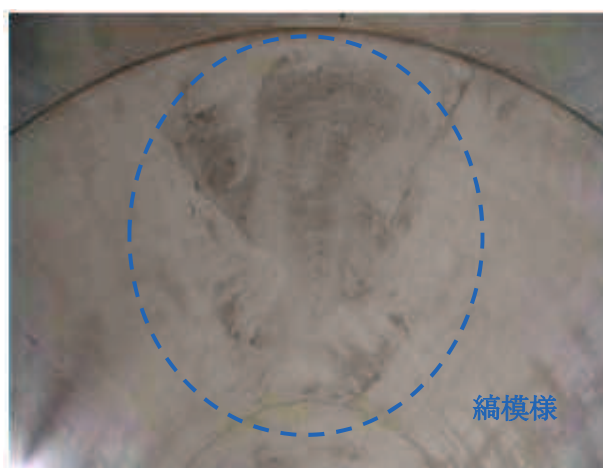


図-4.16 覆工コンクリート表面の縞模様例³⁾

4.3.2 健全度ランク

図-1.8 に示す点検の流れの中で, 評価点等によりトンネルの健全度ランクを判定することになっており, これはトンネルの状態の把握するための重要な指標となっている. そのため, 健全度ランクの判定において大きな要因となると考えられ, 図-4.10 にもその傾向が示されている. 工法別健全度ランクの分布の傾向を分析するため, 図-4.17 に現地にて健全度判定がされている山岳トンネル工法 37,302 スパン, 矢板工法 9,932 スパンに対して健全度ランクの分布を示す.

グラフの横軸は健全度ランク, 縦軸は対象スパンに占める割合を示す. 山岳トンネル工法は健全度 I のスパンの割合が最も多いのに対して, 矢板工法は健全度 II が最も多くなっており, 山岳トンネル工法に比較して矢板工法は健全度ランクが全体に低い傾向にある. これは, 施工法による違いの他に, 図-4.1 に示すように施工後 30 年以上経過し, 経年劣化等による変状の進行も劣化要因となっていると考えられる.

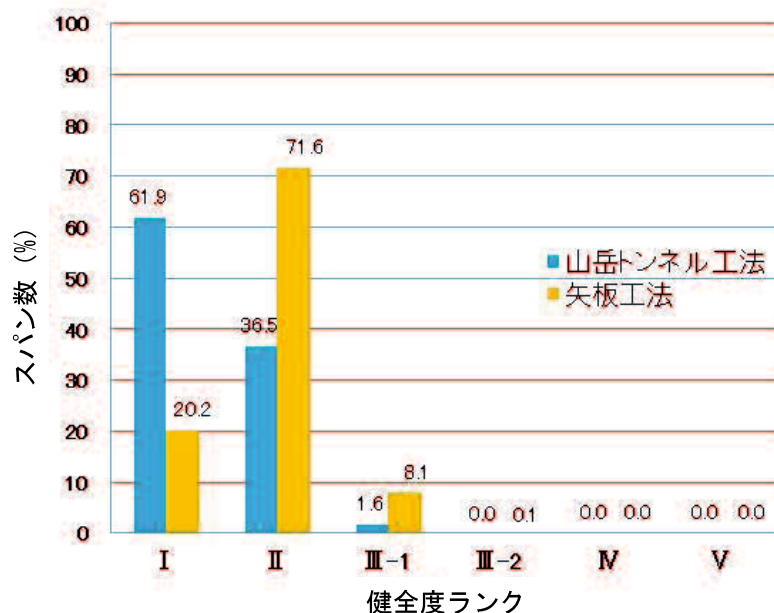


図-4.17 健全度ランクの分布（山岳トンネル工法・矢板工法）

4.4 閾値の検証

覆工詳細点検に使用している評価点の閾値は表-4.2 に示すように各種判定基準の目安にも使用されている。今回、4.3.1 と同様に A シートかつ B シートが存在する全スパン 47,261 スパンに関して分析を行い、点検の実施に際して影響がある、外力評価点と、はく落評価点の閾値について検証した。

4.4.1 点検 A の結果に基づく点検 B の実施状況

表-4.2 に示すように、点検 A の評価が外力評価点では 60 点、はく落評価点では 36 点が、点検 B を実施し重点的に打音点検を実施するスパンかどうかの閾値である。閾値の設定の妥当性を検証するため、点検 A ではそれぞれの閾値を下回っていたものの、点検 B を行った結果、閾値を上回った例を「捕捉漏れ」、それ以外を「捕捉できた」として点検 B の結果を分析した。図-4.18 にその結果を示す。

図-4.18 中、1)の棒グラフに示す特記事項のみにより点検 B を実施したスパンのうち、外力評価点とはく落評価点では 16,045 スパン中 15,513 スパンが捕捉でき捕捉率は 96.75%であった。2)の棒グラフに示す近傍のため実施等覆工評価とは別理由で実施されたスパンのうち、外力評価点とはく落評価点では 24,819 スパン中 24,107 スパン捕捉でき捕捉率は 97.13%であった。3)は 2)の結果に特記事項を考慮すると、その差分となる補足漏れの 712 スパンのうち 285 スパンが捕捉でき、捕捉率は 98.28%であった。3)で捕捉漏れの 427 スパンを、近傍のため実施等覆工評価とは別理由で実施されたスパンに外力評価点、はく落評価点および特記事項により点検 B を実施したスパンを含めた全スパンで比較すると捕捉率は

4)の棒グラフに示すように 99.09%となった。

このことから、外力評価点およびはく落評価点で捕捉できないスパンが存在すると考えられる。特記事項のみのスパンでは 96%以上捕捉でき、近傍のため実施等覆工評価とは別理由で実施されたスパンでは、97%以上捕捉し、特記事項による点検も含めると 98%以上捕捉できる。これは、全スパンを対象とすれば、99%以上捕捉できることから、点検 B を実施するための閾値として、現状の数値は妥当であると判断される。

最終的に閾値で捕捉できなかったスパンのうち、点検 B 時に外力評価点の閾値を越えるものが 15 スパン、はく落評価点の閾値を超えるものが 142 スパンであった。主な部分を占めるはく落評価点の閾値を越える 142 スパンを分析すると、142 スパンのうち A シートでは 141 スパンでひびわれパターン項目の「亀甲型」、130 スパンで「閉合型」、24 スパンで「交差・分岐」がそれぞれ「なし」と判定されているが、B シートでは「亀甲型」が 131 スパン、「交差・分岐」が 14 スパンで「なし」とあまり大きな変化がないが、「閉合型」が「なし」と判定されたスパンは 52 スパンに大きく減少しており、閉合型のひびわれの判定が捕捉率に影響したと考えられる。

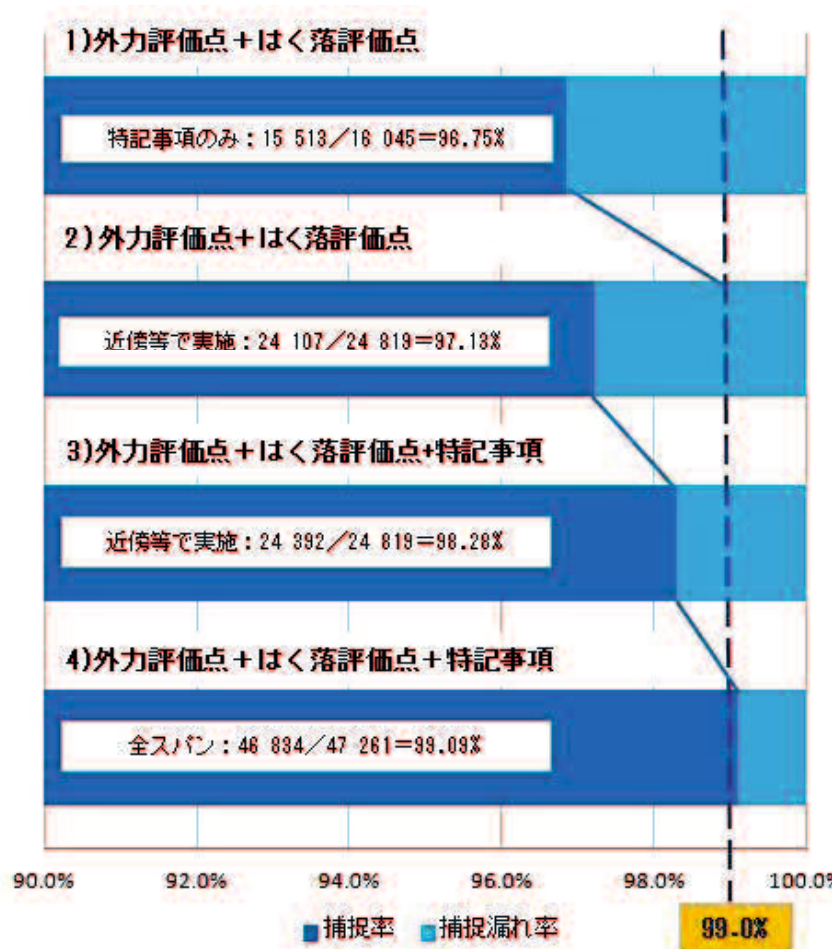


図-4.18 点検 A による捕捉率

また、捕捉率とは逆に、点検 A ではそれぞれの閾値である外力評価点 60 点、はく落評価点 36 点以上および特記事項があったものの、点検 B を行った結果、閾値を下回ったないしは特記事項がなかった事例を「空振り」として、4.3.1 と同様に A シートかつ B シートが存在する全スパン 47,261 スパンを対象に空振り率の分析を行う。点検 A で外力評価点 60 点、はく落評価点が 36 点以上かつ特記事項があるスパンは、47,261 スパン中 22,420 スパンであり、そのうち、点検 B で、評価点が閾値以下ないしは特記事項がなかったスパンは 664 スパンであった。これを全体スパン数でみると、664 スパン/47,261 スパンで空振り率は約 1.4%と非常に低いことから、空振り率の面からも、現状の数値は妥当であると判断される。

4.4.2 外力評価点の閾値の妥当性

NEXCO では健全度ランク「III-1」以上のランクは、外力評価点 60 点以上と合わせて変状の進行性を考慮し健全度ランクを決定することにしており、外力評価点 60 点がポイントとなる。そのため、健全度ランク「III-1」～「V」と判定した覆工スパンが、閾値の 60 点以上と判定されたスパンであれば、その時の閾値は妥当であると考えられる。

図-4.19 に外力評価点の健全度ランク別の分布を示す。グラフは横軸が A シートによる外力評価点、縦軸が B シートによる外力評価点を示した上で、それぞれの覆工スパンに対し判定された健全度ランクを色別で表現している。この図から、健全度ランクが「I」のスパンは B シートの外力評価点が「0～30 点」に、健全度ランクが「II」のスパンは外力評価点が「31～59 点」に、健全度ランクが「III-1」～「IV」のスパンは外力評価点が「60 点以上」に、概ね分布している。また、図-4.20 に A シートによる外力評価点の健全度ランク別のヒストグラムを示すが、図-4.19 と同様の傾向を示している。

そこで、B シートに着目し、健全度ランクごとのスパン数の割合を図-4.21 に示す。この図から、「III-1」のスパンは、1,388 スパン中 93.8%にあたる 1,302 スパンが、「III-1」～「IV」のスパンで 60 点以上のスパンは 1,405 スパン中 93.2%に当たる 1,310 スパンとなり閾値の設定は妥当であったと判断できる。しかし、図-4.19 で確認できるように変状の進行状態の評価がより深刻な「III-2」、「IV」のスパンは全 1,405 スパン中 17 スパンと極めて少ないものの、図-4.22 に示すように、60 点以上が、「III-2」が 11 スパン中 6 スパン(54.5%)、「IV」が 6 スパン中 2 スパン(33.3%)と、59 点以下のスパンが「III-2」で 5 スパン(45.5%)、「IV」で 4 スパン(66.7%)存在しており、同様なことが図-4.20 の「III-2」と「IV」の線からも示されている。これは、対象スパン内に大きなひびわれがあっても、TCI から算出される評価点は、ひびわれ幅、長さ、密度、分布が平準化されることから、進行性の判断が今後重要となることを意味している。

したがって、健全度判定を行う上で外力評価点の閾値は妥当と判断できるものの、今後、精度向上のためには、変状の進行性を考慮した評価方法の検討が重要と考えられる。

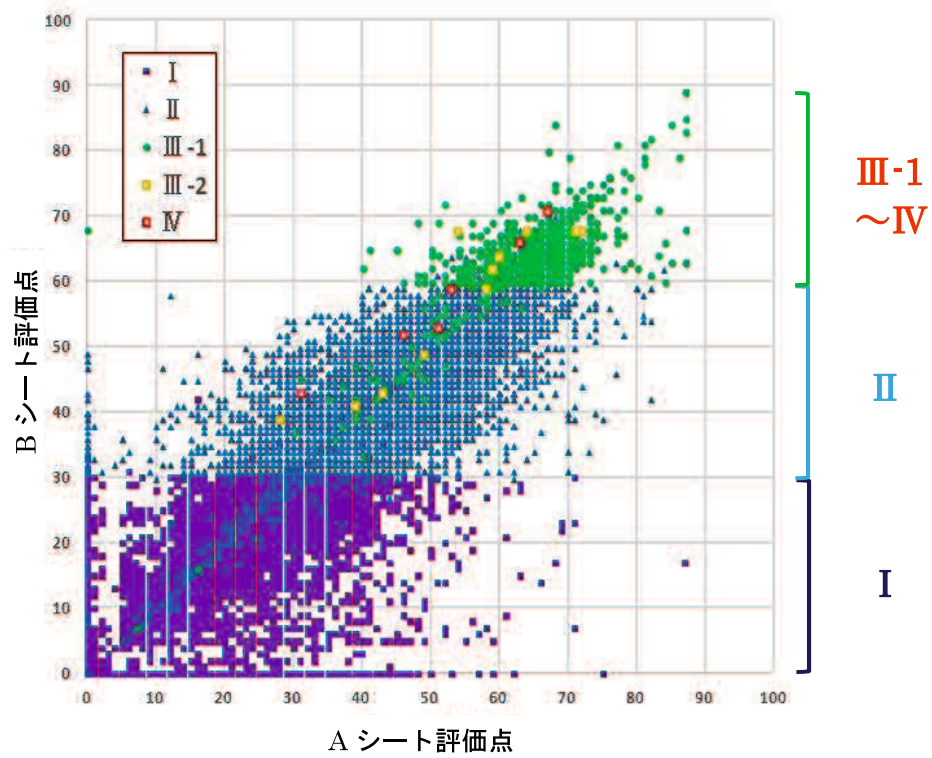


図-4.19 外力評価点の健全度ランク別の分布

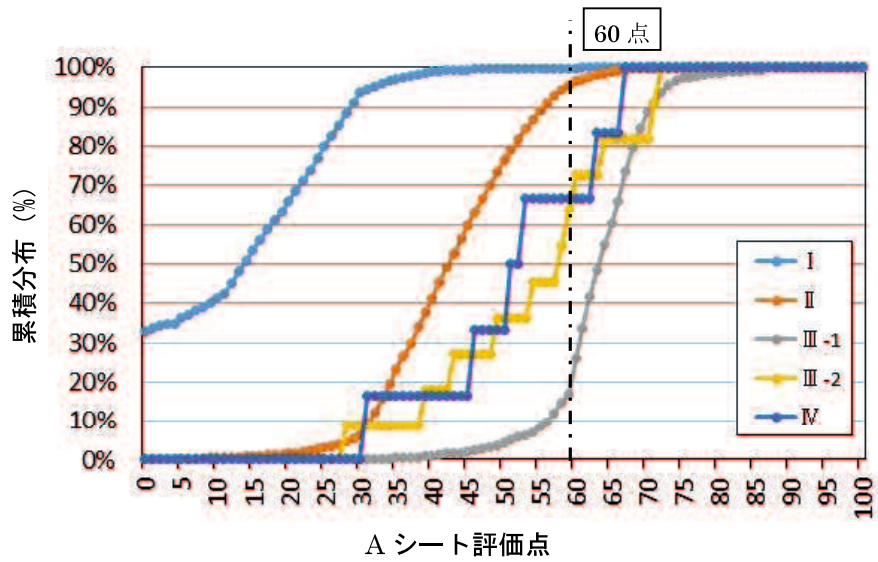


図-4.20 外力評価点の健全度ランク別のヒストグラム

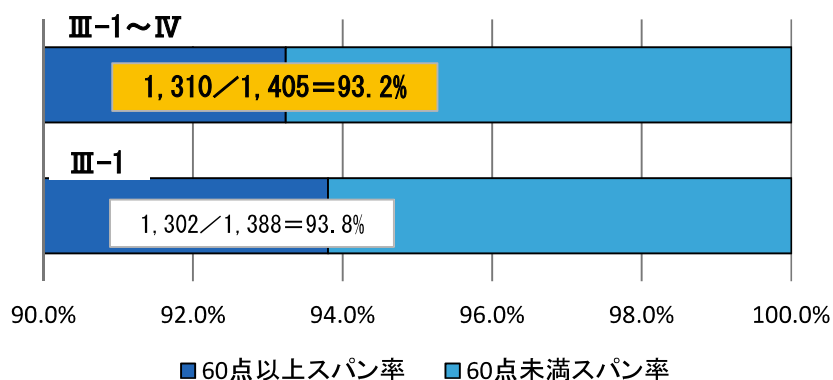


図-4.21 外力評価点による捕捉状況（III-1・III-1~IV）

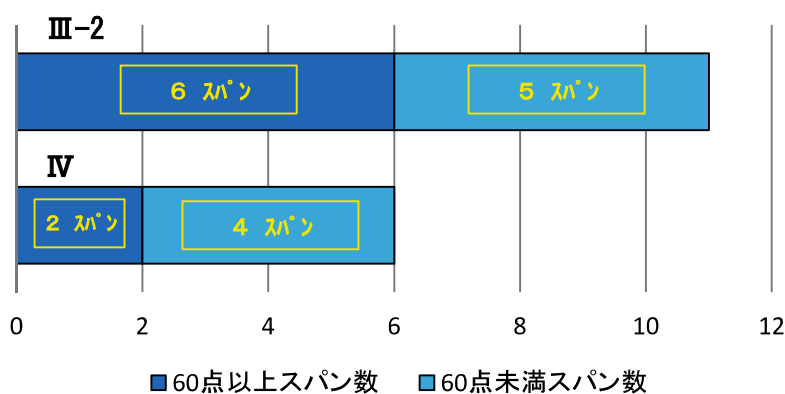


図-4.22 外力評価点による捕捉状況（III-2・IV）

4.4.3 はく落評価点の閾値の妥当性

はく落評価点の閾値 36 点について、はく落評価点の分布傾向および健全度ランクとはく落評価点の関係を分析し、閾値の妥当性を検証する。

(1) 健全度ランクとはく落評価点

覆工の健全度ランクは、外力評価点とひびわれの進行性を考慮し決定されるため、健全度ランクとはく落評価点とは直接的な関係はない。しかし、外力評価点と同様に健全度ランク「III-1」～「V」が、はく落評価点の閾値以上と判定されたスパンであれば重点点検箇所として点検でき、補修の必要性について検討することから、はく落評価点も閾値として利用できると思われる。

図-4.23 に、3.4.2 外力評価点と同様のデータを用い健全度ランクとはく落評価点の関係を示す。これを見ると、健全度ランクが「I」のスパンは B シートのはく落評価点が「0～30 点」に、健全度ランクが「II」のスパンははく落評価点が「15～60 点」に、健全度ランクが「III-1」のスパンははく落評価点が「36 点以上」に、概ね分布している。また、図-4.24 に A シートによるはく落評価点の健全度ランク別のヒストグラムを示すが、図-4.23 と同様の傾向を示している。

図-4.25 に示す健全度ランクごとのはく落評価点による捕捉率を見ると、「III-1」のスペンは、1,388 スパン中 1,332 スパンが、「III-1」～「IV」のスペンで 36 点以上のスペンは 1,405 スパン中 95.4%の 1 340 スパンであり、間接的ではあるがはく落評価点の閾値は妥当であると判断できる。しかし、図-4.23 でも確認できるように、前節 4.3.2 外力評価点と同様に 36 点を健全度ランクの閾値を考えた場合、全 1,405 スパン中 17 スパンと非常に少ないが、図-4.26 に示すように、変状の進行状態の評価がより重要となる「III-2」, 「IV」のスペンでは 36 点以上が、それぞれ 11 スパン中 6 スパン (54.5%), 6 スパン中 2 スパン (33.3%)と 35 点以下のスペンが存在し、35 点以下のスペンが「III-2」で 5 スパン (45.5%), 「IV」で 4 スパン (66.7%) 存在しており、同様なことが図-4.24 の「III-2」と「IV」の線からも示されている。これは、対象スペン内に大きなひびわれがあっても、TCI から算出される評価点は、ひびわれ幅、長さ、密度、分布が平準化されることから、進行性の判断が今後重要となることを意味している。

これは外力評価点と同様に、スペン内に大きなひびわれがあっても、TCI で算出される評価点はひびわれ幅、長さ、密度、分布が平準化されることから、進行性の考慮が重要であると考えられる。

したがって、外力評価点と同様にはく落評価点でも変状の進行性を考慮した評価方法の検討を行えば、より精度の向上が期待できる。

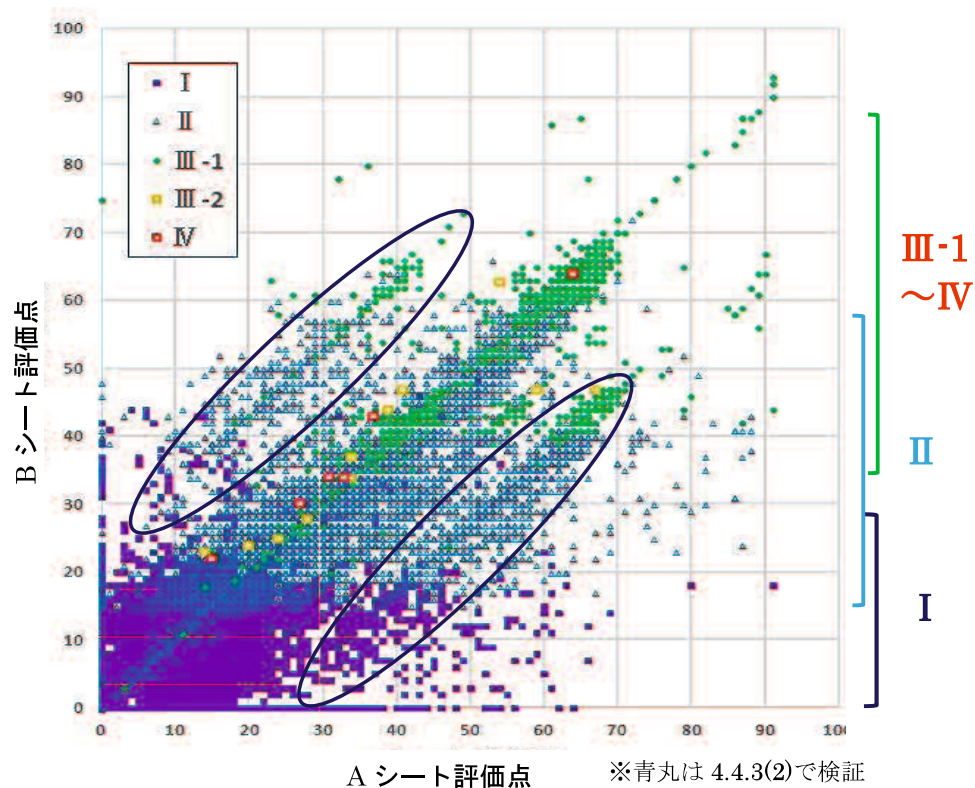


図-4.23 はく落評価点と健全度ランクの関係
(山岳トンネル工法・矢板工法)

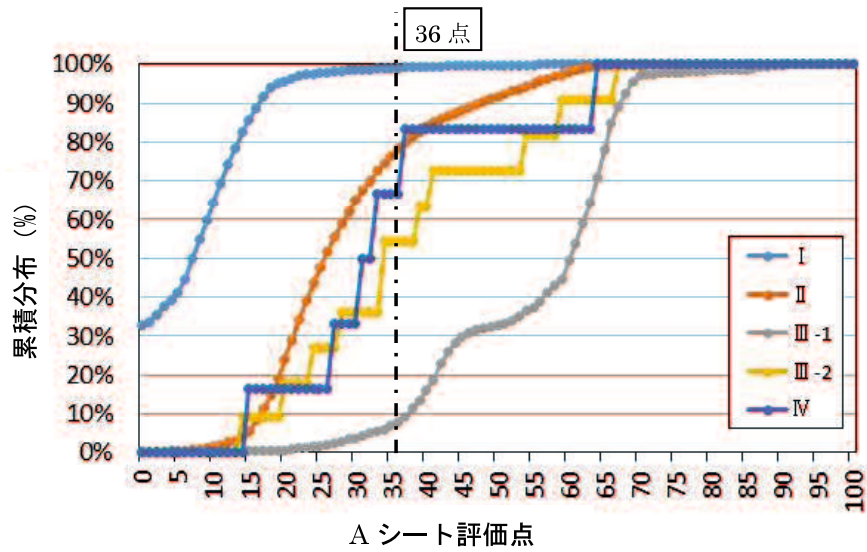


図-4.24 はく落評価点の健全度ランク別のヒストグラム

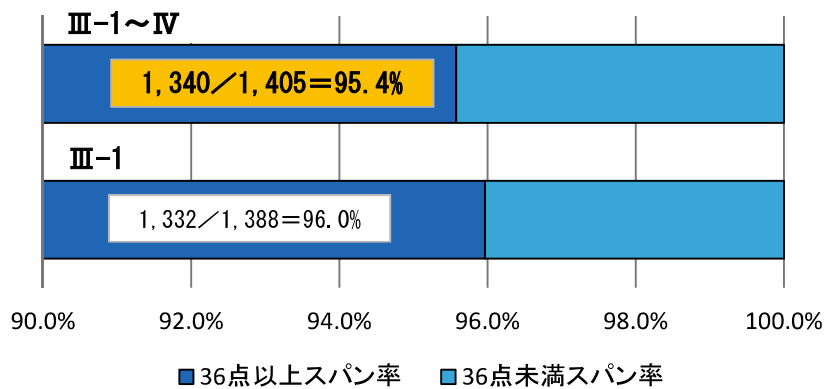


図-4.25 はく落評価点による捕捉状況 (III-1・III-1~IV)

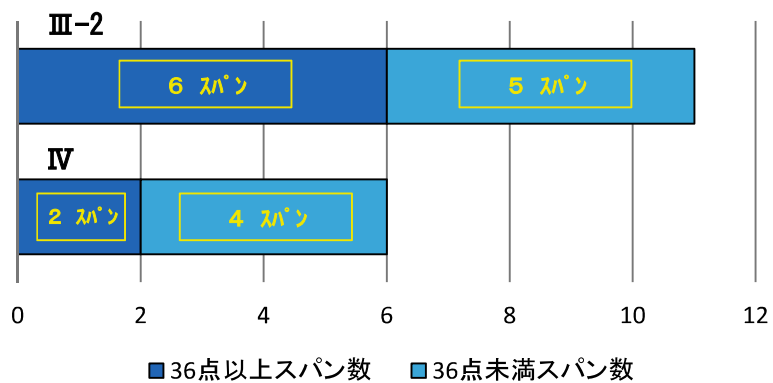


図-4.26 はく落評価点による捕捉状況 (III-2・IV)

(2) はく落評価点におけるひびわれパターンの発生傾向

図-4.19 と図-4.23 を比較すると、図-4.19 の外力評価点に比較して図-4.23 のはく落評価点は全体的に分布にばらつきがあることがわかる。とくに、図-4.23 内に示した青丸で囲んだ部分のように、線形に分布するグループが認められる。この発生要因を特定するため、図-4.23 から TCI により評価される「1. ひびわれ幅・長さ・分布」、「2. ひびわれ方向性」の評価点をはく落評価点から差し引いた結果を、図-4.27 に示す。図中の破線（黒）は傾きが 1 の直線であり、この直線付近にプロットされたスパンは点検 A と点検 B における評価に差異がないことを表している。この図の青丸部分からわかるように図-4.23 とほぼ同じパターンで分布している。このことから、表-4.4 に示す A, B シートにおけるデータシート部の、はく落判定におけるひびわれ評価点のうち TCI で評価した以外の「3. パターン」、「4. エフロッセンス」、「5. 漏水」の影響がその発生要因と考えられる。

表-4.4 に示すはく落評価点の配点を見ると、3. パターンの、「亀甲状」、「閉合型」、「交差・分岐」において、配点が高いのが確認できる。たとえば点検 A で、閉合型ひびわれを「なし」と判定したものの、点検 B で閉合型ひびわれが「長辺 20cm 以上」と判定したスパンは、A シートと、B シートのはく落評価点差が 23 点と高くなるため、配点の高い部分の判定の差が、図-4.23 の青丸部のように特徴的な分布が生じる要因と考えられる。

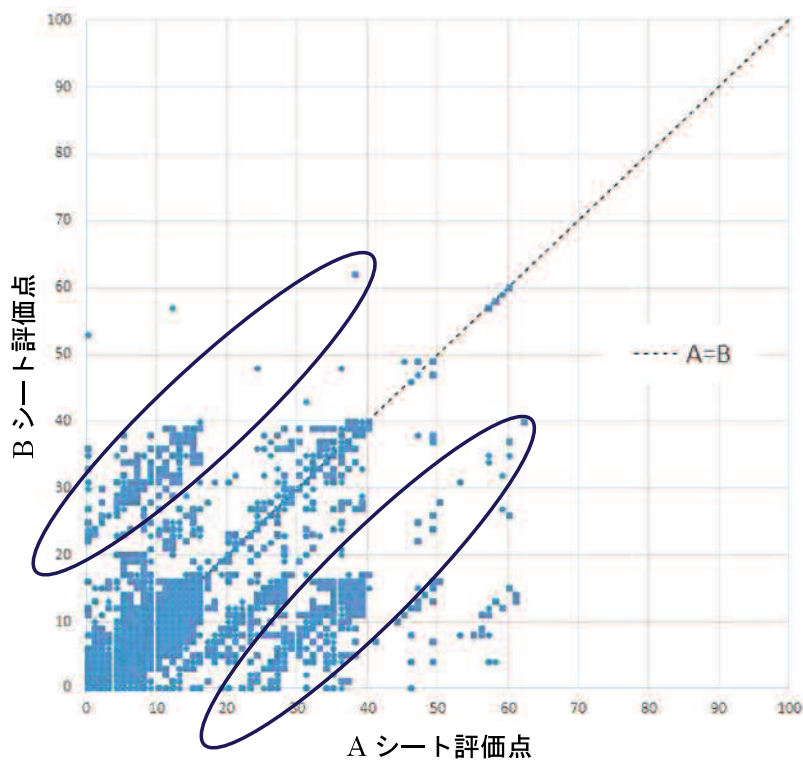


図-4.27 ひびわれパターンのみに着目した健全度ランクとはく落評価点の関係（山岳トンネル工法・矢板工法）

表-4.4 はく落判定におけるひび割れ評価点の配点¹⁾

観察項目		判定区分		外力	はく落
3.パターン	亀甲状	なし		0	0
		1m ² 未満		7	11
		1m ² 以上		14	22
	閉合型	なし		0	0
		長辺20cm未満		4	12
		長辺20cm未満		7	23
	交差・分岐	なし	なし	0	0
		5箇所未満	少ない	2	4
		5～9箇所	中程度	3	8
10箇所以上		多い	5	12	
4.エフロレッセンス	なし		0	0	
	少ない		1	1	
	中程度		2	2	
	多い(全面に分布)		3	3	
5.漏水	なし		0	0	
	あり(対策なし)		2	2	
	あり(対策済み)		2	0	

そこで、特徴的な分布の要因として、はく落評価点の配点が高い「ひびわれパターン」に着目し、点検 A と点検 B の判定の違いについて個々の事例を分析する

図-4.28 は、図-4.23 において、A シートより B シートの方が評価点の高いスパンを抽出し、A シートと B シートでひびわれパターンの判定に差異がないか分析した結果である。

図-4.28 を見ると、ひびわれパターン項目の「閉合型」は、黄色で示す「なし」が A シートで 181 スパンに対し、B シートでは 13 スパンと大幅に減少するのに対し、緑色で示す「閉合型：長辺 20cm 以上」は、A シートでは 1 スパンであるにも関わらず、B シートでは 169 スパンと「閉合型」が増加していることがわかる。それに対し、ひびわれパターンの「亀甲状」と「交差・分岐」では大きな判定の違いはみられない。

すなわち、はく落評価点において、A シートより B シートの方が、評価点が高くなる覆工スパンは、点検 A 実施時に「閉合型」を画像からでは認識しきれないことが原因と考えられる。

図-4.29 は、図-4.28 とは逆に、図-4.16 において、A シートより B シートの方が評価点の低いスパンを抽出し、A シートと B シートでひびわれパターンの判定の差異を分析した結果である。この図から、図-4.28 に示す B シートの方が評価点が高いものと同様に A シートと B シートでひびわれパターンの「亀甲状」「交差・分岐」では大きな判定の違いは見られないことがわかる。ただし、パターン項目の「閉合型」は、「なし」が A シートで 25 スパン、B シートで 279 スパンと大幅に増加、「閉合型：長辺 20cm 以上」が A シートで 252 スパンから B シートで 0 スパンと大幅に減少していることが分かる。

すなわち、はく落評価点において、A シートより B シートの方が、評価点が低くなる覆工スパンは、前述の A シートより B シートの方が、評価点が高くなる覆工スパンとは逆に、点検 A 実施時に「閉合型」を過大評価したものと考えられる。

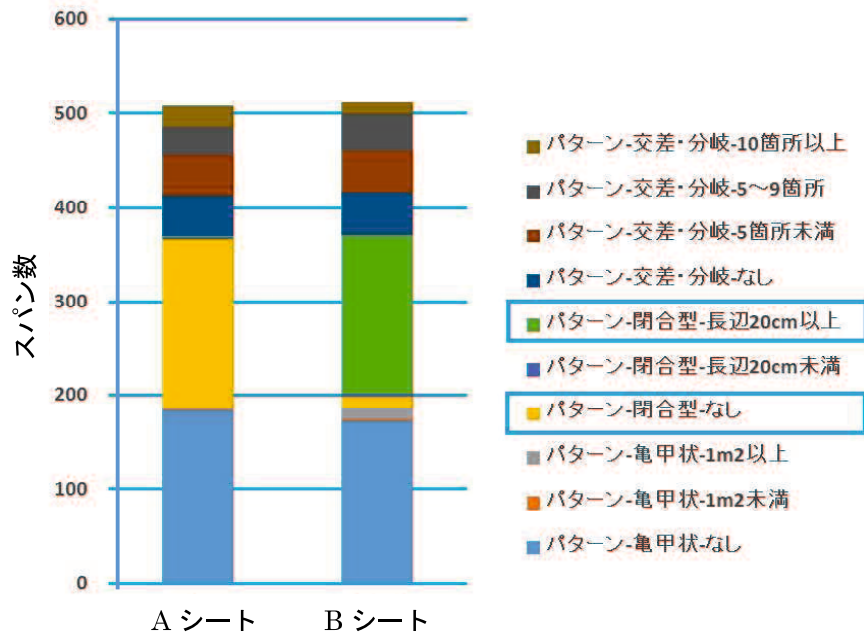


図-4.28 ひびわれパターン比較
(A シート < B シートの場合)

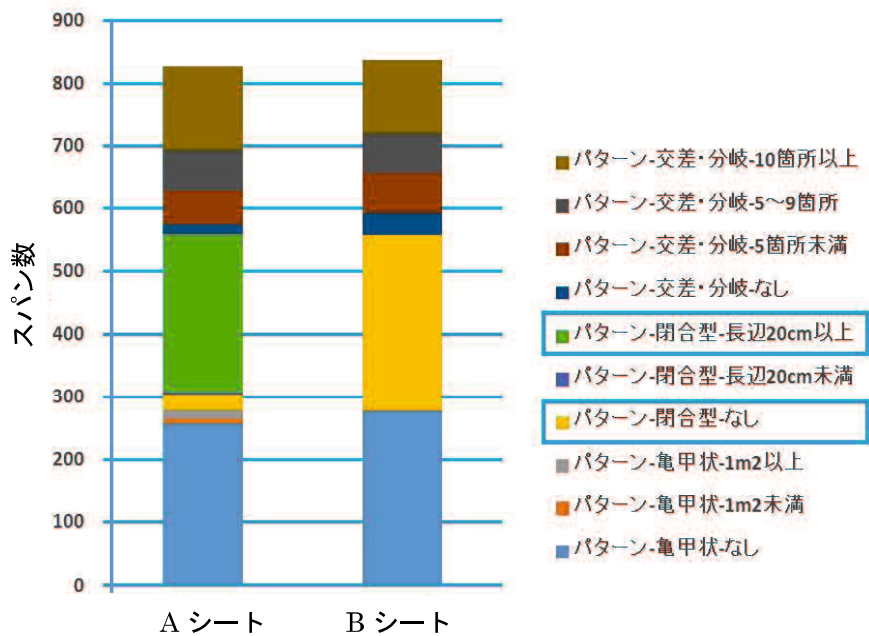


図-4.29 ひびわれパターン比較
(A シート > B シートの場合)

図-4.30 に覆工画像に基づく机上点検である点検 A の際は閉合ひびわれは確認されなかったが、実際に現地へ赴き、詳細点検を行う点検 B の際に閉合型ひびわれが確認された事例、図-4.31 にはその逆の事例を示す。これらのことから、はく落評価点のばらつきは、「閉合型ひびわれ」の判定が大きく影響していると考えられる。

また、この閉合型ひびわれの判定は、4.4.1「点検 A の結果に基づく点検 B 実施状況」に示す捕捉率にも影響していると考えられる。

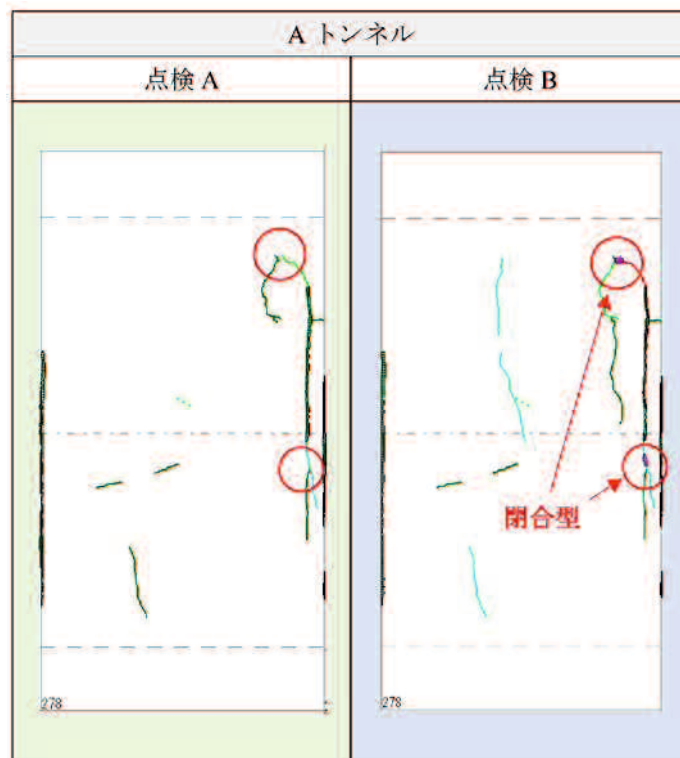


図-4.30 ひびわれ比較（点検 B：閉合型ひびわれあり）

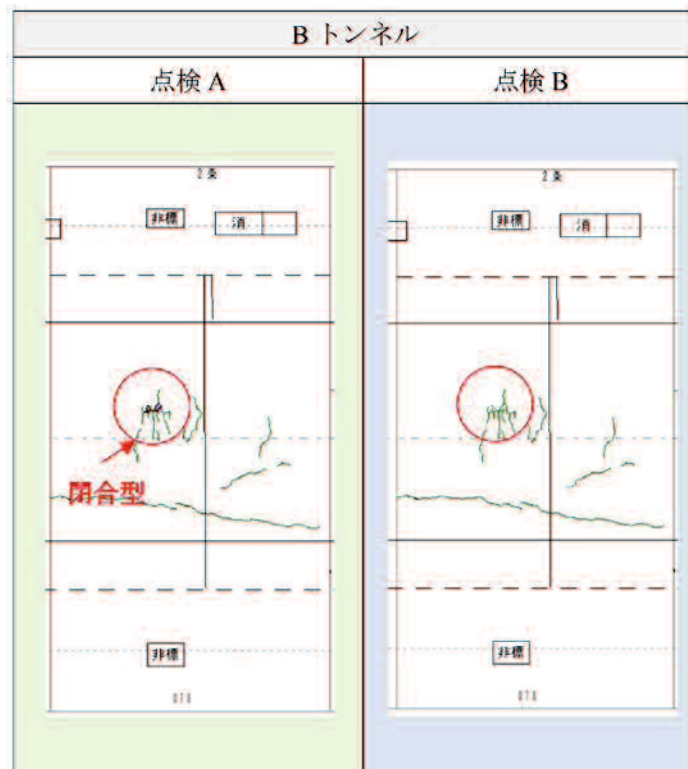


図-4.31 ひびわれ比較（点検 A：閉合型ひびわれあり）

4.5 まとめ

高速道路トンネルの点検データを用いて各種分析・評価を行い、現在、NEXCO が導入しているトンネル覆工の健全度の定量的評価手法の検証について検証した。その検証結果をまとめると次のようになる。

4.5.1 点検結果の整理

現在、NEXCO で実施している点検において覆工画像撮影からひびわれ展開図を作成し、スパン単位で外力評価点、はく落評価点を算出した。そして点検結果を、「外力評価点」、「はく落評価点」それぞれに、スパンごとの評価点数のヒストグラムを作成し、傾向を分析した。その結果、点検 A による閾値より抽出されたスパン数よりも、実際に重点点検スパンとして点検 B を行ったスパン数が多く、閾値による判断以外に特記事項等により判断しているスパンも多くあることから、閾値の適正化とともに、特記事項の照査・整理により、よりの確な点検 B の実施が可能になると考えられる。

4.5.2 評価点および健全度ランク分析

外力評価点およびはく落評価点、健全度ランクについて、トンネル工法別にデータの特徴や傾向の把握および分析を行った。

(1) 外力評価点、はく落評価点

外力評価点およびはく落評価点は、点検 A の画像点検による評価点と、点検 B の近接目視による評価点を散布図により比較した。外力評価点は、山岳トンネル工法の方が、はく落評価点は矢板工法の方が、点検 A と点検 B の評価点にばらつきがあった。これは、画像精度とトンネル工法によるひびわれ特性の違いによるものと考えられる。

(2) 健全度ランク

山岳トンネル工法は健全度 I のスパンの割合が最も多いのに対し、矢板工法は健全度 II が最も多くなっており、矢板工法は健全度が山岳トンネル工法より低い傾向がある。これは、覆工も荷重を受け持つという一般的な矢板工法の特徴と、山岳トンネル工法に比較して施工から時間がたっているための、経年劣化等による変状進行が要因となっていると考えられる。

4.5.3 閾値の検証

各閾値設定項目に対し評価点、健全度ランクの分析結果を踏まえ、閾値の妥当性について検証した。

(1) 点検 A による点検 B の実施状況

外力評価点とはく落評価点ともに、それぞれの閾値である 60 点と 36 点により、現場での点検 B をほぼカバー（99%）できることが判明し、閾値は妥当と判断できる。

(2) 健全度ランクからみた評価点

健全度ランク「III・1」～「V」に注目して分析した結果、外力評価点およびはく落評価点の閾値は妥当と判断できる。しかし、変状の進行性をより考慮した健全度ランク「III・2」、 「IV」のスペンは、それぞれの閾値以下のスペンがある。これは、スペンに最大幅の大きなひびわれがあっても、TCIで算出される評価点はひびわれ幅、長さ、密度、分布が平準化されるためと考えられる。

(3) はく落評価点

はく落評価点の分布状況から、点検 A の画像点検時において、ひびわれパターン項目の「閉合型」を認識できていない、あるいは、「閉合型」を過度に判定している事例があることがわかった。これら閉合部は、複数のひびわれが近接して存在しているため、画像精度および人によるひびわれ抽出時の誤認等により、認識しきれないためと推測される。

これらのことから、外力評価点、はく落評価点による点数をもとに行う健全度のランク付け、閾値を用いて重点点検箇所を抽出する点検手法は妥当であることが検証できた。しかし、その数は極めて少ないが、健全度ランクが「III・2」や「IV」のような健全性の悪い箇所については、TCIの数値では捉えきれないこともあることが判明したため、より健全度把握の精度を効率的に向上させるために個々の問題点の検討が必要であることも確認した。

【参考文献】

- 1) 山田隆昭, 佐野信夫, 重田佳幸, 吉武 勇, 西村和夫: ひびわれ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.11-16, 2009.
- 2) 東日本・中日本・西日本高速道路(株): 保全点検要領 構造物編, p.158, 2017.
- 3) 水野希典: トンネル覆工の課題克服に向けた中流動覆工コンクリートの開発, コンクリート工学, 第54巻5号, p.520, 2016.

第5章 トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証

5.1 目的

トンネルの健全度評価に対しては、外力性評価点の点数によるランク分けが行われている。しかし変状を評価するうえで重要となる、ひびわれの進行性に関しては、表-5.1に示す青字部分に一部記述があるが、定量的な評価手法になっていない。そこで近接目視および打音点検の効率化のために、定量的で一律なひびわれ進行の評価手法について検証を行う。

覆工健全度評価指標の一部である進行性について、トンネル覆工の健全度算出に際して「ひびわれ幅・長さ・分布」、「ひびわれの方向性」の2項目のひびわれの量の評価に活用しているTCIを用いてひびわれ進行性の定量的評価を検討する。

5.2 ひびわれ進行性の評価法の検討

5.2.1 進行性の評価フロー

本研究では、点検シートである図-1.12、図-1.13の赤枠部分「1. ひびわれ幅・長さ・分布」、「2. ひびわれの方向性」の2項目のひびわれの量を、TCIを用いて共通の評価を行っていることから、各スパンを定量的かつ一律に評価できるTCIの時系列的増加量を用い、覆工点検におけるひびわれ判読の誤差を考慮した進行性の評価について検証する。

分析は、覆工表面画像撮影を基にした点検Bを複数回実施したトンネルについて、TCI値（ $\times 10^{-5}$ ）の全体の大きさを表す F_0 の値の「覆工スパンごとにおける F_0 の変動」、「時系列的な F_0 変動」に着目し、図-5.1に示すフローに沿って進行性の評価について検討する。

表-5.1 健全度ランクの標準（トンネル）¹⁾

点検箇所	変状の種類	評価の標準					
		I	II	III-1	III-2	IV	V
覆工	外力による変状	<ul style="list-style-type: none"> 変状が無いが、若しくは軽微なもの 評価点で30点以下 	<ul style="list-style-type: none"> 評価点で31～59点 	<ul style="list-style-type: none"> 評価点が60点以上であるが、進行性が緩やかなもの 	<ul style="list-style-type: none"> 健全度ランクIII-1の状況から進行しているようにみられる 	<ul style="list-style-type: none"> 放射状ひび割れが見られる 圧ざが見られる 5mm以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる 	<ul style="list-style-type: none"> 変状の進行が極めて著しくみられる
		<ul style="list-style-type: none"> 進行性が見られないもの 	<ul style="list-style-type: none"> 継続的に監視を行う程度のもの 				

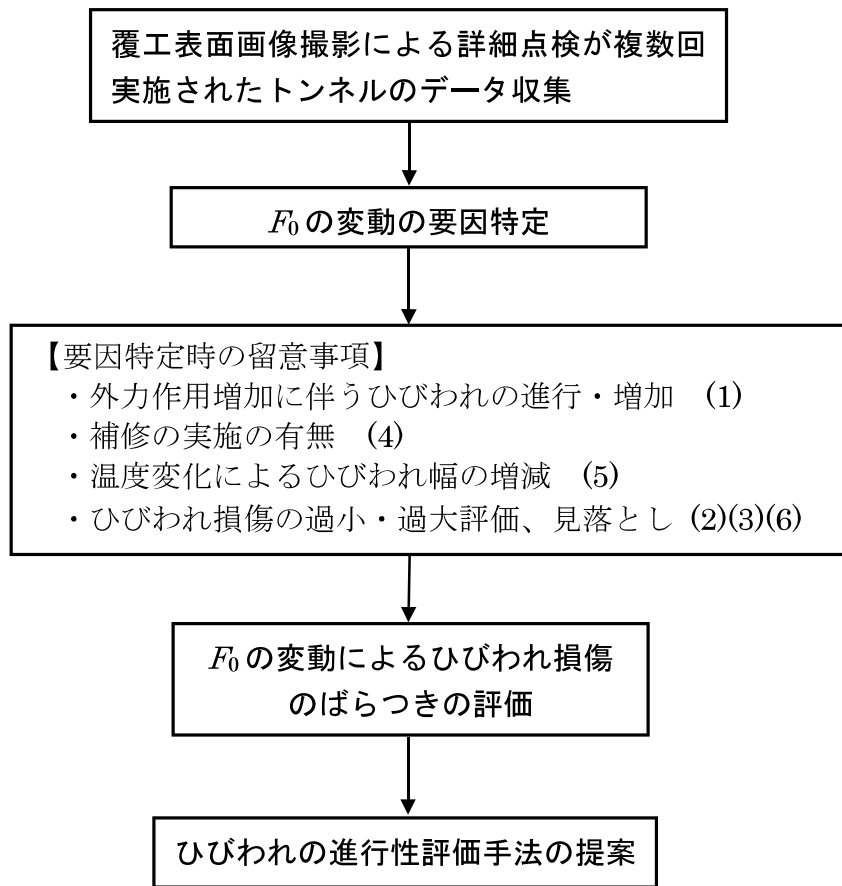


図-5.1 ひびわれ進行性評価の検討フロー

5.2.2 F_0 の変動要因

点検 B を実施した結果、 F_0 の値が前回点検時に比べ増減することがある。その主な要因についてまとめると下記のとおりと推察される。

(1) ひびわれ損傷の進行

ひびわれの延長および幅が大きくなり、覆工の損傷が進行することにより、 F_0 の値が変動する。

(2) ひびわれ損傷の過大評価

ひびわれの延長および幅の過大評価（例えば、幅 1mm を幅 2mm と判定）により、 F_0 の値が変動する。

(3) ひびわれ損傷の過小評価、見落とし

ひびわれの延長および幅の過小評価（例えば、幅 2mm を幅 1mm と判定）や、漏水、エフロッセンス等のひびわれの見落としがあり、 F_0 の値が変動する。

(4) ひびわれ損傷に対する補修の実施

ひびわれの補修実施箇所は、TCI 算出時にひびわれと評価しないため、 F_0 の値が変動する。

(5) 温度変化によるひびわれ幅の変動

温度変化により覆工コンクリートが膨張・収縮するため、点検時のコンクリート温度の違いにより、ひびわれ幅が変動し、 F_0 の値が変動する。

(6) 覆工画像精度・判読による誤差

点検 A は覆工画像撮影による机上点検であり、それに対し、点検 B は現地での点検であるため、撮影技術の進歩による画像からの読取り精度の相違によりひびわれ損傷評価に誤差が生じ、 F_0 の値が変動する。

表-5.2 に、これら F_0 の変動要因をまとめて示す。これらの項目のうち(2)および(3)、(5)、(6)は、 F_0 の変動における誤差として評価できると考えられる。この誤差によるばらつきの程度を評価できれば、ばらつきの範囲を超えたものは、(1)、(4)が要因として考えられるが、(4)は補修済個所であり、ひびわれの進行とみなさないため、変動要因として(1)が残り、時系列的な F_0 変動であるひびわれ損傷の進行性の評価ができる。

また、作用する外力については表-5.3 に示すように、一般的には偏圧や地すべり、水圧等が考えられる。しかし、TCI での評価はひびわれ自体については発生要因で区別して評価はせず、重み付けを行った点数で外力性を評価する特性から、乾燥収縮に代表される環境による変状も点数のなかには含まれている。しかし、乾燥収縮によるひびわれの増加については、トンネル建設 1~2 年後に供用を迎え、供用後 3~5 年で 1 回目の点検が行われことを考えると、点検時は建設から 5 年程度は経過していることが想定されるため、乾燥収縮による影響はほぼ無いと考えられる。

表-5.2 F_0 の変動の主な要因

F_0 の変動	要 因
増 加	(1) ひびわれ損傷の進行
	(2) ひびわれ損傷の過大評価
減 少	(3) ひびわれ損傷の過小評価・見落とし
	(4) ひびわれ損傷に対する補修の実施
増加または 減少	(5) 温度変化によるひびわれ幅の変動
	(6) 画像精度・画像判読による誤差 ((2), (3)の 要因である)

表-5.3 変状原因の区分²⁾

		自然的要因	人為的要因
外因	外力	地形 : 偏圧, 斜面クリープ, 地すべり 地質 : 塑性圧, 緩み圧, 地盤沈下, 地耐力不足 地下水 : 水圧, 凍上圧 その他 : 地震, 地殻変動	近接施工 [※]
	環境	経年 : 地山風化, 中性化, 材料劣化 地下水 : 漏水, 凍害 (冬期の低温) その他 : 塩害, 有害水	火災
内因	材料		覆工材料の不良
	施工	覆工コンクリート打込み時の気温, 湿度	所定の品質が確保されない施工
	設計		外因を考慮しない設計

※ 近接施工とは、既設トンネルに近接した構造物等の建設による影響

5.2.3 進行性の評価方針

複数回実施された、近接目視・打音を実施する点検 B の点検結果から表-5.2 の「(2)ひびわれ損傷の過大評価」、「(3)ひびわれ損傷の過小評価・見落とし」、「(5)温度変化によるひびわれ幅の変動」、「(6)画像精度・判読による誤差」による F_0 のばらつきを評価する。このばらつきによる影響を評価できれば、 F_0 の増加量が大きいスパンは、ひびわれ損傷が進行している可能性があると考えられることができる。

そこで、覆工表面画像撮影をもとに、点検 B を 2 回実施した、山岳トンネル工法 82 トンネル (7,500 スパン)、矢板工法 17 トンネル (2,183 スパン) の合計 99 トンネル (9,683 スパン) について、 F_0 の値を比較する。 F_0 の値の比較は、最新の点検 B における F_0 最新と前回の点検 B における F_0 前回の差を (F_0 最新 - F_0 前回) と算出し、その平均値、標準偏差を求め、ひびわれが進行している可能性があるスパンを抽出するための閾値を検討する。

閾値を検討するにあたり、工法ごとに ΔF_0 の平均値 u 、標準偏差 σ を算出し、 $u \pm \sigma$ に ΔF_0 が入る確率は約 69%、 $u \pm 2\sigma$ に入る確率は約 96%、 $u \pm 3\sigma$ に入る確率は約 99.7% であるが、本検証で用いる閾値は $u \pm \sigma$ とし、なおかつ、平均値以下のスパンは進行性とは直接関係ないと判断できるため $u + \sigma$ を閾値とした。その上で、各トンネルの各スパンにおいて、設定した閾値を上回るスパンは、変状が進行しているスパンと評価することが出来るものと仮定して、検討を行う。

比較にあたり、以下、5.2.4 で述べる各トンネルの点検間隔の差および 5.2.5 で述べる最小ひびわれ幅の差の基礎的な違いによる誤差および補修材背面のひびわれの取り扱いの有無による誤算については、 ΔF_0 算出前に補正を行う。

5.2.4 点検間隔の違いによる差の補正

99 トンネルの点検間隔の日数を算出し 30 日で除して月数とすると、平均が 59.3 ヶ月、最大間隔が 67.1 ヶ月、最小が 45.3 ヶ月となった。図-5.2 に 99 トンネルの点検間隔の頻度分布を示す。一般的に点検間隔が長いと損傷の進行具合が大きくなる³⁾ことが考えられること、また、今後のデータ収集・蓄積において点検間隔のバラつきを無くすことが重要となるため、今後は、点検間隔を平成 26 年の道路法の改訂により義務付けられた点検間隔の 5 年（60 ヶ月）を基準点検間隔とするために、以下の式(5.1)のように点検間隔で割り戻して 60 ヶ月相当の ΔF_0 を算出した。

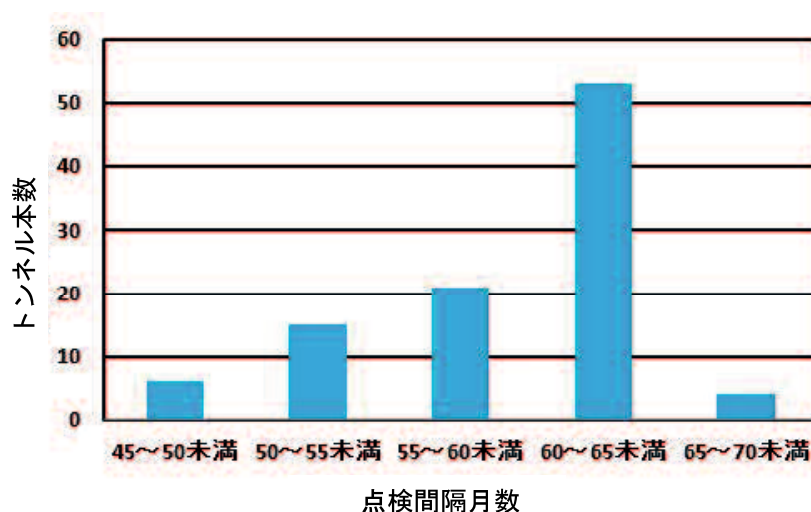


図-5.2 点検間隔の頻度分布

$$\Delta F_0 = (F_{0\text{最新}} - F_{0\text{前回}}) \times \frac{60}{\text{点検間隔 (month)}} \quad (5.1)$$

5.2.5 ΔF_0 算出における誤差の補正

今回収集した点検データから、A トンネル（L=564m、山岳トンネル工法）で算出した ΔF_0 の補正前・後の分布を図-5.3 に示す。この図に示すように、補正前の ΔF_0 が負の領域に分布する傾向が確認された。この原因として、以下のことが考えられる。

(1) ひびわれの抽出による誤差

2 回の点検結果（変状展開図）を比較すると、図-5.4 に示すように A トンネルではひびわれ幅の読取り最小幅が点検時の機器の仕様により 1 回目 1.0mm、2 回目 0.5mm と精度が向上していたため、2 回目の点検時の F_0 が小さくなり ΔF_0 が負の値になったことも考えられる。また、図-5.5 に ΔF_0 が大きく負になった No.1 スパンの展開図を示す。このスパンは

最新の点検時には、覆工コンクリート片のはく落防止シートで補修されており、補修シート背面のひびわれ読み取りの有無により、 ΔF_0 算出に差異が生じたことも考えられる。これは、補修シート背面に前回点検時のひびわれデータが書き込まれているため、この範囲のひびわれを前回点検時の TCI として算出している可能性がある。

そこで、補修されている No.1 スパンについて、補修シート背面のひびわれデータを前回点検時データから削除して TCI を算出し、削除前と ΔF_0 の比較を行った。削除前は、1 回目 $F_0 = 79.75$ 、2 回目 $F_0 = 2.29$ で、 $\Delta F_0 = -77.45$ であったが、補修シート背面のひびわれデータの削除後は、1 回目 $F_0 = 5.41$ 、2 回目 $F_0 = 2.29$ で、 $\Delta F_0 = -3.16$ となり、 ΔF_0 が -77.45 から -3.16 と大きく変化することが確認できた。これは、補修シート背面のひびわれが、 F_0 が負の領域になる要因となるため、補修シート等で補修が行われている場合は補修材背面のひびわれ読み取りの有無を考慮する必要があることがわかった。

これらから、以下の点を考慮して ΔF_0 を算出する。

- ・各点検時に読み取るひびわれの最小幅を統一する。
- ・補修材背面のひびわれは複数回とも読み取ることはしない。

(2) 温度変化によるひびわれ幅の変動誤差

点検 B 実施日の坑内温度の差異により、覆工に発生するひびわれの開口幅が変化し、 F_0 の値が変動することが考えられることから、温度変化によるひびわれ幅変動を考慮する必要がある。しかし、収集したデータには坑内温度に関するデータがないため（現在の点検シートには温度に関する項目がない）、本章では、温度変化によるひびわれ幅の変動の誤差は ΔF_0 の平均値 \pm 標準偏差の中に含まれることとして、上記(1)の要因を考慮し、ひびわれの抽出による誤差を確認する。

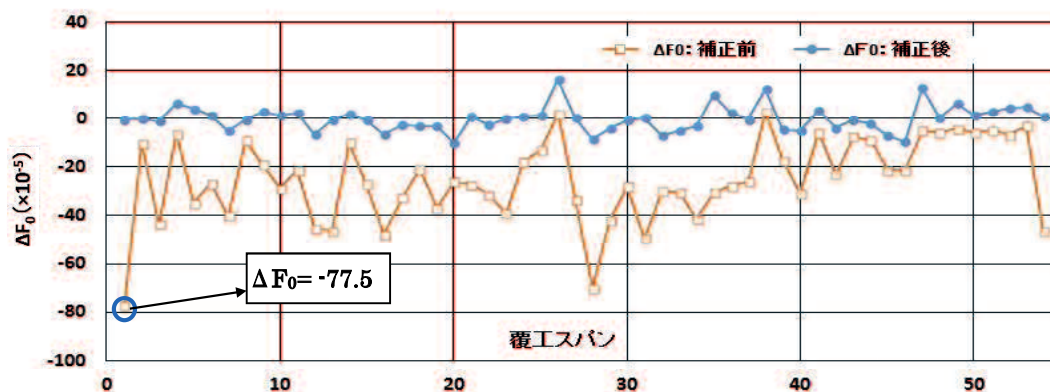


図-5.3 A トンネルの ΔF_0 分布 (修正前・後)

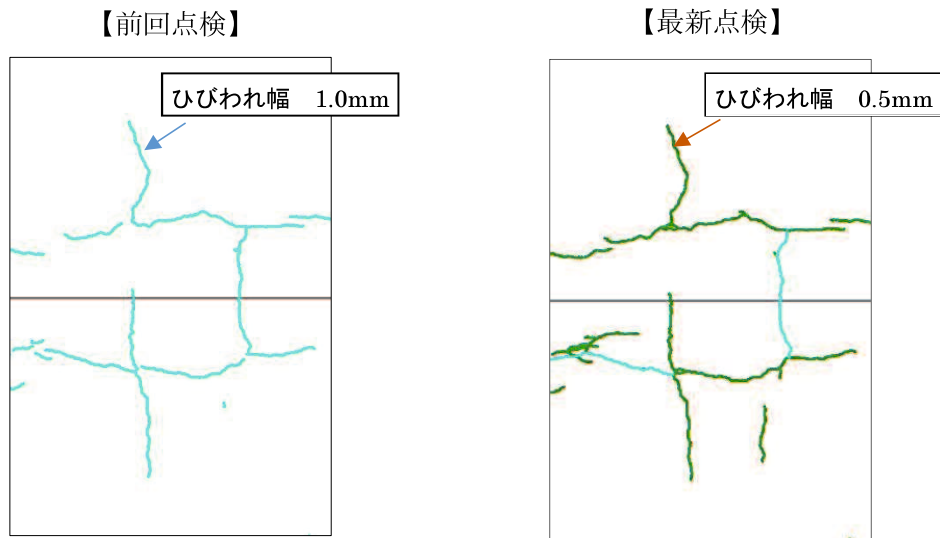


図-5.4 ひびわれ幅の読取り最小幅違いの例 (A トンネル No.4 スパン)

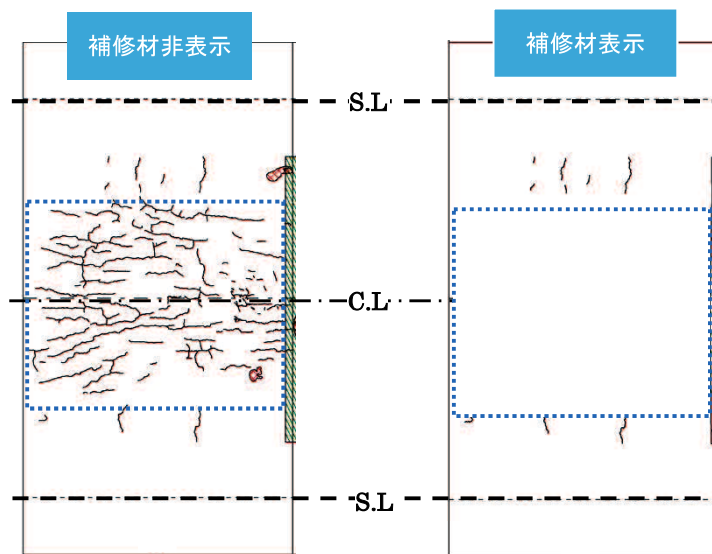


図-5.5 No.1 スパンの展開図 (補修材表示の有無)

5.2.6 ひびわれの抽出による誤差の補正

5.2.5(1)において各点検時に読み取るひびわれの最小幅を合わせる必要性が明らかとなったため、A トンネルでは、2回の点検Bにおけるひびわれ幅の判定最小幅を1mmに統一した。また、ひびわれの補修が行われているスパンがあるため、補修材背面のひびわれを読み取らずに F_0 の算出を行い、ひびわれ修正前と修正後の ΔF_0 の分布を比較し、その影響を確認した。

(1) ΔF_0 の分布

図-5.3 にひびわれの最小幅を合わせて、補修背面のひびわれは読み取らずに ΔF_0 を算出

した補正後の値と、補正前の値の比較を示す。補正後は補正前に比べ、 ΔF_0 がゼロ付近に分布し、大きな経時的なひびわれの進行が認められないことがわかる。

(2) 点検時の温度変化によるひびわれ幅の変動の検討

5.2.5(2)で述べたように、気温が高いほど、覆工コンクリートが膨張し、覆工に発生しているひびわれ幅が小さくなる。そのため、ひびわれ幅がパラメータである F_0 の値は小さくなる。したがって、2回実施した点検 B のひびわれ発生状況が同等のものである場合、2回目の点検日の気温が1回目に比べ高いほど、2回目の F_0 の方が1回目の F_0 に比べ値が小さいことになる。すなわち、2回目の点検時の気温が1回目より高い場合、 ΔF_0 は負となり、逆に2回目の気温が低い場合、 ΔF_0 は正となる。

たとえば、縦断方向ひびわれへの影響は、一般的なコンクリートの熱膨張係数 ($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) から計算すると、一般的な高速道路トンネルである一方向2車線断面での覆工コンクリートの断面方向延長は約 20.0m であるため、 20°C の温度変化を想定すると、ひびわれ幅の変化量は 4mm 程度と計算できるが、実際は、背面地山により拘束を受けるため変化量はそれより小さくなる。

トンネル内の気温のデータとしては、馬場ら⁴⁾によると、建設中のトンネルであるが、貫通したトンネル延長 297m (大久保トンネル) と 793m (有明トンネル) の2本のトンネル内の約3年間の温度データとして図-5.6、図-5.7 が示されており、夏季と冬季で坑口部と坑内で約 20°C の気温差が観測されている。

また、永井⁵⁾によると、供用中のトンネル延長 833m (美郷トンネル) でトンネル坑内の覆工表面の温度を秋期と冬期で計測しているが、冬期になるほど覆工表面温度は低い結果になったとされており、やはり、延長が長いトンネルは坑口付近が影響を受けると考えられるが、トンネル延長が 1,000m 程度では全体で外気温の影響を受けることが推測される。

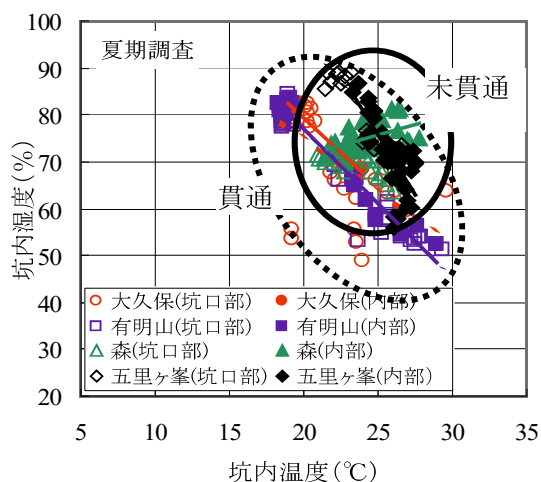


図-5.6 坑内温度と坑内湿度の関係
(調査 I 夏季)⁴⁾

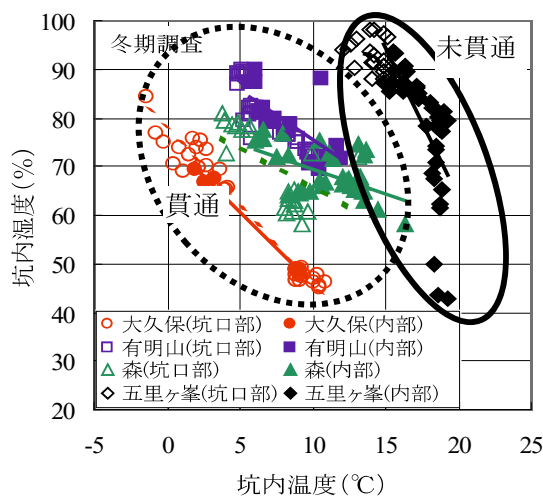


図-5.7 坑内温度と坑内湿度の関係
(調査 I 冬季)⁴⁾

そこで、今回収集したデータから、トンネル延長が短く外気温の影響を受けやすい状況下で、坑外気温の変化が大きいトンネルを抽出した。Bトンネルは、山岳トンネル工法で施工された延長420mと短いトンネルである。トンネル近接個所の気象庁の観測データ（観測地点：山口県下松）から坑外の気温が前回点検時は25.5℃、最新点検時が5.8℃と温度変化が19.7℃と大きいことがわかっている。図-5.8にトンネルの点検結果を示す。

その結果、 ΔF_0 が $u + \sigma$ を超えるスパンが42スパン中7スパンあり、7スパン全てにおいて、ひびわれの進行が見られた結果となった。しかし、図中に示すNo.7, 11の2スパンについては、ひびわれの増加とともに、ひびわれ幅が1mmから2mmになっており、温度変化によるコンクリート収縮の影響の可能性が考えられる。しかし、そのほかのひびわれが進行していると想定されるスパンでは、新規のひびわれの発生やひびわれ延長の増加によるものであり、ひびわれ幅が増加するような状況が確認できないことから、このひびわれ幅の差は覆工変状の進行が原因であると考えられる。また、気温差による長さ変化が、熱膨張係数から算出したよりも影響が少ないのは、算出が一方向の単純化した計算であり、現地における縦横断の長さ変化の影響、覆工背面の拘束状況などが考慮されていないことが要因と考えられる。

これらの検討から、気温差による影響が $u + \sigma$ に入ることから、 $u + \sigma$ 内に温度による変化は含むことができる可能性があると考えられる。

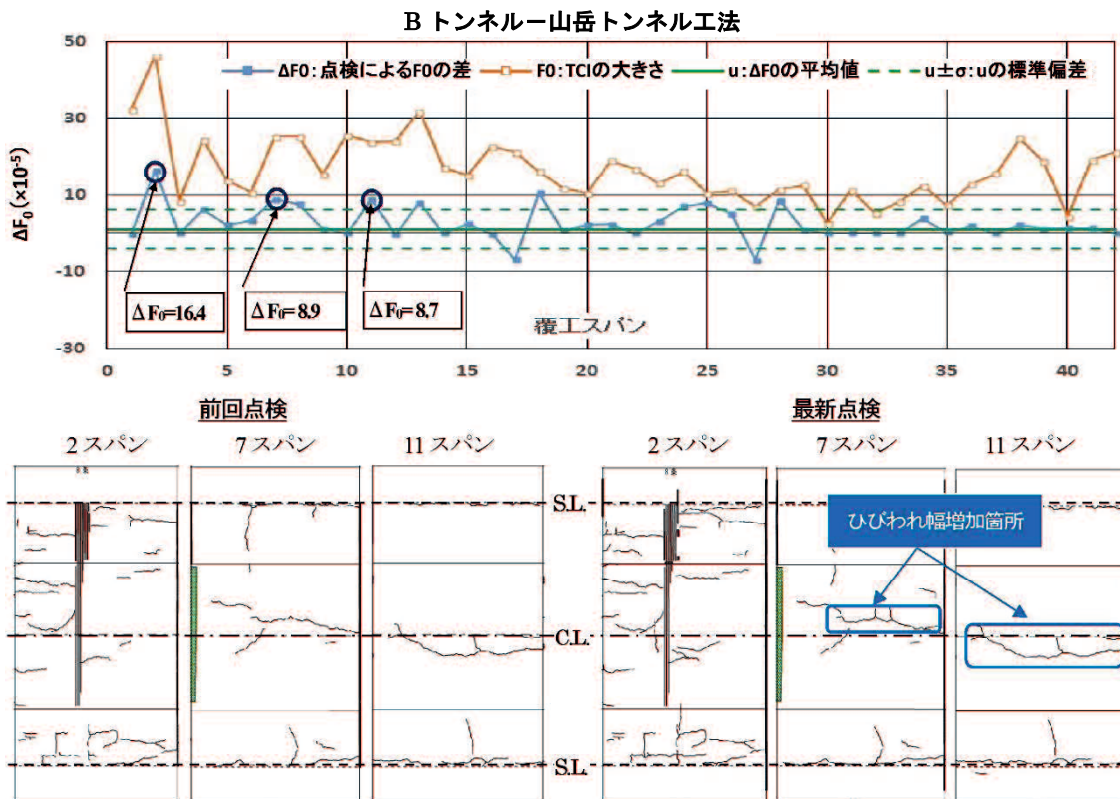


図-5.8 A トンネルの ΔF_0 分布（修正前・後）

5.3 点検データの検証

今回分析対象の 99 トンネルにおいて、5.2.4, 5.2.5 で検討した誤差の補正の有無により、 ΔF_0 を算出した結果を表-5.4 に示す。補正後の ΔF_0 が $u + \sigma$ を上回ったスパンが存在するトンネル数およびスパン数は、山岳トンネル工法で 74 トンネル(全トンネル数の 90.2%)、730 スパン(全スパン数の 9.7%)、矢板工法トンネルで 12 トンネル(全トンネル数の 70.6%)、245 スパン(全スパン数の 11.2%) の計 86 トンネル(全トンネル数の 86.9%)、975 スパン(全スパン数の 10.1%) であった。これら $u + \sigma$ を上回ったスパンを抽出し、前回と最新点検 2 回分のひびわれ展開図を確認した。

その結果、抽出された山岳トンネル工法 730 スパン、矢板工法 245 スパンの全てのスパンにおいて、新たに細かなひびわれが発生している、ひびわれの長さおよび幅が進行している、あるいは亀甲状ひびわれ、三日月状のひびわれが発生しているなど、明らかに変状が進行していることを示す状況が確認できた。

事例として、 ΔF_0 算出における誤差の検討を行った、A トンネルの ΔF_0 が $u + \sigma$ より大きい代表的な 3 スパンについて、前回と最新点検時のひびわれ展開図を図-5.9 に示す。No.26, 38, 47 の 3 スパンとも S.L. 付近にひびわれの進行が認められる。

また、そのほかの事例として、C トンネル (L=152m, 山岳トンネル工法)、D トンネル (L=1,019m, 矢板工法)、E トンネル (L=3,277m, 矢板工法) のひびわれ進行状況を、それぞれ図-5.10, 図-5.11, 図-5.12 に示す。

図-5.10 の C トンネルは、No.1, 2, 15 の 3 スパンとも細かい縦断ひびわれが断面位置を問わず進行・増加している。

図-5.11 の D トンネルは、No.44 スパンはひびわれの進行とともに、ひびわれ幅が増加し

表-5.4 各工法における ΔF_0 ($\times 10^{-5}$) の平均値と標準偏差

項目	山岳トンネル工法	矢板工法
トンネル数	82	17
スパン数	7,500	2,183
平均値 u	1.0(-3.2)	1.4(-6.5)
標準偏差 σ	5.1(4.0)	9.0(9.6)
$u \pm \sigma$	-4.1 ~ 6.1 (-7.2 ~ 0.8)	-7.6 ~ 10.4 (-16.1 ~ 3.1)
$u + \sigma$ 上回ったスパン数	730(887)	245(294)
$u + \sigma$ 上回ったスパンが存在するトンネル本数	74(65)	12(13)

(): 各種誤差補正前の値

ている。No.84 スパンは、トンネル断面肩付近の縦断ひびわれが進行・増加しており、No.94 スパンは細かい縦断ひびわれが増加している。

図-5.12 の E トンネルは、No.43, 152 スパンはトンネル横断方向のひびわれが増加しており、No.44 スパンは縦断ひびわれが増加し、亀甲状のひびわれにひびわれ形態の進行がみられる。

このように 5.2.4, 5.2.5 で検討した誤差を補正して設定した $u + \sigma$ を上回ったスパンは、明らかなひびわれの長さ・幅の増加や新規のひびわれ発生が確認することができた。

また、どの程度のひびわれの進行性が把握できるか確認したところ、今回の検証で $u + \sigma$ を上回った 976 スパン (99 トンネル) の約 0.1% にあたる 10 スパン (6 トンネル) については、微細なひびわれや損傷の増加をとらえられており、高い精度で進行性を評価できている。事例として F トンネル (L=1,097 m, 山岳トンネル工法) のひびわれ進行状況を図-5.13 に示す。図-5.13 の F トンネルは、No.10, No.104 の 2 スパンにおいて、微細なひびわれが増加している。

したがって、今回の検証で閾値と仮定した $u + \sigma$ を上回ったスパン全てにおいて、微細な損傷も含めて進行性が確認されたことから、 $u + \sigma$ を内には表-5.2 に示す、(2) ひびわれ損傷の過大評価、(3) ひびわれ損傷の過小評価・見落とし、(5) 温度変化によるひびわれ幅の変動、(6) 画像精度・画像判読による誤差 ((2), (3)の要因である) の 4 項目の誤差要因が含まれており、 $u + \sigma$ を閾値と想定することは妥当と考えられる。

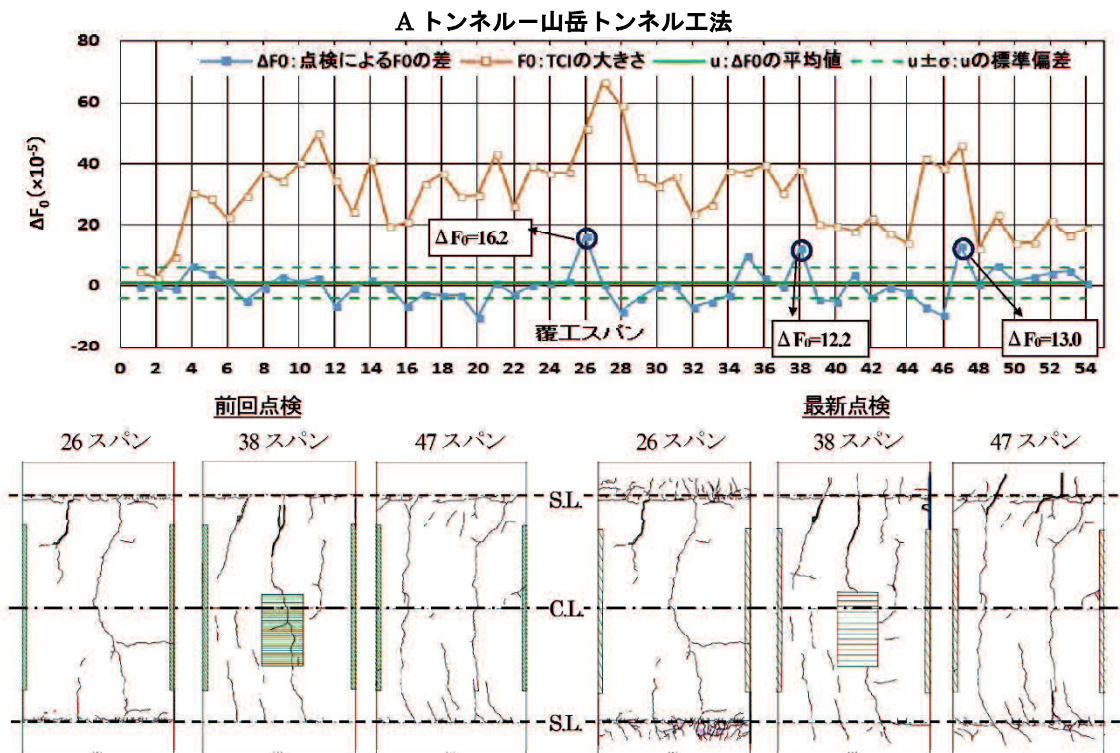


図-5.9 A トンネルのひびわれ進行状況

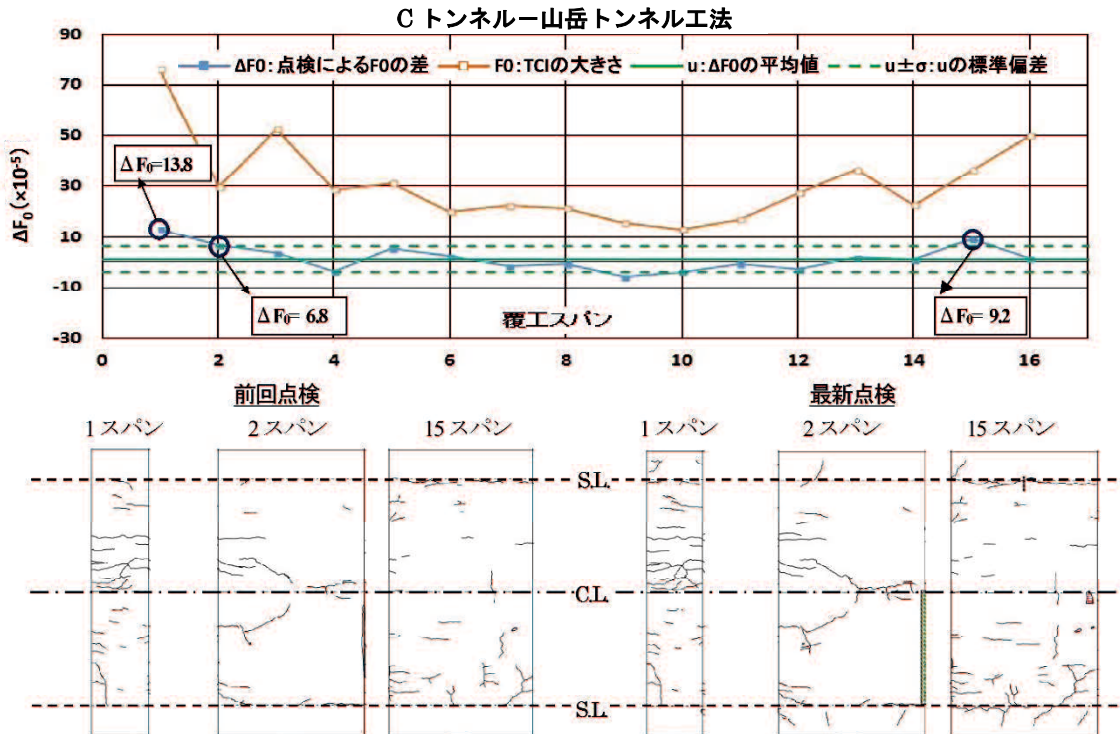


図-5.10 C トンネルのひびわれ進行状況

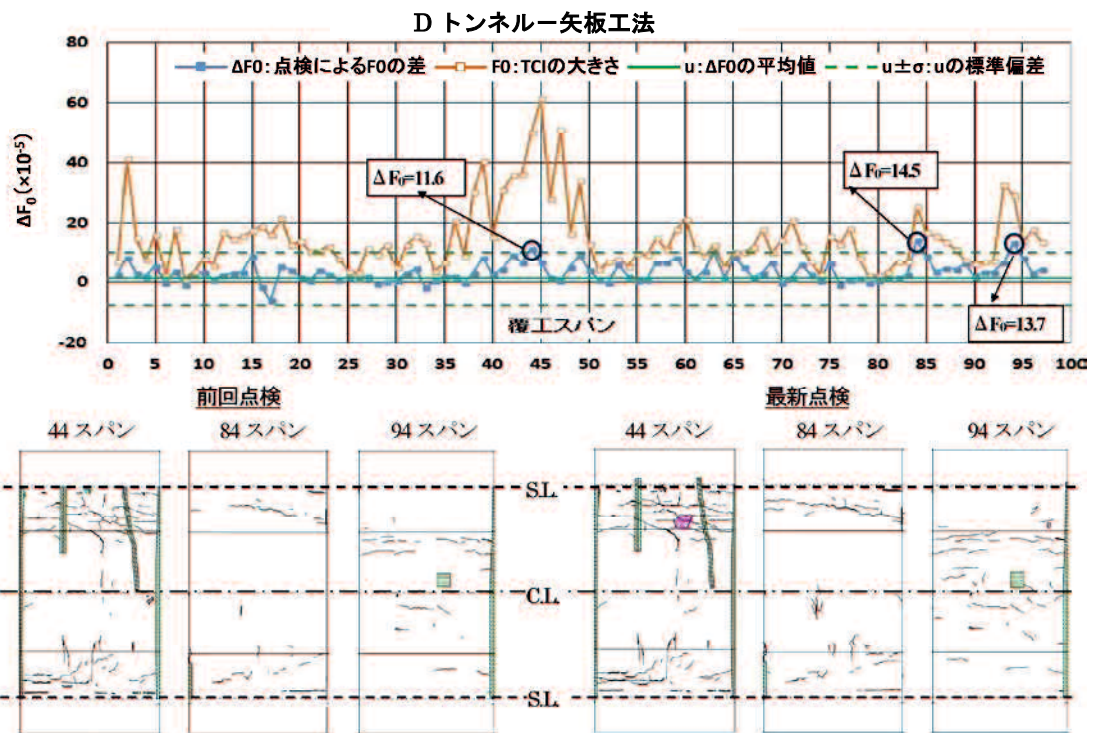


図-5.11 D トンネルのひびわれ進行状況

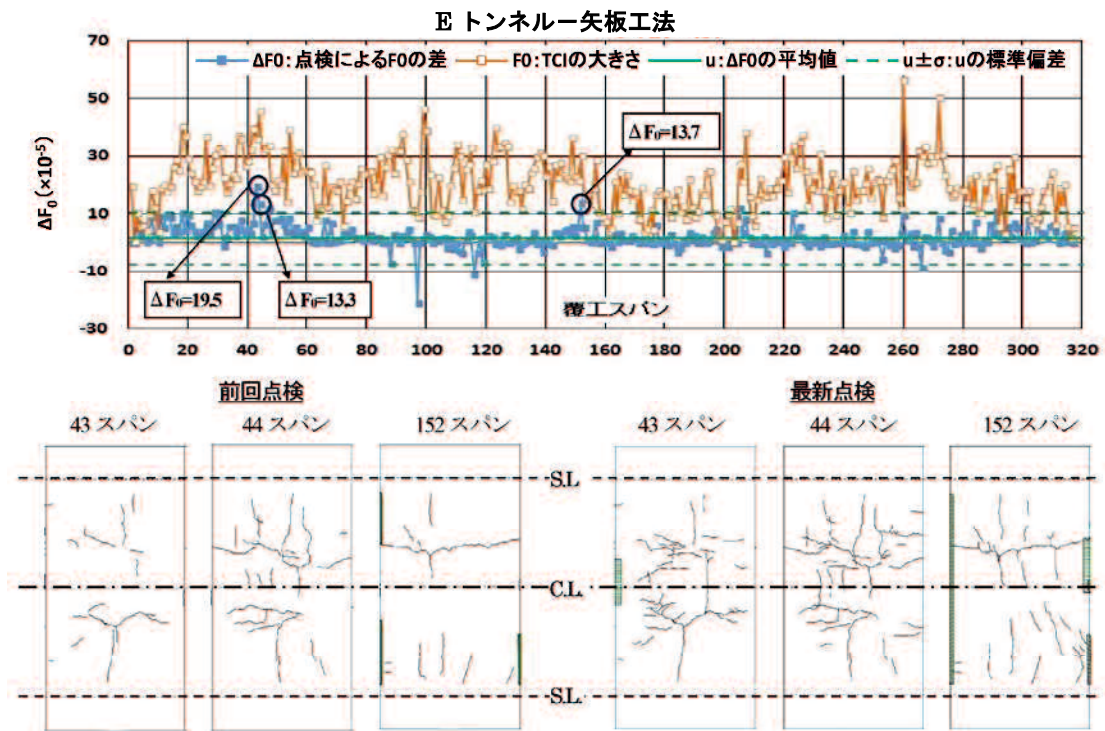


図-5.12 E トンネルのひびわれ進行状況

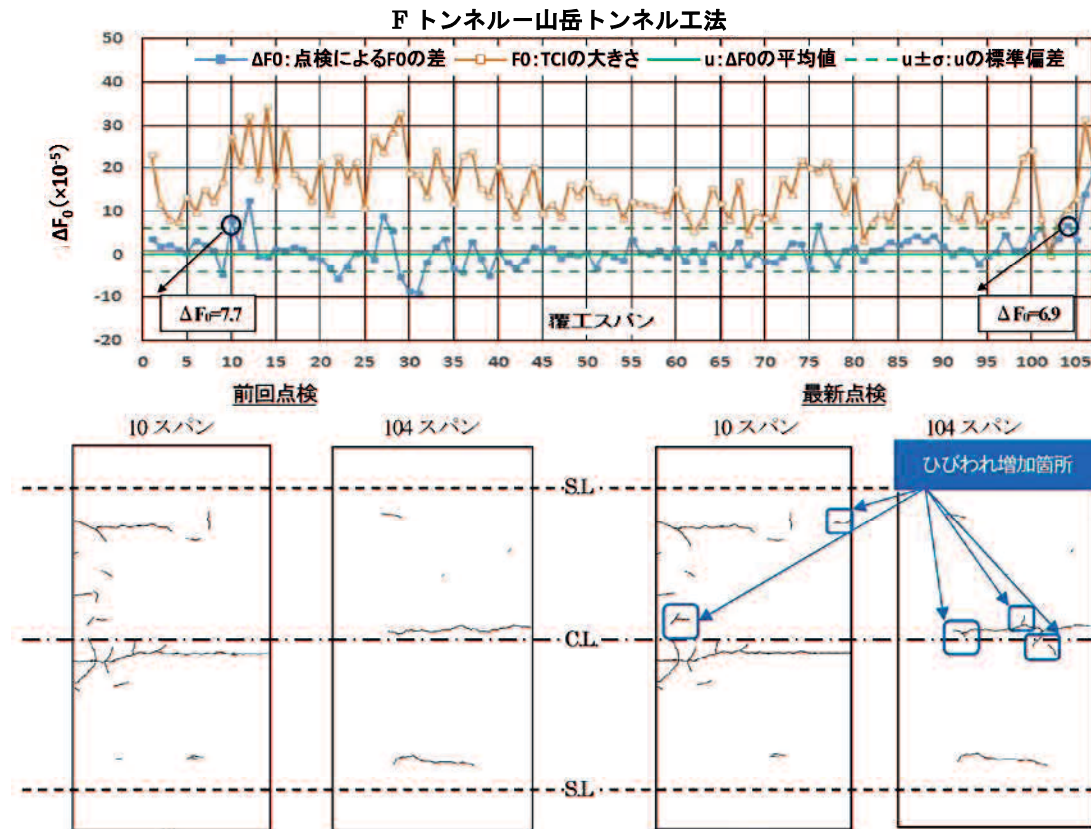


図-5.13 F トンネルのひびわれ進行状況

5.4 まとめ

トンネルの健全度評価において変状を評価するうえで重要となる変状の進行性に関しては、現状、定量的な評価手法になっていないことから、高速道路トンネルの点検データを用いて定量化の検討を行った。変状の進行はひびわれの進行と強く関係していることから、NEXCO が実施しているトンネル覆工の点検評価において、定量的な評価手法として取入られている TCI のうちの F_0 を用いて進行性の評価指標として検証した。

検証は、点検 B を複数回実施した NEXCO の管理する中国地方の 99 トンネル（山岳トンネル工法 82 トンネル、矢板工法 17 トンネル）のそれぞれについて、TCI のひびわれ量 F_0 の増減値 ΔF_0 を進行性のパラメータとし、 ΔF_0 の平均値 u 、標準偏差 σ を算出した。

一般的に $u \pm \sigma$ の範囲内に含まれるデータは全データの約 69% である。 ΔF_0 の算出時にひびわれ損傷に対する補修実施の補正を行えば、 $u \pm \sigma$ の範囲は検証の結果、ひびわれ損傷の過大評価、ひびわれ損傷の過小評価・見落とし、温度変化によるひびわれ幅の変動、画像精度・画像判読による誤差の誤差要因を含んだ標準的な変状であった。よって、ひびわれの進行性の閾値として $\Delta F_0 > u + \sigma$ が妥当であると考えられた。

【参考文献】

- 1) 東日本・中日本・西日本高速道路㈱：保全点検要領 構造物編, p.158, 2015.
- 2) 公益社団法人 土木学会：トンネルライブラリー12 山岳トンネル覆工の現状と対策, pp.64, 2002.
- 3) 笹田俊之, 砂金伸治, 石村利明：点検結果にもとづく道路トンネルの変状進行に関する一考察, 土木学会トンネル工学報告書, 第26巻, I-18, 2016.
- 4) 馬場弘二：トンネル覆工コンクリートの品質・機能の向上に関する基礎的研究, 山口大学大学院 理工学研究科, p.66, 2004.
- 5) 永井泉治：山岳トンネルの熱エネルギーを利用したパイプヒーティングシステムの設計に関する研究, 山口大学大学院 理工学研究科, p.80, 2002.

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

トンネルを健全かつ安全に管理するためには、維持管理の基礎となる点検を高精度で効率的に実施することは必要不可欠である。

本論文は、現状の高速道路トンネルの点検において抽出された課題を解決することにより、高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価の精度向上を目的に取り組んだ研究成果を取りまとめたものである。

第1章では、わが国の道路トンネルは老朽化が早いペースで進んでおり、その維持管理が問題となっていることを示した。特に、日本国内の交通物流の重要な位置を占める高速道路トンネルは、資産数量が多く、トンネル1本当たりの延長が長いことから、防災施設の設置状況や車線規制の問題等により設計速度が速いこと併せてトンネルの維持管理がより難しいものとなっている。また、これら膨大な高速道路トンネル資産の維持管理計画の立案にあたっての基礎となる点検については、現状の高速道路トンネル点検システムの課題を抽出して、その課題である点検技術の向上、健全度ランク・評価点の閾値等の妥当性および変状進行性評価の定量化に関して解決する必要性とその研究の目的が明らかになった。

第2章では、トンネル点検技術について国内外の既往の研究および各組織の実施状況をまとめ、国内、海外ともにトンネル覆工の点検手法は、過去においてトンネルの点検の必要性が認められ、点検が開始されてから目視（遠望・近接目視）および打音点検が基本であり、今現在においてもそれについては変わっていないことを示した。また、国内では道路法の改正により定期点検の実施が明確に制度化され、点検業務の増大に対応して、点検の効率化等を目指した機械化技術の開発が盛んに進められているが、現在のところ従来の点検に変わる方法として全面的な適用には至っていない。そのような中、既往の研究の結果、機械化を進めた点検システムおよび定量的な健全度評価手法を積極的に取り入れている NEXCO においても、一部の適用にとどまっている。そのため、高速道路トンネルの点検システムの課題解決のために走行型覆工表面画像撮影技術の適用による点検技術の精度向上および点検データを分析しての、健全度評価の精度向上の必要性が判明した。

第3章では、技術者による近接目視点検の代替として走行型の覆工画像撮影技術の適用による点検技術向上の可能性についてまとめた。検証は供用中のトンネルを利用し、現場での点検精度の試行試験による検証を行った。検証にあたっては、点検時間をかけて作成した詳細展開図を正解のひびわれ展開図とし、人が行う通常の近接目視点検で作成した通常展開図と、走行型画像撮影車による覆工画像から作成した画像展開図のそれぞれの変状抽出の精度について検証を行った。その結果、画像展開図は通常展開図と比較してほぼ同等の精度があることが確認され、これにより点検の回数および特記事項の有無、画像で確認できる変化、目地部という特定箇所など、点検範囲の限定化を実施できることがわかった。具体的には1回目の詳細点検は全面的な近接目視および打音点検を実施し、2回目以降については、

健全度や特記事項の有無に応じて近接目視や打音点検を行う箇所を限定することで、現場での点検時間を削減しつつ、従来と同等以上精度で健全性の診断ができ、トンネル点検技術の高精度化および効率化ができることを示した。

第4章では、NEXCOが導入しているトンネル健全性の定量的評価について、NEXCOが管理する85,000スパンを超えるトンネル覆工点検データを分析し、覆工画像撮影により健全性を診断している点検Aと現地における実施点検である点検Bの比較分析、健全性評価の基本となる外力評価点およびはく落評価点と健全度ランクの関連性分析、外力およびはく落評価点の閾値の検証を行いその妥当性についてまとめた。まず、点検データ分析については点検Aによる閾値より抽出されたスパン数よりも、実際に点検Bを行ったスパン数が多く、閾値以外に特記事項等により判断しているスパンが多くあることから、閾値の適正化とともに、特記事項の照査・整理により、よりの確な点検Bの実施が可能になると考えられた。外力評価点は、山岳トンネル工法の方が、はく落評価点は矢板工法の方が、点検Aと点検Bの評価点にばらつきがあったが、これはトンネル工法によるひびわれ特性の違いによるものと考えられた。健全度ランクは、矢板工法は健全度が山岳トンネル工法より低い傾向があり、覆工も荷重を受け持つという一般的な矢板工法の特徴と、山岳トンネル工法に比較して施工から時間がたっているための、経年劣化等による変状進行が要因となっていると考えられた。閾値に関しては外力評価点とはく落評価点の閾値により、健全度ランク付けはBシートに着目すると外力評価点で93%以上、はく落評価点で95%以上カバーできていた。また、閾値による現場での点検Bの実施の判断については99%以上カバーできることから、閾値は妥当と判断できた。これらのことから、外力評価点、はく落評価点による点数をもとに行う健全度のランク付け、閾値を用いて重点点検箇所を抽出する点検手法は問題がないことが検証できた。

第5章では、現状の覆工の健全度評価では、ひびわれの進行性に関する定量的な評価指標はないが、外力性の変状を評価するうえで重要な指標であり、近接目視・打音点検の高精度化・効率化には、定量的な評価手法が必要であることから、ひびわれの進行性について覆工の健全度算出に活用している、覆工ひびわれ指数を用いた定量的評価の検討をまとめた。ひびわれ進行性の評価は、TCIのひびわれ量 F_0 の増減値 ΔF_0 を進行性のパラメータとし、 ΔF_0 の閾値を設定して進行性の有無を評価する手法を提案した。検討は点検Bを複数回実施した99トンネルを対象とし、山岳トンネル工法、矢板工法、それぞれについて、 ΔF_0 の平均値 u 、標準偏差 σ を算出した。一般的に $u \pm \sigma$ の範囲内に含まれるデータは全データの約69%であり、この範囲は誤差を含んだ標準的な変状であるとし、 ΔF_0 の閾値とした。したがって、 ΔF_0 が閾値 $u + \sigma$ より大きいスパンは、進行性があると判断でき、点検データの確認からも、外力変状の可能性の有無の指標とする事が出来る可能性があることを示した。

本研究の成果は、トンネル管理において従前行われていた、近接目視・打音点検による点検および定性的評価による健全度判定において、走行型覆工表面画像撮影技術を全面的に用いて、TCIによる定量的評価による健全度判定により、従前と比較して高精度で効率性を

向上させた点検手法を開発したことである。すなわち、従前の点検員による判断の相違や点検記録の不正確さの問題点を解消し、現地での点検作業の大幅な効率化を行う技術を取り入れることに対しての、適用性を確認したことである。

6.2 トンネル覆工表面画像撮影技術およびトンネル健全度の定量評価の適用と今後の課題

本研究で検証・開発したトンネル覆工表面画像技術およびトンネル健全度の定量的評価手法の適用については、現地状況を考慮しながら順次導入適用できる。トンネル覆工表面画像技術を近接目視点検の代替として導入した場合のトンネル点検の流れを図-6.1に示す。

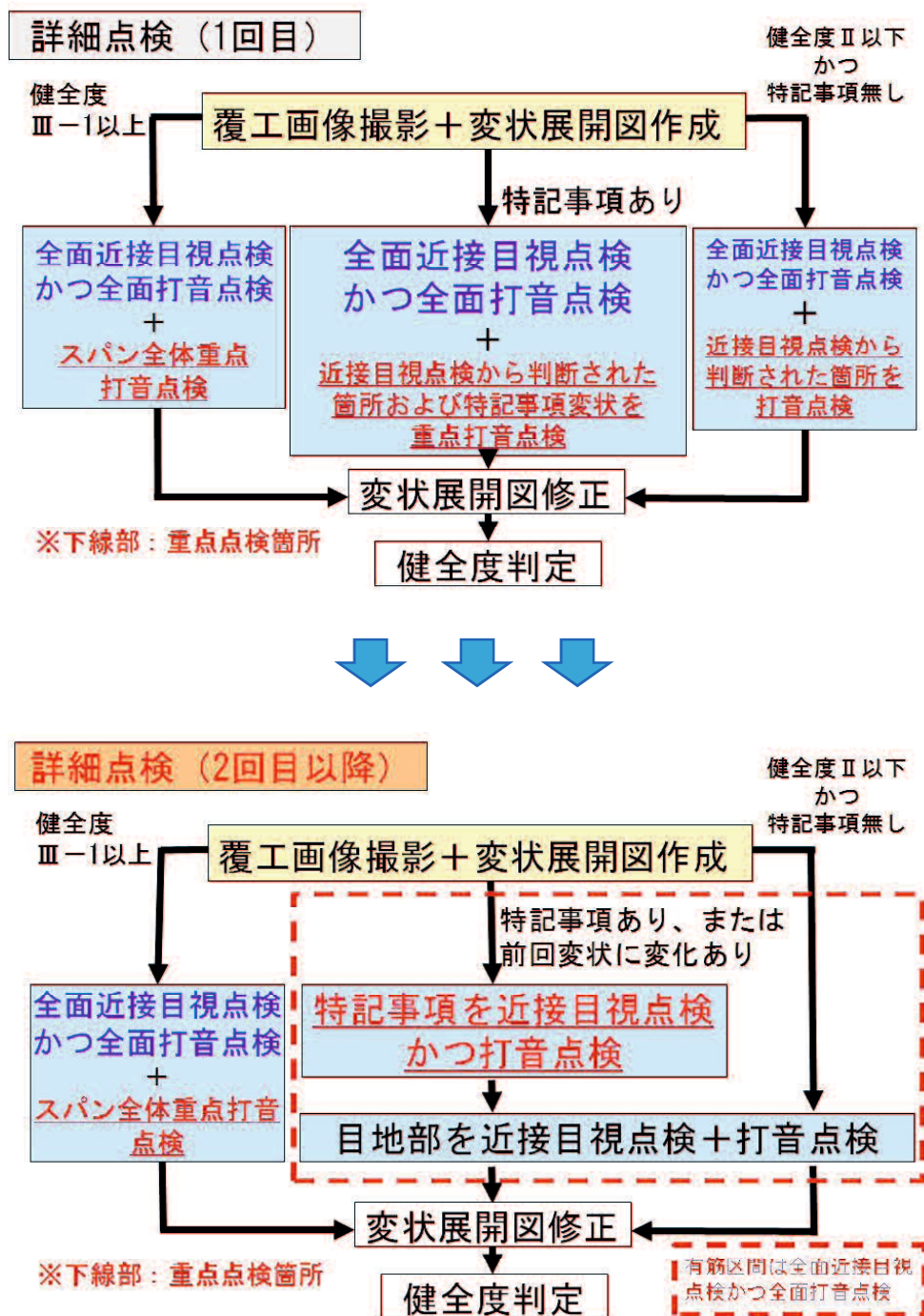


図-6.1 研究成果を導入した場合のトンネル点検の流れ

図-6.1 に示す点検の流れを導入した場合、費用および現地規制状況の面で考えると、これら点検手法は従前（点検 B のみ実施）の点検手法である全スパン近接目視・打音点検と比較して、中日本高速道路会社のトンネル資産数量の約 34,000 スパンを対象にした場合、現地での近接目視・打音点検の実施率を調査した支社の実績より 46%と設定すると、覆工表面画像処理等も含めた点検日数で約 20%（現場作業のみの日数では約 54%）、点検費用で約 6%（約 73 百万円）の削減が見込まれる。また、現状の画像撮影による点検 A の実施のうへ、全スパン近接目視・打音点検を行っているものをベースとすると、点検費用は約 36%（約 672 百万円）の削減が見込まれ、これを高速道路三社に単純に当てはめると、現場作業日数がのべ約 14,000 日/5 年（2,800 日/年）、点検費用が約 20 億円/5 年（4 億円/年）の削減が見込まれる。現地での点検は一般的に点検員 3 人+高所作業車運転手 1 名の 4 名体制で行われることから、現地点検作業では年間約 3,700 人工の削減が見込まれる。

これは、車線規制実施による事故等の発生リスクの観点から、規制の伴う点検日数の削減は大きな効果と考えられる。また、点検費用の削減分を補修・補強工事に充てることができ、高速道路トンネルの安全に大きく寄与すると考えられる。

また、トンネル覆工表面画像技術を近接目視点検の代替えとして導入し、点検回数による点検内容の変更による効率化する本点検手法は、トンネル健全度評価部分については、対象とするトンネルの利用状況等に応じてそれぞれ設定することにより、高速道路トンネル以外においても、適用可能であると考えられる。

トンネル点検のより一層の高精度および効率化を目指すにあたって、各検証の今後の課題を以下に示す。

6.2.1 トンネル覆工表面画像撮影技術による点検技術の精度向上の可能性に関する検証

- (1) 高速道路トンネルでは、1999（平成 11）年ごろから覆工のはく落対策として地山状況により覆工コンクリートに繊維を混入した、繊維補強覆工コンクリートを採用している。点検結果をみると繊維補強することによりひびわれの発生は少ない傾向であるが、発生したひびわれ部付近のコンクリートのはく落の評価について、繊維補強なしの部分と比較してはく落リスクが異なると考えられる。そのため、繊維混入の有無によるひびわれ部の評価についての検証および異なる場合はその評価手法についての研究開発する必要がある。
- (2) トンネル延長の 1 割未満であるが坑口部分や地山の不良箇所を中心に覆工コンクリートが鉄筋補強されている。この部分については鉄筋腐食による損傷の発生の可能性があることから、第 5 章の検討対象からは外し、詳細点検の実施回数によらず、全面的近接目視および打音点検を行っている。しかし、トンネル覆工の鉄筋補強は橋梁の床版とは異なり一般的に鉄筋かぶりが 100mm 程度と、大きく取られている。そのため、鉄筋かぶりが確保されていれば、鉄筋腐食の恐れが少ないことから無筋区間と同様に点検を限定化できると考えられる。このことから、鉄筋かぶりと損傷の関係の検証お

よび鉄筋被りを簡易に広範囲で測定できる機器の開発が必要である。

- (3) トンネルの浮き・はく落箇所約 50%を占める目地部については、安全性を考慮して、詳細点検の実施回数によらず、近接目視および打音点検の実施を行うこととしている。しかし、現地の点検員から、一度叩き落しを行えば、損傷の進行が見られない限りは、毎回の近接目視および打音点検の実施は必ずしも必要ではないとの意見が出ている。約 10m 程度の間隔で存在する目地部分の点検を限定化できれば、効率化に大きく貢献できることから、画像撮影により損傷の進行の把握が高い精度で把握できるなどの検証を行う必要がある。
- (4) 現在、高速道路ではリニューアル工事としてトンネルの補修・補強工を進めており、供用トンネルの老朽化とも相まって、今後、補修・補強箇所が大幅に増加すると考えられる。しかし、補修・補強に用いられる炭素繊維シートに代表される内面補強工、高強度・高じん性の埋設型枠に無収縮の高強度モルタルを充填して覆工と一体化させる工法に代表される内巻工については施工後の点検および点検結果の評価手法が確立されていない。今後、施工される補修・補強工自体の劣化等の問題が表面化することが想定されることから、その点検および点検結果の評価手法を確立する必要がある。

6.2.2 既設トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証

- (1) 山岳トンネル工法は、天端中央付近に 1 本の縦断方向ひびわれ、矢板工法（上半先進）は、天端付近に 2 本の縦断方向ひびわれに加えて数本の横断ひびわれ、矢板工法（側壁導坑）は、左アーチ肩部に 2 本の縦断方向ひびわれが、施工に起因するひびわれの発生形態¹⁾²⁾であることが提起されている。また、TCI で算出される F_{11} と F_{22} による変状原因の推定手法³⁾についても検討されていることから、これらを分類し、ひびわれパターンを把握し、特記事項に反映させることにより、点検 B の実施精度をより向上させ必要がある。
- (2) 変状の進行性をより考慮した健全度ランク「III-2」、 「IV」のスパンは、外力評価点の閾値 60 点未満のスパンがある。これは、スパンに最大幅の大きなひびわれがあっても、TCI で算出される評価点はひびわれ幅、長さ、密度、分布が平準化されるため、変状の進行性を考慮した評価方法の検討を行う必要がある。
- (3) はく落評価点の課題として、はく落評価点の分布状況から、点検 A の画像点検時において、ひびわれパターン項目の「閉合型」を認識できていない、あるいは、「閉合型」を過度に判定している事例があることがわかった。これら閉合型は、複数のひびわれが近接して存在していることから、画像精度および人によるひびわれ抽出時の誤認等により、認識しきれないと推測される。これは、ひびわれを認識できなかった原因の特定および分析を行う必要があるほか、現在、覆工表面画像撮影技術の進歩により、ひびわれ幅の認識能力が向上してきており、実際、ひびわれ幅の検出能力が高い機器が高速道路トンネルの点検 A にも使用されてきていることも踏まえ、画像の解像度の仕様としているひ

びわれ幅 0.5mm 程度の認識能力を 0.2mm ないしは 0.3mm 程度に上げることが考えられる。

6.2.3 トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証

- (1) 本検討で対象としたのは、覆工表面画像撮影を用いた点検が他地域に比較して進んでいる中国地方の 99 トンネルである。分析数が少なく、工法別データ数にも偏りがある。そのため、今後、覆工表面画像撮影を用いた点検が進むことから、他地域のトンネルも対象とし、工法別で偏りなくデータを収集、分析して閾値を再度検討する必要がある。
また、ひびわれの進行の要因には、外力のほかに乾燥収縮ひびわれやアルカリシリカ反応のような材料劣化によるものがあり、対応法も異なることから、その評価について検討する必要がある。
- (2) 図-1.12, 図-1.13 の点検シートについては、進行性に関する評価項目がないことから、特記事項に「 ΔF_0 が閾値以上」という項目の追加を検討し、点検 A シートで、 ΔF_0 が閾値以上であれば、そのスパンは重点点検スパンとして点検 B を実施する点検フローを検討する必要がある。
- (3) 温度変化によるひびわれ幅の変動は、その分析に点検時の坑内温度データが必要となる。しかし、現時点で、坑内温度データは取得データとなっていないため、現地で点検時に取得するように変更を検討する必要がある。
- (4) トンネル内装工の設置の関係で、基本的には TCI は天端から S.L.までを算出範囲と設定されているが、側壁部のひびわれは、変状原因分析において重要であると考えられることから、今後、TCI の算出範囲の見直しを検討する必要がある。

6.3 目標とする点検技術および健全度評価

6.2.1～6.2.3 に示す今後の課題を解決しつつ、今後、目標とする点検の流れを図-6.2、健全性評価を表-6.1 に示す。

図-6.2 は点検回数による点検内容の変更は行わず、機械化によるスクリーニングを初回点検時から導入するイメージであり、表-6.1 の健全性評価は、変状の進行性を数値化し、覆工表面画像撮影の変化の有無と外力評価点との組み合わせで、定量的評価を進めるイメージである。

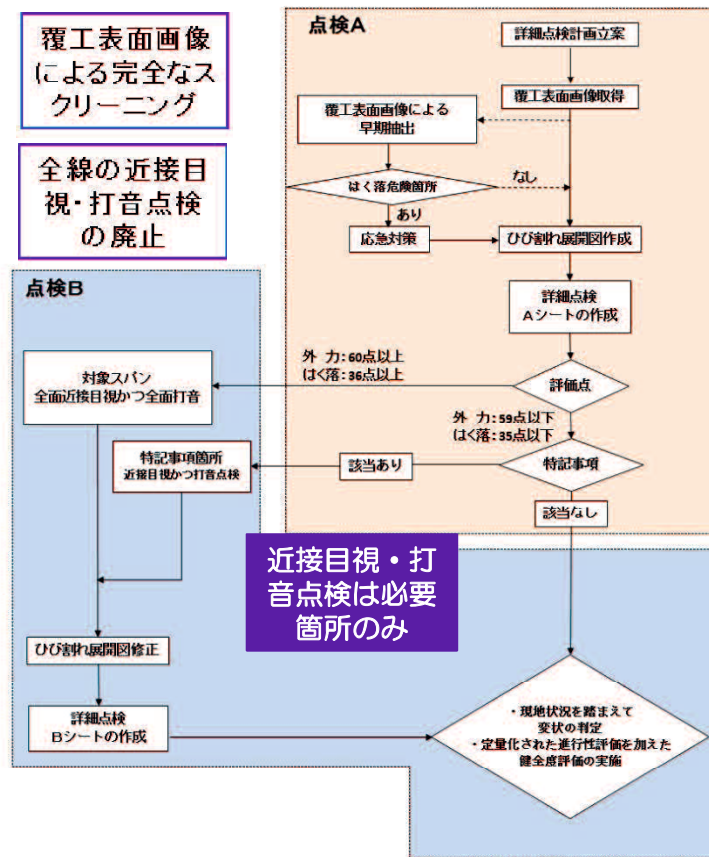


図-6.2 目標とするトンネル詳細点検の流れ

表-6.1 目標とする健全度ランクの標準

点検箇所	変状の種類	評価の標準					
		I	II	III-1	III-2	IV	V
トンネル	外力による変状	<ul style="list-style-type: none"> 変状が無いが、若しくは軽微なもの 評価点で 30 点以下 進行性が見られないもの 	<ul style="list-style-type: none"> 評価点で 31 ~ 59 点 継続的に監視を行う程度のもの 	<ul style="list-style-type: none"> 評価点で 60 点以上であるが、進行性が緩やかなもの 	<ul style="list-style-type: none"> 健全度ランク III-1 の状況から進行しているようにみられる 	<ul style="list-style-type: none"> 放射状ひび割れが見られる 圧ざが見られる 5mm 以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる 	<ul style="list-style-type: none"> 変状の進行が極めて著しくみられる
進行性の判断 ¹⁾		ΔF_0 が閾値より小さい			ΔF_0 が閾値以上		
覆工画像撮影による変化		変状に進行がみられない			変状に進行がみられる		

1) ΔF_0 をひびわれ幅と長さに細分化して評価

2) TCI 値である縦断成分 F_{11} , 横断成分 F_{22} による変状原因の特定, の 2 項目についても検討

6.3 おわりに

トンネルの維持管理において、点検を高精度で効率的に行う技術が確立できれば、トンネルを長期間使用するにあたり安全性や経済性を大幅に向上することができる。これまで一般的に適用されてきたトンネル全面におよぶ近接目視点検および打音点検は多大なる労力と時間をかけるものであるが、定量的な評価基準がないことと、その点検手法上すべてにおいて高い精度で点検を行うことは困難であることから、覆工コンクリートのはく落事象への対応や、点検に予算と時間が割かれることによる補修・補強工事の遅れが生じ、ひいてはトンネル構造自体の劣化等の進行が発生している。

本研究で検証・開発した近接目視の代替としてトンネル覆工表面画像技術の導入およびトンネル健全度の定量的評価手法により、高精度な点検を効率的に行うことでより適正な維持管理計画の策定および補修・補強へのリソースを確保できるなど、これまでの問題点を解決しながら、より適切なトンネルの維持管理が可能となると考えられる。また、これら点検評価手法および点検システムから得られるデータの分析を行うことで、さらなる高精度化・効率化の可能性があり、トンネルを健全な状態で長期間使用することができる点検技術にしたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 前田佳克, 八木 弘, 海瀬 忍, 増田弘明, 水野希典, 重田佳幸, 前田洸樹: ひびわれ指数 (TCI) を用いた覆工に発生するひびわれ形態の整理, 土木学会トンネル工学報告書, 第 26 巻, I-30, 2016.
- 2) 中島彰吾, 海瀬 忍, 森本真吾, 進士正人: TCI を用いた施工法の違いによる覆工評価の比較, 土木学会トンネル工学報告書, 第 26 巻, I-31, 2016.
- 3) 水野希典, 前田佳克, 海瀬 忍, 前田洸樹, 重田佳幸, 松岡 茂, 西村和夫: 既設トンネル覆工の変状推定手法に関する検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.73, No.3 (特集号), I_1-I_9, 2017.

謝 辞

本論文は、高速道路トンネルにおける点検の高精度化および効率化を目的とし、主に(株)高速道路総合技術研究所トンネル研究室において実施しました、高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価手法の精度向上を目指した一連の研究の内容を取りまとめたものです。

本論文の執筆にあたっては、多くの方々のご指導、ご鞭撻、ご協力をいただきました。

山口大学大学院創成科学研究科進士正人教授には、貴重な御助言と御指導を頂くとともに、研究におけるその必要性の問いかけから技術的な解決手段の方向性におきましても、丁寧なご教授をいただき、心より御礼申し上げます。

また、首都大学東京理事・学長特任補佐 西村和夫名誉教授、鉄建建設(株)執行役員土木本部技術部長松岡茂氏には、日本トンネル技術協会において開催された点検に関する検討部会におきまして、点検技術について貴重な御討議を頂き、多くの御助言、御指導を頂きました。

研究の方針と結果の評価に関して、中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株)テクニカルセンター チーフエンジニア中田雅博氏、中日本高速道路(株)技術建設本部技術支援部専門役八木弘氏、西日本高速道路(株)本社技術担当部長伊藤哲男氏、(株)高速道路総合技術研究所トンネル担当部長中野清人氏には、貴重な御意見、御指導を頂きました。

研究の実施におきまして膨大なデータのとりまとめ等に関しまして、パシフィックコンサルタント(株)重田佳幸氏、同前田洸樹氏、西日本高速道路(株)関西支社建設事業部建設第二課長代理前田佳克、山口大学大学院創成科学研究科林久資助教、山口大学大学院トンネル工学研究室宮地智仁氏の皆様方には御助言いただき、大変お世話になりました。

本研究テーマの方向性を決定付けます各種検討会等で、共にご尽力いただいた(株)高速道路総合技術研究所基盤整備推進部長手代木学氏、西日本高速道路(株)関西支社保全サービス事業部保全第二課長西岡昌樹氏、(株)高速道路総合技術研究所トンネル研究室主任前川和彦氏には、深く感謝いたします。

以上の皆様をはじめ、ここに名前を挙げるのでできなかった多くの関係各位と家族に深く感謝するとともに御礼申し上げます。