

トンネル覆工に発生するひび割れの定量化と
振動特性に基づく健全度評価手法に関する研究

2018年1月

谷 口 徹 也

目 次

| | |
|---|----|
| 第1章 緒論..... | 1 |
| 1.1 本研究の背景..... | 1 |
| 1.2 関連する既往研究等..... | 8 |
| 1.2.1 関連する既往研究の分類..... | 8 |
| 1.2.2 変状の効率的把握に関する研究等..... | 8 |
| 1.2.3 トンネル覆工の健全度評価に関する研究..... | 15 |
| 1.3 本論文の位置づけ..... | 16 |
| 1.4 研究の目的..... | 17 |
| 1.5 論文の構成..... | 18 |
| 参考文献..... | 20 |
| 第2章 道路トンネル点検の現状..... | 22 |
| 2.1 概説..... | 22 |
| 2.2 トンネル定期点検方法..... | 23 |
| 2.2.1 用語の定義..... | 23 |
| 2.2.2 国土交通省のトンネル定期点検方法..... | 26 |
| 2.2.3 NEXCOのトンネル点検方法..... | 38 |
| 2.3 国土交通省とNEXCOとのトンネル定期点検の比較と課題..... | 52 |
| 2.3.1 国土交通省とNEXCOとのトンネル定期点検の比較..... | 52 |
| 2.3.2 トンネル定期点検の課題..... | 54 |
| 参考文献..... | 57 |
| 第3章 トンネル覆工のひび割れ分布定量化手法..... | 58 |
| 3.1 概説..... | 58 |
| 3.2 NEXCOのひび割れ分布定量化手法および健全度評価点算出方法..... | 58 |
| 3.3 本研究で提案するひび割れ分布定量化手法..... | 60 |
| 3.3.1 フラクタル次元解析..... | 60 |
| 3.3.2 フラクタル次元の適用検証..... | 62 |
| 3.4 まとめ..... | 68 |
| 参考文献..... | 70 |
| 第4章 トンネル覆工のひび割れ自動抽出技術の構築..... | 71 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|-------|
| 4.1 | 概説 | 7 1 |
| 4.2 | トンネル覆工点検システムの開発 | 7 1 |
| 4.2.1 | トンネル覆工点検システムの目標性能と構成 | 7 1 |
| 4.2.2 | 覆工表面撮影システムの開発 | 7 3 |
| 4.2.3 | 覆工表面画像作成ソフトウェアの開発 | 8 1 |
| 4.2.4 | ひび割れ自動抽出ソフトウェア | 8 2 |
| 4.3 | ひび割れ自動抽出精度の検証 | 8 5 |
| 4.3.1 | ひび割れ自動抽出精度検証手順 | 8 5 |
| 4.3.2 | ひび割れ自動抽出精度検証結果 | 8 6 |
| 4.4 | まとめ | 9 8 |
| 第5章 | トンネル覆工のひび割れ分布と振動計測に基づく健全度評価 | 9 9 |
| 5.1 | 概説 | 9 9 |
| 5.2 | 研究対象トンネルと研究手順の概要 | 9 9 |
| 5.3 | 覆工表面画像の取得およびひび割れの抽出，図面化 | 1 0 2 |
| 5.4 | ひび割れ分布の定量化 | 1 0 5 |
| 5.5 | 現地トンネル覆工の常時微動計測 | 1 0 5 |
| 5.6 | 計測結果分析と考察 | 1 1 0 |
| 5.6.1 | 現地覆工のフーリエスペクトルとフラクタル次元との相関 | 1 1 0 |
| 5.6.2 | 推定覆工厚，推定覆工背面空洞量，岩質とフーリエスペクトルとの 関連 | 1 1 4 |
| 5.7 | まとめ | 1 1 9 |
| | 参考文献 | 1 2 0 |
| 第6章 | ひび割れ分布定量化手法の検証 | 1 2 1 |
| 6.1 | 概説 | 1 2 1 |
| 6.2 | ひび割れ自動抽出結果を用いた健全度評価適用検証 | 1 2 1 |
| 6.2.1 | ひび割れ抽出方法の相違によるひび割れ線形の傾向 | 1 2 1 |
| 6.2.2 | 検証内容 | 1 2 2 |
| 6.2.3 | 検証結果と考察 | 1 2 6 |
| 6.3 | TCIとフラクタル次元との相関性検証 | 1 3 0 |
| 6.4 | まとめ | 1 3 1 |
| | 参考文献 | 1 3 2 |

| | | |
|-------|----------------------------------|-------|
| 第7章 | ひび割れ定量化手法を用いた覆工ひびわれ発生区間の調査および | |
| | 補強対策検討..... | 1 3 3 |
| 7.1 | 概説..... | 1 3 3 |
| 7.2 | 日岳トンネルの変状概要..... | 1 3 3 |
| 7.2.1 | 概要..... | 1 3 3 |
| 7.2.2 | トンネルの変状概要..... | 1 3 5 |
| 7.3. | トンネル定期点検結果..... | 1 3 7 |
| 7.3.1 | ひび割れ展開図と健全度評価..... | 1 3 7 |
| 7.3.2 | ひび割れの経年変化..... | 1 3 7 |
| 7.4 | ひび割れ発生の原因究明..... | 1 4 0 |
| 7.4.1 | 原因究明のための着目点..... | 1 4 0 |
| 7.4.2 | 現況構造調査..... | 1 4 1 |
| 7.4.3 | 外力の可能性調査..... | 1 4 1 |
| 7.4.4 | 覆工コンクリートの品質調査..... | 1 4 5 |
| 7.4.5 | ひび割れ発生原因の究明と対策方針..... | 1 4 8 |
| 7.5 | 補強対策工の選定..... | 1 4 9 |
| 7.6 | 実トンネルにおけるフラクタル次元とフーリエスペクトルとの相関性 | |
| | 再検証..... | 1 5 5 |
| 7.6.1 | TCIとフラクタル次元の相関..... | 1 5 5 |
| 7.6.2 | フラクタル次元および3方向合成フーリエスペクトルと健全度評価 | |
| | との相関性検証..... | 1 5 6 |
| 7.7 | まとめ..... | 1 5 6 |
| | 参考文献..... | 1 5 8 |
| 第8章 | 常時微動計測の再現性検証および補強対策工前後における常時微動計測 | |
| | 結果の変化..... | 1 5 9 |
| 8.1 | 概説..... | 1 5 9 |
| 8.2 | 検証内容..... | 1 5 9 |
| 8.3 | フーリエスペクトルの方向補正..... | 1 6 1 |
| 8.4 | 第2回常時微動計測およびフーリエスペクトル解析結果..... | 1 6 2 |
| 8.5 | フーリエスペクトルの再現性検証..... | 1 6 4 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.5.1 | 第1回常時微動計測の補正後フーリエスペクトルとフラクタル次元 の相関..... | 164 |
| 8.5.2 | 第2回常時微動計測のフーリエスペクトルとフラクタル次元の相関..... | 166 |
| 8.5.3 | 第1回と第2回におけるフーリエスペクトルとフラクタル次元の比較... | 168 |
| 8.5.4 | 補強対策工前後におけるフーリエスペクトルの比較..... | 173 |
| | 参考文献..... | 177 |
| 第9章 | 結論..... | 178 |
| 謝 | 辞..... | 182 |

第 1 章 緒論

1.1 本研究の背景

産業基盤施設としての道路や鉄道は、経済成長とともに充実してきた。その一方で、我が国は高齢化社会をむかえ、膨大な構造物を健全に維持するための人材が不足し、この状況は今後ますます深刻になっていくと予想される。近年は、老朽化による構造物の劣化が著しく、トンネルでは 1999 年 6 月 27 日に発生した山陽新幹線小倉～博多間福岡トンネル内における、トンネル覆工のコールドジョイント部からのコンクリート片はく落事故や、2012 年 12 月 2 日に発生した中央自動車道大月ジャンクション～勝沼インターチェンジ間笹子トンネル上り線内における天井板落下事故をはじめ、表 1.1-1 に示す近年発生したトンネル覆工のコンクリート片はく落事象の一例のように、老朽化を要因とした人命を脅かすほどのリスク事象が発生している^{1), 2), 3)}。

道路トンネルに着目する。図 1.1-1 に建設年度別トンネル数を示す⁴⁾。1950 年代までは、地方自治体を中心に年間 50 本以下の建設数であるが、実質成長率が 10%を超える 1970 年代初頭までの高度経済成長期、1956 年の日本道路公団設立、1986 年から 1991 年までのバブル景気を経て、2000 年まで年間 150 本程度のペースで建設されてきた。このうち高度経済成長期に建設されたトンネルは、全体の約 22%と多くを占める。供用年数が 50 年を超えるトンネルは、2010 年を基準にして全体の 16%を占め、10 年後には 1.8 倍の 29%、20 年度には 2.7 倍の 45%、30 年後には 3.9 倍の 64%と過半数を超える。すなわち、今後老朽化を迎えるトンネルが倍増していくことを示している。

表 1.1-1 トンネル覆工のコンクリート片はく落事象の一例^{1), 2), 3)}

| 種別 | 発生日時 | 路線名 | トンネル名 | 部位 | はく落片 |
|----|-----------|---------------------------|----------|-------|------------------------------|
| 鉄道 | H11.10.8 | 長野新幹線安中榛名～軽井沢駅間 | 一ノ瀬トンネル | 覆工アーチ | 200g |
| 道路 | H19.10.21 | 九州自動車道上り線 | 福智山トンネル | 覆工アーチ | 12*5*4.5 小片3個 |
| 道路 | H19.10.21 | 浜田自動車道瑞穂～旭IC間 | 岩畳トンネル | 覆工アーチ | 33*15*15 その他11個 |
| 道路 | H20.7.20 | 高知自動車道大豊～南国IC間 | 明神トンネル | 覆工側壁 | 14*11*7 その他8個 |
| 鉄道 | H23.12.6 | 山陽新幹線岩国～徳山駅間 | 第二米川トンネル | 覆工アーチ | 20*11*3.5 |
| 鉄道 | H24.2.27 | きのくに線紀伊田原～古座駅間 | 津荷坂トンネル | 覆工側壁 | 200*130*2 |
| 鉄道 | H24.7.25 | 芸備線備後落合～比婆山駅間 | 井出山トンネル | 覆工アーチ | 25*10*1(4個) 10*10*1.5(4個) |
| 鉄道 | H25.1.18 | 東北新幹線くりこま高原～ 一ノ関駅間 | 第二有壁トンネル | 覆工側壁 | 4個(1.4kg) |
| 鉄道 | H25.1.18 | 上越新幹線 | 大清水トンネル | 覆工側壁 | 11個(24.7kg) |
| 鉄道 | H25.2.14 | 山陽新幹線広島～新岩国駅間 | 大竹トンネル | 覆工側壁 | 48*18*6 |
| 鉄道 | H25.2.25 | 北陸本線市振～親不知駅間 | 第一外波トンネル | BOX天端 | 15*20*3 |
| 鉄道 | H25.3.7 | 高山本線猪谷～楡原駅間 | 第三庵谷トンネル | 覆工アーチ | 17*12*1 |
| 鉄道 | H25.3.8 | 北陸本線能生～名立駅間 | 頸城トンネル | 覆工側壁 | 25*10*3 |
| 鉄道 | H25.4.2 | 津軽線大平～津軽二股駅間 | 非公開 | 覆工アーチ | 8*8*2 他数個 |
| 鉄道 | H25.4.9 | 三田線西巢鴨～新板橋駅間 | 非公開 | 覆工側壁 | 20*14*3 他数個 |
| 鉄道 | H25.4.12 | 釜石線足ヶ瀬～上有住駅間 | 非公開 | 覆工アーチ | 30*20*2 他2個 |
| 鉄道 | H25.4.25 | 東北新幹線新白河～郡山駅間 | 非公開 | 覆工側壁 | 40*10*3 他2個 |
| 鉄道 | H25.6.10 | 山陽新幹線福山～新尾道駅間 | 第1松永トンネル | 覆工側壁 | 24*15*6 |
| 鉄道 | H25.7.15 | 吾妻線川原湯温泉～ 長野原草津口駅間 | 非公開 | 覆工側壁 | 30*40*1 他数個 |
| 鉄道 | H25.8.8 | 福岡市営地下鉄空港線唐人町～ 大濠公園前駅間 | 非公開 | 覆工側壁 | 170*30*2 |
| 鉄道 | H25.8.21 | 神戸市西神・山手線妙法寺～ 板宿駅間 | 非公開 | 覆工アーチ | 68*22*4 他数個 |

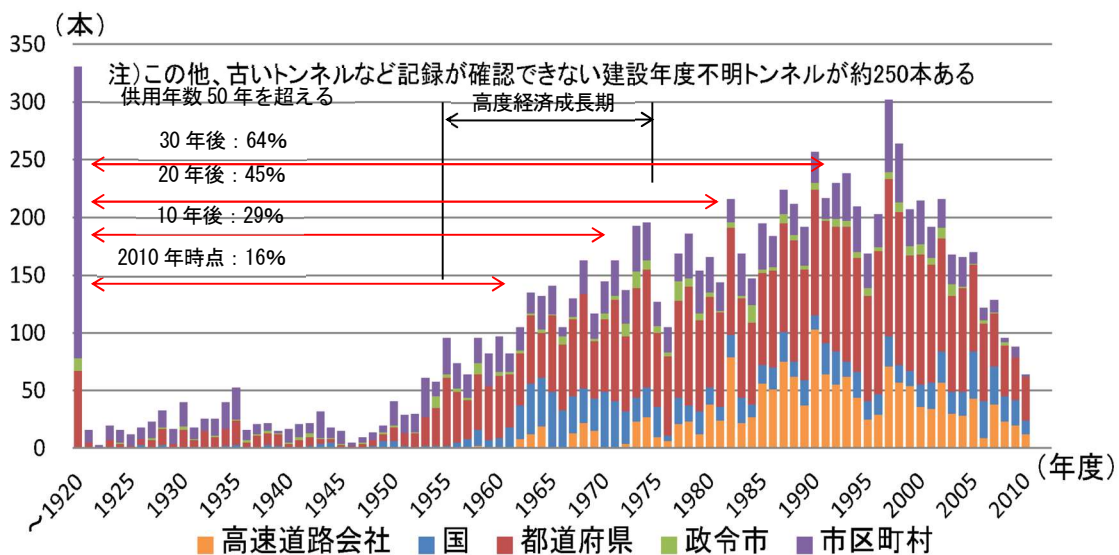


図 1.1-1 建設年度別道路トンネル数 (2013年4月)⁴⁾

表 1.1-2 橋梁、トンネル数量および延長割合 (2015年度時点)⁵⁾

| 道路種別 | 橋梁 | | | トンネル | | | 全体割合 (%) |
|---------|---------|---------|----------|--------|---------|----------|----------|
| | 個所数 | 延長 (km) | 延長割合 (%) | 個所数 | 延長 (km) | 延長割合 (%) | |
| 高速自動車国道 | 12 654 | 1 356 | 10.2% | 1 042 | 1 038 | 23.9% | 17.0% |
| 一般国道 | 55 258 | 2 843 | 21.4% | 3 976 | 1 989 | 45.7% | 33.6% |
| 都道府県道 | 100 831 | 3 103 | 23.4% | 2 657 | 877 | 20.2% | 21.8% |
| 市町村道 | 521 356 | 5 967 | 45.0% | 2 626 | 446 | 10.2% | 27.6% |
| 合計 | 690 099 | 13 269 | 100.0% | 10 301 | 4 349 | 100.0% | 100.0% |

表 1.1-2 に橋梁、トンネル数量および延長割合を示す⁵⁾。トンネルは、2015年時点において約1万個所、4349kmが供用されている。道路種別ごとの延長割合は、高速自動車国道が24%、一般国道が46%、都道府県道が20%、市町村道が10%という分布になっている。同じく定期点検が必要な橋梁の数量を加味すると、市町村道は橋梁が多いため橋梁とトンネルを含む点検数量は全体の28%程度と割合は大きくなる。維持管理・更新にかかる担当職員は、国、都道府県や政令市では一定数従事しているものの、市町村、なかでも町村に

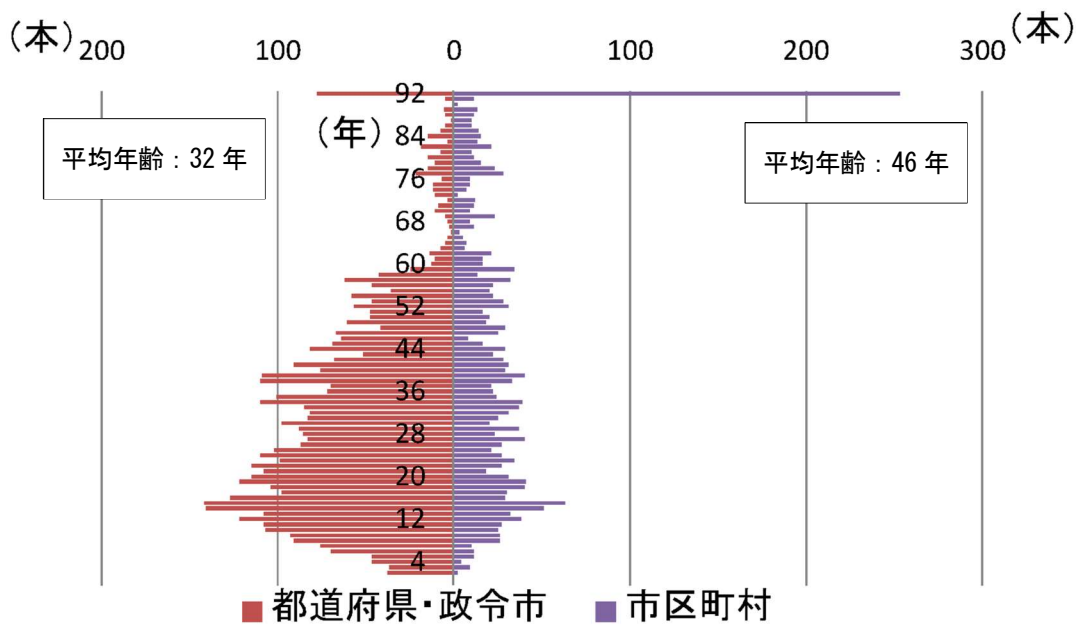
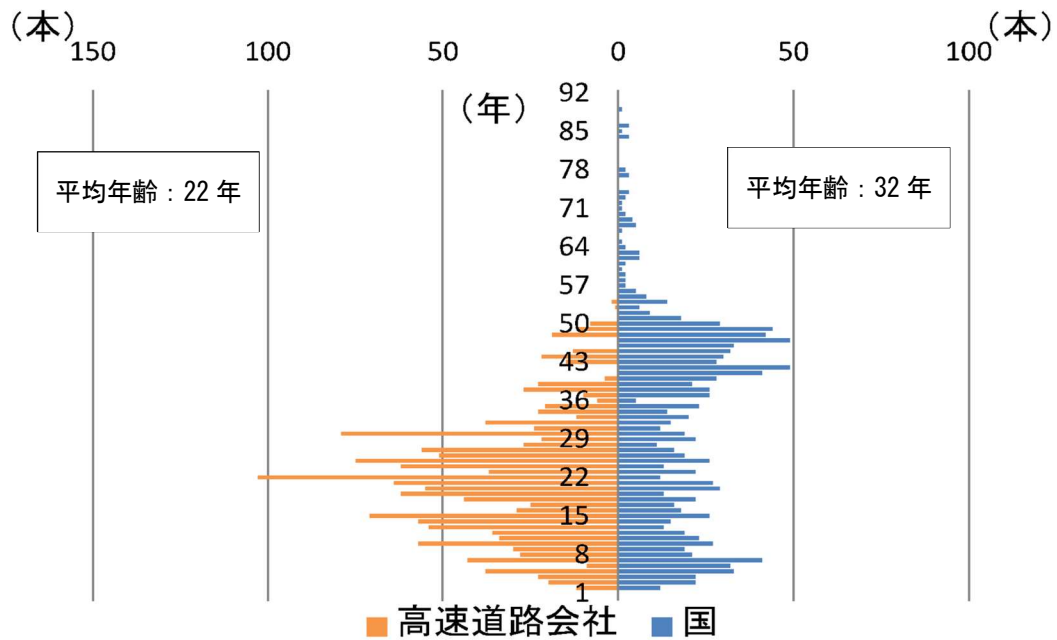
においては不足していることから⁴⁾、定期点検の確実な実施は難しい状況にある。

鉄道においても表 1.1-3 に示すとおり約 4900 本、4000 kmのトンネルが供用されていることから⁶⁾、国内に相当数の供用中トンネルが存在しており、定期点検に膨大な労力が必要であることが容易に推測できる。

図 1.1-2 に各道路管理者別供用中トンネルの供用年数分布を示す⁴⁾。トンネルの供用年数の平均は、2013 年を基準として高速道路会社が 22 年、国が 32 年、都道府県・政令市が 32 年、市区町村が 46 年と、市区町村が管理するトンネルが最も高い。これらのことから、老朽化を迎えるトンネル数が倍増し、特に高速道路会社および都道府県が管理するトンネルは急激に増加することがわかる。

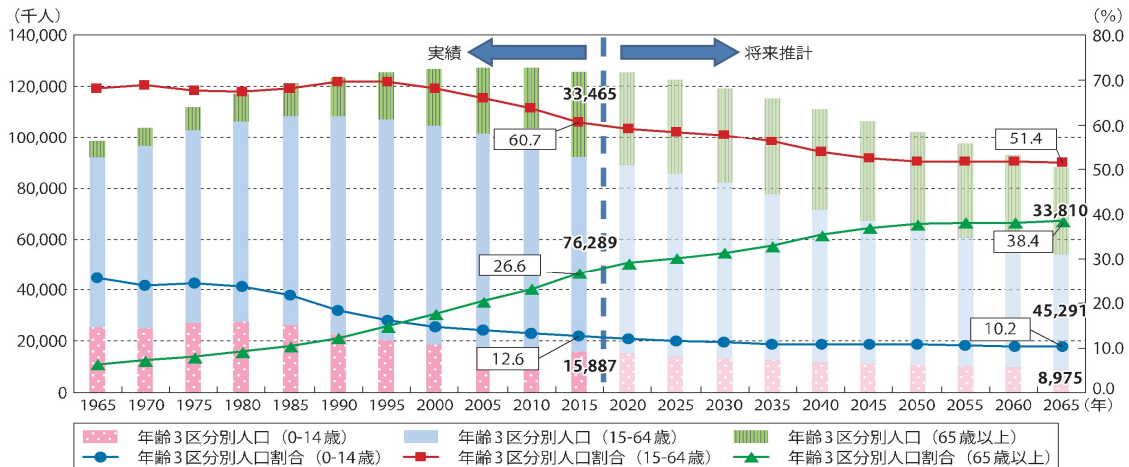
表 1.1-3 鉄道におけるトンネル数量（2014 年度時点）⁶⁾

| 事業者名 | トンネル | |
|----------|-------|-------|
| | 数 | 延長 |
| | (個所) | (km) |
| 北海道運輸局計 | 3 | 46 |
| 東北運輸局計 | 164 | 115 |
| 北陸信越運輸局計 | 94 | 108 |
| 関東運輸局計 | 331 | 506 |
| 中部運輸局計 | 221 | 158 |
| 近畿運輸局計 | 254 | 445 |
| 中国運輸局計 | 78 | 36 |
| 四国運輸局計 | 77 | 33 |
| 九州運輸局計 | 50 | 44 |
| 北海道旅客鉄道 | 176 | 203 |
| 東日本旅客鉄道 | 1 235 | 958 |
| 東海旅客鉄道 | 433 | 223 |
| 西日本旅客鉄道 | 1 027 | 704 |
| 四国旅客鉄道 | 277 | 93 |
| 九州旅客鉄道 | 468 | 271 |
| 日本貨物鉄道 | 5 | 1 |
| 計 | 4 893 | 3 942 |



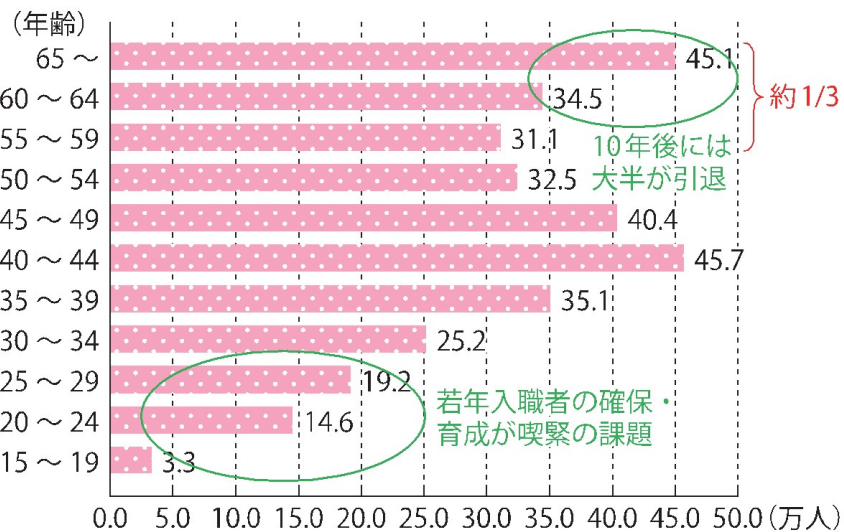
注) 平均年齢は、建設年度が把握されている施設の平均

図 1.1-2 道路管理者別供用中トンネルの供用年数分布 (2013年4月) ⁴⁾



(注) 1970年以前は沖縄県を含まない。
 資料) 2010年までは総務省統計局『国勢調査報告』、2015年は総務省統計局『平成27年国勢調査 人口等基本集計』、推計値は国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」(2017年推計)の出生中位(死亡中位)推計より国土交通省作成

図 1.1-3 我が国の人口推移⁷⁾



資料) 総務省「労働力調査」より国土交通省作成

図 1.1-4 建設業における高齢者の大量離職率の見通し⁷⁾

図 1.1-3 に我が国の人口推移を示す⁷⁾。我が国は、少子高齢化の進行により総人口が 2008 年をピークに減少に転じ、15 歳から 64 歳の生産年齢人口も 1995 年をピークに減少に転じている。国立社会保障・人口問題研究所の将来推計によると、総人口は 2065 年には 8808 万人まで減少すると見込まれており、生産年齢人口は 2065 年には 4529 万人にまで減少すると見込まれている。また、図 1.1-4 の建設業における高齢者の大量離職率の見通しに示

すように、高齢者が大量離職する反面、若年入職者の不足が懸念されていることから、産業基盤施設の維持管理に従事する技能者、技術者が不足していくことが容易に想定できる⁷⁾。

こうした背景の中で発生した、2012年12月の中央自動車笹子トンネル天井板落下事故を受け、国土交通省では2013年を「社会資本メンテナンス元年」と位置づけ、トンネル天井板の緊急点検、トンネル内道路付属物一斉点検、インフラ長寿命化計画の策定を経て、2014年6月に道路トンネル定期点検要領の策定⁸⁾、また同年7月に道路法施行規則の一部改正⁹⁾が行われた。同規則の改正内容は、

- ① 橋梁・トンネル等は、国が定める統一的な基準により、5年に1回の頻度で、近接目視により点検を行うことを基本とすること。
- ② 点検、診断の結果等について、記録保存すること。
- ③ 統一的な尺度で健全性の診断結果を分類すること。

という内容が盛り込まれた。

我々土木技術者は、膨大な産業基盤施設に対する維持管理に従事する技能者、技術者が不足していく状況のなかで、日々現地トンネルの近接目視、打音による定期点検を実施しているところである。その一方で、新たな道路法施行規則および道路トンネル定期点検要領に従って行われている道路トンネル定期点検は、**図 1.1-5**に示すとおり実施率が2015年度末時点で約29%と道半ばである¹⁰⁾。このような状況から、道路トンネルの利用者に対する安全性の確保、技能者、技術者不足への対応に対して、イノベーションによる課題解決が必要とされている。

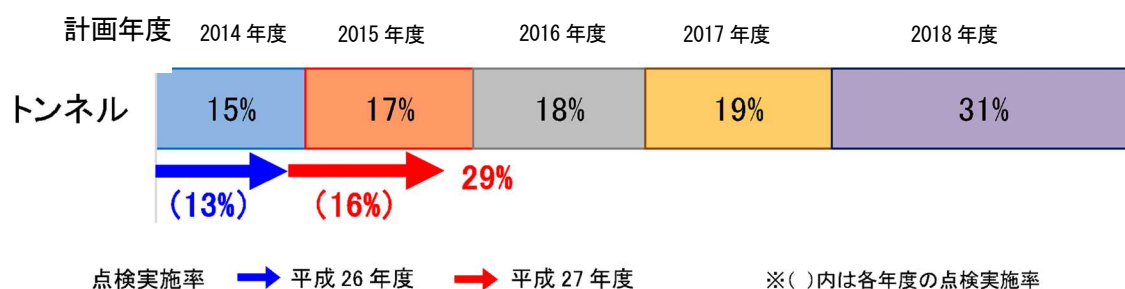


図 1.1-5 5年間の点検計画・累積点検実施率（全道路管理者合計）¹⁰⁾

1.2 関連する既往研究等

1.2.1 関連する既往研究の分類

前述に示すとおり，膨大な数の道路トンネルに対する維持管理の困難さが背景にあることから，表 1.2-1 に分類されるようなさまざまな研究がなされている．次項にその一例を示す．

1.2.2 変状の効率的把握に関する研究等

(1)次世代社会インフラ用ロボット開発・導入

少子高齢化，人口減少による建設産業における労働力不足が懸念されるなか，2013年7月16日に国土交通省および経済産業省は，インフラの老朽化に対応した効率的な維持管理，更新や，大規模災害への迅速な対応が必要とされているに鑑み，「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を共同設置し，同年12月25日に「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」を策定して今後取り組むべき事項を提示した．

そして重点分野にかかるロボットについて，2014年度および2015年度の全国の直轄現場等における現場検証および評価を通じて開発・改良を促進し，現場検証の結果を踏まえて2016年度から現場への試行的導入を実施し，その後の本格導入を目指している．図 1.2-1 に，次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野を示す¹⁾．重点分野は5分野に分かれており，そのうち維持管理におけるトンネルの重点分野は，①近接目視を支援，②打

表 1.2-1 既往研究の目的と分類

| 研究の目的 | 研究の分類 |
|---|--------------------|
| 人力による点検の支援または代替技術の構築．再現性のある定量データとして変状を抽出，記録する技術の構築． | 変状の効率的把握に関する研究 |
| 再現性があり定量的に健全度を評価する技術の構築 | トンネル覆工の健全度評価に関する研究 |

音検査を支援，③点検者の移動を支援する技術が取り組むべき事項とされている。公募技術は，①覆工，坑門等に発生したひび割れ，うき，はく離，はく落，変形，漏水などの変状の全てまたは一部に対して，近接目視の支援ができる技術，②同じく覆工等に発生した変状の全てまたは一部に対して，打音検査の支援ができる技術・システム，③点検者を点検個所に近づけて移動できる技術・システムである。

2016年3月30日に国土交通省から公表された「トンネル維持管理技術の現場検証・評

I 維持管理

① 橋梁


- ・近接目視を支援
- ・打音検査を支援
- ・点検者の移動を支援

② トンネル

- ・近接目視を支援
- ・打音検査を支援
- ・点検者の移動を支援

③ 水中 (ダム、河川)

- ・近接目視を代替・支援
- ・堆積物の状況を把握


II 災害対応

④ 災害状況調査
(土砂崩落、火山災害、トンネル崩落)

- ・現場被害状況を把握
- ・土砂等を計測する技術
- ・引火性ガス等の情報を取得
- ・トンネル崩落状態や規模を把握

⑤ 災害応急復旧 (土砂崩落、火山災害)

- ・土砂崩落等の応急復旧
- ・排水作業の応急対応する技術
- ・情報伝達する技術








図 1.2-1 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野¹⁾

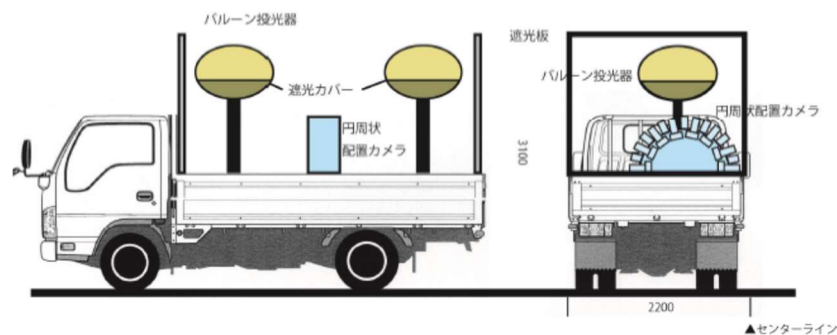
価の結果」によると¹²⁾、表 1.2-2 のとおり 13 技術 12 社の応募があり、10 技術が現段階で実現場での利用可能性があると判断される「実用検証技術」に、3 技術が現時点で開発段階であり、データ収集や各要素の稼働状況等の確認を目的とした「要素検証技術」に認定されている。

本研究に使用する著者が開発した「トンネル覆工点検システム」に類似している技術は、

表 1.2-2 2015 年度次世代インフラロボット（トンネル維持管理）¹²⁾

| No. | 技術名称 | 応募者 |
|-----------------|------------------------------------|----------------------|
| 【実用検証技術】 | | |
| 1 | 画像から抽出したクラック分析による浮き、はく離の検知技術 | (株)アルファ・プロダクト |
| 2 | 走行型高精細画像計測システム（トンネルレーザー） | 中外テクノス |
| 3 | MMSによるトンネル点検支援技術 | (株)アスコ |
| 4 | デジカメ画像と赤外線熱画像を用いた画像診断システム「HIVIDAS」 | 清水建設(株) |
| 5 | ポール型打音検査機 | 日本電気(株) |
| 6 | トンネル覆工レーザー・赤外線画像計測システム | 日本工営(株) |
| 7 | 走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM-R | パシフィックコンサルタンツ(株) |
| 8 | 高精度トンネル覆工計測装置 | 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) |
| 9 | トンネル覆工コンクリート調査システム | 三井造船(株) |
| 10 | インフラ点検システム | 沖電気工業(株) |
| 【要素検証技術】 | | |
| 11 | 車両走行型トンネル点検システム MMSD TM | 三菱電機(株) |
| 12 | ハンディひびわれ検出装置 | 東急建設(株) |
| 13 | 打音点検用飛行ロボットシステム | 日本電気(株) |

車両走行型の No.1 から No.3, No.6 から No.9 および No.11 であり、デジタルスチールカメラ、デジタルビデオカメラ、ラインセンサカメラやレーザーが覆工表面画像を取得する機材として使用されている。図 1.2-2～図 1.2-5 に次世代インフラロボット（覆工表面画像等取得技術）の一例を示す¹²⁾。これらの覆工表面画像取得技術を活用して、ひび割れやはく離、遊離石灰などの変状を自動的に抽出する技術の研究も活発に行われている。なお、図 1.2-5 に示す次世代インフラロボットは、国土交通省近畿地方整備局が運営する「新都市社会技術融合創造研究会」（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）のもとで、2005 年度から 2013 年度までの 8 年間にわたり産・学・官の連携により進められた「道路トンネルの健全性評価技術の研究」¹³⁾および「走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究」¹⁴⁾の成果である。本研究は、ビデオカメラによる壁面撮影装置およびレーザーによる覆工内面の形状計測装置を搭載した専用車両（以下、「MIMM」という）を用いて、取得した覆工表面画像からひび割れなどの変状を抽出し、レーザーによる覆工内面形状計測データと組み合わせて変形モードを推定することで、外力の有無の判定や合理的トンネル点検方法を提案している。



撮影機材配置



撮影用機材 (FOCUS-T)

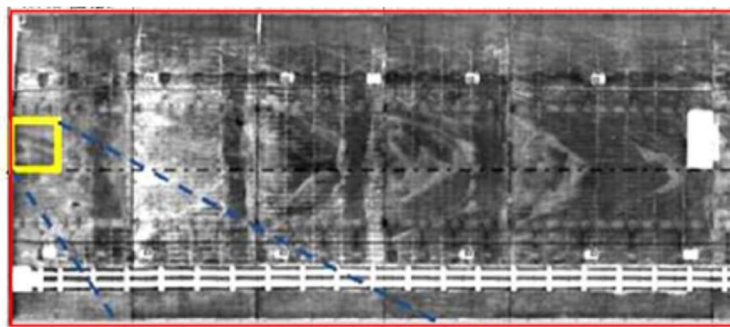
図 1.2-2 次世代インフラロボットの例(No.1)¹²⁾



図 1.2-3 次世代インフラロボットの例(No.2)¹²⁾

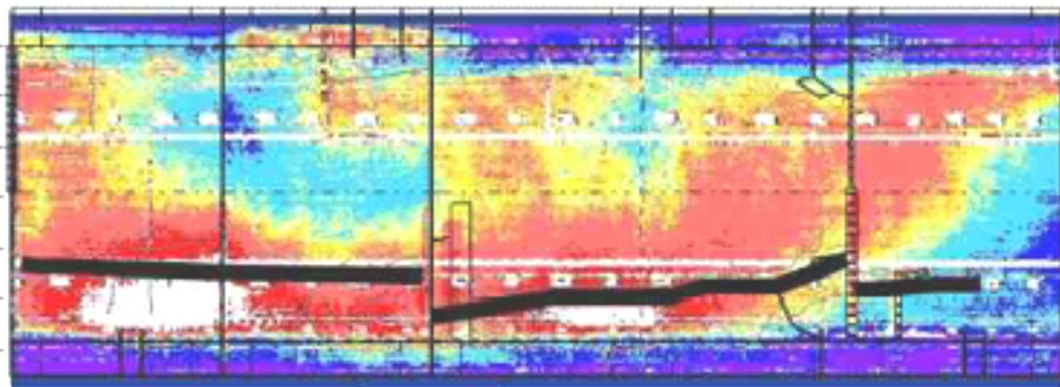
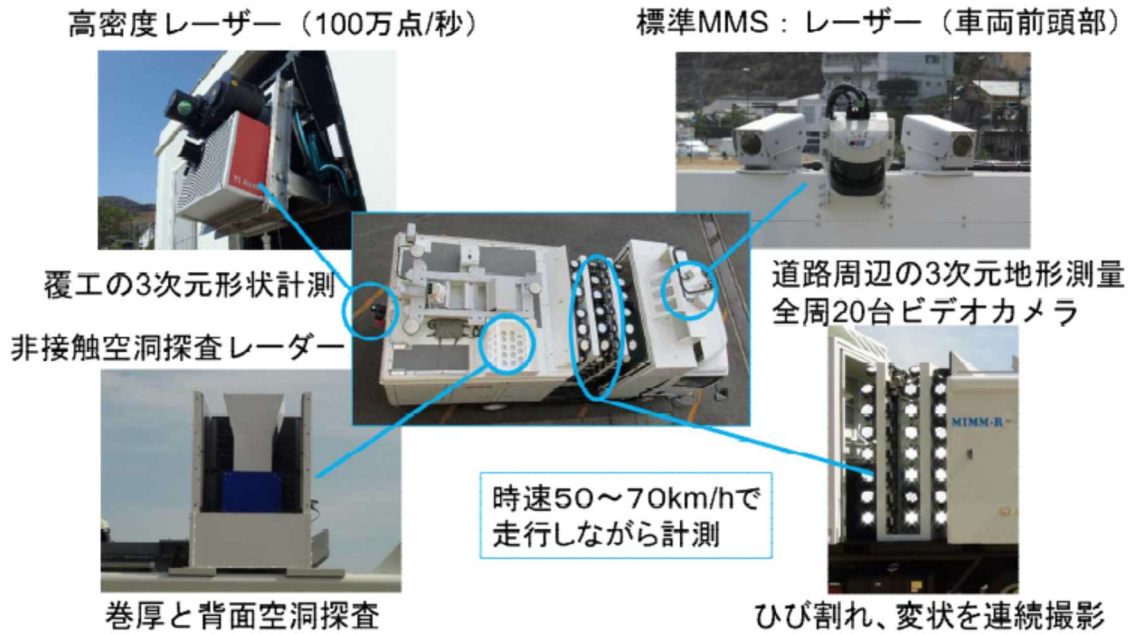


レーザー計測車 (TC2)



覆工表面画像例。(レーザースキャンニング)

図 1.2-4 次世代インフラロボットの例(No.6)¹²⁾



レーザー計測による変形モードの例

図 1.2-5 次世代インフラロボットの例(No.7)¹²⁾

(2)変状の効率的把握手法に関する既往の研究

覆工表面画像を用いて変状を効率的に把握する手法に関する研究が従前から行われている。半田らは¹⁵⁾、覆工表面画像のひび割れ部分を鋭敏化させるために、ラプラスアンフィルタ等を用いて白黒の2値化画像へ変換した。次に雑音処理された画像を2値化した。さらに2値化された画像を連結成分ごとに同一の番号を付けるラベリング処理を行い、連結成分ごとにフラクタル次元を求め、フラクタル次元が1.2以上1.3未満の成分をひび割れとして抽出する処理を行っている。

藤田らは¹⁶⁾、コンクリート構造物の画像に対し、光の不均一性や影による画像の濃淡変化を除去してひび割れを区別するため、2つの前処理を導入している。まずは、メディアンフィルタを用いて濃淡変化を除去した補正画像を作成して現画像との差分をとることによりひび割れ画像を得る。次にヘッセ行列を用いた多重スケール線強調処理により、線、粒、面の構造を区分したエッジ強調を行うことによりひび割れを強調している。ひび割れ自動抽出処理は、確率的弛緩法を用いてノイズの発生を抑えて大まかにひび割れを抽出し、抽出された領域の周囲に限定して段階的閾値処理により大まかに抽出されたひび割れをもとにひび割れ抽出処理を高精度化している。

鵜飼らは¹⁷⁾、ひび割れ抽出は黒っぽい線状の領域というひび割れの特徴に着目してひび割れ線を輪郭線でモデル化し、ヒステリシス閾値を適用したフィルタリングにより抽出精度を高精度化させている。また漏水の抽出については、鉛直方向に流れ落ちる黒っぽい跡という特徴に着目して、画像を横方向に平滑化をかけ動的閾値処理で背景に比べてより黒い領域を抽出する。次に小さなノイズを除去し特徴量の検査を経て最終的に当該領域を囲む座標軸と平行な最小矩形を漏水として抽出している。

河村らは¹⁸⁾、覆工表面画像から遺伝的アルゴリズム(GA:Genetic Algorithm)の一つである対話型遺伝的アルゴリズム(iGA)による視覚的な画像処理パラメータ調整および、タッチパネルを用いた直感的なひび割れ抽出の二つの機能を特徴とするひび割れ半自動抽出ソフトウェアを開発した。手書き作業と比較して同程度の精度でひび割れを抽出し作業時間を70%短縮することが可能であるが、ユーザーによってばらつきがあるとされている。

全らは¹⁹⁾、メディアンフィルタを用いた前処理、機械学習により訓練したアルゴリズムによる抽出を行う本処理、幾何学的基準によりノイズ等を除去する後処理によりひびわれ抽出を行っている。前処理については、藤田ら¹⁶⁾の手法と同様である。本処理については、ひび割れ画像とひび割れでない画像を機械に与えて学習させて判定アルゴリズムを構築し、出力した着目画素を画像フィルタ処理により特徴量を算出してひび割れかどうかを判定する。最後に後処理として、幾何学的基準(面積 ≥ 10 pixel, 偏心率 ≥ 0.98)を用いてノイズなどの誤抽出を除き、一定の面積を持つ連結領域のみをひびわれ抽出結果として残している。

第4章に示す本研究でのひび割れ自動抽出手法は、線状の特徴を抽出するためにヘッセ行列を用いている藤田らの手法に比べ、1画素以下と推測されるような細線にも反応することができる。藤田らの手法は、ヘッセ行列の2つの固有値の比率によって線状構造を分別しているが、細線の場合固有値の絶対値が小さくなり結果が不安定になるのに比べ、本手法では細線の細さに比例して抽出値は小さくなるものの、値自体は安定しているからで

ある。この性質は、撮影の困難さ、データ量の問題などから、細いひび割れの撮影に十分な解像度を得られない実際の画像では有効である。

また半田らの手法は、抽出されたひび割れ候補に対しフラクタル処理を施して、ひび割れのみを選択する手法を提案しており、抽出そのものはラプラシアンフィルタ処理を行っている。単純なフィルタ処理では細線を抽出するために、感度を上げるとコンクリート表面の凹凸などによる細かな構造が浮かび上がり、これらがランダムな形状をしていると、フラクタル処理を行ってもノイズとして残存する可能性がある。

全らの手法は、ひび割れ本体の輝度と、周辺輝度などの特徴量ベクトルを入力とした機械学習を行い、非常に S/N 比のよい抽出器を構築している。しかし、機械学習による手法においては、学習データがどの程度の普遍性を持っているか実証が困難であり、学習画像と大きく様相の異なるコンクリート面での正解率が大きく低下する可能性がある。また、なぜ抽出できなかつたのかを解析することも困難である。

以上のことから、ひび割れの抽出精度や処理時間の比較を具体的に行うことは不可能であるが、実寸解像度が限られた現実のコンクリート面画像に対するひび割れ抽出処理において、第4章で述べる本研究のひび割れ自動抽出手法は有意性があると考えられる。

1.2.3 トンネル覆工の健全度評価に関する研究

トンネル覆工の健全度を評価するにあたっては、一般的にひび割れの分布状況が着目される。その中でも東、中、西日本高速道路株式会社（以下、「NEXCO」という）が規定する健全度評価手法が最も定量的な手法である。当手法は、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により、覆工コンクリートの劣化度の定量化を図っている。

大場ら²⁰⁾や重田ら²¹⁾によると、現場技術者による道路トンネル維持管理便覧に従った健全度評価とクラックテンソルには相関があり、従来の諸基準であるひび割れの幅、長さや密度に着目して段階的なランク付けによる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という知見が得られている。

山田らは²²⁾、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分析法（以下、「AHP」という）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が数量化され、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た形で、より適切かつ詳細

に健全度を評価することが可能といわれている。また同氏らは²³⁾、健全度評価シートの観察項目のうち、「1.最大ひび割れ幅」、「2.最大ひび割れ幅の長さ」、「3.ひび割れの分布」、「4.方向性」について、クラックテンソルの考えを導入したひび割れ指数 TCI(Tunnel-lining Crack Index)によりひび割れ評価の点数化が試みられ、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ことが証明された。

TCI による健全度評価手法で課題となるのは、現地の覆工コンクリートの剛性に着目した評価が含まれていないことである。一方で、ひび割れ発生パターンによる評価と解析による評価を組み合わせる残存耐力を評価する安部らの方法²⁴⁾や、覆工模型実験により荷重条件と覆工条件に対するひび割れ進展と剛性変化をもとめ、荷重条件とひび割れ進展状況による剛性の推定値から健全度評価する佐野らによる手法²⁵⁾が提案されている。この手法は、覆工に対する荷重の加わり方を想定し、現地のひび割れ形態と照らし合わせることでトンネルがどの状態にあるかを推定する。また糸井ら²⁶⁾は、常時微動で劣化を推定することを目的として、覆工の健全部と不健全部において常時微動計測による振動特性の違いの確認と、観測データを AR モデル (Autoregressive Model) にモデル化し、AR 係数から健全および不健全の違いを読み取る試みがされた。蔣氏ら²⁷⁾はひび割れがほとんど見られない健全部と漏水を伴うひび割れが発生している不健全部の覆工において常時微動計測を行い、フーリエスペクトルを求めて健全部と不健全部の振動特性の違いを確認している。さらに山内氏ら²⁸⁾は、覆工背面空洞とひび割れがある不健全部、ひび割れのみ不健全部、空洞もひび割れもない健全部の覆工において常時微動計測を行い、背面空洞の存在により振動特性が影響を受ける可能性があることを指摘している。これらのように、ひび割れパターンや模型実験から残存耐力を評価する試みや、常時微動計測から得た振動特性とひび割れや背面空洞との関連を研究されているが、定量データ化したひび割れ分布と覆工本体の振動特性を関連付けた健全度評価手法に関する研究事例は確認できていない。トンネル定期点検で把握されたひび割れ発生の状況と覆工本体の振動特性を組み合わせ、簡易な方法で覆工の剛性を評価することができれば、効果的な補修・補強工法を選定するための対策方針を早期に決めることが可能となるのではと考える。

1.3 本論文の位置づけ

人力のみによる近接目視点検と点検技術者の経験に基づく能力に依存した健全度評価のみでは、効率的、統一的かつ正確な定期点検、健全性の診断、措置、記録のメンテナンスサイクルをまわすことは困難と考えられる。近接目視および点検技術者の支援に資するイ

ノバージョンによる課題解決が必要であることは、道路トンネル定期点検要領に、「今後、調査技術者が近接目視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」と記載されていることから明らかである⁸⁾。そこで本研究の成果である、トンネル覆工表面に発生するひび割れ、はく落危険箇所、漏水、遊離石灰などの変状を近接目視の実施前に覆工表面画像から技術者の観察もしくは画像解析により自動抽出する「トンネル覆工点検システム」を用いた近接目視の支援と、画像解析により自動抽出したひび割れデータを用いた健全度評価、覆工本体の剛性に着目した簡易的な計測手法および剛性評価手法は、点検から記録までのメンテナンスサイクルの効率化に資することを旨とした論文と位置付けるものである。

1.4 研究の目的

本研究は、今回改定された国土交通省の道路トンネル定期点検要領⁸⁾と、NEXCOの保全点検要領（構造物編）²⁹⁾について定期点検方法を解説、比較し、定期点検実施上の課題を整理し、解決策について研究を行うものである。

本研究の内容は、まずトンネル定期点検の分野において、人力で行っている現場でのひび割れのスケッチと内業による図面化を省力化することを目的とし、トンネル坑内を通行しながらトンネル覆工表面画像を取得する「覆工表面画像撮影車両」、撮影データを用いて合成処理を行う「覆工表面画像合成ソフトウェア」、覆工表面画像を解析してひび割れを自動抽出する「ひび割れ自動抽出ソフトウェア」で構成する「トンネル覆工点検システム」を新たに開発して、ひび割れ自動抽出精度の検証、NEXCOの健全度評価基準への適用検証を行う。

また、定期点検の健全度評価に考慮されていない覆工の剛性について、簡易的に評価する新たな手法を確立することを目的として、トンネル覆工のひび割れと振動特性に着目し、覆工表面画像およびフラクタル次元解析により定量化したひび割れ分布状況と、覆工の常時微動計測による振動特性との相関性を検証する。

そして、実際の道路トンネルの補強検討において、覆工表面画像からひび割れを抽出し、NEXCOの健全度評価を行った事例を紹介し、さらに、フラクタル次元によるひび割れ定量化手法の妥当性検証と、常時微動計測とNEXCO健全度評価結果との比較検証を行う。

更に、覆工の補強対策工施工前後における、常時微動計測による補強対策効果の評価の可能性について研究する。

最後にまとめとして、新たな剛性評価手法の確立の可能性と将来展望について言及する。

1.5 論文の構成

図 1.5-1 に論文構成のフローチャートを示す。本論文は9章から構成している。各章の内容を要約すると以下のとおりである。

第1章では、本論文の背景および関連する既往研究について述べ、本論文の位置づけと目的を明らかにするとともに、本論文の構成をまとめた。

第2章では、2014年に改訂された道路トンネル定期点検要領⁸⁾、2015年に改訂された道路トンネル維持管理便覧²⁹⁾、2015年に改訂された保全点検要領（構造物編）³⁰⁾について、点検方法や対策区分の判定、健全性診断、措置、記録について解説し、各要領を比較するとともに、現状の道路トンネル定期点検における課題を整理した。

第3章では、NEXCOの健全度評価手法として運用されている、トンネル覆工に発生するひびわれの分布を定量化する手法について概説した。そして、本研究で提案するひび割れ分布定量化手法として、フラクタル次元解析を提起し、その適用性について検証した。

第4章では、トンネル定期点検の効率化を目的として開発した、「トンネル覆工表面撮影車両」、「覆工表面画像合成ソフトウェア」、「ひび割れ自動抽出ソフトウェア」で構成する「トンネル覆工点検システム」について言及し、「ひび割れ自動抽出ソフト」を用いたひび割れ自動抽出精度の検証を実施した。

第5章では、第3章で提案したフラクタル次元解析と、現地トンネル覆工の常時微動計測によるフーリエスペクトルとの相関性を検証した。

第6章では、NEXCOの健全度評価手法に対するひび割れ自動抽出結果の適用性の検証と、TCIとフラクタル次元の相関性について検証した。

第7章では、長崎自動車道日岳トンネルにおいてトンネル覆工のひび割れ分布をTCIにより定量化し、健全度評価を行った結果から詳細調査を行い、補強工法を選定した実績について述べた。また、第6章で検証したTCIとフラクタル次元の相関性について、本トンネルの全スパンを対象に再検証した。更に、NEXCOの健全度評価結果とフーリエスペクトルとの関連を検証し、フラクタル次元とフーリエスペクトルを組み合わせた剛性評価手法の可能性について検証した。

第8章では、異なる時期に実施した2回の常時微動計測結果の再現性と、補強工事を実施した覆工における、補強工事前後の常時微動計測結果の変化について検証した。

第9章では、本研究の統括として、各章の研究成果を要約した。

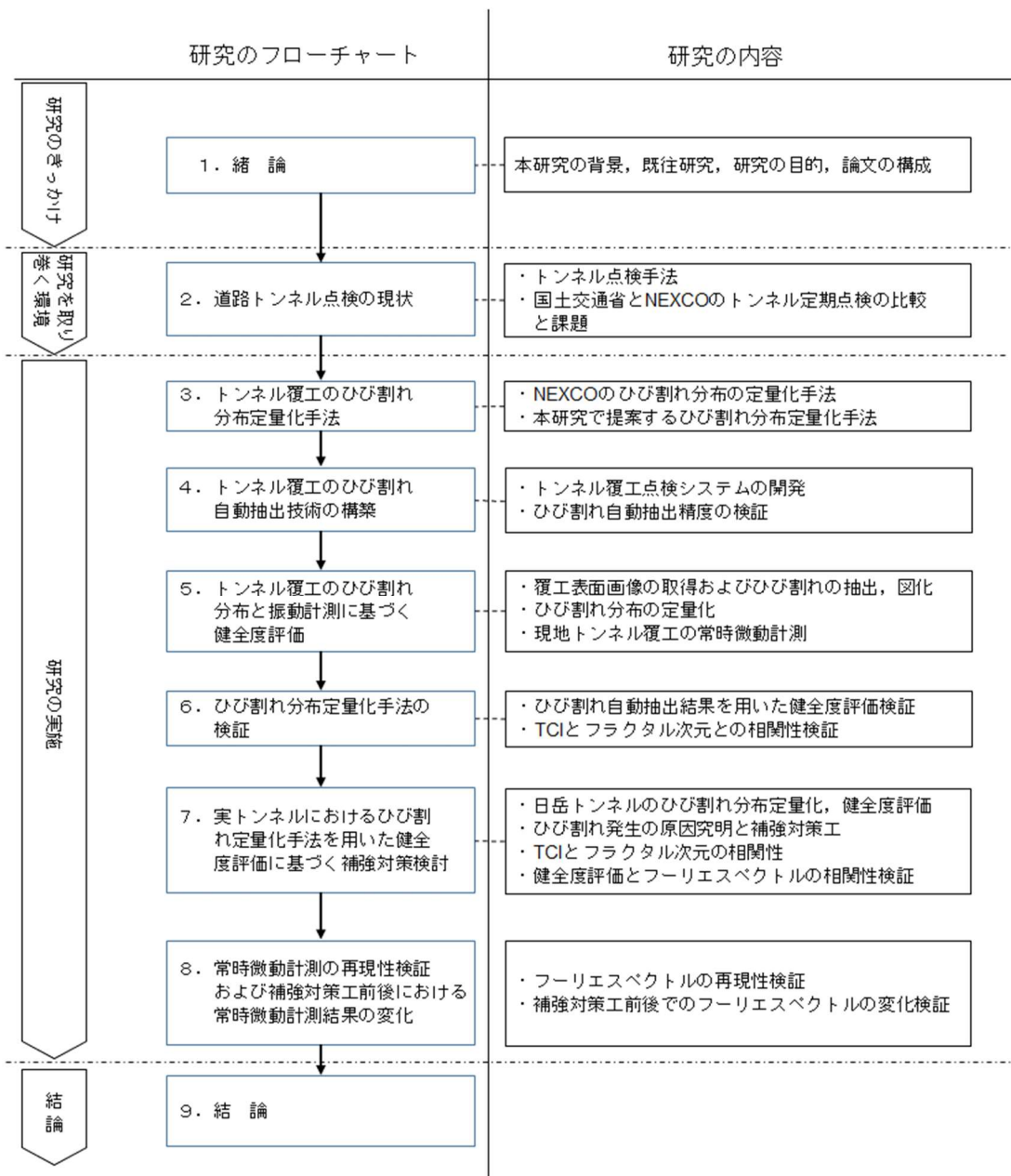


図 1.5-1 論文構成のフローチャート

参考文献

- 1) NEXCO 西日本：ニュースリリース， corp.w-nexco.co.jp/newly， 2017.07.15
- 2) JR 西日本：ニュースリリース， <https://www.westjr.co.jp/smt/press>， 2017.07.15
- 3) 国土交通省：報道発表資料， www.mlit.go.jp/report/press/， 2017.07.15
- 4) 国土交通省：社会資本に関する実態の把握結果（試行版），第5回社会資本メンテナンス戦略小委員会， p.3， 2013
- 5) 国土交通省：道路統計年報 道路の現況 表3 道路実延長内訳の総括表， 2016
- 6) 国土交通省：鉄道統計年報 停車（留）場、線路建造物、立体交差、枕木数量及び道床延長表， 2014
- 7) 国土交通省：国土交通白書 図表 1-1-1， 図表 1-1-2， 2016
- 8) 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， 2014.6
- 9) 道路法施行規則（昭和二十七年建設省令第二十五号）
- 10) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報， p.2， 2016.8
- 11) 国土交通省：報道発表資料次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野， <http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15-hh-000104.html>， 2014.12.25
- 12) 国土交通省：報道発表資料 2015 年度次世代社会インフラ用ロボット現場検証・評価結果の公表について， <http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15-hh-000149.html>， 2016.3.30
- 13) 新都市社会技術融合創造研究会：道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト，道路トンネルの健全性評価技術の研究成果報告書， 2010
- 14) 新都市社会技術融合創造研究会：走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化プロジェクト，走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究報告書， 2013
- 15) 半田兼一，大西有三，西山哲，矢野隆夫，西川啓一，下澤正道：デジタル画像処理を利用したひび割れ抽出による道路トンネル健全性評価，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号3，土木学会， pp.13-18， 2008.1
- 16) 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， 2010.9
- 17) 鶴飼正人，下田一也：ラインセンサカメラを用いたトンネル変状検査システム，建設の施工企画， pp.35-40， 2011.11
- 18) 河村圭，村上慧季，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, pp. I -114- I -122, 2015
- 19) 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, pp.I-1-I-8, 2015
 - 20) 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巻報告(47), pp.371-376, 2003
 - 21) 重田佳幸, 飛田敏行, 亀村勝美, 進士正人, 吉武勇, 中川浩二, : ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価法, 土木学会論文集 F Vol.62, No.4, pp.628-632, 2006.10
 - 22) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫: 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, 2007.3
 - 23) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 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, 2009.1
 - 24) 安保秀範, 田中雅弘, 吉田典明: 水路トンネル管理支援システムの開発, 電力土木, No.287, pp.42-46, 2000.5
 - 25) 佐野信夫, 伊藤哲男, 馬場弘二, 小島芳之, 津野究, 川島義和, 松岡茂: ひび割れ進展と剛性変化に基づいたトンネル覆工の健全度評価, 土木学会論文集 F Vol.62, No.2, pp.194-202, 2006.4
 - 26) 糸井謙介, 須藤敦史, 丸山収, 佐藤京, 西弘明: 寒冷地のトンネル覆工における常時微動記録を用いた劣化推定に関する研究, 土木学会トンネル工学報告集第22巻, pp.277-280, 2012.11
 - 27) 蔣宇静, 谷川征嗣, 山内淑人, 安田亨, 田近宏則: 常時微動計測に基づくトンネル覆工の健全度評価手法の提案, トンネル工学報告集, 第20巻, pp.205-209, 2010
 - 28) 山内淑人, 蔣宇静, 李博, 小川能克, 大嶽剛志: 常時微動計測によるトンネル覆工コンクリート健全度評価の可能性, JCROSSAR 2011 論文集, pp.645-648, 2011
 - 29) 西日本高速道路株式会社: 保全点検要領 (構造物編), 2015.4

第2章 道路トンネル点検の現状

2.1 概説

2012年12月2日に発生した中央自動車道上り線笹子トンネルの天井板落下事故を機に検討された点検手法が、去る2014年3月31日、道路法施行令第35条の2第2項の規定に基づき、道路法施行規則において道路の維持・修繕に関する具体的な基準等を定めるため、「道路法施行規則の一部を改正する省令」および「トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示」が公布された。また道路の維持修繕に関する省令、告示が次のとおり制定、施行され、道路管理者の義務が明確化された¹⁾。

- ① 国が定める統一的な基準により、5年に1回の頻度で近接目視により点検を行うことを基本とする。
- ② 点検、診断の結果等について、記録、保存する。
- ③ 統一的な尺度で健全性の診断結果を分類する。

トンネル定期点検に関しては、2014年6月に「道路トンネル定期点検要領（国土交通省道路局）」²⁾および、「道路トンネル定期点検要領（国土交通省道路局国道・防災課）」³⁾（以下、「道路トンネル定期点検要領」という）が公表された。前者は、道路法施行規則第4条の5の2の規定に基づいて行うことが義務付けられた定期点検について、最小限の方法、記録項目を具体的に記されており、後者は、道路の重要度や施設の規模等を踏まえて各道路管理者が必要に応じて、より詳細な点検、記録を行う場合の参考という位置づけとなっている。2015年6月には、「道路トンネル維持管理便覧【本体工編】：公益社団法人日本道路協会（以下、「維持管理便覧」という）⁴⁾が改訂され、主として直轄版要領の内容を補完し、より具体的な知見について記された内容となっている。

定期点検の目的は、道路トンネル定期点検要領によると、「道路トンネルの変状、異常を把握、診断し、当該道路トンネルに必要な措置を特定するために必要な情報を得るものであり、トンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ること」とされている³⁾。維持管理便覧ではより具体的に、「近接目視等によりトンネルの変状を把握して、利用者被害の可能性のあるコンクリート等のうき、はく離部等の撤去や、付属物の取り付け状態の改善等を行う応急措置を講じる。また変状等に対して、次回定期点検までに必要な応急対策、本対策及び監視の判断を行う上で必要な情報を得るために、必要に応じて調査も併せて実施するなど安全で効果的な維持管理を行うことを目的」としている⁴⁾。

一方で、NEXCO では保全点検要領構造物編（以下、「保全点検要領」という）が 2015 年 4 月に改訂され、点検の目的は、「道路法四十二条，同施行令第三十五条の二，同施行規則第四条五の二を遵守して，安全な道路交通を確保するとともに，第三者等被害を未然に防止するため，および構造物を長期的に良好な状態に維持管理するために，構造物の状況を的確に把握・評価し，必要な対策や措置を決定することを目的」と，法律に準じた点検を実施することが義務付けられている．次節に，国土交通省の道路トンネル定期点検要領および，NEXCO の保全点検要領によるトンネル定期点検方法について述べる．

2.2 トンネル定期点検方法

2.2.1 用語の定義

国土交通省と NEXCO では，語形は異なるが意味は互いに類義している用語がある．表 2.2-1 に用語対照表を示す．本論文において両要領に共通している内容については道路トンネル定期点検要領の用語を使用するものとする．

表 2.2-1 用語対照表³⁾⁴⁾

| 道路トンネル 定期点検要領 | 保全点検要領 | 道路トンネル定期点検要領の定義 |
|------------------|-----------------|---|
| 定期点検 | 詳細点検 | 一定の期間ごとに定められた方法で点検を実施し、必要に応じて調査を行い、その結果を基にトンネルごとの健全性を診断し、記録を残す。 |
| 点検 | 点検 | トンネル本体工の変状やトンネル内付属物の取り付け状態の異常を発見し、その程度を把握することを目的に、定められた方法により、必要な機器を用いてトンネル本体工の状態やトンネル内付属物の取り付け状態を確認することをいう。必要に応じて応急措置を実施する。 |
| 近接目視 | 近接目視 | 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い、変状の状況を観察し、必要に応じてひび割れの位置、長さ、幅、段差等をクラックスケール等で計測することをいう。 |
| 打音検査 | 打音点検 | 頭部重量 100~300g 程度の点検用ハンマを用いて打診し、コンクリートのうき、はく離の有無とその範囲およびボルト、ナットの緩みなどの異常の有無を確認することをいう。 |
| 調査 | 標準調査 詳細調査 | 点検により発見された変状の状態や原因等をより詳しく把握し、対策の必要性及びその緊急性を判定するとともに、対策を実施するための設計・施工に関する情報を得ることをいう。 |
| 健全性の診断 | 健全度評価 健全性の診断 | 点検または調査結果により把握された変状・以上の程度を判定区分に分類することをいう。定期点検では、変状等の健全性の診断と、トンネルごとの健全性の診断を行う。 |
| 記録 | 記録 | 点検結果、調査結果、健全性の診断、措置または措置後の確認結果は適時、点検結果の記録様式に記録する。 |
| 応急措置 | 応急対策 | 点検作業時に、利用者被害の可能性のあるコンクリートのうき・はく離部を撤去したり、付属物の取り付け状態の改善等を行うことをいう。 |
| 措置 | 措置 | 点検・調査の結果に基づいて、トンネルの機能や耐久性等を回復させることを目的に対策、監視を行うことをいう。 |
| 応急対策 | 応急対策 | 定期点検等で、利用者被害が生じる可能性が高い変状が確認された場合、調査や本対策を実施するまでの期間に限定し、短期的にトンネルの機能を維持することを目的として適用する対策をいう。 |

表 2.2-1 用語対照表³⁾⁴⁾

| 道路トンネル 定期点検要領 | 保全点検要領 | 道路トンネル定期点検要領の定義 |
|------------------|------------------------|--|
| 本対策 | 対策(補修, 補強, 撤去, 取替等) | 中～長期的にトンネルの機能を回復・維持することを目的として適用する対策をいう。 |
| 監視 | 監視 | 応急対策を実施した個所, もしくは健全性の診断の結果, 当面は応急対策または本対策の適用を見送ると判断された箇所に対し, 変状の挙動を追跡的に把握することをいう。 |
| トンネル 本体工 | トンネル 構造物 | 覆工, 坑門, 内装板, 天井板, 路面, 路肩, 排水施設及び補修・補強材をいう。 |
| 点検員 | 点検技術者 | 点検作業に臨場して点検作業班の統括および安全管理を行う。また, 利用者被害の可能性がある変状・異常を把握し, 応急措置や応急対策, 調査の必要性等を判定する。 |
| 点検補助員 | — | 点検員の指示により変状・異常個所の状況を具体的に記録するとともに, 写真撮影を行う |
| 変状 | 変状(初期欠陥, 損傷, 劣化) | トンネル本体工の覆工, 坑門, 天井板本体等に発生した劣化の総称をいう。 |
| 異常 | — | トンネル内付属物やその取付金具に発生した不具合の総称をいう。 |
| 外力 | 外力 | トンネルの外部から作用する力であり, 緩み土圧, 偏土圧, 地すべりによる土圧, 膨張性土圧, 水圧, 凍上圧等の総称をいう。 |
| 材質劣化 | 材料劣化 | 仕様材料の品質が時間の経過とともに劣化が進行するものであり, コンクリートの中酸化, アルカリ骨材反応, 鋼材の腐食, 凍害, 塩害, 温度変化, 乾燥収縮等の総称をいう。 |
| 漏水 | 漏水 | 覆工背面地山の地下水が, 覆工コンクリートに生じたひび割れ箇所や目地部を通過し, トンネル坑内側に流出するなどの現象の総称をいう。 |
| 記録 | 記録 | 点検・調査結果, 健全性診断, 措置または措置後の確認結果は適時, 点検結果の記録様式に記録する。 |

2.2.2 国土交通省のトンネル定期点検方法

(1) トンネル定期点検の手順

図 2.2-1 にトンネル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

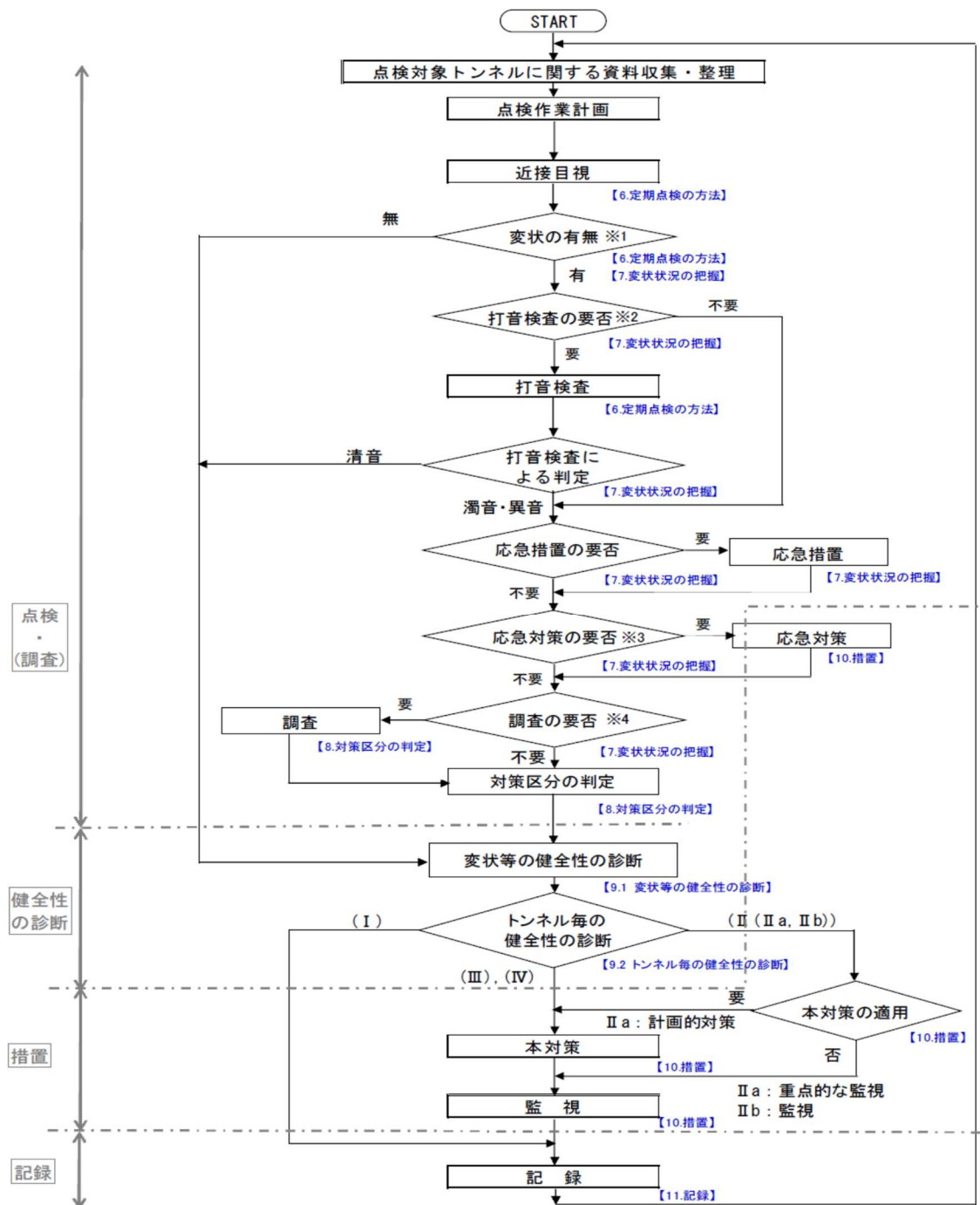


図 2.2-1 トンネル定期点検を対象としたメンテナンスサイクルの基本的なフロー³⁾

す。

道路トンネルの維持管理では、メンテナンスサイクル（点検、診断、措置、記録）を定められた期間で確実に実施することが重要である。トンネル定期点検は、メンテナンスサイクルのうち、巡回等の日常的な維持管理や事故と災害時の緊急的な維持管理とを区別し、定められた頻度や方法で点検を実施し、その結果を定量的・定性的に診断して点検表に記録を残す一連の行為を指す。トンネル定期点検の目的は、道路トンネルの変状・異常を把握、診断し、当該道路トンネルに必要な措置を特定するために必要な情報を得るものであり、安全で円滑な交通の確保や第三者への被害の防止を図るなど、トンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることである。トンネル定期点検の実施方法は、近接目視により行い、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査を併用して行う。

(2) トンネル定期点検の頻度

トンネル定期点検は、5年に1回の頻度で実施することを基本とする。トンネルの状態によっては5年より短い間隔で点検する。また、初回の定期点検は、覆工打設完了後1年から2年の間に実施するのが望ましい。これは、初期の段階に発生したトンネルの変状、異常を正確に把握した記録が、以後の維持管理に有効な資料となるためである。

(3) トンネル定期点検の体制

トンネル定期点検は、現場にてトンネルの変状や異常を確実に抽出し、利用者被害を防止するための応急措置及び調査の必要性などを判断する。点検員は、これらを実行するためにトンネルに関する一定の知識および技能を有することが望ましいとされている。また調査技術者は、点検結果に基づき変状の要因、進行性を把握するための調査を計画、実行し、変状等の健全性の診断を行い、本対策の必要性およびその緊急性の判定を行うとともに、覆工スパンごとの健全性を診断し、その結果を総合してトンネルごとの健全性の診断を行う。調査技術者は、これらを実行するためにトンネルの変状に関する必要な知識および技能を有することが望ましいとされている。

点検技術者および調査技術者に必要な資格要件を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-2 点検技術者および調査技術者の資格要件³⁾

| 技術者名 | 資格要件 |
|-------|--|
| 点検技術者 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 大学卒業後、5年以上のトンネルに関する実務経験を有するもの ・ 短大、高専卒業後、8年以上のトンネルに関する実務経験を有するもの ・ 高校卒業後、11年以上のトンネルに関する実務経験を有するもの ・ 前項と同等以上の能力を有すると道路トンネルの管理者が認めたもの |
| 調査技術者 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 技術士（トンネル） ・ RCCM（トンネル） |

(4) トンネル定期点検の方法

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により観察するが、うきやはく離などが懸念される個所に対しては、うき、はく離の有無および範囲などを把握する打音検査を行うとともに、利用者被害の可能性のあるコンクリートのうき、はく離部を撤去するなどの応急措置を講じる。初回点検においては、トンネルの全延長、全面に対して近接目視に打音を併用する。2回目以降の打音検査は必要に応じて行う。

特筆すべきは、「今後、調査技術者が近接目視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³⁾と記載されており、点検を近接目視と同等以上のレベルを確保しつつ効率的に実施することを目的とした新技術が期待されていることがわかる。

定期点検において変状や異常を発見した場合は、覆工スパン番号、部位区分、変状、異常の種類などとともに、前回点検時の状態との差異が把握できるように記録する。打音検査の際に打音を発するうき、はく離があると判断された個所は、ハンマを用いてできる限り撤去する。撤去作業に用いるハンマは、変状や作業効率等を考慮して適切なものを使用する。撤去した個所は、コンクリート片が残らないよう丁寧に清掃を行う。

(5) 対策区分の判定

対策区分の判定は、トンネルの変状、異常が利用者には及ぼす影響を詳細に把握し、適切な措置を計画するために行うものであり、従来の点検、調査結果の判定と同様に、点検、調査実施後に変状等に対して判定を行う。変状状況の把握に基づき、変状、異常を判定の単位とし、健全性を診断する。変状の判定区分を表 2.2-3 に示す。

表 2.2-3 変状の判定区分³⁾

| 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 | 早晚、利用者に対して影響が及び可能性が高いため、早期に対策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（早期に措置を講じる必要がある状態から交通解放できない状態まで）に対策を講じる必要がある状態 | |

判定にあたり、原因の特定など調査が必要な場合には、現状原因を推定するための調査を行う。調査は変状の状態に応じて調査項目を適宜選定する。なお、調査の結果から本対策の必要性や緊急性を踏まえて変状等の健全性を診断する。調査が不要で、応急対策の実施に代えて本対策を実施することが合理的な場合があるため、対策区分の判定では、変状の状況の把握による結果、対策の緊急性を含めて総合的に判断する。

トンネル本体工の場合、変状状況の把握結果に基づき、変状の健全性診断を材料劣化、漏水、外力という変状区分に対して I～IV に区分する。表 2.2-4 に示す変状区分に対する変状の種類を示す。また、変状種類別判定区分を表 2.2-5、表 2.2-6、表 2.2-7、表 2.2-8、表 2.2-9、表 2.2-10 に示す。なお、本表に示すように、変状はその原因が複合しているケースがあるため、現場の状況に応じて総合的に判断することが望ましい。

表 2.2-4 変状区分に対する変状の種類との関係³⁾

| 変状種類 | 変状区分 | | |
|---------------|------|------|----|
| | 外力 | 材料劣化 | 漏水 |
| ①圧ざ、ひび割れ | ○ | | |
| ②うき、はく離 | ○ | ○ | |
| ③変形、移動、沈下 | ○ | | |
| ④鋼材腐食 | | ○ | |
| ⑤有効巻厚の不足または減少 | | ○ | |
| ⑥漏水等による変状 | | | ○ |

表 2.2-5 圧ざ, ひび割れに対する判定区分³⁾

表-解 8.4, 表-解 8.5 をもとに再構成. 幅と長さの対応は各丸印で表す.

| 区分 | 目安 | | | | | | |
|-----|--------------------------------------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|
| | ひび割れの状況 | 幅 | | | 長さ | | |
| | | 5 mm 以上 | 3~5 mm | 3 mm 未満 | 10m 以上 | 5~10m | 5m 未満 |
| I | 生じていない. 生じていても軽微措置必要なし | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| II | II b 進行が認められない 監視必要 | ◎ | | ○ | ○ | ○ | ○○◎ |
| | II a 進行が認められる 計画的対策必要 | ◎ | ● | ○ | ○ | ○ | ○●◎ |
| III | 密集している. またはせん断ひび割れ等がある 早期に対策必要 | ◎ | ○ | | ○ | ○○◎ | ◎ |
| IV | 大きく密集している. またはせん断ひび割れ等がある 緊急に対策必要 | ○ | | | ○ | | |

表 2.2-6 うき, はく離に対する判定区分³⁾

表-解 8.8, 表-解 8.9 をもとに再構成.

| 区分 | 目安 | | | | | |
|-----|----------------------------------|-------------|-------------------------------|------------------|---|--|
| | うき, はく離の状況 | 打音異常あり | ひび割れ等の状況 | 打音異常なし | ひび割れ等の状況 | |
| I | うき, はく離の兆候がない 措置必要なし | | | | | |
| II | II b うき, はく離の兆候がある 監視必要 | ○ | 閉合の恐れがない | ○ ○ ○ ○ | 閉合の恐れがない 閉合が懸念される 閉合しブロック化 補修材等の劣化 豆板等の劣化 | |
| | II a うき, はく離の兆候がある 計画的対策必要 | | | ○ ○ ○ | 閉合しブロック化 補修材等の劣化 豆板等の劣化 | |
| III | うき, はく離等が見られる 早期に対策必要 | ○ ○ | 閉合が懸念される 補修材等の劣化 | ○ ○ ○ | 閉合しブロック化 補修材等の劣化 豆板等の劣化 | |
| IV | うき, はく離等が顕著にみられる 緊急に対策必要 | ○ ○ ○ | 閉合しブロック化 補修材等の劣化 豆板等の劣化 | | | |

表 2.2-7 変形，移動，沈下に対する判定区分³⁾

表-解 8.11，表-解 8.12 をもとに再構成.

| 区分 | 目安 | | | | |
|-----|--------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|--------------|
| | 変形等の状況 | 変形速度 (mm/年) | | | |
| | | 10 以上 (著しい) | 3~10 (進行あり) | 1~3 (進行あり~ 緩慢) | 1 未満 (緩慢) |
| I | 生じていないまたは 軽微， 措置不要 | | | | |
| II | II b | 生じ，進行が停止 監視必要 | | | ○ |
| | II a | 生じ，進行が緩慢 重点的監視，計画的 対策 | | ○ | ○ |
| III | 生じ，進行がある 早期に対策必要 | | ○ | ○ | |
| IV | 生じ，進行が著しい 緊急に対策必要 | ○ | | | |

表 2.2-8 鋼材腐食に対する判定区分³⁾

表-解 8.14 をもとに再構成.

| 区分 | 目安 | |
|-----|--|----------------------------|
| | 鋼材腐食の状況 | |
| I | 生じていないまたは軽微，措置不要 | |
| II | II b | 表面的あるいは小面積の腐食あり，監視必要 |
| | II a | 孔食あるいは鋼材全周のうき錆，重点的監視，計画的対策 |
| III | 腐食により鋼材の断面欠損がみられ，構造用鋼材として機能が損なわれている，早期に対策必要 | |
| IV | 腐食により鋼材の断面欠損がみられ，構造用鋼材として機能が著しく損なわれている，緊急に対策必要 | |

表 2.2-9 有効巻厚の不足または減少に対する判定区分³⁾

表-解 8.16, 表-解 8.17 をもとに再構成.

| 区分 | 目安 | | | |
|-----|--|-----------|---------|--------|
| | 有効巻厚の不足または減少の状況 | 有効巻厚／設計巻厚 | | |
| | | 1/2 未満 | 1/2~2/3 | 2/3 以上 |
| I | ないまたは軽微, 措置不要 | | | |
| II | II b 断面強度への影響がほとんどない 監視必要 | | | ○ |
| | II a 不足, 減少し構造物の機能が損なわれる 可能性 重点的監視, 計画的対策 | | ○ | |
| III | 不足, 減少し構造物の機能が損なわれた 早期に対策必要 | ○ | ○ | |
| IV | 著しく不足, 減少し構造物の機能が著しく 損なわれた 緊急に対策必要 | ○ | | |

表 2.2-10 漏水等による変状に対する判定区分³⁾

表-解 8.19, 表-解 8.20 をもとに再構成.

| 区分 | 目安 | | |
|-----|---|---------|---|
| | 漏水の状況 | 利用者への影響 | |
| | | 有 | 無 |
| I | なし, あっても利用者安全性影響なしまたは軽微 措置不要 | | |
| II | II b 浸出あり, 利用者の安全性ほとんど影響なし 監視必要 | | ○ |
| | II a 滴水あり, 将来的に利用者の安全性損なう可能性あり, 排水不良による舗装面に滞水の恐れあり 重点的監視, 計画的対策 | ○ | |
| III | 流下あり, 排水不良による舗装面に滞水があり利用者の安全性損なう可能性, 早期に対策 | ○ | |
| IV | 噴出あり, 漏水に伴う土砂流出による舗装の陥没や沈下の可能性あり, 寒冷地でつららや側氷等により利用者の安全性損なう 緊急に対策 | ○ | |

(6) 健全性の診断

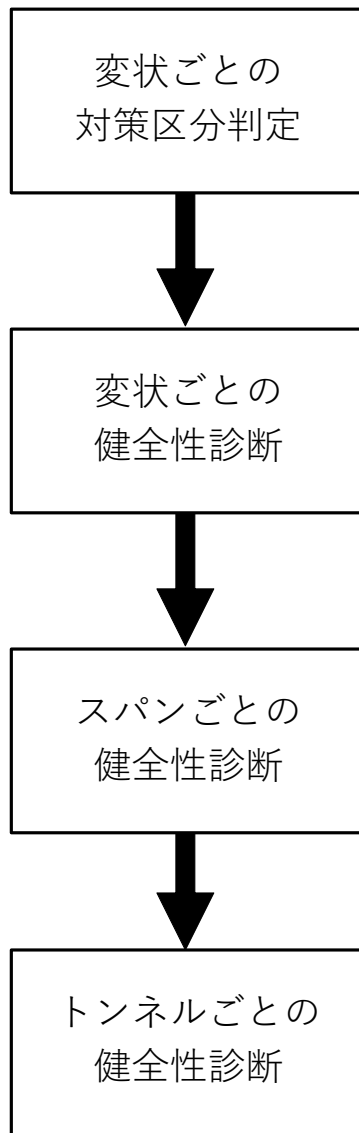
健全性の診断は、定期点検にて変状状況を把握した結果と対策区分の判定結果に基づいて行う。健全性の診断の流れを図 2.2-2 に示す。健全性の診断は、「変状等の健全性の診断」を実施後に構造物単位で実施する「トンネルごとの健全性の診断」の2段階で行う。

1) 変状等の健全性診断

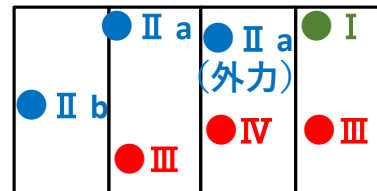
変状等の健全性診断は、変状ごとの対策区分の判定結果に基づき変状区分を材料劣化、漏水、外力に分類し、I からIVの区分により行う。判定区分の定義と措置を表 2.2-11 に示す。なお、診断は材料劣化または漏水に起因する変状はそれぞれの変状単位に、外力に起因する変状はスパン単位に行う。また、本対策の必要性およびその緊急性の判定を行う。

2) トンネルごとの健全性の診断

トンネルごとの健全性の診断は、変状等の健全性診断結果をもとに、トンネル構造物としての健全性を診断するものであり、道路トンネルの管理者が保有するトンネルを含む構造物を一括管理し、効率的な維持管理を行うための指標となるよう、全構造物で統一した判定区分を与えることを目的としている。診断は、一般としては利用者や構造物の機能に影響を及ぼす変状等に注目して、最も厳しい変状等の評価で代表させることができる。ただし、スパンごと及びトンネルごとの健全性の診断はトンネル本体工に関する健全性の診断の結果に基づいて行うものとする。判定区分は、変状等の健全性診断と同じI からIVの区分により行う。



スパン1 スパン2 スパン3 スパン4



スパン1 スパン2 スパン3 スパン4

| | | | | |
|----|----|-----|------|-----|
| 外力 | | III | II a | |
| 材料 | II | | IV | III |
| 漏水 | | II | | I |
| 付属 | | | | |

スパン1 スパン2 スパン3 スパン4



トンネル



表-解 9.2.1 をもとに再構成.

図 2.2-2 健全性の診断の流れ³⁾

表 2.2-11 判定区分の定義と措置³⁾

表 9.1, 表-解 9.1.1 をもとに再構成.

| 区分 | | 状態 | 措置 |
|-----|--------|--|---|
| I | 健全 | 構造物の機能に支障が生じていない状態 | 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 | 予防保全段階 | 構造物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 | 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、または予防保全の観点から対策を必要とする状態 |
| III | 早期措置段階 | 構造物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 | 早晩、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に対策を講じる必要がある状態 |
| IV | 緊急措置段階 | 構造物の機能に支障が生じている、また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 | 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 |

(7) 措置

措置にあたっては、点検、調査の結果に基づいて、トンネルの機能や耐久性などを回復させるための最適な対応を道路トンネルの管理者が総合的に検討する。措置の区分は、適用する対策の効果と持続性、即応性、点検後に行われる調査の容易性などから、①応急対策、②本対策、③監視に分けられる。

1) 応急対策

応急対策とは、定期点検などで利用者被害が生ずる可能性が高い変状が確認された場合、調査や本対策を実施するまでの期間に限定し、短期的にトンネルの機能を維持することを目的として適用する対策であり、点検後速やかに実施することが重要である。利用者被害の危険性が高く、応急対策を実施するよりもさらに速やかに対応が求められる場合、交通規制などの応急措置を必要に応じて適用する必要があることに留意する。なお、応急対策を実施した変状に対しては、健全性の診断の判定区分は変更しない。はく落防止並びに漏水に対する応急対策の代表例を表 2.2-12 に示す。

2) 本対策

本対策とは、中～長期的にトンネルの機能を回復・維持することを目的として適用する対策である。本対策は、変状の種類により分類できる。表 2.2-13 にトンネル内から施工す

表 2.2-12 はく落防止並びに漏水に対する応急対策の代表例³⁾

| 変状区分 | 対策区分 | 応急対策の代表例 |
|-----------|---------|----------|
| 材質劣化による変状 | はく落防止対策 | はつり落とし工 |
| | | 金網・ネット工 |
| | | 当て板工 |
| | | 補強セントル工 |
| 漏水による変状 | 漏水対策 | 線状の漏水対策工 |
| | | 面状の漏水対策工 |

表 2.2-13 本対策の代表例³⁾

| 変状区分 | 対策区分 | 本対策の代表例 |
|-----------|---------|----------|
| 外力による変状 | 外力対策 | 内面補強工 |
| | | 内巻補強工 |
| | | ロックボルト工 |
| 材質劣化による変状 | はく落防止対策 | はつり落とし工 |
| | | 断面修復工 |
| | | 金網・ネット工 |
| | | 当て板工 |
| 漏水による変状 | 漏水対策 | 線状の漏水対策工 |
| | | 面状の漏水対策工 |
| | | 地下水位低下工 |
| | | 断熱工 |

る方向の代表例を示す。また、本対策の実施から2年程度以内に、措置後の確認として本対策を実施した個所に対して近接目視などを行い、本対策の効果が確実に実施されているかを確認する必要がある。なお、本対策を実施した変状個所に対しては、健全度の診断区分をIとすることを基本とする。

3) 監視

監視は、応急対策を実施した個所、もしくは健全性の診断の結果、当面は応急対策や本対策の適用を見送ると判断された個所に対し、変状の挙動を追跡的に把握するために行う。

表 2.2-14 に診断結果に対する監視の方法を示す。

表 2.2-14 診断結果に対する監視の方法³⁾

| 診断結果 | 監視方法 |
|----------------|--|
| Ⅱのスパン | 調査結果や変状など健全性の診断結果を踏まえ、適切な方法にて監視を行う |
| Ⅲのスパン | 前回の定期点検または監視から 2 年程度以内に近接目視などを実施する |
| Ⅳの応急対策を実施したスパン | やむを得ず早急に本対策までの措置ができない場合は、前回の定期点検から 2 年程度以内に近接目視などを実施する |
| Ⅱa の変状箇所 | 前回の定期点検または監視から 2 年後を目安に近接目視を行う |
| Ⅱb の変状箇所 | 日常巡視などで状況を把握することに努めるのを基本とする |

表 2.2-15 道路トンネルの点検表の構成および記載内容³⁾

| 点検表の構成 | 記載内容 | 様式 |
|--------|--|------|
| トンネル台帳 | トンネル諸元, 非常用施設諸元 (延長, 内空断面, 線形, 掘削工法など) トンネル情報一覧表 (スパン番号と距離の関係など) トンネル記録 (位置図, 断面図, 施工実績ほか) | A |
| 点検調書 | トンネル変状, 異常箇所写真位置図 点検結果総括表 (トンネル本体工) 点検結果総括表 (トンネル内付属物の取付状態) 調査, 措置の履歴 変状写真台帳 トンネル全体変状展開図 (図 2-3) 覆工スパン別変状詳細展開図 | C, D |
| 診断調書 | 診断結果 (変状単位) 診断結果 (覆工スパンごと, トンネルごと) | E |

(8) 記録

定期点検および診断の結果並びに措置の内容などを記録し、当該道路トンネルが利用されている期間中はこれを保存する。表 2.2-15 に道路トンネルの点検表の構成および記載内容を示す。図 2.2-3 にトンネル全体変状展開図の例を示す。

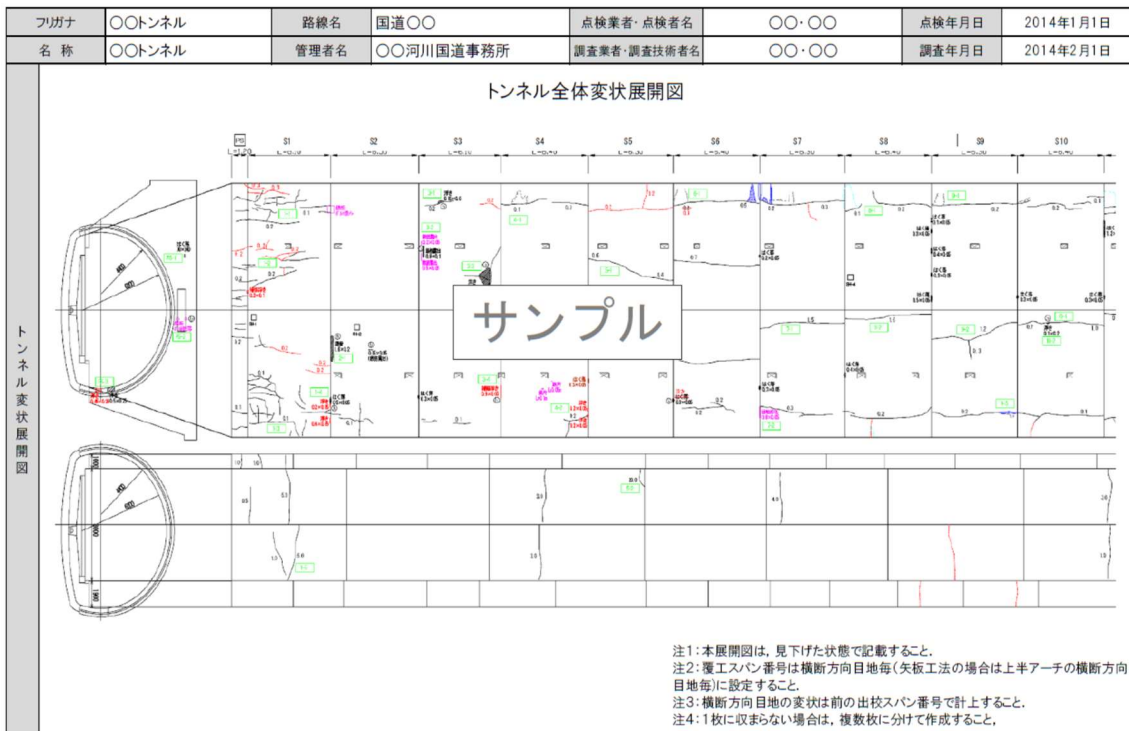


図 2.2-3 トンネル全体変状展開図の例³⁾

2.2.3 NEXCO のトンネル点検方法

(1) トンネル詳細点検の流れ

図 2.2-4 にトンネル詳細点検フローを示す⁵⁾。

トンネル詳細点検はトンネル全延長を対象として、トンネルの経年劣化や外力による変状状況を把握する点検である。本点検においてトンネルの損傷状況を細部にわたって把握し、評価することによって点検結果等のデータをもとに点検・調査計画および補修計画の立案を行う。したがって、点検にあたっては既存資料等により個々のトンネルの諸元はもちろんのこと、他の点検結果や補修・補強履歴などの状況も理解しておく必要がある。また、覆工表面画像撮影およびひび割れ展開図に基づき、目地部とその他一般部とに区分して、単位面積当たりのひび割れ密度を算出しておくことが望ましい。その結果を、設計要領第三集トンネル本体工保全編（変状対策）の関連箇所と照らし合わせ、補修計画策定の参考にするものとする。

トンネル詳細点検は、①トンネル詳細点検 A、②トンネル詳細点検 B、③トンネル詳細点検 C の 3 種類に区分されている。

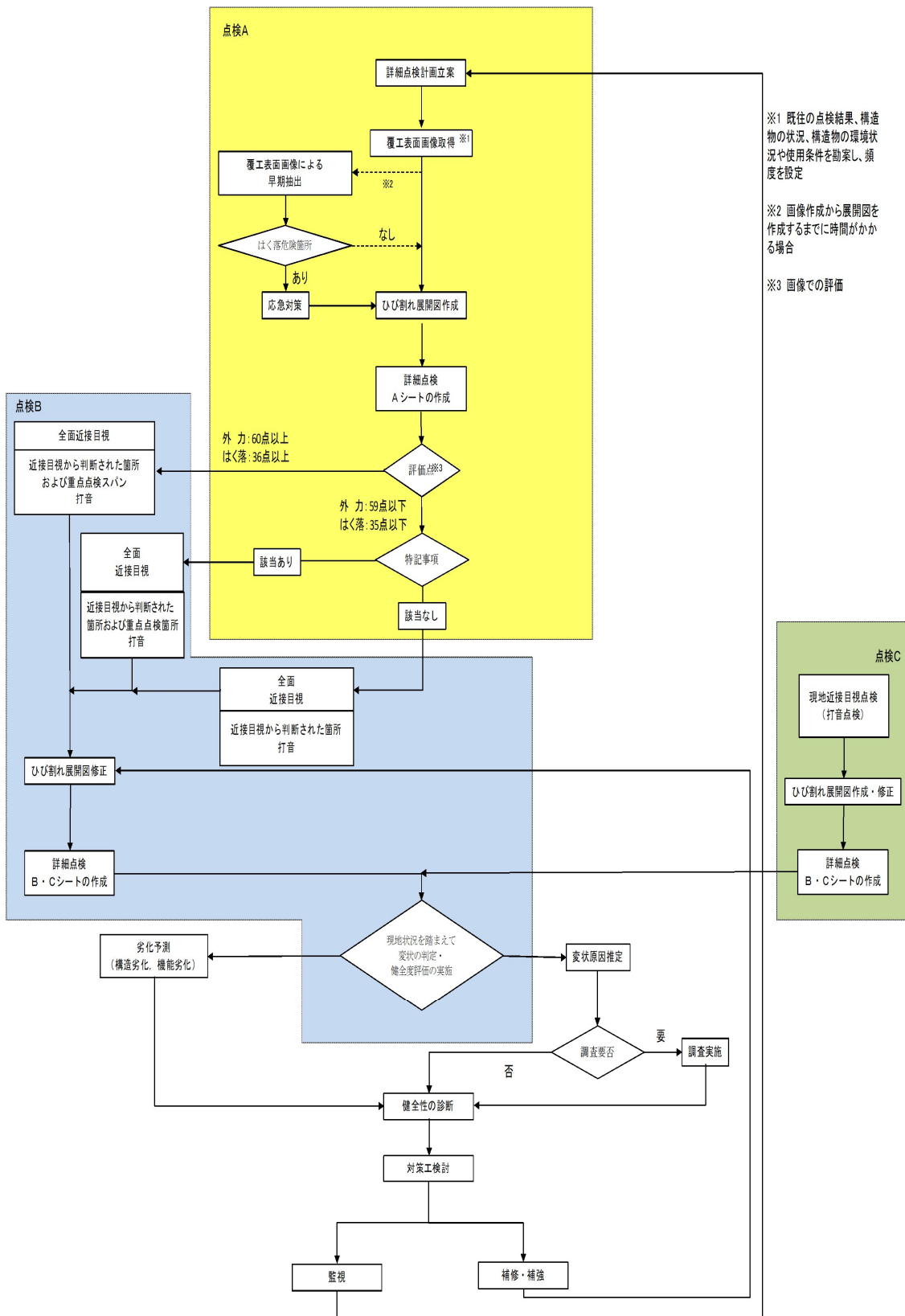


図 2.2-4 トンネル詳細点検フロー⁵⁾

1) トンネル詳細点検A

トンネル詳細点検Aは、トンネル覆工コンクリートのアーチ部および画像取得により判定可能な部分の坑門を対象とし、レーザー光などを用いた計測手法により覆工表面画像を取得し、ひび割れ展開図、詳細点検Aシートを作成し、これらに基づいて変状個別の抽出や、1スパンごとに「外力評価点」および「はく落評価点」を算出し、重点点検箇所および重点点検スパンの判定を行うものである。重点点検箇所および重点点検スパンとは次の事項をいう。

a) 重点点検スパン

- ①外力評価点が60点以上のスパン
- ②はく落評価点が36点以上のスパン

b) 重点点検箇所

- ①ひび割れ幅2mm程度のひび割れが連続して3m以上ある。
- ②ひび割れ幅3mm程度以上のひび割れがある。
- ③打継ぎ目に三日月状のひび割れがある。
- ④添架物のアンカー部およびその周辺に放射状ひび割れがある。
- ⑤モルタル系の補修材による既対策箇所がある。
- ⑥豆板などがあり、浮き、はく離の危険性がある。
- ⑦構造上問題があると判断されるひび割れがある。
- ⑧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。
- ⑨前回点検時のひび割れ展開図と比較して、新たに変状が発生した箇所。
- ⑩前回点検時に打音を実施している箇所。
- ⑪前回点検以降の補修、補強箇所およびその周辺。
- ⑫水平打継ぎ目、横断目地部およびその周辺、クラウン部、コールドジョイント

図 2.2-5 に上述の判定を行うためのデータシートである詳細点検Aシートを示す。

1.トンネル諸元等

スパンNo. 0

| | | | | | |
|--------|-----------|---|----------|---|-----|
| トンネル名 | 路線名 | | 管轄 | | |
| 所在地 | 自 | 自 | 距離標(STA) | 自 | IC |
| | 至 | 至 | | 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)

| 観察項目 | 数量 | 判定 | 有無 | |
|----------|---|-------|--------|--------------------------|
| 画像での先行判定 | ① 幅2mm程度のひび割れが3m以上ある | 本 | 点検Bの実施 | <input type="checkbox"/> |
| | ② 幅3mm程度以上のひび割れがある | 本 | 点検Bの実施 | <input type="checkbox"/> |
| | ③ 打ち継ぎ目に三日月型のひび割れがある | 箇所(本) | 点検Bの実施 | <input type="checkbox"/> |
| | ④ JF、標識等添架施設周辺に放射状のひび割れがある | 箇所(本) | 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割れがある | 箇所(本) | 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 | 箇所 | 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 | 箇所 | 点検Bの実施 | <input type="checkbox"/> |
| | ⑧ 外力健全度がⅢ-2～Ⅳ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 | 箇所 | 点検Bの実施 | <input type="checkbox"/> |

3.データシート

「数量」は必須入力ではない。入力有無は点検者判断とする。

【評価は、スプリングライン間のアーチとして一括で行う】

| 観察項目 | 判定区分 | | check | 外力 | はく落 | 備考 |
|---|-----------|----------|------------------------------|------------------------------|--|----|
| | 画像目視の判定 | | | | | |
| 1.ひび割れ幅・長さ・分布 | | | | 0 | 0 | |
| 2.ひび割れの方向性 | | | | 0 | 0 | |
| 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 | |
| 【外力判定】Ⅰ:30以下 Ⅱ:31～59 60以上詳細点検B実施 【はく落判定】36以上詳細点検B実施 【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。 | | | 評価点の合計 | | その他 | |
| コメント | | | 外力 | はく落 | 理由 | |
| | | | 0 | 0 | | |
| | | | ／100 | ／100 | <input type="checkbox"/> 特記事項による点検B <input type="checkbox"/> その他の理由による点検B | |
| | | | <input type="checkbox"/> 点検B | <input type="checkbox"/> 点検B | | |

前回詳細点検結果

| 対策実施 | 外力判定 | はく落判定 | 特記事項 |
|---|--|-------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 実施 <input type="checkbox"/> 未実施 | ／100 | ／100 | |
| 対策内容 | <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"/> 要調査 | | <input type="checkbox"/> 特記事項 |

注4) 上記特記事項には「その他の理由」も含む

注1) 特記事項がある場合は、詳細点検Bを実施する。

注2) その他の理由による点検B

- 1.前回点検時のひび割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

| | |
|----------|--------------------------|
| 詳細点検Aの実施 | <input type="checkbox"/> |
| 画像チェック | <input type="checkbox"/> |

注3) ひび割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

図 2.2-5 詳細点検 A シートの例⁶⁾

2) トンネル詳細点検B

詳細点検 B は、近接目視かつ打音を基本とする。打音は、近接目視で打音が必要と判断された個所、トンネル詳細点検 A の結果から選定した重点点検個所および重点点検スパンおよび、目地部、クラウン部、コールドジョイント、上下半打継目部において行う。トンネル詳細点検を行った結果を踏まえ、ひび割れ展開図を修正し、機能面および利用者の安全性に対する評価を行う。なお、健全度評価は、覆工への外力に関してのみスパンごとに行うこととし、はく落、漏水といった利用者の安全性に対する評価は個別変状に対する判定とする。

3) トンネル詳細点検C

トンネル詳細点検 C は、トンネル詳細点検 A および B の対象であるトンネル覆工コンクリートアーチ部以外の側壁、坑門、路面、内装板、排水施設、附属物を対象とする。点検手法は、第三者等被害想定範囲については近接目視かつ打音を行い、それ以外は近接目視を基本として必要に応じて触診や打音を行う。評価は、個別の変状に対して機能面および利用者の安全性に対する評価を行う。

図 2.2-6 に詳細点検 B および詳細点検 C の判定を行うためのデータシートである詳細点検 BC シートを示す。

| 1.トンネル諸元等 | | | | スパンNo. 1 | | | |
|-----------|----------|-----------|---|----------|---|-----|---|
| トンネル名 | サンプルトンネル | 路線名 | | 管轄 | | | |
| 所在地 | 自 | 距離標(KP) | 自 | 距離標(STA) | 自 | IC | 自 |
| | 至 | | 至 | | 至 | | 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 | 1 | 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) | | 覆工コンクリート | | | |

2.詳細点検B実施理由確認

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> | 外力評価点60点以上 | /100 |
| <input type="checkbox"/> | はく落評価点36点以上 | /100 |
| <input type="checkbox"/> | 幅2mm程度のひび割れが3m以上ある | |
| <input type="checkbox"/> | 幅3mm程度以上のひび割れがある | |
| <input type="checkbox"/> | 打ち継ぎ目に三日月状のひび割れがある | |
| <input type="checkbox"/> | J.F.標識等添架施設周辺に放射状ひび割れがある | |
| <input type="checkbox"/> | 構造上の問題があると判断されるひび割れがある | |
| <input type="checkbox"/> | モルタル系の補修材による既対策箇所が見られる | |
| <input type="checkbox"/> | 豆板、ジャンカなどがあり、浮き・はく落の危険性がある | |
| <input type="checkbox"/> | 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 | |
| <input type="checkbox"/> | その他の理由 | |

2.2詳細点検B実施チェック

| | |
|--------------------------|-------|
| <input type="checkbox"/> | /100 |
| <input type="checkbox"/> | /100 |
| <input type="checkbox"/> | 本 |
| <input type="checkbox"/> | 本 |
| <input type="checkbox"/> | 箇所(本) |
| <input type="checkbox"/> | 箇所(本) |
| <input type="checkbox"/> | 箇所(本) |
| <input type="checkbox"/> | 箇所 |
| <input type="checkbox"/> | 箇所 |
| <input type="checkbox"/> | 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】

| 観察項目 | 判定区分 | | check | 外力 | はく落 | 備考 |
|---------------|-----------|--------------------------|--------------------------|------|------|-----------------------------------|
| | 画像目視の判定 | | | | | |
| 1.ひび割れ幅・長さ・分布 | | | | 0 | 0 | |
| 2.ひび割れの方向性 | | | | 0 | 0 | |
| 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 | <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 | |
| 4.エプロンレスセス | 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 | |
| 評価点の合計 | | | | | | |
| 外力 | | | | 0 | 0 | <input type="checkbox"/> 全面点検 |
| | | | | /100 | /100 | <input type="checkbox"/> 特異箇所のみ点検 |

4.外力健全度判定

| | | |
|--------------------------|-----------------------|---------|
| <input type="checkbox"/> | 放射状ひび割れが見られる | 健全度ランクⅣ |
| <input type="checkbox"/> | 圧ざが見られる | |
| <input type="checkbox"/> | 縁石、排水施設に変状が見られる | |
| <input type="checkbox"/> | 5mm以上の段差、ずれのあるひびが見られる | |
| <input type="checkbox"/> | 変位速度を測定しなければならない場合 | 要調査 |

| 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-1

※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、前回のひび割れ展開図と比較して明らかに進行性がないものをいう。
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) |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

| 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

※既存データがある場合、その結果を流用してもよい。

図 2.2-6 詳細点検 BC シートの例⁶⁾

(2) 点検結果に基づく判定，健全度評価の概要

トンネル点検の結果は、「個別の変状に対する個別判定」，および「覆工スパンに対する健全度評価」を行うことを基本とし，「機能面に対する判定」と「利用者の安全性に対する判定」に大別する．判定区分のフローチャートを図 2.2-7 に示す．個別の変状判定は，主に短期の補修計画策定に活用し，覆工スパンごとの健全度評価は，主に中長期の修繕，更新計画に活用するものである．

1) 個別の変状に対する判定

個別の変状に対する判定は，「覆工本体における利用者の安全性にかかわる変状」，「覆工以外における坑門工・路面および附属物の，機能面および利用者の安全性にかかわる変状」に対して行う．個別の変状に対する判定区分は，表 2.2-16 の個別の変状に対する判定区分の表示方法に示すとおり，変状の程度と調査や対策の必要性検討の要否から AA から OK までの 5 区分とし，さらにその変状が第三者などに対し安全性の観点から対策が必要かどうかを判定する E に区分されている．判定区分 E の使い方は，例えば軽微な変状

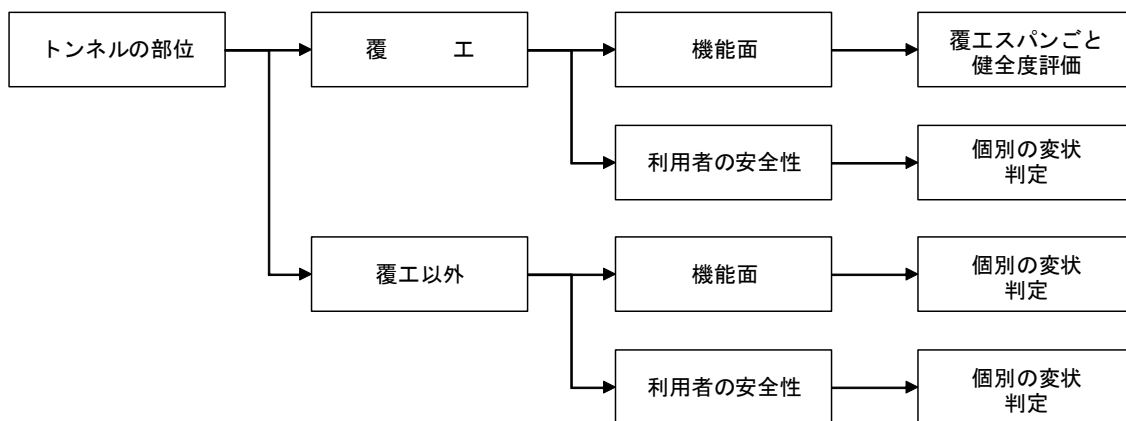


図 9-43 をもとに再構成.

図 2.2-7 トンネル構造物の分類別における判定区分⁵⁾

表 2.2-16 個別の変状に対する判定区分の表示方法⁵⁾

| | | | |
|------------------|----|---|------|
| 個別の変状に関する判定のみの場合 | | 左記の判定に加え、第三者等被害の安全性に対して支障となる恐れがあり対策が必要な場合 | |
| AA | | AA・E | |
| A※ | A1 | A・E※ | A1・E |
| | A2 | | A2・E |
| B | | B・E | |
| C | | C・E | |

※日常点検における標準的な表示方法

であるコンクリート表面の小さなはく離が、通行車両や歩行者などに被害を及ぼす可能性がある場合など、機能面に対する変状の大小に関係なく安全な道路交通または第三者に対し支障となる恐れがあるため、第三者等被害防止対策が必要であることを示し、5 区分の判定に付加して区別するものである。表 2.2-17 に 5 区分の判定の定義を示す。なお表 2.2-17 中の「機能」とは、構造物または部材が果たすべき役割のことであり、安全性、使用性、復旧性、耐久性、美観、第三者影響度に分類される。

判定区分 AA とは、変状が著しくトンネル構造の機能面への影響が非常に高く、応急対策も含め速やかな対策が必要な場合の判定区分である。なお、AA の中での部分的な運用として、直ちに交通規制等の措置を必要とする場合など非常に緊急性が高い場合には、一時的に AAA を付すものとするが、応急対策が完了し当該措置が必要でなくなれば AA 以下の判定に戻すこととする。

判定区分 A は、変状がありトンネル構造の機能面への影響が考えられ、緊急性は低いものの放置しておく問題が生ずる可能性があり、対策の時期、方法などについて検討が必要な場合で影響度合いに応じて A1, A2 に細分化される。

判定区分 B は、変状はあるものの機能面への影響はなく、当面は対策の必要がなく進行状態を監視すればよい場合の判定である。

判定区分 C は、変状が認められるが、変状の状態に関する判定を行うために調査を実施する必要がある場合の判定区分である。なお、判定区分 C のままでは点検、診断は完了していないので、他の判定区分結果が得られるよう速やかに調査等を実施することになっている。

判定 OK は、変状がないかもしくは軽微で、対策も監視も必要ない場合の判定区分であるが、点検漏れの防止や点検実施の記録を残すため設定したものである。なお、はく落の危険性がある変状をハンマなどで撤去し、あるいははく落対策工を施工して第三者等被害の恐れがある変状に対する応急対策が完了した場合には、第三者影響度を除いた機能に対する判定へ変更する。これは、機能面への影響が非常に高いと判断される AA, AAA の場合であり、A 以下はあくまで応急対策であり変状が進展する可能性が残されていることから、判定区分は変更しないこととし判定 E も付加したままとする。

判定区分に応じた対策時期の目安は、AAA は措置の緊急性が非常に高い場合で、AA は速やかな補修などが必要な場合である。A1 は機能面への影響が高いことから「速やか」から「概ね 2 年以内」の間に対策が必要と判断されるものとする。A2 は現時点では機能低下への影響は低いものの次回点検時まで放置すると機能低下への影響が高くなることから、

概ね2年から5年以内の間に対策が必要と判断されるものとして区分した。

変状の種別に対する判定の目安を表 2.2-18, 表 2.2-19, 表 2.2-20, 表 2.2-21 に示す。変状の種別は、「はく落」、「漏水」、「鋼材腐食」、「有効巻厚の不足または減少」に分けられ、それぞれ判定区分の内容が定義されている。

表 2.2-17 5区分の判定の定義⁵⁾

| 判定区分 | | 一般的状況 |
|--------------|------------------|--|
| 個別の変状に対する判定 | AA | 変状が著しく、機能面への影響が非常に高いと判断され、速やかな対策が必要な場合。 |
| | A | 変状があり、機能低下に影響していると判断され、対策の検討が必要な場合。 |
| | A1 ^{※1} | 変状があり、機能低下への影響が高いと判断される場合。 |
| | A2 ^{※1} | 変状があり、機能低下への影響が低いと判断される場合。 |
| | B | 変状はあるが、機能低下への影響は無く、変状の進行状態を継続的に監視する必要がある場合。 |
| | C | 変状の状態（機能面への影響度合い等）に関する判定を行うために、調査を実施する必要がある場合。 |
| | OK | 変状がないか、もしくは軽微な場合。 |
| 第三者等被害に対する判定 | E | 安全な交通または第三者等に対し支障となる恐れがあるため、対策が必要と判断される場合。 |

※1 日常点検以外の点検では、A判定区分を2区分に細分化した判定を実施する。

※2 日常点検の路面周辺点検では、A判定区分は1区分（基本A1）の判定を実施する

表 2.2-18 はく落に対する判定の目安⁵⁾

| 判定区分 | | 判定標準 |
|-----------|----|---|
| はく落に関する判定 | AA | ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、速やかに対策を講じる必要がある状態 |
| | A1 | ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、はく離等がみられ、落下する可能性があるため、計画的に対策を講じる必要がある状態 |
| | A2 | ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき、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、監視を必要とする状態 |
| | B | ひび割れ等によるうき、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 |
| | OK | ひび割れ等によるうき、はく離の兆候がなく、健全な状態 |

表 2.2-19 漏水に対する判定の目安⁵⁾

| 判定区分 | 判定標準 | |
|----------|------|---|
| 漏水に関する判定 | AA | コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり、または、漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり、寒冷地においては漏水等によりつららや側氷が生じ、利用者の安全性を損なうため、速やかに対策を講じる必要がある状態 |
| | A1 | コンクリートのひび割れ等から、漏水の流出があり、または、排水不良により舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、計画的に対策を講じる必要がある状態 |
| | A2 | コンクリートのひび割れ等から、漏水の流下があり、または、排水不良により舗装面に滞水を生じるおそれがあり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、監視を必要とする状態 |
| | B | 滴水またははじみによる漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態 |
| | OK | 漏水がみられないもの |

表 2.2-20 鋼材腐食に対する判定の目安⁵⁾

| 判定区分 | 判定標準 | |
|------------|------|--|
| 鋼材腐食に対する判定 | AA | 腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が損なわれているため、速やかに対策を講じる必要がある状態 |
| | A1 | 孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため、計画的に対策を必要とする状態 |
| | A2 | 表面的あるいは小面積の腐食があるため、監視を必要とする状態 |
| | B | 鋼材腐食が生じているが、軽微なため、措置を必要としない状態 |
| | OK | 鋼材腐食が生じていない |

表 2.2-21 有効巻厚の不足または減少に対する判定の目安⁵⁾

| 判定区分 | 判定標準 | |
|--------------------|------|---|
| 有効巻厚の不足または減少に対する判定 | AA | 材質劣化等により有効巻厚が不足または減少し、構造物の機能が損なわれたため、速やかに対策を講じる必要がある状態 |
| | A1 | 材質劣化等により有効巻厚が不足または減少し、構造物の機能が損なわれる可能性があるため、計画的に対策を必要とする状態 |
| | A2 | 材質劣化等がみられ、断面強度への影響がほとんどないが、監視を必要とする状態 |
| | B | 材質劣化等がみられるが、有効巻厚の不足または減少がないため措置を必要としない状態 |
| | OK | 材質劣化等がみられない |

2) 覆エスパンに対する健全度評価

覆エスパンに対する健全度評価は、覆工本体の機能面である「構造的な安定性」にかかわる、主として外力の作用による変状に対して行う。健全度評価の実施フローチャートを図 2.2-8 に示す。

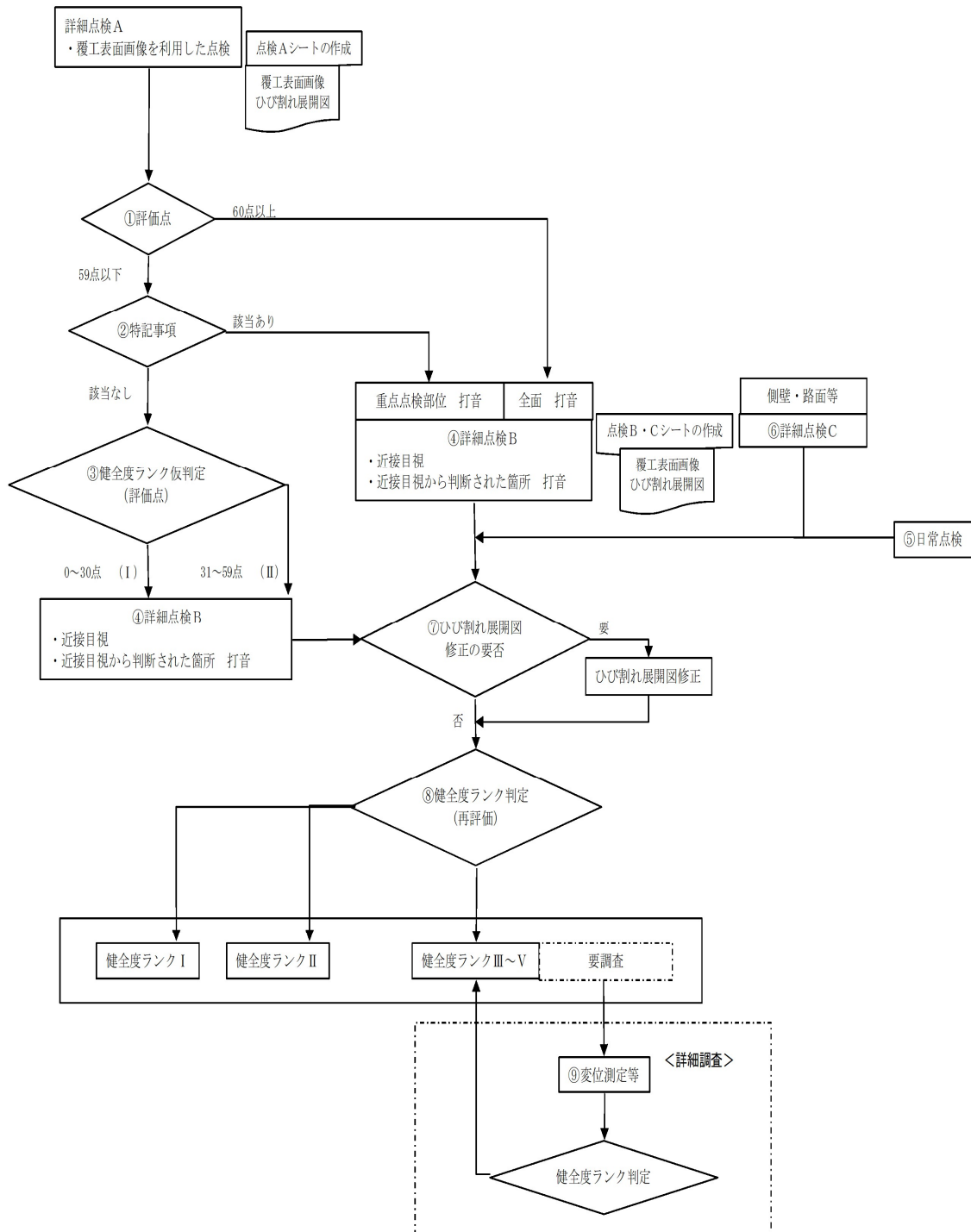


図 2.2-8 健全度評価実施フローチャート⁵⁾

表 2.2-22 健全度ランクの定義と対策時期の目安³⁾

| 健全度 ランク | 定義 | 対策工までの期間 (目安) |
|------------|--------------------------------|------------------|
| V | 変状が極めて著しく、直ちに何らかの対策を行う必要があるもの | 0年(緊急) |
| IV | 変状が著しく、早急に何らかの対策検討を行う必要があるもの | ~3年 |
| III-2 | 変状があり、速やかに何らかの対策検討を行う必要があるもの | ~11年 |
| III-1 | 変状があり、適切な時期に何らかの対策検討を行う必要があるもの | ~34年 |
| 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 | ~54年 |
| I | 変状がないか、もしくは軽微なもの | ∞ |

健全度ランクはIからVまで分類されており、健全度ランクにより対策時期、対応方針が決められている。表 2.2-22 に健全度ランクの定義と対策時期を示す。対策工までの期間の目安は、室内試験を基に想定されている。各健全度ランクは、対策工実施までの期間を目安として示すものであり、具体的には次のとおりである。

健全度ランクVは、即日もしくは場合によって1週間程度以内に応急対策を行わなければならない状態である。または対策に時間を要するようであれば通行止めを必要とする状態である。

健全度ランクIVは、対策が必要で緊急性もあるが、対策工事費の予算確保や効果的な対策を熟慮するため、または詳細設計を行うための期間を1から3年程度確保できる余裕がある状態である。

健全度ランクIII-2は、次回点検程度までには同レベルにとどまっていると考えられる状態である。

健全度ランクIII-1は、対策工実施までに30年程度機能を維持できる状態である。

健全度ランクIIは、対策工実施までに相当機能を維持できる状態である。

健全度ランクIは、変状がないか軽微な状態である。

健全度評価方法は次のとおりである。なお、下記番号は図 2.2-8 中の番号を示す。

- ① 詳細点検Aで評価点(外力)が59点以下であれば特記事項の確認を行い、60点以上の場合、重点点検スパンとして詳細点検Bにて覆工コンクリートの全面打音を行う。

- ② 詳細点検 A で特記事項を確認し、該当するものがあれば詳細点検 B として特記事項対象部位を重点点検箇所として当該箇所の打音を行う。
- ③ 評価点(外力)が 59 点以下で特記事項に該当項目がなければ評価点に応じて健全度ランク I あるいは II と仮判定を行う。
- ④ 詳細点検 B では、近接目視かつ打音を実施することを基本とする。打音については、近接目視により打音による確認が必要と判断された箇所について実施することを基本とし、併せて近接目視の支援として覆工表面画像を撮影し、一次評価を行い、重点点検スパンおよび重点点検箇所の該当があれば打音を実施する。
- ⑤ 日常点検において変状を見つけた場合、詳細点検 B, C に準じた点検を実施する。
- ⑥ 側壁および路面については、詳細点検 C として近接目視かつ打音を行う。
- ⑦ 必要に応じ、現地点検結果を反映させるようひび割れ展開図を修正する。
- ⑧ 詳細点検 A, B, C の結果を踏まえて外力による変状の健全度評価を行う。
- ⑨ 内空変位を測定し、変位速度での評価が必要な場合には「要調査」と評価し、別途詳細調査を実施するものとし、変位速度などを測定しなければならない場合は、可能な限り長い期間（4 か月以上）で変位測定を行い、年間変位速度に換算する。

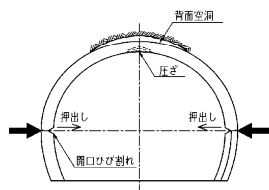
上記評価点、ひび割れの形態、ひび割れ幅および詳細調査による内空変位速度、ひび割れ幅変位速度により、表 2.2-23 に示す健全度評価の標準に従ってランクを決定する。

表 2.2-23 健全度評価の基準⁵⁾

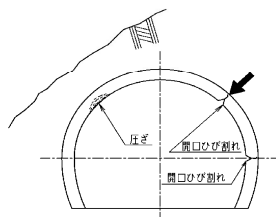
| 対象構造物 | 点検箇所 | 変状の種類 | 評価の標準 | | | | | |
|----------------------------------|---------|---------------------|---|---------------------------------------|---|--------------------------------|---|-------------------|
| | | | I | II | III-1 | III-2 | IV | V |
| トンネル | 覆工 | 外力による変状 | ・変状が無いか、もしくは軽微なもの ・評価点で30点以下 ・進行性が見られないもの | ・評価点で31～59点 ・継続的に監視を行う程度のもの | ・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 | ・変状の進行が極めて著しくみられる |
| | | | 変状の状況が明らかな場合は、上記を参考に評価を行う。 内空変位速度やひび割れの位置・規模、外力のかかり方を総合的に勘案し、下記を参考に評価を行う。 また、内空変位等を測定し変位速度での評価が必要な場合は「要調査」とし、別途詳細調査を実施する。 | | | | | |
| 内空変位速度 | 塑性圧 | - | 1mm/年未満 | 1mm/年～ 3mm/年 | 3mm/年～ 10mm/年 | 10mm/年～ 24mm/年 | 2mm/月以上 (24mm/年以上) | |
| | 偏圧 | | 0.5mm/年未満 | 0.5mm/年～ 1mm/年 | 1mm/年～ 3mm/年 | 3mm/年～ 10mm/年 | 10mm/年以上 | |
| | 緩み圧 | | | | | | | |
| 塑性圧による変状現象 | なし | 側壁部に軸方向のヘアークラック | 側壁部に軸方向の引張ひび割れ | → | 側壁部に軸方向の引張ひび割れ ～ 圧ざまたは側壁部ひび割れに段差 | 圧ざまたは側壁部ひび割れに段差 | | |
| 偏圧による変状現象 | なし | 山側肩部に軸方向のヘアークラック | 山側肩部に軸方向の引張ひび割れ | 山側肩部以外にも軸方向の引張ひび割れ | 圧ざまたはせん断ひび割れ | アーチの変形、断面軸の回転、移動 | | |
| 緩み圧による変状現象 | なし | クラウン部に軸方向のヘアークラック | クラウン部に軸方向の引張ひび割れ | 引張ひび割れ(軸方向・直角方向)が交差 | 以下のいずれか ①放射状ひび割れ ②ひび割れによりブロック化 ③圧ざまたはせん断ひび割れ | アーチの変状が顕著(崩壊の恐れ) | | |
| 変状原因が不明の場合 <small>注1)</small> | なし | いずれかの箇所に軸方向のヘアークラック | いずれかの箇所に軸方向の引張ひび割れ | 健全度ランクI～III-1で見られた箇所以外の箇所にも軸方向の引張ひび割れ | 圧ざまたはせん断ひび割れ | アーチの変形、断面軸の回転、移動 | | |
| ひび割れ幅 | 0.2mm未満 | 0.2～1.5mm | 1.5～3.0mm | 3.0～5.0mm | 5.0～10.0mm | 10mm以上 | | |
| ひび割れ幅変位速度の目安 | | - | | (0.3mm/年以上) | (1.5mm/年以上) | (1.0mm/時間) | | |

注1) 変状原因が不明な場合の内空変位速度の目安は、ひび割れ状況を勘案した上で、塑性圧または偏圧・緩み圧のどちらかの値を選択して用いるものとする。

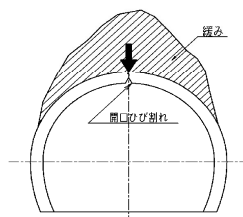
1)塑性圧



2)偏圧



3)緩み圧



2.3 国土交通省と NEXCO とのトンネル定期点検の比較と課題

2.3.1 国土交通省と NEXCO とのトンネル定期点検の比較

前節までに国土交通省および NEXCO の定期点検の概要について述べた。両者の比較を表 2.3-1 に示す。両者の大きな違いは、NEXCO では近接目視点検の実施前に覆工表面画像を取得、観察して変状を把握することで、念入りに近接目視、打音検査を行う必要がある「重点点検箇所、スパン」を選定している点（詳細点検 A）である。詳細点検 A を近接目視点検実施前に行うことで、明らかに変状がない範囲と変状がある可能性がある範囲に対する近接目視、打音検査作業にメリハリができ、また現場での変状記録作業を軽減することができるという利点がある。

変状の判定方法においては、国土交通省では各々の変状原因に対して、個別、スパンごと、トンネルごとの順で判定、診断が実施され、個別変状の補修要否からトンネルごとの対策優先順位を設定できる仕組みになっている。一方で NEXCO では、機能面と利用者安全性に区分して、変状個別およびスパンごとの評価を行っているが、個別変状の補修要否およびトンネルごとの対策優先順位設定の面で同様の目的となっている。判定区分については、区分名は異なるが概ね同様の区分内容となっている。健全性診断（健全度評価）については、両者は関連付けられており、同様のレベルで比較ができるようになっている。国土交通省の道路トンネル定期点検要領の健全性評価基準の関係を表 2.3-2 に示す。

表 2.3-1 国土交通省道路トンネル定期点検要領と NEXCO 保全点検要領の比較

| 機 関 | 国土交通省 | NEXCO |
|---------------------------|--|---|
| 要領名 | 道路トンネル定期点検要領 | 保全点検要領 |
| 変状の判定 健全性診断 (健全度評価) | <pre> graph TD A[外力, 材料劣化, 漏水] --> B[変状ごとの対策区分判定] B --> C["(材料劣化, 漏水) 変状ごとの健全性診断"] B --> D["(外力) スパンごとの健全性診断"] C --> E[トンネルごとの健全性診断] D --> E </pre> | <pre> graph TD A["覆工の機能面(外力)"] --> B[変状ごとの対策区分判定] C["覆工の利用者安全性(材料劣化, 漏水)"] --> B D["覆工以外の機能面, 利用者安全性(材料劣化, 漏水)"] --> B B --> E[スパンごとの健全度評価] E --> F["ひび割れ分布定量化手法(TCI)"] </pre> |
| 変状ごと 判定区分 | <p>I : 措置不要</p> <p>II b : 監視必要</p> <p>II a : 重点的監視計画的対策</p> <p>III : 早期対策</p> <p>IV : 緊急対策</p> | <p>OK : 変状なしか軽微</p> <p>C : 判定のための調査必要</p> <p>B : 監視必要</p> <p>A2 : 対策検討必要 (機能低下影響低い)</p> <p>A1 : 対策検討必要 (機能低下影響高い)</p> <p>AA : 速やかな対策必要</p> <p>E : 第三者被害恐れ, 対策必要 (上記判定に付加)</p> |
| 健全性診断 健全度評価 区分 | 表 2.3-2参照 | |

表 2.3-2 国土交通省道路トンネル定期点検要領の健全性診断と NEXCO 保全点検要領の健全度評価との関係⁵⁾

| 国土交通省定期点検要領における部材毎の健全性の診断区分 | | | | トンネル（外力） | |
|-----------------------------|--------|--|--------|--------------------------------|--|
| | | | | NEXCO外力による変状の健全度評価区分 | |
| 区分 | 状態 | 判定区分と措置との関係 （トンネル） | 健全度ランク | 定義 | |
| IV | 緊急措置段階 | 構造物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。 | V※ | 変状が極めて著しく直ちに何らかの対策を行なう必要があるもの | |
| III | 早期措置段階 | 構造物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 | 変状が著しく早急に何らかの対策検討を行なう必要があるもの | |
| II | 予防保全段階 | 構造物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-2 | 変状があり速やかに何らかの対策検討を行なう必要があるもの | |
| | | | III-1 | 変状があり適切な時期に何らかの対策検討を行なう必要があるもの | |
| I | 健全 | 構造物の機能に支障が生じていない状態。 | II | 変状があるが、現状は継続的に監視を行なう必要があるもの | |
| | | | I | 変状がないか、もしくは軽微なもの | |

2.3.2 トンネル定期点検の課題

(1) 近接目視、打音検査

近接目視は、現地トンネルにおいて覆工アーチ上部や坑門工の上部に対して、トンネル点検車に搭乗して評価が行える距離まで接近し、ひび割れ、うき、はく離、漏水の状況、トンネル内付属物の取付状態を観察する。ひび割れについては、必要に応じてその位置、長さ、幅、段差などを目盛付きルーペやクラックスケールを用いて計測する。打音検査は、頭部重量 100g～300g 程度の点検用ハンマを用いてコンクリートのうき、はく離の有無とその範囲などを確認する。また、付属物を取り付けるボルト、ナットなどを打診し、緩みなどの異常の有無を確認する。これらの点検結果は、トンネルの図面や模式図にその都度記録する。近接目視、打音検査の実施状況を写真 2.3-1 に示す。点検実施にあたっての装備および服装は、図 2.3-1 に示すとおり、クラックゲージ、ハンマ、巻尺、安全帯、防塵

眼鏡，防塵マスクなどの用具，カメラ，黒板，チョーク，記録用紙などの記録用具などを携行する．近接目視，打音検査の実施は，基本的に供用中の道路を1車線規制し，規制帯内での作業となり，日々車線規制は解除される．これらのように，近接目視，打音検査は現場で行う作業内容が多く，重装備のうえ道路交通に近接して作業を行うことにより，次に示すような問題点が生ずることが考えられる．

問題点 1 事故のリスクが高い道路交通に近接した交通規制内の作業であり，さらに継続的に重装備状態での上向き姿勢で，必要に応じて点検ハンマで打音を行うため，緊張かつ疲労による変状の見落としや記録漏れが生ずる可能性がある．

問題点 2 変状を図面や模式図に記録するにあたって，同上の理由や変状の位置，長さの記録誤差により記録結果に個人差が生ずる可能性がある．

問題点 3 点検技術者の熟練度の差により，変状の把握に個人差が生ずる可能性がある．

問題点 4 交通規制内の限られた時間内での作業であるため，1日の点検量が限られ点検日数が多大となる．また，点検日数を削減するためには作業班を複数投入する必要がある，事故リスクおよびコスト高が懸念される．

このような問題点から，点検作業内容および作業量の低減による点検技術者の負担軽減，事故リスクの軽減が課題となる．



写真 2.3-1 近接目視，打音検査状況

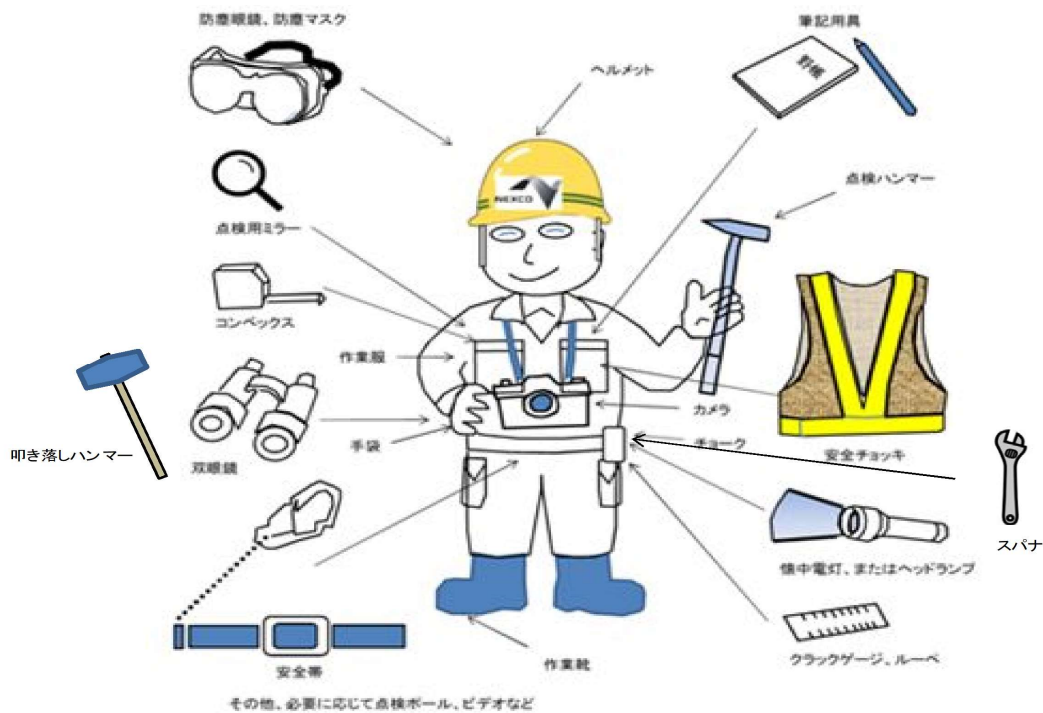


図 2.3-1 点検時に必要な標準的な装備と服装⁵⁾

(2) 覆工表面画像観察による変状の机上把握

NEXCO で実施されている覆工表面画像から変状を把握，記録する方法は，近接目視，打音検査の作業軽減に有効である。しかし，当方法は，点検技術者が画像を目視観察して変状を把握，記録するため，点検技術者の技量によって変状把握結果が左右され，健全度評価へ影響を及ぼす可能性がある。特にひび割れが多いトンネルの場合顕著である。このような問題点から，ひび割れ抽出，図面作成の自動化による作業軽減および統一化が課題と考えられる。

(3) 健全度評価

国土交通省およびNEXCOによる健全度評価は，変状の状況から定性的に判断，区分されている。トンネル覆工を補強する必要があるか否かについては，現判定方法は定性的であるために点検技術者の技量により判定に個人差が生じる場合がある。また，トンネル覆工の剛性がどの程度であるかについて詳細な調査をする必要がある。このような問題点から，覆工の剛性に着目した客観的かつ定量的なトンネル覆工の健全度評価方法によるトンネル覆工の正確な補強要否判定が課題と考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路の持修繕に関する省令，告示の制定について，2014.4
- 2) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，2014.6
- 3) 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.5, pp.2-4, p.6, p.9, p.30, pp.33-34, p.36, p.39, p.41, p.44, pp.47-48, p.58, pp.54-55, p.60, p.61, p.62, p.72, 2014.6
- 4) 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】，p.101，2015.6
- 5) 東日本，中日本，西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編），p.5, pp.2-3, p.143, p.33, p.31, p.151, p.155, p.157, p.158, p.160, p.162, p.164, p.167, p.29, 2015.4
- 6) 東日本，中日本，西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編）補足資料(案)【技術資料】，pp.5-39，2015.4

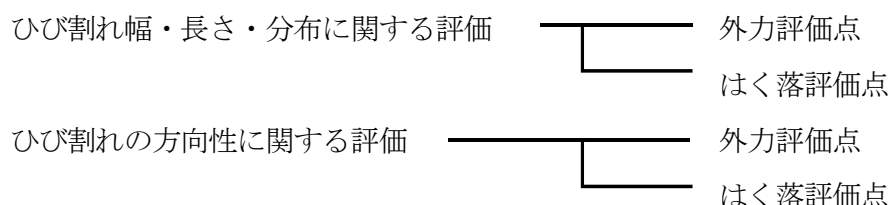
第3章 トンネル覆工のひび割れ分布定量化手法

3.1 概説

トンネル覆工に発生するひび割れの分布を把握することは、覆工本体の健全性を判定する重要な要素となる。本章では、NEXCOの保全点検要領に規定されているひび割れ分布の定量化手法と、本研究で提案するひび割れ分布定量化手法について述べる。

3.2 NEXCOのひび割れ分布定量化手法および健全度評価点算出方法

NEXCOのひび割れ分布定量化手法は、点検技術者が覆工表面画像を観察してひび割れを抽出、図面化し、覆工コンクリート1打設長（以下、「スパン」という）ごとに、構造的な安定性に対する評価点（以下、「外力評価点」という）と利用者の安全性に対する評価点（以下、「はく落評価点」という）を求める。外力評価点およびはく落評価点は、「ひび割れ幅・長さ・分布に関する評価」と「ひび割れの方向性に関する評価」という評価項目のそれぞれについて算出される。



ひび割れ分布の定量化手法は、岩盤力学の分野で研究されているクラックテンソルの考え方を採用したひび割れ指数である TCI (Tunnel-Lining Crack Index) を用いる。TCI は、覆工表面のひび割れの幅、長さ、方向をパラメータとした指数であり、最大ひび割れ幅、最大ひび割れ幅の長さ、ひび割れの分布、ひび割れの方向性についての判定が可能となる指数である。TCI の基礎式を式(3.2.1)に示す。また、図 3.2-1 に TCI 算出のための展開図を示す。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(t^{(k)} \right)^a \left(l^{(k)} \right)^b \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (3.2.1)$$

ここに、 F_{ij} : TCI

A : 対象とする覆工コンクリートの面積

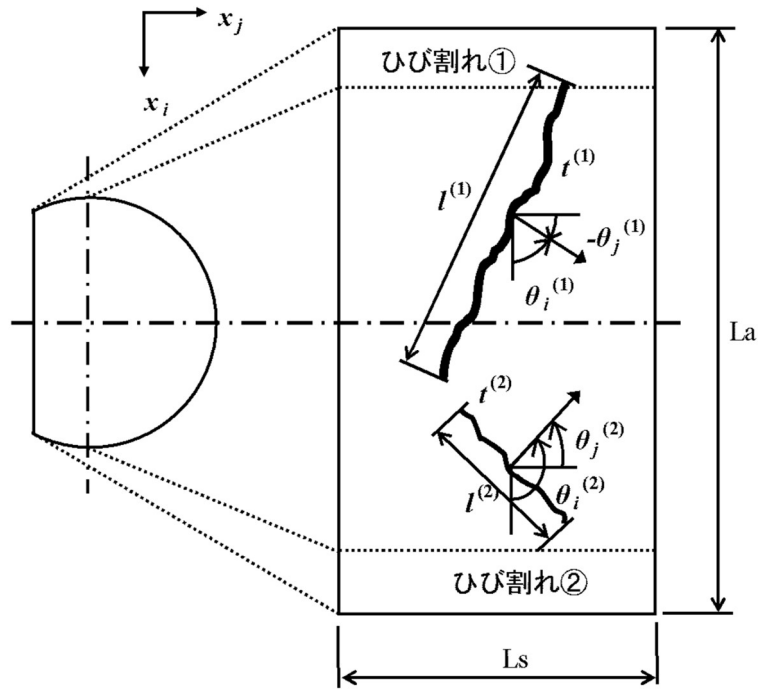


図 3.2-1 TCI 算出のための展開図例

n : ひび割れの本数

$l^{(k)}$: k 番目のひび割れの長さ

$t^{(k)}$: k 番目のひび割れの幅

$\theta_i^{(k)}$: k 番目のひび割れの法線ベクトルが x_i 軸となす角 (反時計回りを正)

$\theta_j^{(k)}$: k 番目のひび割れの法線ベクトルが x_j 軸となす角 (反時計回りを正)

a : ひび割れ幅の重み付けに関する係数

b : ひび割れ長さの重み付けに関する係数

評価点は、式(3.2.2)に基づき TCI を計算し、以下のとおり算出する。

$$F0 = F11 + F22 \quad (3.2.2)$$

ここに、 $F0$: TCI

$F11$: TCI (縦断成分)

$F22$: TCI (横断成分)

「ひび割れの幅、長さ、分布に対する評価」

$$\text{外力評価 } yI = \frac{58 \times F0 \times 10^5}{F0 \times 10^5 + 10} \quad (3.2.3)$$

ここに、 yI : 外力評価点

$$\text{はく落評価} \quad y_2 = \frac{32 \times F_0 \times 10^5}{F_0 \times 10^5 + 13} \quad (3.2.4)$$

ここに、 y_2 : はく落評価点

「ひび割れの方向性に対する評価」

外力評価

$$y_1 = 4 \quad (0.7 \leq Z < 1.0) \quad \text{横断卓越型}$$

$$y_1 = 7 \quad (0.3 \leq Z < 0.7) \quad \text{縦横断拮抗型}$$

$$y_1 = 11 \quad (0.0 \leq Z < 0.3) \quad \text{縦断・斜め卓越型}$$

はく落評価

$$y_2 = 2 \quad (0.7 \leq Z < 1.0) \quad \text{横断卓越型}$$

$$y_2 = 4 \quad (0.3 \leq Z < 0.7) \quad \text{縦横断拮抗型}$$

$$y_2 = 6 \quad (0.0 \leq Z < 0.3) \quad \text{縦断・斜め卓越型}$$

ここに、 $Z : F_{22}/F_0$

3.3 本研究で提案するひび割れ分布定量化手法

3.3.1 フラクタル次元解析

本研究のひび割れ分布定量化手法は、覆工表面に発生するひび割れが変状の程度により多様かつ複雑に分布しているため、適切に定量化できる手法としてフラクタル次元解析に着目した。

既往の研究では、アルカリ骨材反応が生じているコンクリートのひび割れをトラバース法や面積法によりひびわれ数、幅および密度などが評価されている。しかし、ひび割れの形状や分布の評価はあいまいな表現となる²⁾。その一方で、フラクタル次元でひび割れ分布を定量化する研究は、既設橋梁床版のひび割れ進展状態を評価する方法³⁾、舗装のひび割れ率とひび割れ度をフラクタル次元で表示する方法⁴⁾、アルカリ骨材反応による膨張ひび割れをフラクタル次元で表現する方法⁵⁾がある。しかしながら、トンネル覆工のひび割れをフラクタル次元で定量評価する研究はみられない。その理由としては、ひび割れ分布を正確に抽出、図化することが困難であったためと推測する。

フラクタル次元解析は、あいまいな図形から規則性を見出し、フラクタル次元という尺度により複雑な形状に対して数学的なモデルを与えることであり、これにより形状、密度、

粗さなどを算出することが可能である。フラクタル次元解析の手法は、様々な図形に対して適用できる汎用性と、コンピュータを利用した解析方法として一般的な Box Counting 法を採用した。図 3.3-1 に Box Counting 法の模式図を示す。本手法は、ひび割れ展開図を幅 r の格子状に分割し、その格子中に少なくとも 1 本のひび割れが含まれるような正方形の数を計上するものである。フラクタル次元算出式を式(3.3.1)に示す。

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log(\frac{1}{r})} \quad (3.3.1)$$

ここに、 D : フラクタル次元

$N(r)$: 正方形の数

r : 分割幅

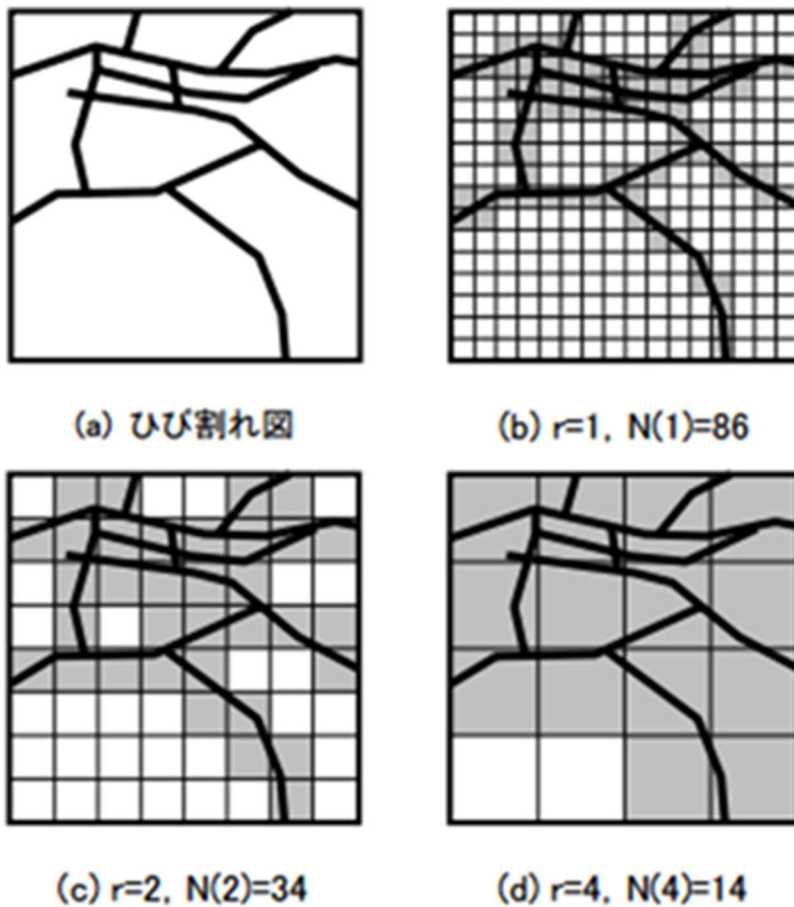


図 3.3-1 Box Counting 法の模式図⁶⁾

3.3.2 フラクタル次元の適用検証

(1) 検証手順

ひび割れ分布の定量化について、フラクタル次元の適用可能性を検証した。検証の着目点は、①ひび割れ開口面積、②ひび割れの本数、③ひび割れの幅、④ひび割れ同士の交差である。検証手順は次のとおりである。

手順1 ひび割れ開口面積率 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%に相当するひび割れ図を作成する。図 3.3-2 にひび割れ開口面積率モデル図を示す。

手順2 現地覆工の幅 1mm のひび割れを 2 本抽出、図面化する。

手順3 図面化した 2 本のひび割れを、4 本、8 本、16 本、32 本、48 本、64 本に複写、図面化する。図 3.3-3 にひび割れ本数別ひび割れモデル図を示す。

手順4 手順3 で図面化した 4 本のひび割れを幅 0.2mm、0.5mm、0.7mm、1.0mm、1.4mm、2.0mm に変化させて図面化する。図 3.3-4 にひび割れ幅別ひび割れモデル図を示す。

手順5 幅 0.5mm² 本、幅 1.0mm² 本のひび割れの交差個所数を、0 か所、1 か所、2 か所、3 か所、4 か所、5 か所に設定して図面化する。図 3.3-5 にひび割れ交差個所数別ひび割れモデル図を示す。

手順6 手順1、手順3、手順4 および手順5 のひび割れ展開図についてフラクタル次元解析を行う。解析プログラムは Mathworks 社の MATLAB を使用する。

手順7 フラクタル次元 (D) とひび割れ開口面積率、ひび割れ本数、幅、交差個所数の相関性を検証する。

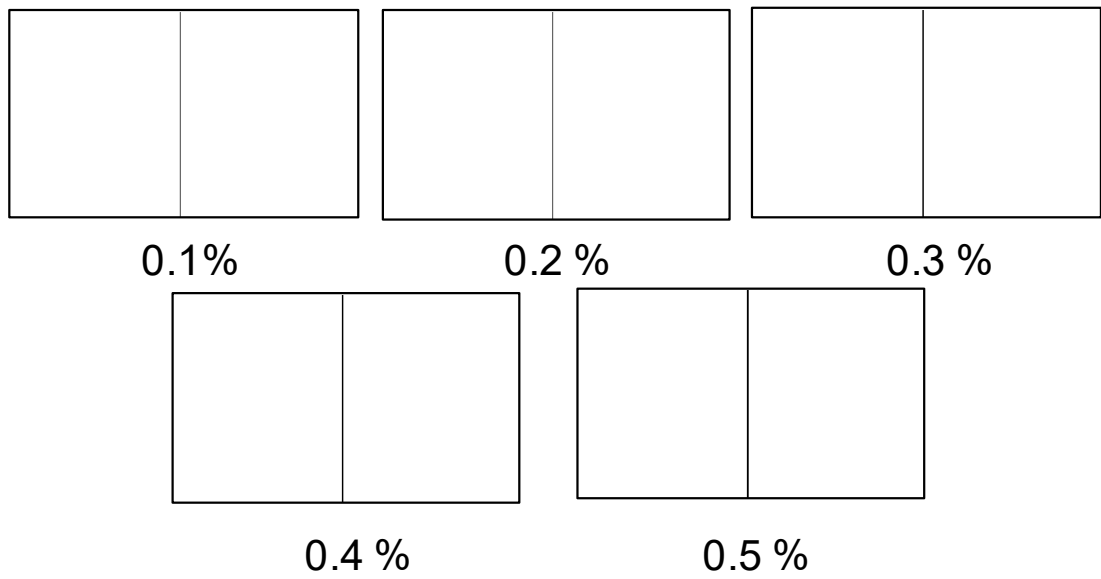


図 3.3-2 ひび割れ開口面積率別ひび割れモデル図

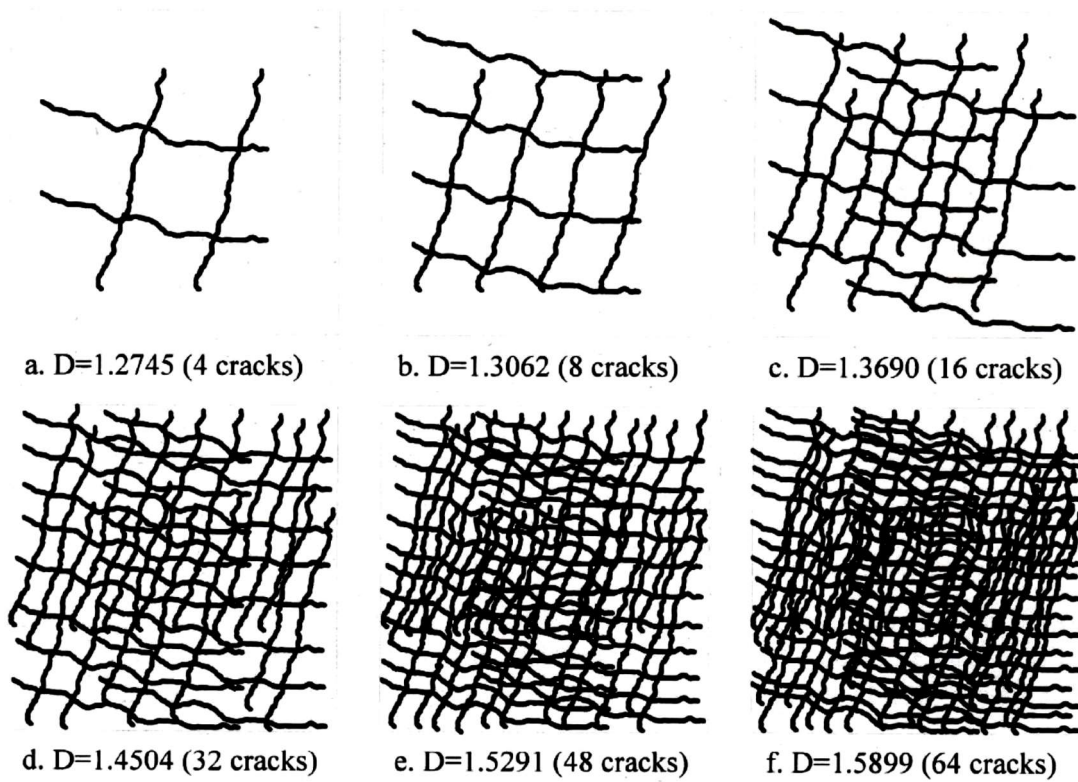


図 3.3-3 ひび割れ本数別ひび割れモデル図

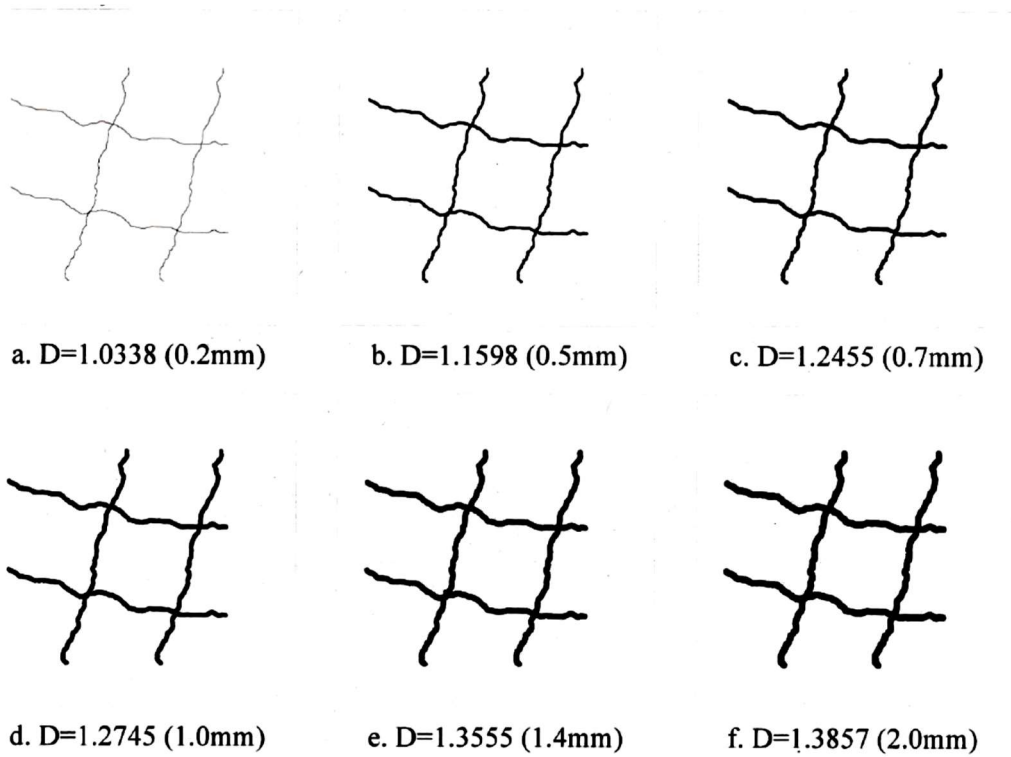


図 3.3-4 ひび割れ幅別ひび割れモデル図

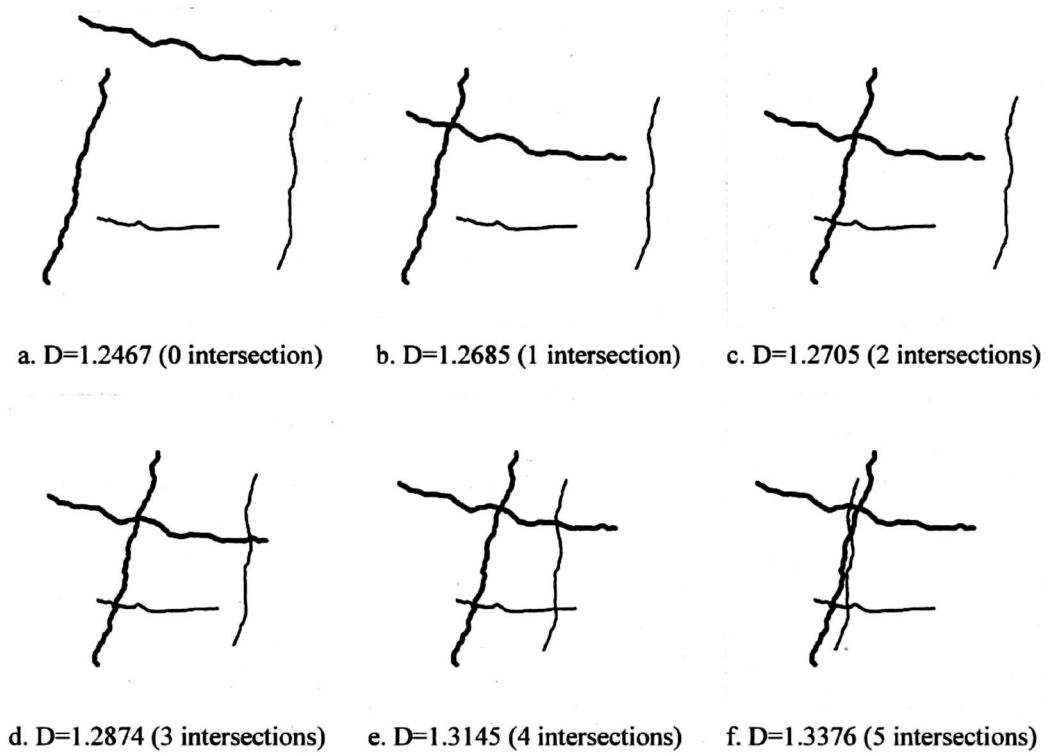


図 3.3-5 ひび割れ交差個所数別ひび割れモデル図

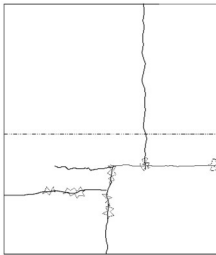
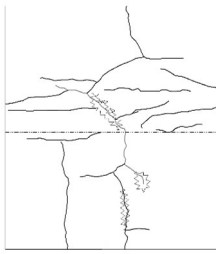
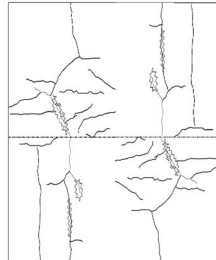
(2) 検証結果

① ひび割れ開口面積率とフラクタル次元の相関性検証

ひび割れ開口面積率とは、フラクタル次元解析を行う面積に対するひび割れ開口面積の割合のことをいう。ひび割れ開口面積率が示すひび割れ分布の目安を表 3.3-1 に示す。

ひび割れ開口面積率とフラクタル次元の相関性検証結果を図 3.3-6 に示す。ひび割れ開口面積率0.1%から0.5%への変化に対してフラクタル次元は1.0439から1.234まで変化し、相関係数0.92と相関関係があることが判明した。これにより、フラクタル次元はひび割れの面積の変化を表現できる可能性がある。

表 3.3-1 ひび割れ開口面積率の目安

| ひび割れ開口面積率(%) | ひび割れ開口面積率の目安 | ひび割れ分布の例 |
|--------------|--|---|
| 0.01 | ひび割れ幅 0.5 mm ひび割れ密度 20cm/m ² |  |
| 0.03 | ひび割れ幅 0.5 mm ひび割れ密度 50cm/m ² |  |
| 0.1 | ひび割れ幅 1.0 mm ひび割れ密度 100cm/m ² ひび割れ幅 10.0 mmが円周方向に1本発生 |  |
| 0.3 | ひび割れ幅 3.0 mm, ひび割れ密度 100cm/m ² | |
| 0.5 | ひび割れ幅 10 mmが円周方向に5本発生 | |

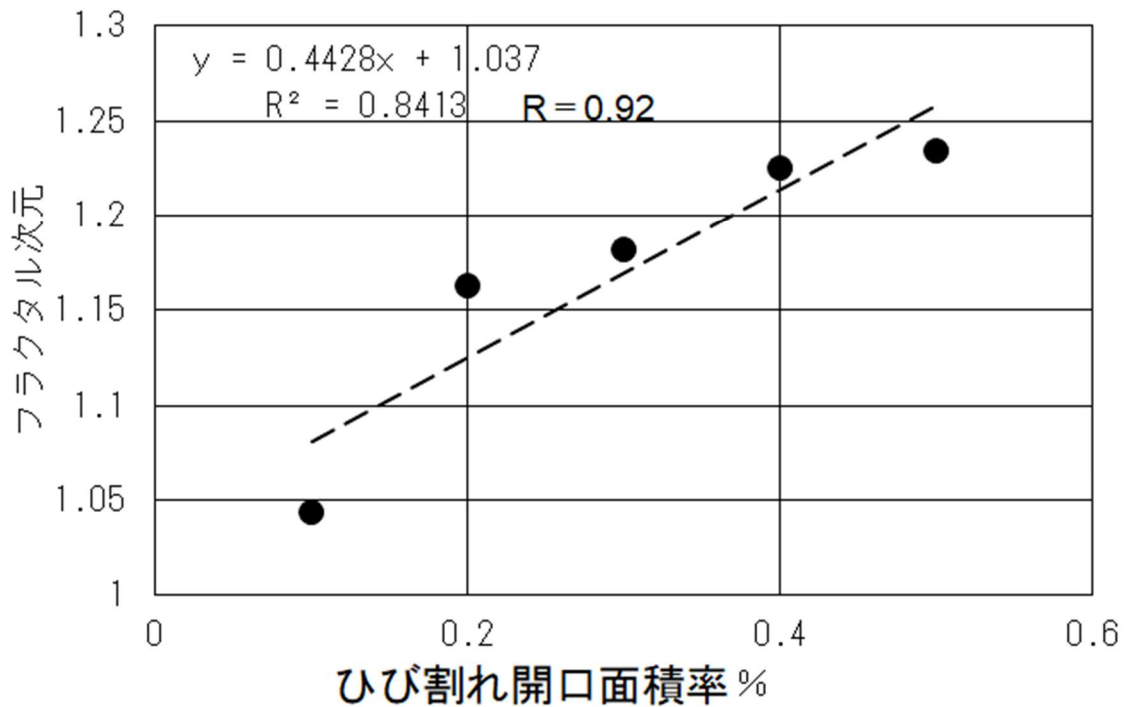


図 3.3-6 ひび割れ開口面積率とフラクタル次元の相関性

② ひび割れ本数とフラクタル次元の相関性検証

ひび割れ本数とフラクタル次元の相関性検証結果を図 3.3-7 に示す。ひび割れ本数 4 本から 64 本への変化に対してフラクタル次元は 1.2745 から 1.5899 へ変化し、相関係数 0.99 と相関関係があることが判明した。これによりフラクタル次元は、ひび割れの本数を表現できる可能性がある。

③ ひび割れ幅とフラクタル次元の相関性検証

ひび割れ幅とフラクタル次元の相関性検証結果を図 3.3-8 に示す。ひび割れ幅が 0.2mm から 2.0mm への変化に対してフラクタル次元は 1.0338 から 1.3857 へ変化し、相関係数 0.93 と相関関係があることが判明した。これによりフラクタル次元は、ひび割れ幅の変化を表現できる可能性がある。

④ ひび割れ交差個所数とフラクタル次元の相関性検証

ひび割れ交差個所数とフラクタル次元の相関性検証結果を図 3.3-9 に示す。ひび割れ幅が 0 か所から 5 か所への変化に対してフラクタル次元は 1.2467 から 1.3376 へ変化し、相関係数 0.98 と相関関係があることが判明した。これによりフラクタル次元は、ひび割れ交差個所数の変化を表現できる可能性がある。

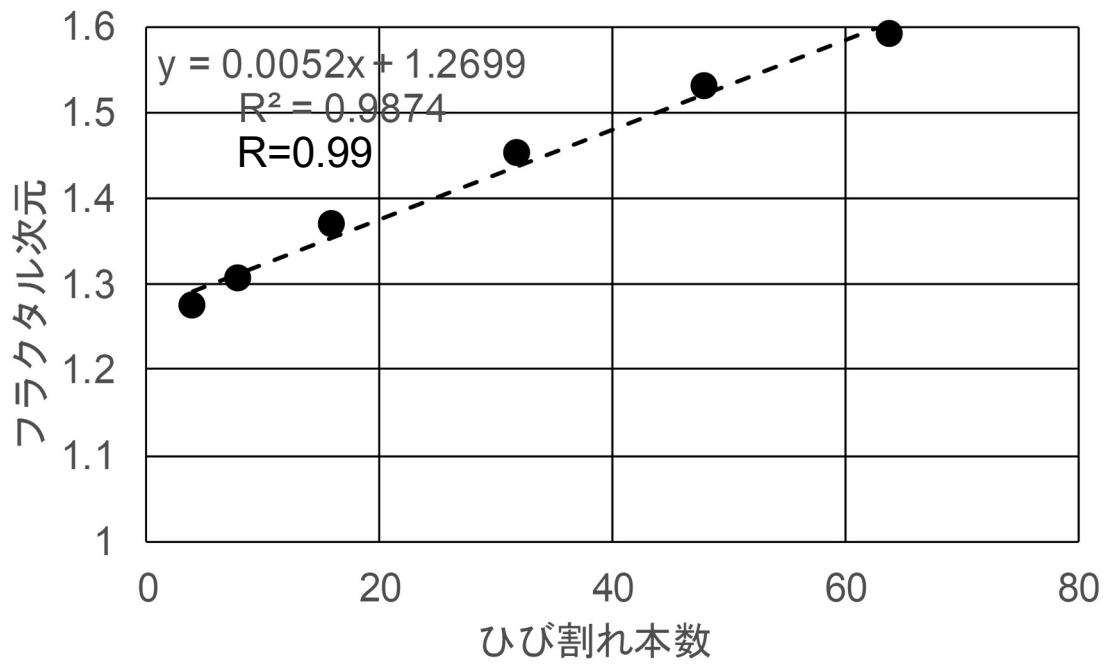


図 3.3-7 ひび割れ本数とフラクタル次元の相関性

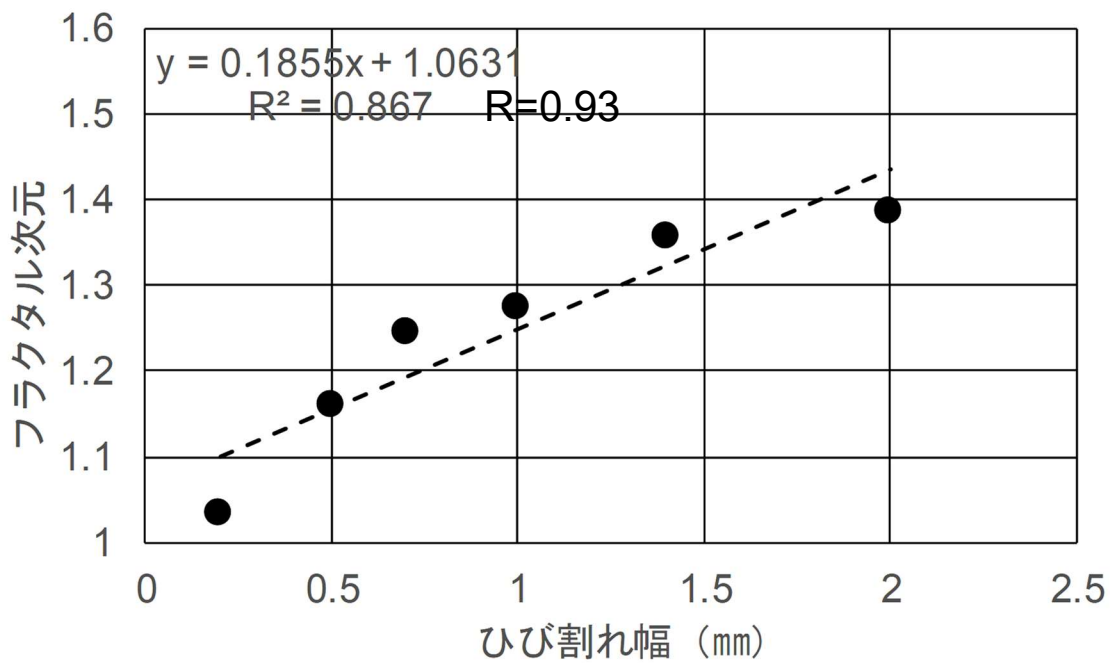


図 3.3-8 ひび割れ幅とフラクタル次元の相関性

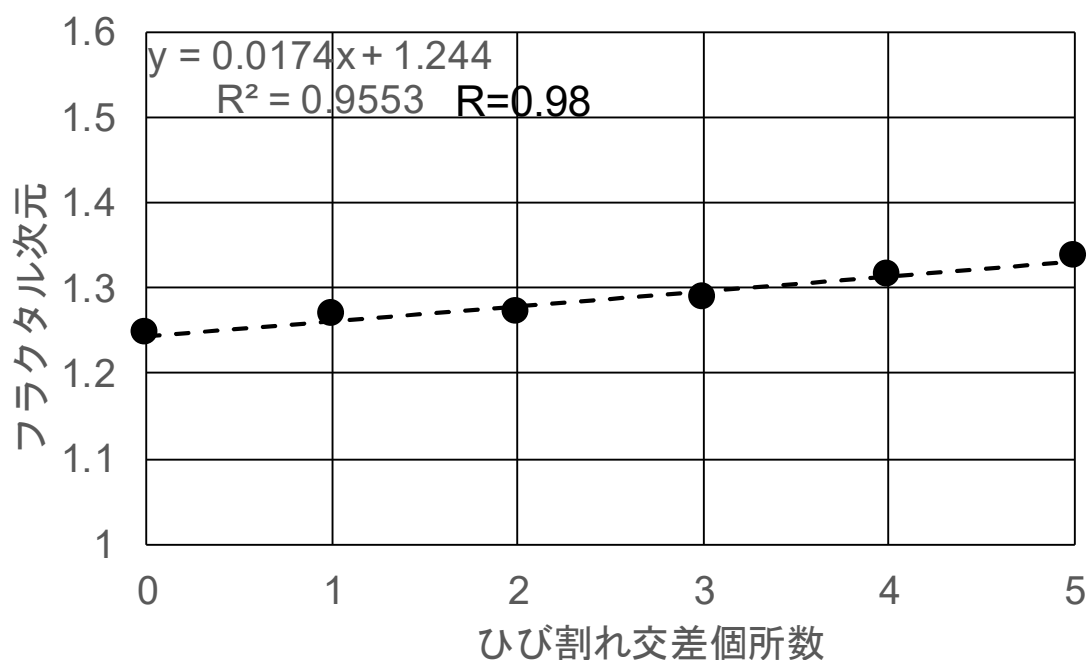


図 3.3-9 ひび割れ交差個所数とフラクタル次元の相関性

図 3.3-7 と図 3.3-8 を比較して考察する。幅 1 mm のひび割れ 4 本の場合、フラクタル次元は 1.2745 である。4 本のひび割れのひび割れ幅が 2 mm のときのフラクタル次元は 1.3857 であり、幅 1 mm のひび割れ本数 19 本程度に相当する。4 本のひび割れのひび割れ幅が 1 mm から 2 mm に変化した場合、ひび割れ開口面積が 2 倍に変化する一方で、幅 1 mm のひび割れの本数が 4 本から 19 本に変化した場合のひび割れ開口面積は、4.75 倍と大きく変化する。このことから、フラクタル次元はひび割れ幅の変化に対して鋭敏に変化することが分かった。これは、外力の作用などによりひび割れ幅が変化することを鋭敏に捉えられる可能性があると考えられる。

図 3.3-9 では、ひび割れ交差個所数が増加するとひび割れ開口面積は微減するが、フラクタル次元は微少ながら増加している。これは、フラクタル次元がひび割れ交差個所数の増によりコンクリート片のはく落の危険性や、覆工コンクリートのブロック化による剛性の低下を表現できる可能性があると推測する。

3.4 まとめ

フラクタル次元解析は、ひび割れの面積、ひび割れ本数、ひび割れ幅、ひび割れ交差個所数の変化を表現できることが明らかとなった。実際の運用では、高解像度の覆工表面画

像からひび割れを自動抽出してフラクタル次元解析を行うことが可能であるため、効率的かつ正確なひび割れ分布状況の定量データ化が期待できる。

参考文献

- 1) 東日本, 中日本, 西日本高速道路株式会社 : 保全点検要領 (構造物編) 補足資料, pp.5-21, pp.5-23, 2015.4
- 2) Nishibayashi.S : Evaluation of Alkali-Agreagate Reaction by Concrete Specimen, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1987
- 3) 百武稔郎, 柿本忠純 : 既設橋梁における床版等のひび割れ検出システムの開発, 平成13年度福岡県工業技術センター研究報告(第12号), 2001
- 4) 阿部忠行, 小川進 : 舗装ひび割れのフラクタル解析, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.119-126, 1992.2
- 5) 王鉄成, 西林新蔵 : アルカリ骨材反応による膨張ひび割れのフラクタル次元解析, コンクリート工学論文集第8巻第1号, pp.43-50, 1997.1
- 6) 三橋博三 : 平成13年度-平成14年度科学研究補助金 (基盤研究(C)(2)) 研究成果報告書, 課題番号 13650613

第4章 トンネル覆工のひび割れ自動抽出技術の構築

4.1 概説

本研究では、近接目視点検作業の負担軽減と変状抽出の個人差の抑制を目的として、①覆工表面撮影システム、②覆工表面画像作成ソフトウェア、③ひび割れ自動抽出ソフトウェアで構成する「トンネル覆工点検システム」を開発した。本システムは、トンネル内を走行しながら覆工表面を撮影し、得られた覆工表面画像からひび割れを自動抽出、図化することが可能である。本章では、本システムの開発内容および、本システムを使用して得られるひび割れ自動抽出結果と現地トンネルのひび割れとの整合性について検証した。

4.2 トンネル覆工点検システムの開発

4.2.1 トンネル覆工点検システムの目標性能と構成

トンネル内を走行する周辺車両に対して安全で、変状を正確に把握可能なトンネル覆工点検システムを目指して4項目の課題を設定した。課題と目標性能を表 4.2-1 に示す。

課題 A に対する目標性能は、高速道路を走行する周辺車両の交通流を阻害しない撮影速度 100 km/h を目指す。

課題 B に対する目標性能は、写真 4.2-1 に示す撮影時に周辺車両のわき見運転を誘発する可能性があるまぶしい光を発しない照明を目指す。

課題 C に対する目標性能は、閉合ひび割れなどコンクリート片がはく落する危険性があるひび割れ（以下、「はく落危険箇所」という）を早期発見するために微細なひび割れを写すことができ、さらに様々な断面形状のトンネルに対する撮影汎用性を両立できる解像度の技術上の限界として、経験的に 0.5mm/画素を目指す。

課題 D に対する目標性能は、近接目視点検で最も労力を必要とし、個人差が生じやすいひび割れの抽出、記録の自動化技術の構築を目指す。課題 C で設定した解像度による自動抽出可能なひび割れ幅は 1 画素のおよそ半分の幅である 0.2mm を目標とする。

表 4.2-1 トンネル覆工点検システムの課題と目標性能

| 課 題 | 目標性能 |
|--|---|
| A. 撮影時の交通阻害を抑制 | 撮影速度最高 100km/h の覆工表面撮影車両 |
| B. 走行撮影時における周辺通行車両のわき見運転防止 | 撮影時照明を不可視化した覆工表面撮影車両 |
| C. 変状の確実な抽出と様々な断面寸法のトンネルに対する撮影汎用性を両立した解像度の覆工表面画像 | 高解像度画像が取得可能な覆工表面撮影車両および覆工表面画像作成ソフトウェア（解像度 0.5mm/画素） |
| D. ひび割れの抽出, 記録の労力低減および個人差抑制 | ひび割れ自動抽出ソフトウェア（自動抽出ひび割れ最小幅 0.2mm） |



写真 4.2-1 可視光照明を使用した覆工表面撮影状況の例

4.2.2 覆工表面撮影システムの開発

(1) 全体構成

覆工点検システムの全体構成は、①走行しながら覆工表面を撮影する「覆工表面撮影システム」、②撮影した画像からトンネル全体の覆工表面画像を作成する「覆工表面画像作成ソフトウェア」、③覆工表面画像を解析してひび割れを自動抽出する「ひび割れ自動抽出ソフトウェア」とした。撮影車の撮影機材はカメラによるものとし、複数のカメラでトンネル半周を分割撮影する。例えば、図 4.2-1 のとおり 2 車線トンネルの場合、左右の車線をそれぞれ走行し半周ずつ撮影する。

(2) 撮影用カメラの選定

解像度 0.5mm/画素の覆工表面画像を取得するには、たとえば上半半径 5.5m、スプリングライン高 1.6m の場合、周長は約 20.5m となり、約 41 000 画素で撮影可能な台数のカメラが必要である。また複数台のカメラ画像を合成する処理が必要であり、健全度評価へ早期につなげるには画像合成処理をできるだけ速やかに行わなければならない。このような観点から、撮影用カメラの選定にあたっては一般的なビデオカメラであるエリアセンサカ

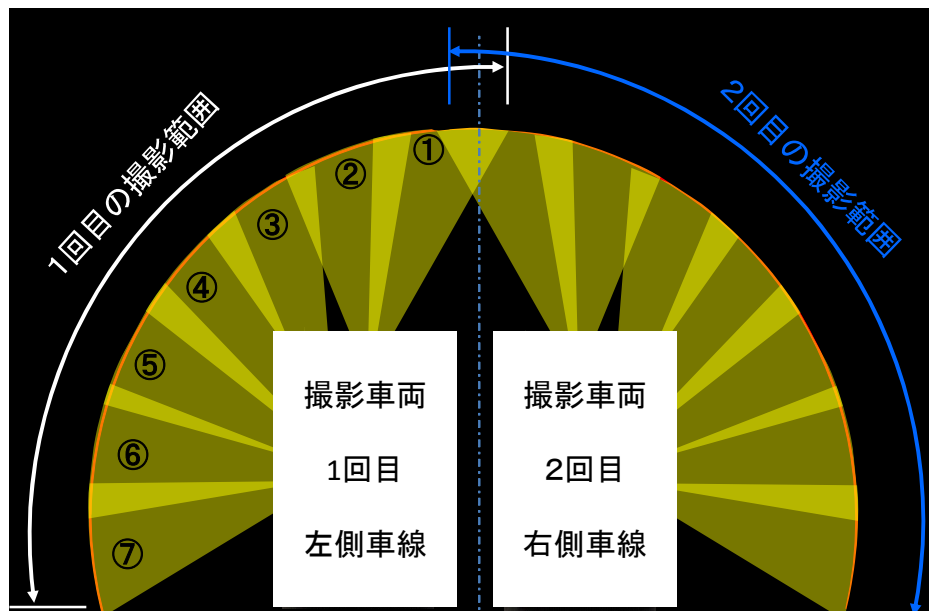


図 4.2-1 複数カメラによる分割撮影の例

メラと、工場の品質管理などで使用されるラインセンサカメラを表 4.2-2 のとおり比較した。エリアセンサカメラは、センサの形状が矩形で撮影データは動画となる。覆工表面画像の作成は、動画を静止画に変換して写真を生成し、撮影進行方向および隣り合うカメラ同士の画像合成を行う。一方でラインセンサカメラは、センサの形状がライン状で、撮影データは撮影進行方向に連続した静止画像となる。したがって、静止画変換作業および撮影進行方向の画像合成が不要となるため、ラインセンサカメラのほうが画像合成処理を省力化できる。次に、式(4.2.1)、式(4.2.2)に基づきハイビジョンビデオカメラとラインセンサカメラの必要台数を試算した。図 4.2-2 に模式図を示す。

表 4.2-2 エリアセンサカメラとラインセンサカメラの比較

| 比較項目 | エリアセンサカメラ | ラインセンサカメラ |
|----------------|--|--|
| センサ |  |  |
| 撮影データ | 動画 | 静止画 |
| 取得画像 | 撮影動画を静止画変換し、一般的に撮影進行方向に 30 枚/秒の写真を生成 | 撮影進行方向に帯状連続画像 シャッター 56,000 回/S (時速 100 km) |
| 撮影進行方向の画像合成の要否 | 必要 | 不要 |

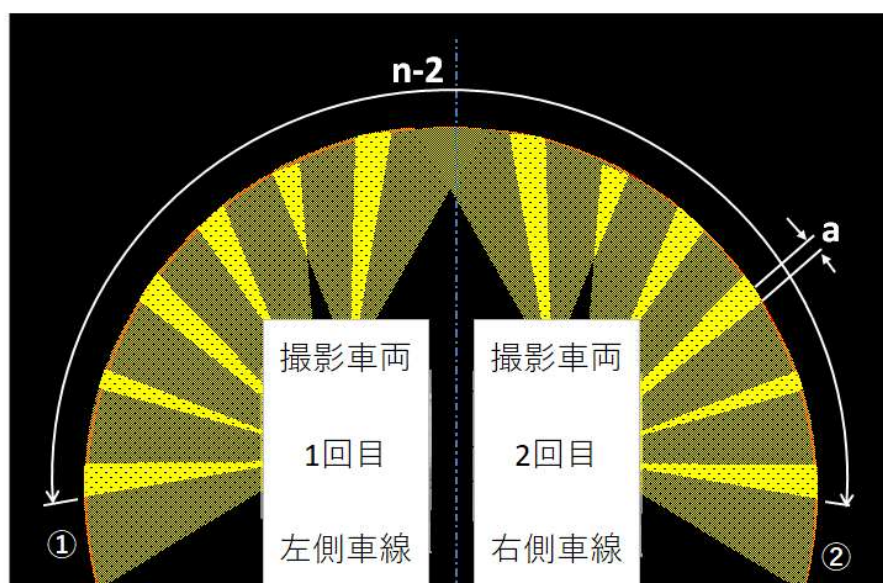


図 4.2-2 カメラ必要台数試算模式図

$$L \doteq (n-2) \times g \times (1-a \times 2) + 2 \times g \times (1-a) \quad (4.2.1)$$

$$n \doteq \left(\frac{L}{g} - 0.3\right) / 0.7 \quad (4.2.2)$$

ここに、 L ：トンネル周長方向の画素数

n ：カメラ台数

g ：カメラの画素数

ハイビジョンカメラ：1 920 画素

ラインセンサカメラ：4 096 画素

a ：隣り合うカメラの重複率

試算の結果、ハイビジョンカメラの場合 30 台（撮影車両搭載台数 15 台）、ラインセンサカメラの場合 14 台（撮影車両搭載台数 7 台）となった。したがって、画像合成の効率性の面からラインセンサカメラを採用した。ラインセンサカメラの性能は、課題 A,C である時速 100km で解像度 0.5mm/画素の撮影を行うために 56kHz 以上のラインレートが必要である。また、課題 D であるひび割れ自動抽出を実現するために、ひび割れをより鮮明なコントラストで表現可能なモノクロ画像でダイナミックレンジの大きさを優先した。表 4.2-3 に撮影用カメラの選定結果を示す。

(3) カメラレンズ調整機構

撮影対象となるトンネル断面の形状寸法は様々であるため、様々な形状寸法に対して解像度 0.5mm/画素となる視野幅に調整するズームレンズが必要となる。しかし、ラインセンサカメラ用のレンズにはオートフォーカス、ズーム機構を有する機種が存在しない。そのため、ズームについてはレンズのズームリングをギヤとモーターで自動制御する機構を開発した。フォーカスについては、別体のレンズ制御アダプタを採用した。

図 4.2-3 にズーム、フォーカス制御機構を示す。

表 4.2-3 撮影用カメラの選定結果

| カメラの種類 | ラインセンサカメラ |
|-----------|------------------|
| 画素数 | 4 096 画素 |
| ラインレート | 56kHz/100km/h 以上 |
| 画像の色 | モノクロ |
| ダイナミックレンジ | 70.7dB |



図 4.2-3 ズーム，フォーカス制御機構

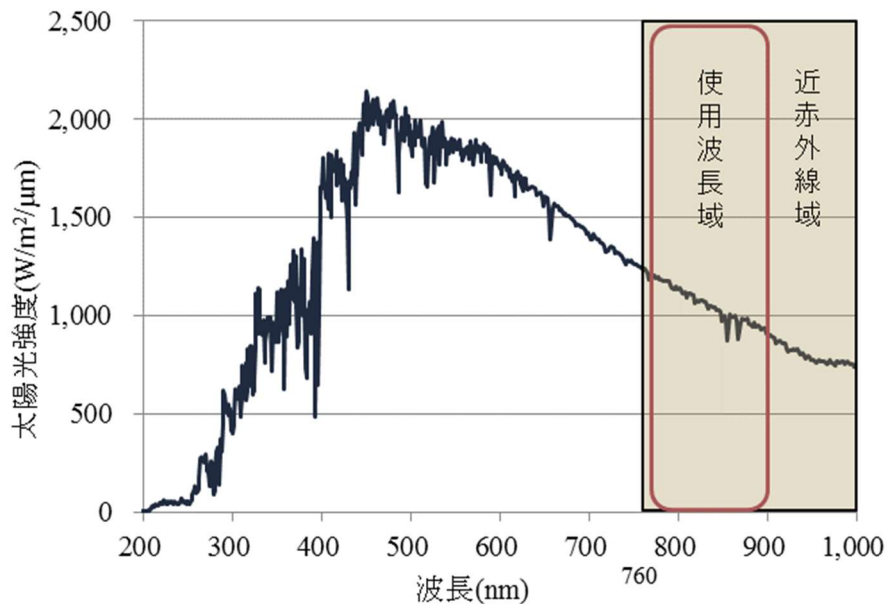


図 4.2-4 太陽光の波長域とバンドパスフィルタの波長域

(4) 近赤外線照明

課題 B の走行撮影中における通行車両のわき見運転防止策は、撮影用照明に近赤外線照明を採用して不可視化することとした。また、近赤外線照明の波長域のみで撮影できるようにラインセンサカメラのセンサ前面部にバンドパスフィルタを設置した。本波長域での撮影は、図 4.2-4 (<http://wwwb.pikara.ne.jp/ogawa-iken/image-process/image-031.html> (2017/06/25 参照))に示すとおり、太陽光の波長域のうち使用波長域以外を排除することで、トンネル入口部撮影時における太陽光の影響を抑制する効果も期待される。

近赤外線照明の光源は、集光性および品質・安全面から反射型 LED を採用し、ライン状に 60 個配置してリニアフレネルレンズによりライン状に集光させる照明ユニットを開発した。さらにカメラレンズ調整機構を備えたラインセンサカメラの撮影軸と照明ユニットの光軸を一致させたユニット（以下、「撮影ユニット」という）を開発した。図 4.2-5 に撮影ユニットを示す。

(5) 撮影ユニット配置シミュレーションソフトウェア

様々な形状寸法のトンネルに対し、7 台の撮影ユニットの角度、ズーム、フォーカスの最適値をシミュレーションするソフトウェアを開発した。図 4.2-6 に撮影ユニット配置シミュレーション結果の例を示す。

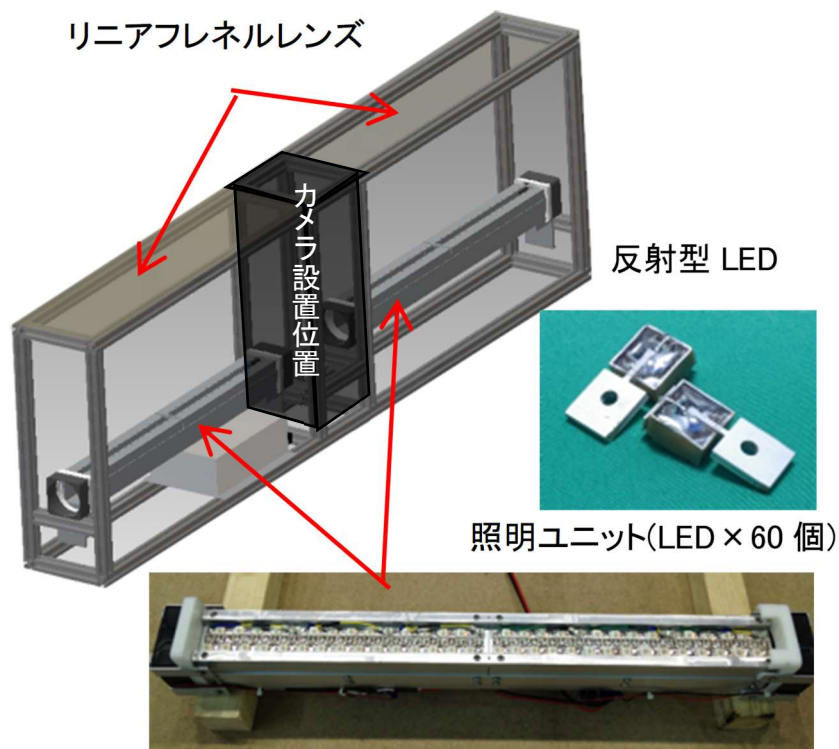


図 4.2-5 撮影ユニット

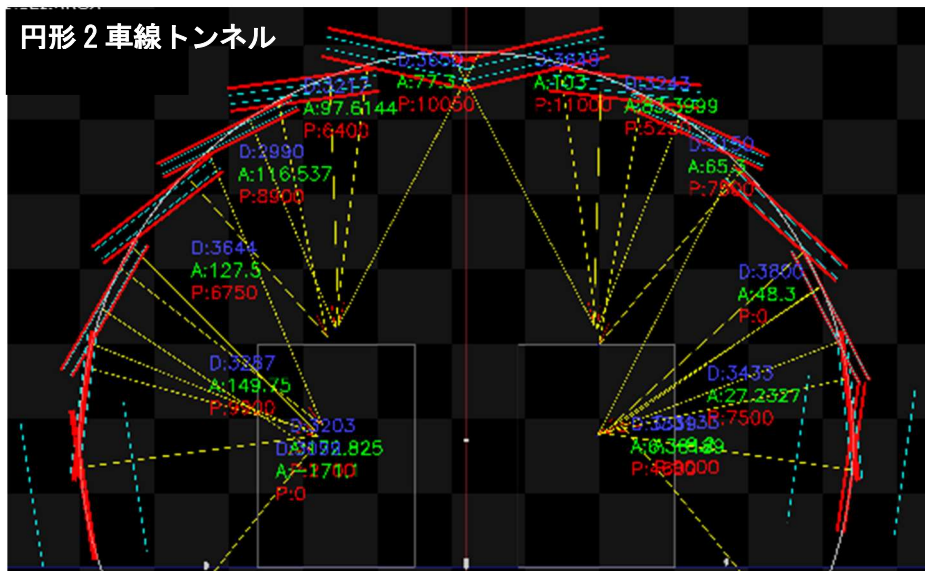


図 4.2-6 撮影ユニット配置シミュレーション結果の例

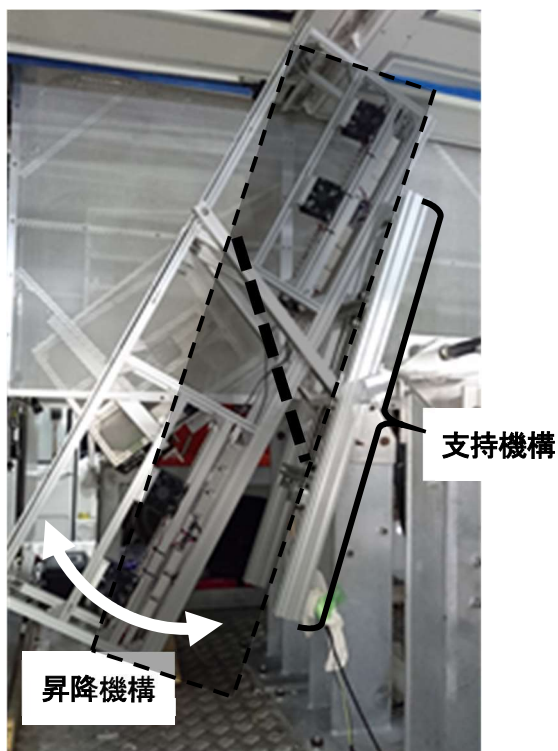


図 4.2-7 撮影ユニット角度調整機構

(6) 撮影ユニット角度調整機構

図 4.2-7 に撮影ユニット角度調整機構を示す。撮影ユニット配置シミュレーション結果に応じて、撮影ユニットが自動的に角度調整を行う機構を開発した。撮影ユニット角度調

整機構は、走行撮影中の車両の振動による撮影ユニットの揺れを抑制するために、強固な昇降機構と支持機構で構成される。

(7) 撮影制御ソフトウェア

撮影ユニット配置シミュレーション結果に基づいて、撮影ユニット角度調整機構への指令、撮影操作、および撮影画像の画質と隣り合うカメラ同士の画像の重複の確認を行う機能をそなえた撮影制御ソフトウェアを開発した。

(8) 覆工表面撮影車両

撮影車の開発仕様は、表 4.2-4 のとおりとした。撮影車の構造は、運転室、撮影操作室、機器室に分かれ、撮影操作室には、撮影制御ソフトウェアがインストールされた専用コンピュータが設置されている。機器室は、撮影ユニット角度調整機構を伴った撮影ユニットが7台設置されている。機器の配置を図 4.2-8 に示す。撮影ユニットは、撮影制御ソフトウェアからの指令により最適な配置と設定に自動で調整される。走行撮影中は、車両の蛇行や速度変化によりシミュレーションで設定したフォーカスやラインレートにずれが生ずる。これらのずれに対しては、距離センサによる覆工面までの測距データと、非接触速度計による速度データを撮影制御ソフトウェアに収集し、車両と壁面までの距離と速度の変化に応じて、フォーカスとラインレートを走行撮影中に制御する機構を開発した。トンネル覆工表面撮影状況を、写真 4.2-1 に示す。4.2.2(4)で述べた近赤外線照明を可視化するため、赤外線フィルターを介した状況である。

表 4.2-4 覆工表面撮影車両の開発仕様

| 仕様項目 | 仕 様 |
|--------|---|
| 撮影走行速度 | 5～100km/h |
| 対象車両 | ベース車両 3.5t クラス |
| 乗車定員 | 4 名 |
| 適用規格 | JIS, 道路交通法, 路交通法施行令, 道路運送車両法, 車両制限令 |
| 保護性能 | IP55 相当(防塵、防噴流水), 近赤外線照明が 人体に影響を与えない防護構造 |
| 空調管理 | 高温、低温時に正常に稼働するための空調を備える |

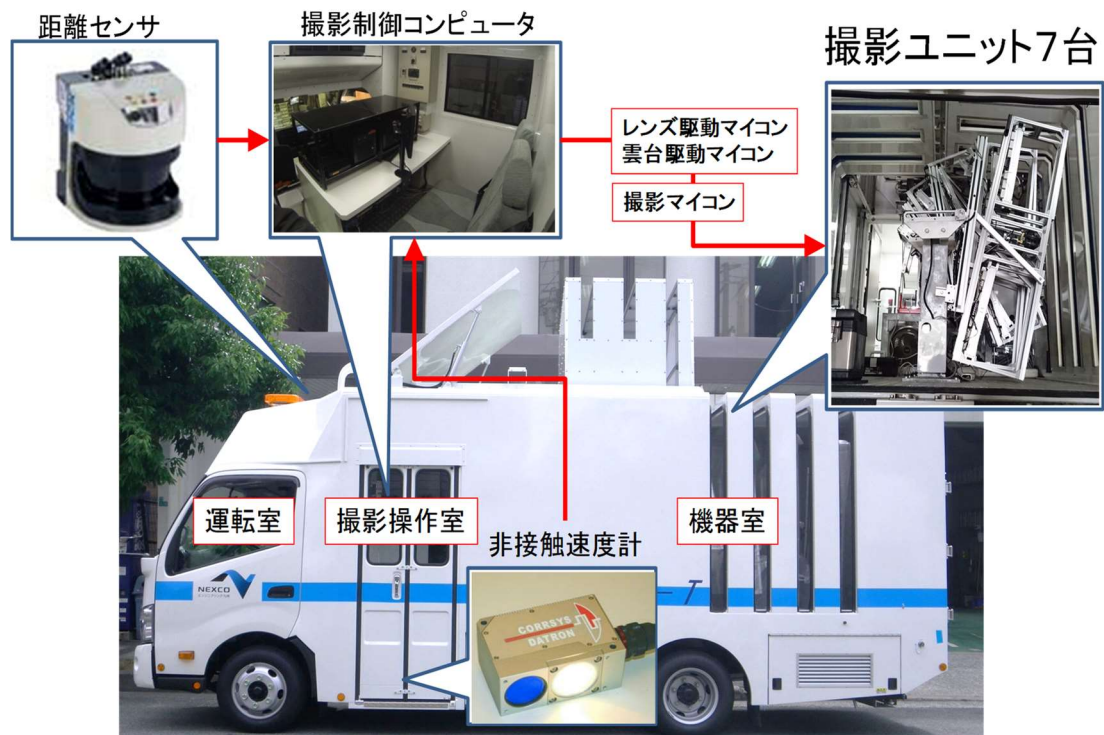


図 4.2-8 覆工表面撮影車両機器等配置状況



(赤外線フィルターを通して撮影。肉眼で撮影用照明は可視不可である)

写真 4.2-1 トンネル覆工表面撮影状況

4.2.3 覆工表面画像作成ソフトウェアの開発

本ソフトウェアの処理手順は以下のとおりである。

(1) シェーディング補正による輝度レベルの統一

シェーディング補正では、下記の5点について輝度補正を行い、一様な照明条件下の画像を生成することで各カメラ画像の輝度格差を解消する。輝度補正は、平均輝度と分散値を撮影データから算出し、その平均値と分散値が所定の値になるようにした。

- ① レンズの周辺の光量低下
- ② LED 照明の輝度むら(周辺光量の低下)
- ③ 撮影ユニットから覆工表面までの距離
- ④ 撮影ユニットの傾きによる輝度傾斜
- ⑤ 覆工表面の汚れ具合による輝度低下

図 4.2-9 左図の補正前画像では各カメラ間の距離・向きの違いからカメラ間およびカメラ中央部と周辺部の輝度レベルが大きく異なっている。図 4.2-9 右図の補正後の画像では、各カメラ画像の輝度レベルが一様になり、カメラ間の輝度差も解消されている。

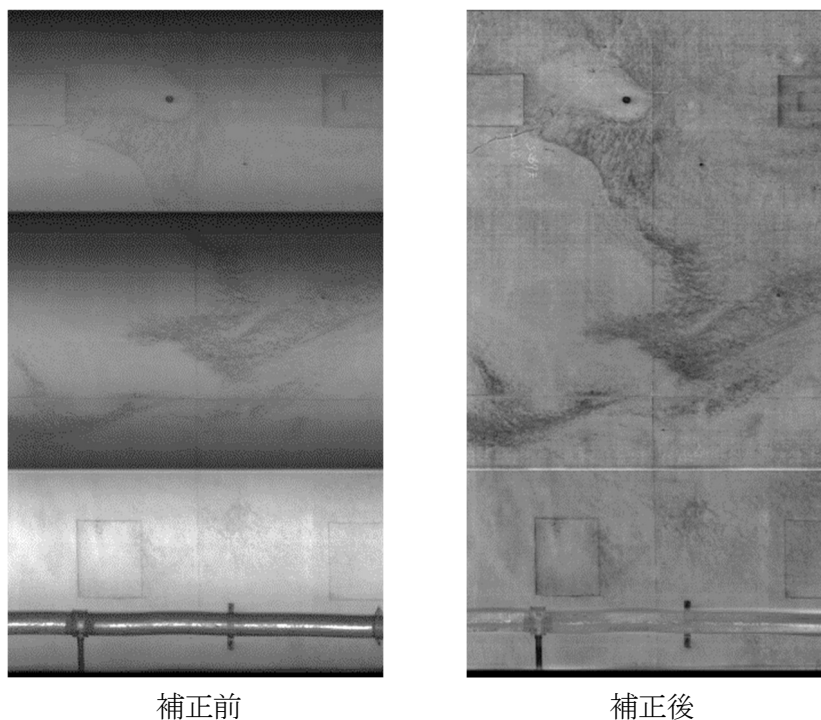
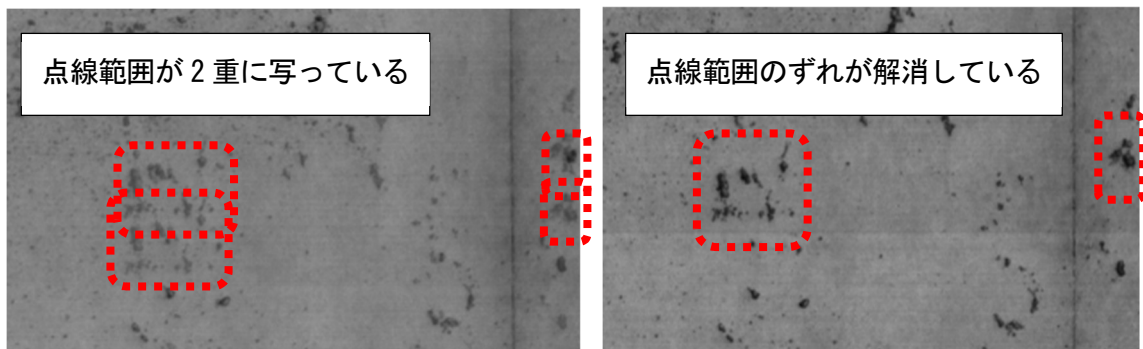


図 4.2-9 シェーディング補正状況



位置合わせ処理前画像

位置合わせ処理後画像

図 4.2-10 隣り合う撮影画像の位置合わせ処理の効果

(2) 逆射影による画像歪みのキャンセル

距離センサから得たトンネルの形状と、覆工表面に対する各カメラとの相対位置のデータに撮影画像を逆射影することで、各カメラの覆工表面までの距離が一律でないことと、あおり撮影による解像度の不均一、レンズ収差による画像のひずみについて補正を行う。

(3) 隣り合う撮影画像の位置合わせ

隣り合う撮影画像を正確に合成するための位置あわせを実施する。処理の手順は次のとおりである。

手順1 各撮影画像について、正確にスパン両端の境界を切り出し、スパン境界が垂直になるようにスパン境界上下端の4点を4隅とする長方形に変形するホモグラフ変換を行う。

手順2 水平方向のエッジ成分を抽出し、隣り合う撮影画像の重複部分において一致度の最も高い個所を検索して画像の整合点とする。図 4.2-10 に隣り合う撮影画像の位置合わせ処理の効果を示す。このように画像のずれが解消されている。

4.2.4 ひび割れ自動抽出ソフトウェア

ひび割れ自動抽出ソフトウェアは、覆工表面画像を図 4.2-11 に示す手順で解析して、覆工表面画像に写るひび割れを自動抽出、図面化する。

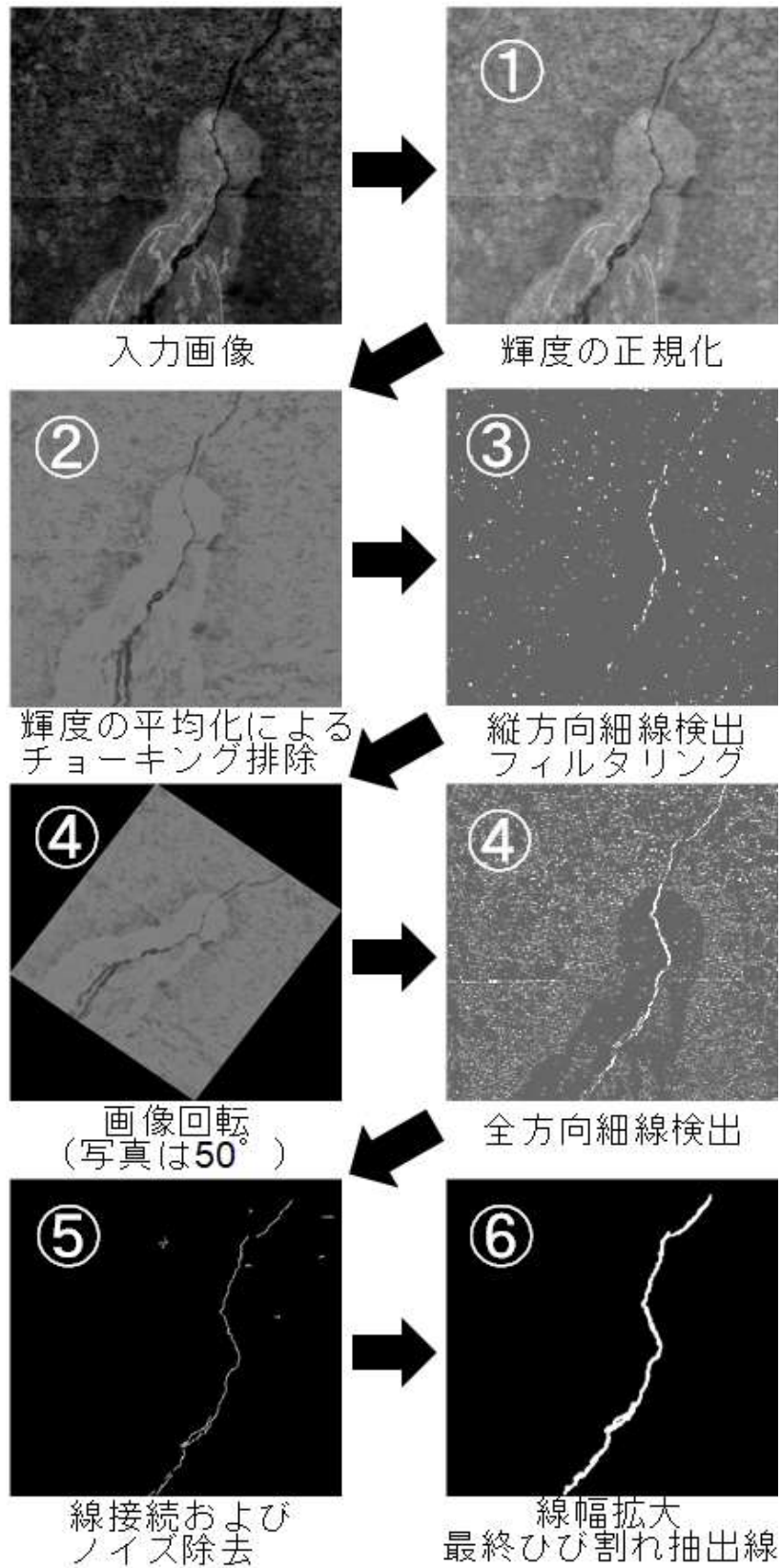
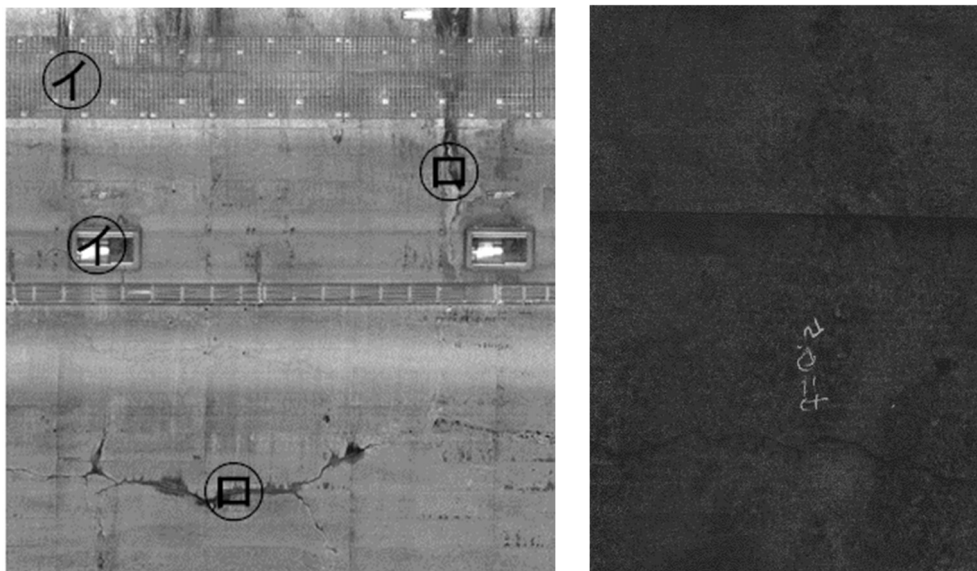


図 4.2-11 ひび割れ自動抽出ソフトウェアの処理手順

- ①画像の輝度平均を計算し、指定した輝度値に変換する。
 - ②輝度平均値以上の領域を検出し、平均値で埋める処理を行い、チョーキングを排除する。
 - ③ひび割れの輪郭フィルターカーネルによるフィルタリングを行い、細線の縦方向成分を検出する。
 - ④画像を回転させながら③の処理を行うことで、全方位の細線を検出する。
 - ⑤全方向細線検出画像から、距離センサデータおよび直線検出アルゴリズムなどを用いて、トンネル内施設物、型わく跡などの人為的な線を除去したうえで細線を接続し、長さが短い線分をノイズとして除去する。
 - ⑥接続した細線を、ひびわれ図として見やすくするために線幅を拡大する。
- なお、**図 4.2-12** および下記に示す事象はひび割れ自動抽出が不可能である。
- ㊦照明や補修個所の裏面など画像に写っていない場合。
 - ㊧漏水、エフロレッセンスにより覆工表面の色とのコントラスト差が少ない、もしくは輝度が高い場合。
 - ㊨幅 0.2mm 未満のひび割れ。
 - ㊩煤汚れが著しく、コントラスト全体的に低い場合。
 - ㊪ピントが合っていない場合。



漏水，エフロレッセンス，照明

㊩煤汚れが著しい覆工面

図 4.2-12 ひび割れ自動抽出対象外の例

4.3 ひび割れ自動抽出精度の検証

4.3.1 ひび割れ自動抽出精度検証手順

トンネル覆工点検システムのひび割れ自動抽出精度を検証した。検証にあたっては、覆工表面状況の特徴が異なると抽出精度が異なると考え、NATM および矢板工法のトンネルを検証対象トンネルとした。表 4.3-1 に検討対象トンネルの覆工表面の特徴と対象スパン数を示す。実施手順は次のとおりである。

手順 1 撮影車を時速 100km で走行させて覆工表面撮影を行い、対象スパンの覆工表面画像作成およびひび割れ自動抽出、図面化を行う。

手順 2 手順 1 と並行して、トンネル定期点検のひび割れ図をもとに現地を詳細確認し、幅 0.2mm 以上のひび割れの記録漏れを図面上に追記する（以下、「ひび割れ詳細確認結果図」という）。

手順 3 ひび割れ詳細確認結果図とひび割れ自動抽出結果図のひび割れを個別にピクセル数で比較し、ひび割れ詳細確認結果に対するひび割れ延長の整合率を算出する。

なお近接目視点検結果のひび割れ線について、図 4.3-1 に示すとおり覆工表面画像の状態を観察して次のケースに分けて色分けした。本検証はケース 3 を対象とした。

ケース 1：照明不足によるコントラスト低下、ピンボケ、ひび割れ幅 0.2 mm未満（緑）

ケース 2：黒っぽい覆工打設模様や漏水上に発生したひび割れの場合。（赤）

ケース 3：正常な撮影画像上のひび割れ（青）

表 4.3-1 ひび割れ自動抽出精度検証対象トンネル

| トンネル | 工法 | 特徴 | 対象スパン数 |
|----------------------|------|-------------------------------------|--------|
| 九州自動車道 加久藤トンネル上り線 | NATM | 煤汚れ平均的、 コンクリート打設模様あり | 5 |
| 長崎自動車道 馬神トンネル下り線 | 矢板工法 | 煤汚れ平均的、漏水・エフロレッセンス、 コンクリート打設模様顕著 | 5 |

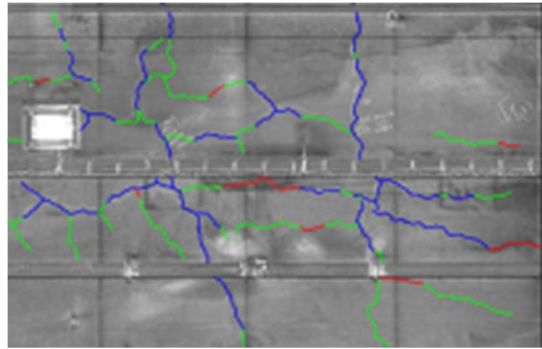


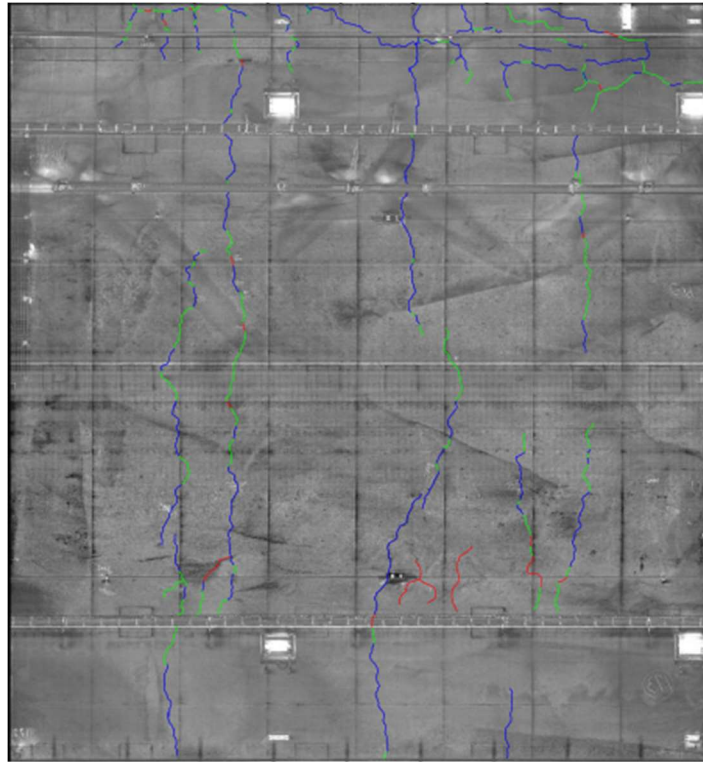
図 4.3-1 ひび割れ線の色分け例

表 4.3-2 加久藤トンネルひび割れ自動抽出整合率

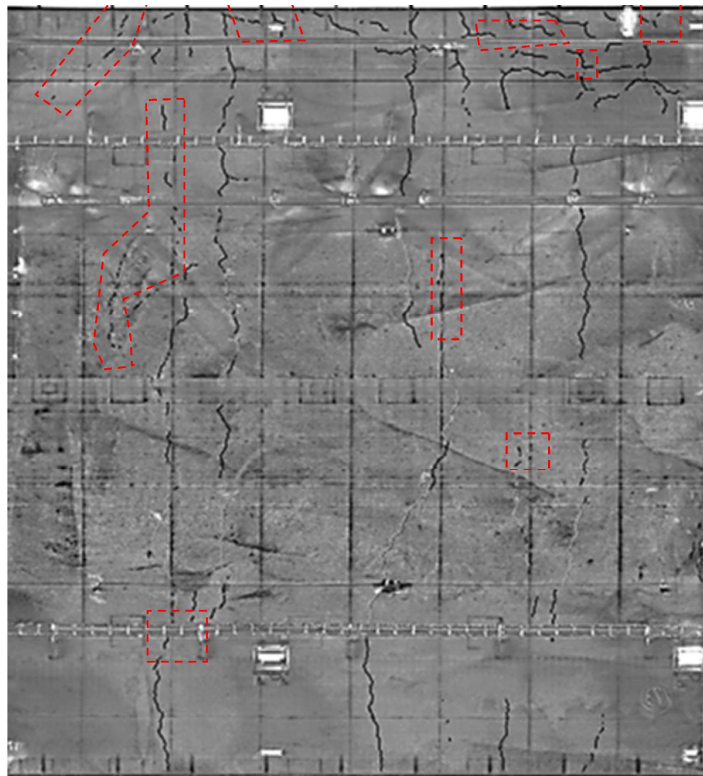
| スパン No. | 詳細確認結果 (ピクセル数) | ひび割れ自動抽出結果 | |
|---------|-------------------|------------|---------|
| | | ピクセル数 | 整合率 (%) |
| 1 | 156 523 | 150 241 | 96 |
| 2 | 255 602 | 245 389 | 96 |
| 3 | 170 393 | 156 743 | 92 |
| 4 | 134 652 | 125 209 | 93 |
| 5 | 132 512 | 117 935 | 89 |
| 平均 | | | 93 |

4.3.2 ひび割れ自動抽出精度検証結果

加久藤トンネルのひび割れ詳細確認結果とひび割れ自動抽出結果を表 4.3-2 に、トンネル定期点検のひび割れ図と自動抽出ひび割れ図の比較を図 4.3-2、図 4.3-3、図 4.3-4、図 4.3-5、図 4.3-6 に示す。平均延長整合率は 93%と実用的な結果となった。なお、図中の点線で囲んだ範囲は、トンネル定期点検で記録漏れであった個所である。これは、前述の問題点である変状の見落としや記録漏れ、抽出の個人差を解決できる可能性があることを示している。

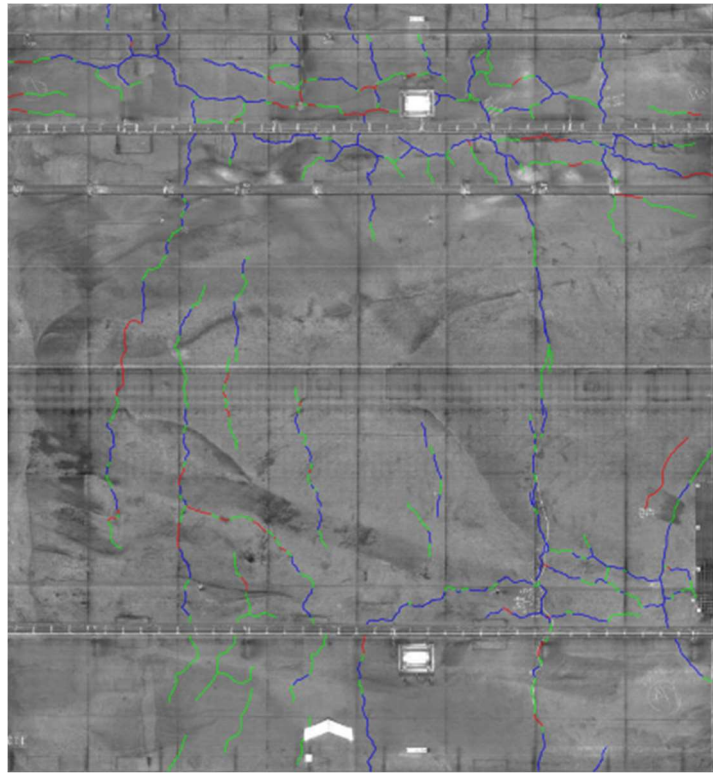


トンネル定期点検結果

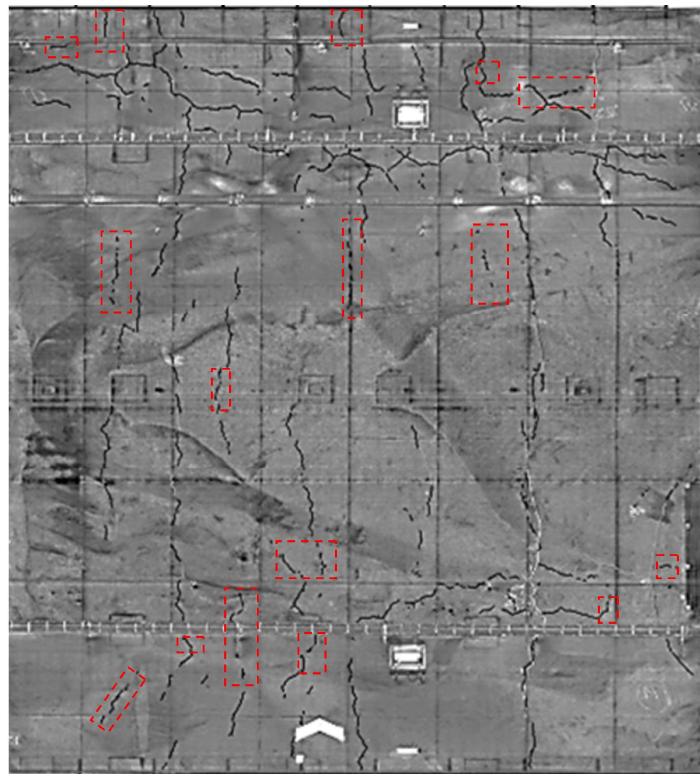


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-2 加久藤トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.1)

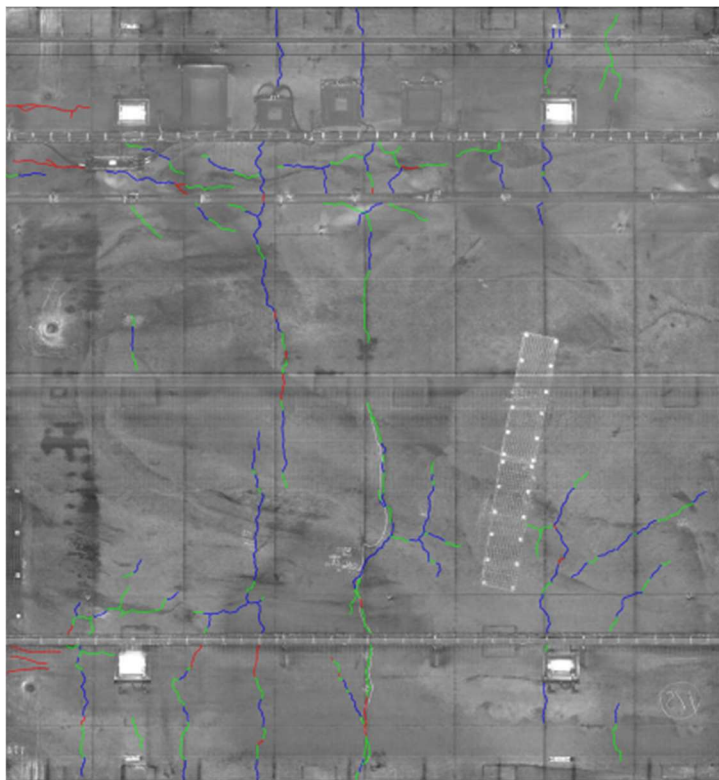


トンネル定期点検結果

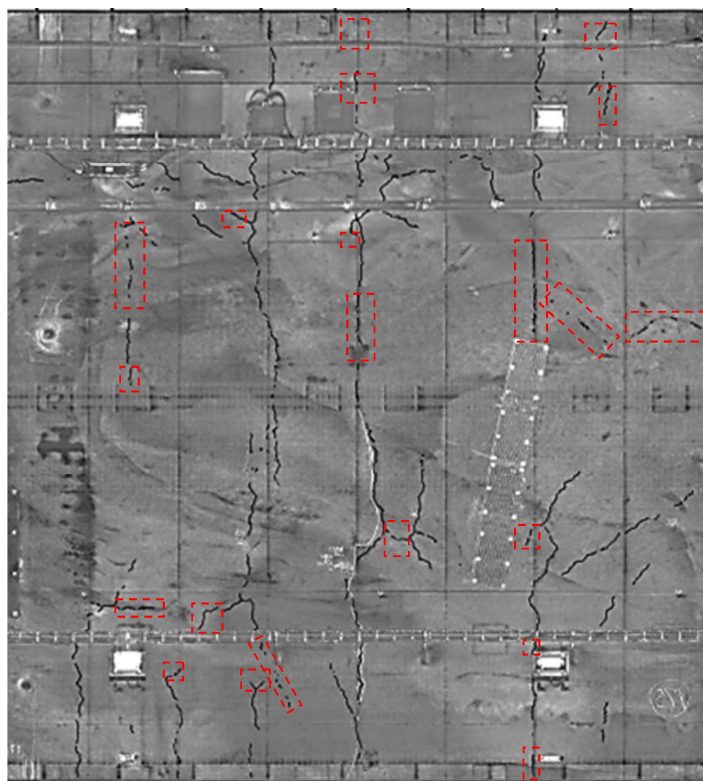


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-3 加久藤トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.2)

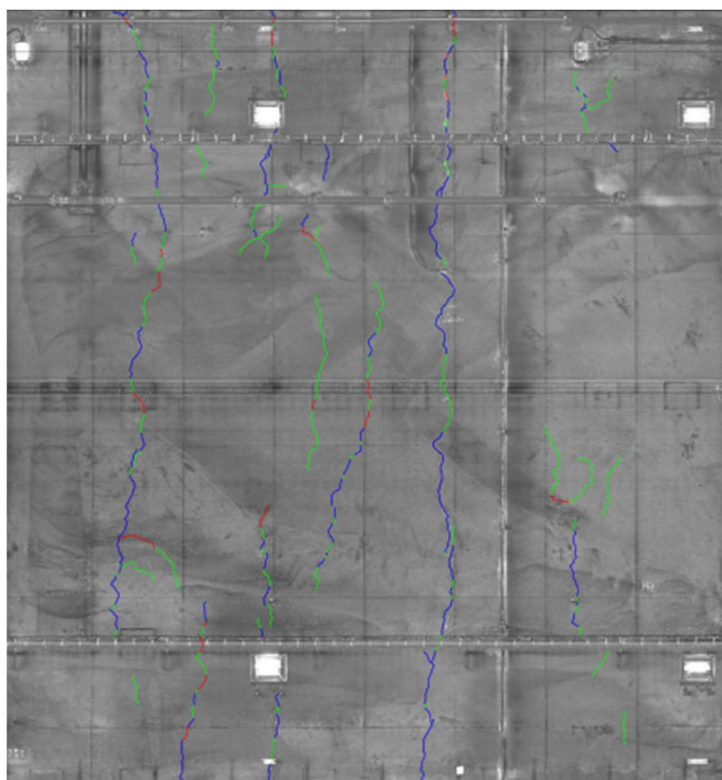


トンネル定期点検結果

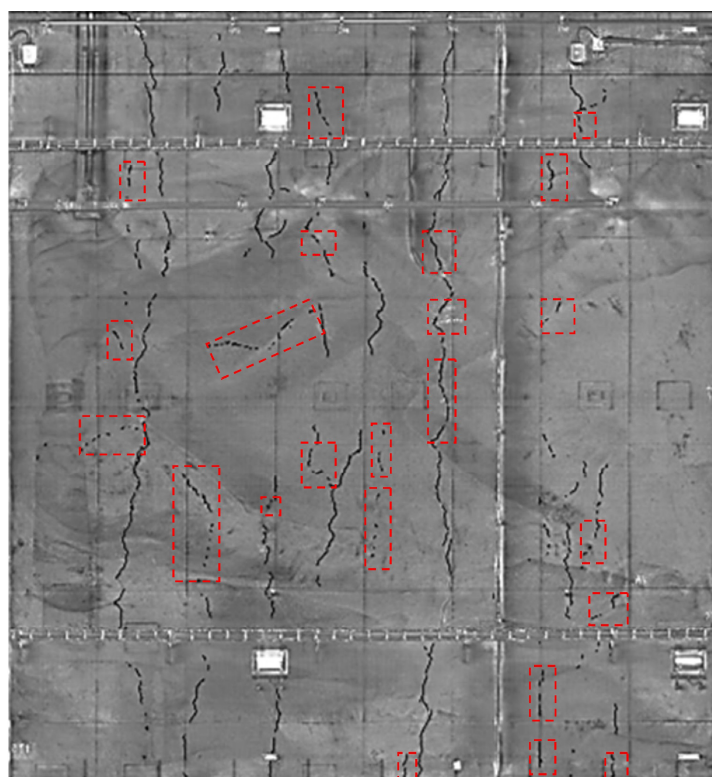


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-4 加久藤トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.3)

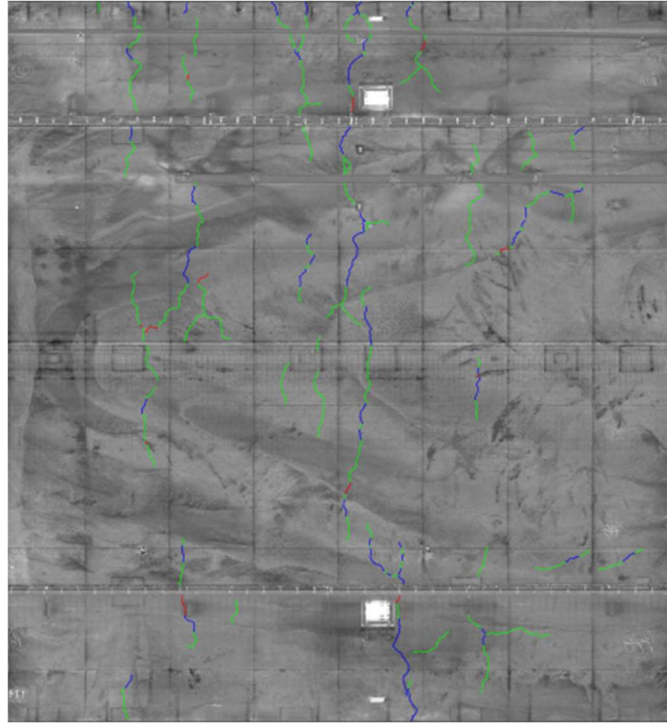


トンネル定期点検結果

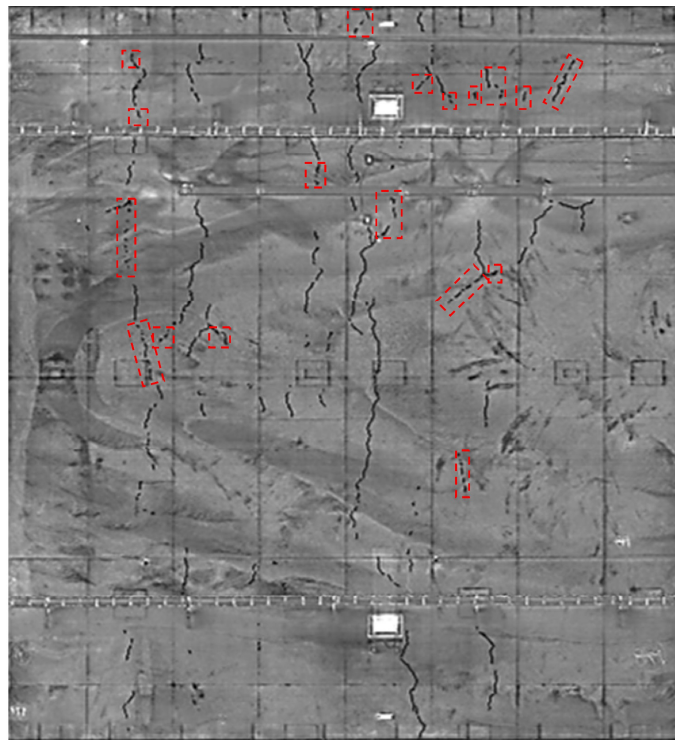


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-5 加久藤トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.4)



トンネル定期点検結果



ひび割れ自動抽出結果

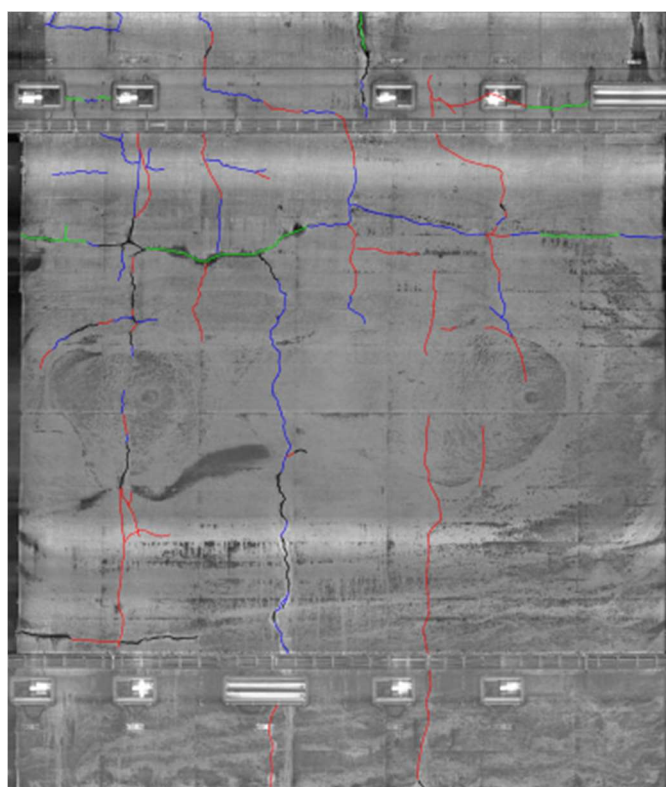
図 4.3-6 加久藤トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.5)

馬神トンネルのひび割れ詳細確認結果とひび割れ自動抽出結果を表 4.3-3 に、トンネル定期点検のひび割れ図と自動抽出ひび割れ図の比較例を図 4.3-7、図 4.3-8、図 4.3-9、図 4.3-10、図 4.3-11 に示す。平均延長整合率は 88%と NATM より低いが比較的良好な結果となった。NATM の A トンネルと矢板工法の馬神トンネルの整合率の差の原因は、矢板工法のトンネルにおいて、覆工コンクリート打設の模様に沿って生じたひび割れが、覆工面とひび割れのコントラスト不足により抽出できなかったことに起因すると考えられる。

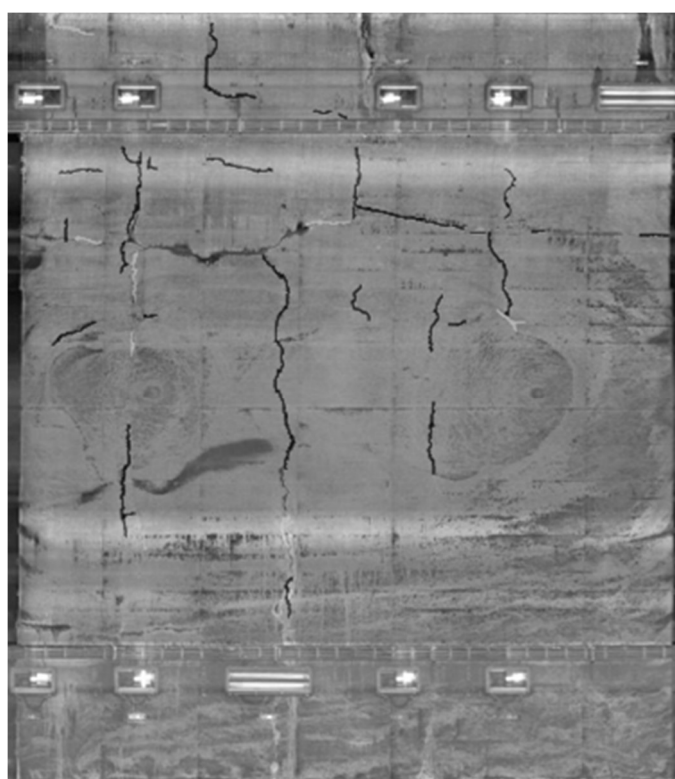
なお、実務上はひび割れ自動抽出結果を点検技術者がチェックし、未抽出、誤抽出を編集して仕上げるため、未整合については補完可能である。

表 4.3-3 馬神トンネルひび割れ自動抽出整合率

| スパン No. | 詳細確認結果 (ピクセル数) | ひび割れ自動抽出結果 | |
|---------|-------------------|------------|---------|
| | | ピクセル数 | 整合率 (%) |
| 1 | 681 985 | 588 553 | 86 |
| 2 | 196 648 | 181 523 | 92 |
| 3 | 426 363 | 391 786 | 92 |
| 4 | 494 301 | 447 468 | 91 |
| 5 | 327 546 | 262 089 | 80 |
| | | 平均 | 88 |

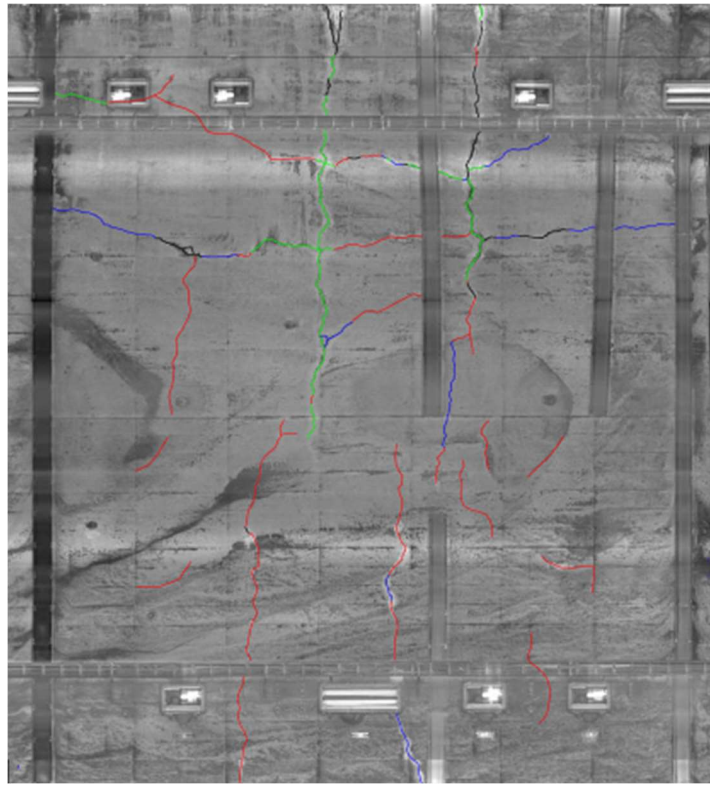


トンネル定期点検結果

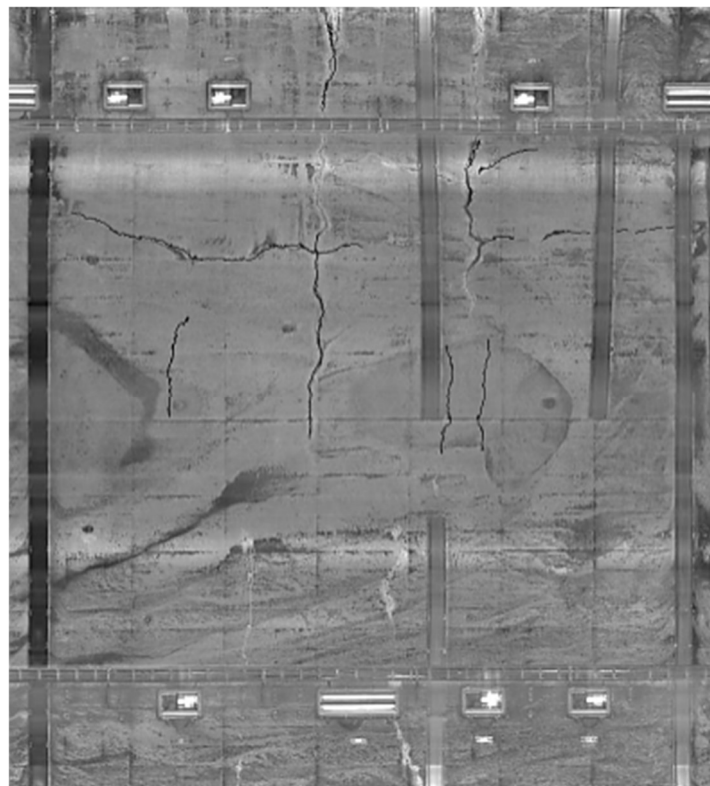


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-7 馬神トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.1)

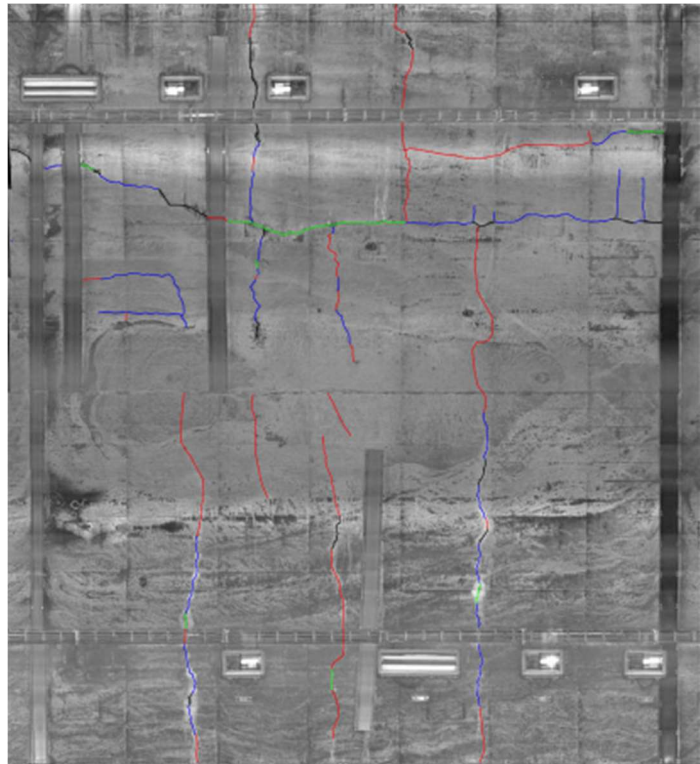


トンネル定期点検結果

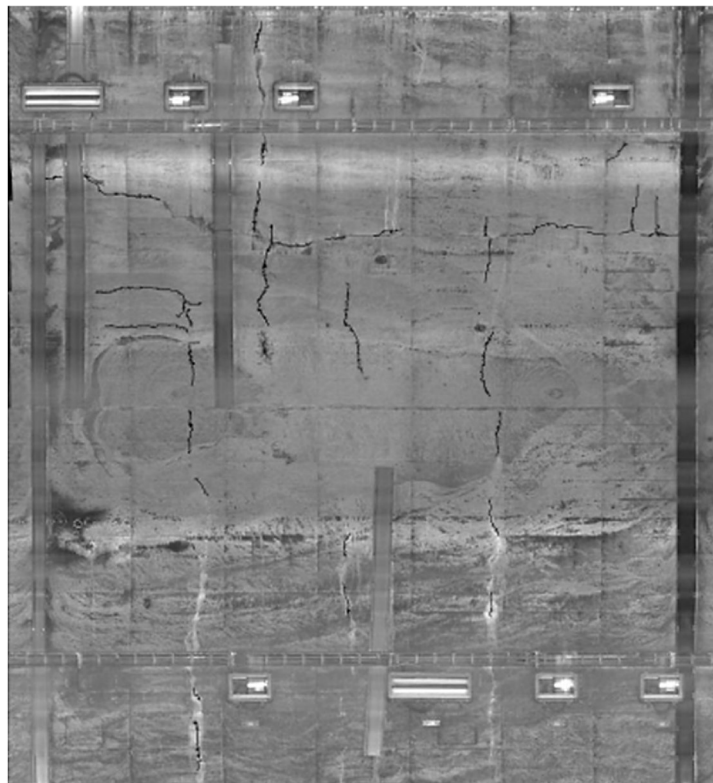


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-8 馬神トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.2)

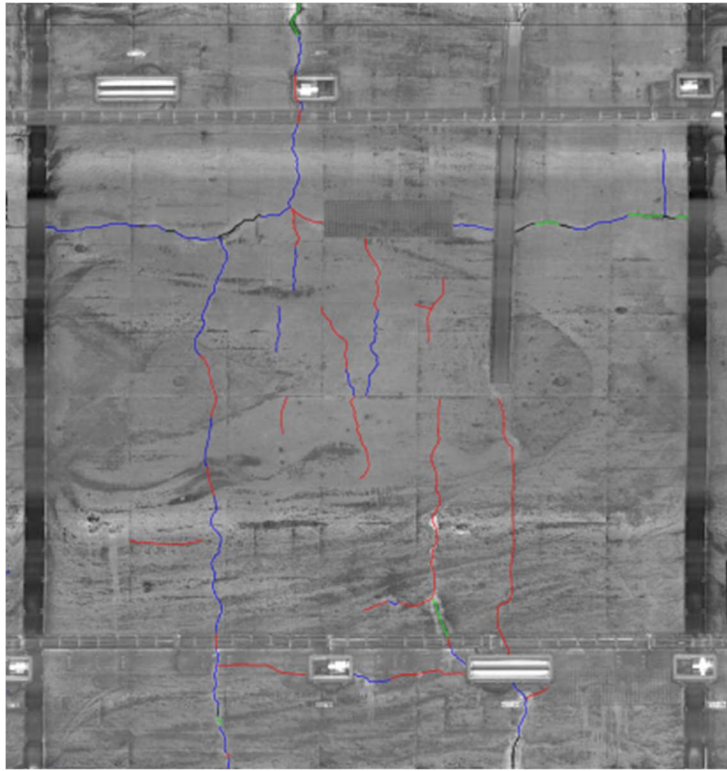


トンネル定期点検結果

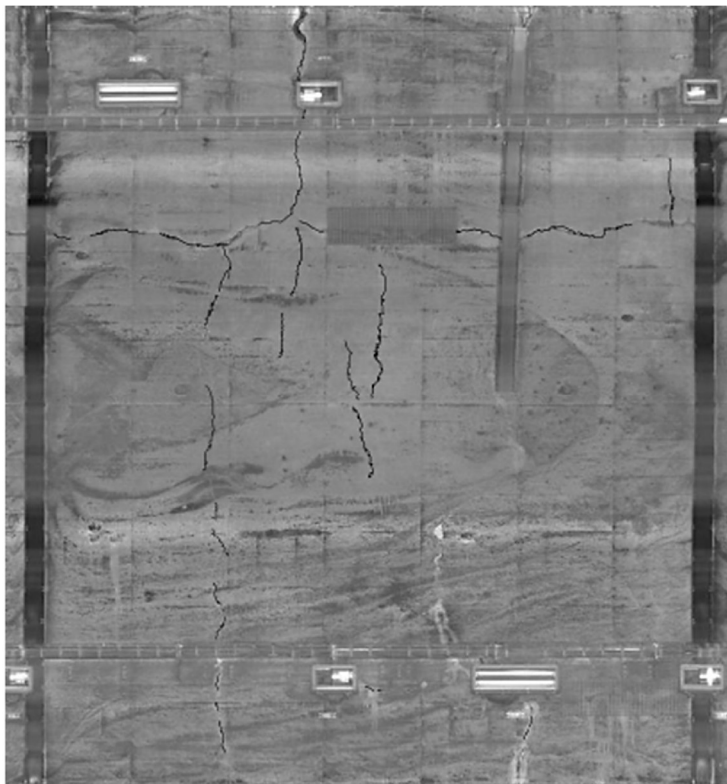


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-9 馬神トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.3)

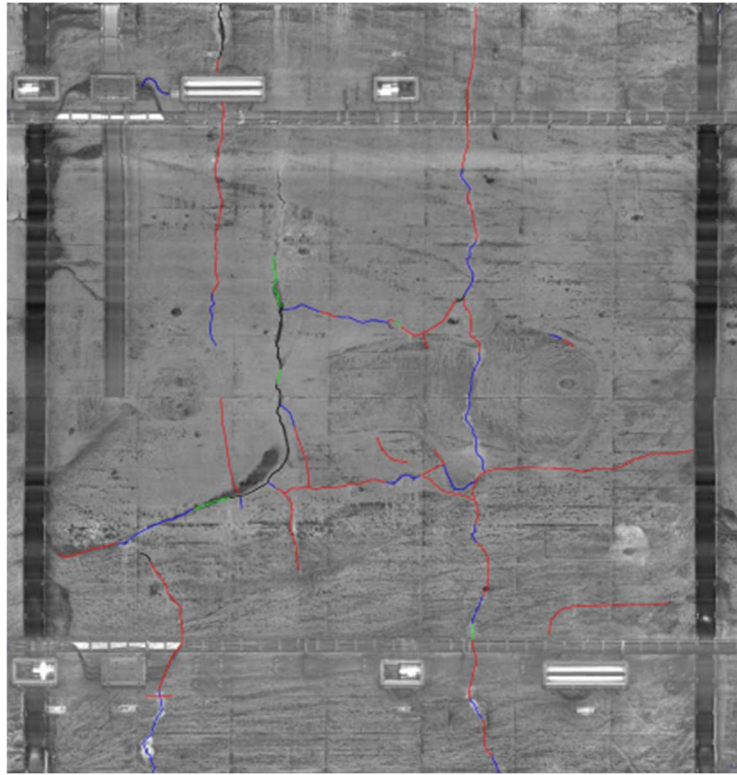


トンネル定期点検結果

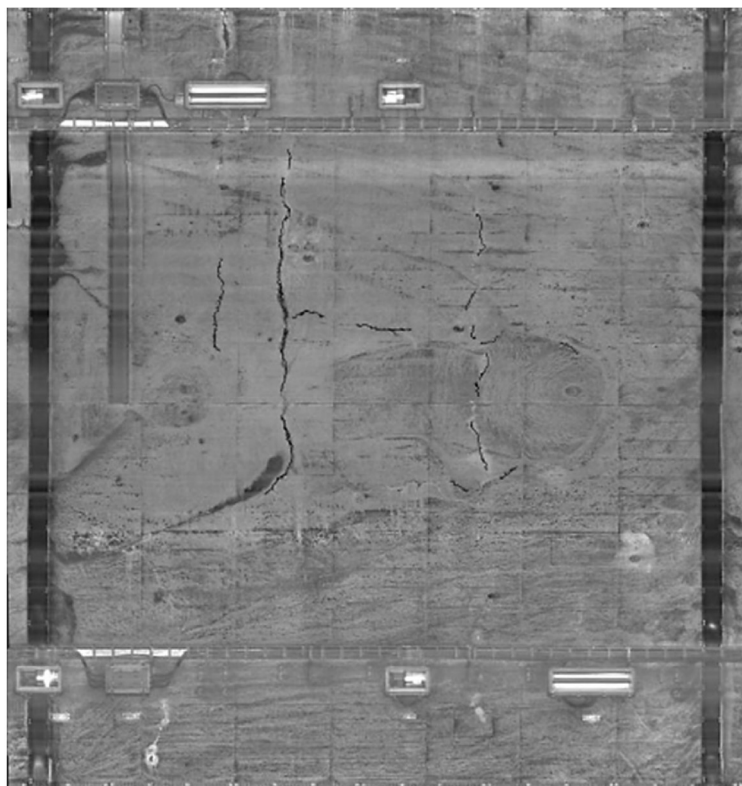


ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-10 馬神トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.4)



トンネル定期点検結果



ひび割れ自動抽出結果

図 4.3-11 馬神トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.5)

4.4 まとめ

覆工点検システムの開発により次の事項が明らかとなった。

- ① 最高時速 100km での走行撮影により，覆工表面画像を早期に取得可能となった。
- ② 撮影用照明の不可視化により走行撮影時に通行車両から注目されないため，通行車両のわき見運転防止が実現可能となった。
- ③ 解像度 0.5mm/画素という高解像度の覆工表面画像の取得により，変状把握の正確性向上が実現可能となった。
- ④ 高解像度画像とひび割れ自動抽出ソフトウェアの組合せにより，覆工表面に生じている複雑なひび割れの分布を実用上問題ない精度で自動的に抽出，図面化することが実現可能となった。これにより，トンネル定期点検実施前に従来手動で行われていたひび割れ分布の把握，図面化の効率化が実現可能となった。
- ⑤ 事前にひび割れ分布が図面化されていることで，現地でのひび割れの発見や記録を最小限にすることが可能となった。

第5章 トンネル覆工のひび割れ分布と振動計測に基づく健全度評価

5.1 概説

国土交通省およびNEXCOの健全性診断は、変状の定性的な状態確認により行われている¹⁾²⁾。一方で既往の研究ではひび割れのパターンや模型実験により間接的に剛性を推定する試みが行われているが³⁾⁴⁾、現時点では覆工の剛性を正しく評価し対策の要否を決定するにはさらに詳細調査が必要である。そこで本研究では、トンネル覆工のひび割れ分布と振動特性に基づく健全性評価手法の確立を目的として、第3章で提案したフラクタル次元と、現地トンネル覆工の常時微動計測による振動特性との相関性を検証した。

5.2 研究対象トンネルと研究手順の概要

表 5.2-1 に研究対象トンネルおよび対象スパンの種別を示す。研究対象トンネルは、矢板工法で建設された長崎自動車道日岳トンネルとする。対象スパンは、ひび割れ密度の範囲を3種類に分類し合計10スパンを選定した。図 5.2-1 に対象スパンを示す。また、表 5.2-2 に対象スパンの基本構造を示す。

表 5.2-1 研究対象トンネル

| | | | |
|------------------------|--------------------|-------------------|-------------|
| 対象トンネル名 | 長崎自動車道 日岳トンネル（下り線） | | |
| 施工法 | 矢板工法 | | |
| 延長 | 780m | | |
| 供用年数 | 34年 | | |
| タイプ名 | A | B | C |
| ひび割れ密度 $H_i(m/m^2)$ | $H_i < 0.2$ | $0.2 < H_i < 0.5$ | $0.5 < H_i$ |
| ひび割れ 展開図の例 | | | |
| スパン数 | 5スパン | 3スパン | 2スパン |

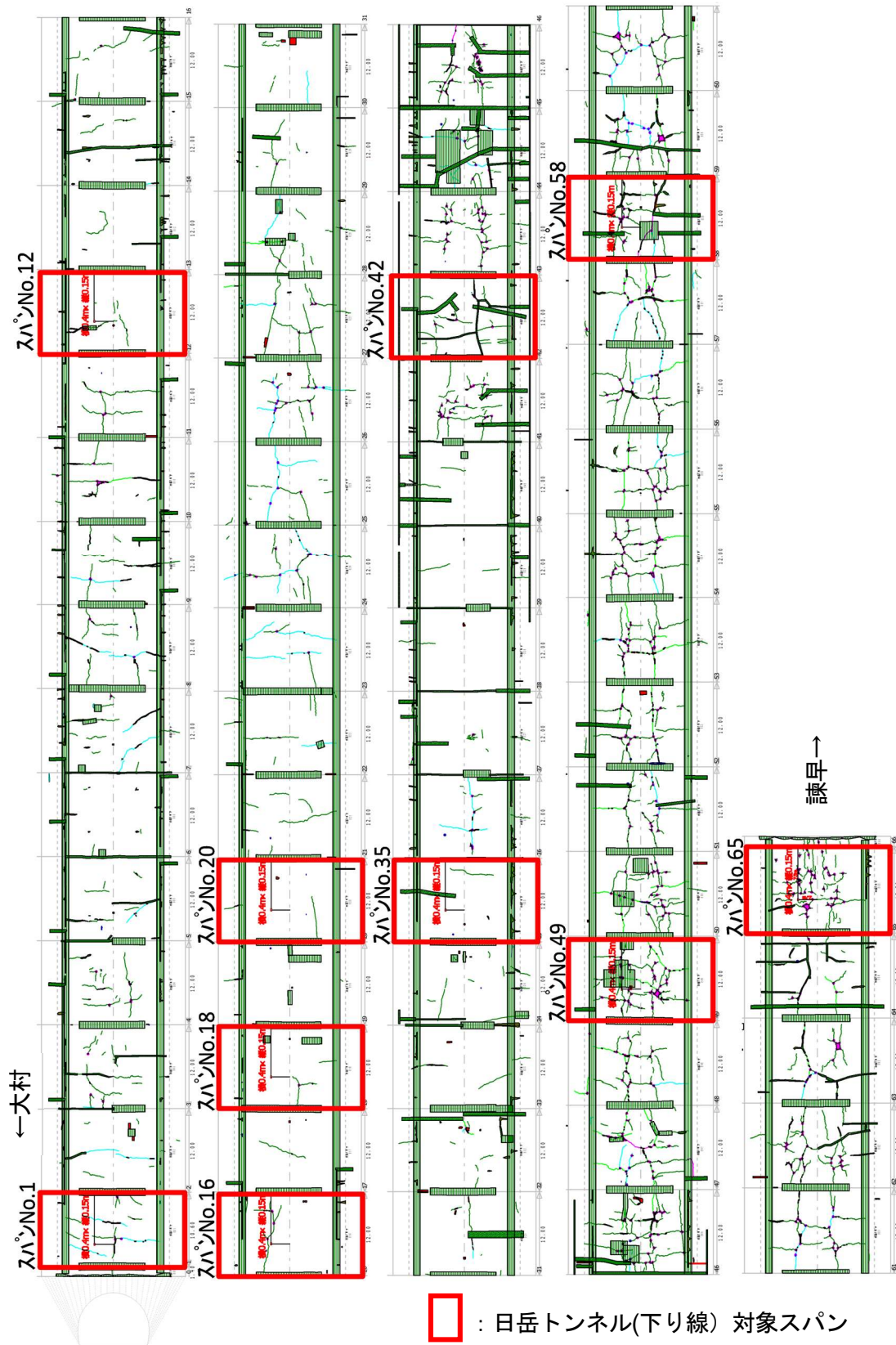


図 5.2-1 研究対象スパン

表 5.2-2 研究対象スパンの基本構造

| スパン 番号 | ひび割れ 密度タイプ | 設計覆工厚 (m) | インバート の有無 | 土被り (m) | 地質 |
|-----------|---------------|--------------|--------------|------------|---------|
| 1 | B | 0.7 | あり | 3 | 砂岩 |
| 12 | A | 0.55 | なし | 25 | 砂岩 |
| 16 | A | 0.55 | なし | 25 | 砂岩 |
| 18 | A | 0.55 | なし | 25 | 砂質凝灰岩 |
| 20 | A | 0.55 | なし | 25 | 凝灰質シルト岩 |
| 35 | A | 0.70 | なし | 23 | 玄武岩 |
| 42 | B | 0.55 | なし | 23 | 玄武岩 |
| 49 | C | 0.55 | なし | 23 | 火山礫質凝灰岩 |
| 58 | B | 0.70 | なし | 23 | 火山礫質凝灰岩 |
| 65 | C | 0.70 | あり | 0 | 火山礫質凝灰岩 |

図 5.2-2 に研究手順を示す。まず、日岳トンネルの覆工表面を撮影し、対象スパンの覆工表面画像を作成する。次に、覆工表面画像を解析してひび割れを抽出、図面化し、フラクタル次元解析を行う。併せて、現地トンネル覆工の対象スパンについて常時微動計測を行い、得られた加速度データからフーリエスペクトルを求める。そして同スパンのフラクタル次元とフーリエスペクトルの相関性を検証する。

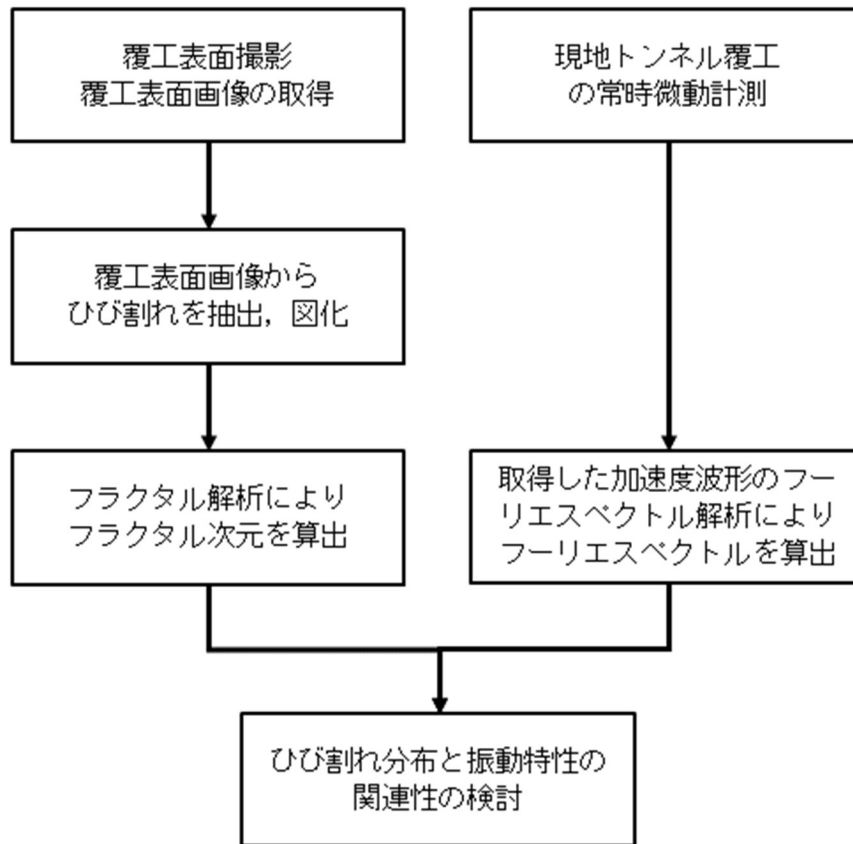


図 5.2-2 研究の手順

5.3 覆工表面画像の取得およびひび割れの抽出, 図面化

近接目視と覆工表面画像解析による変状把握の相違について、変状把握項目で比較すると表 5.3-1 のとおりとなる。覆工表面画像解析による変状把握は、施設物の裏面など現地でしか目視できない局所的な変状の把握が不可能である反面、現地覆工の寸法を再現した覆工表面画像全体からまんべんなく変状を抽出、図面化できるため、変状の抽出、形状寸法の記録に個人差が生じにくい。本研究では、ひび割れの分布状況をフラクタル次元で表現するため、ひび割れを正確に抽出、図面化可能な本システムは必要不可欠である。本システムで取得した覆工表面画像およびひび割れ展開図の例を図 5.3-1 に示す。

表 5.3-1 近接目視と覆工表面画像解析における変状の把握の比較

| 変状把握 比較項目 | 近接目視 | 覆工表面画像 解析 |
|--------------|-----------------------|--|
| 施設物裏面の変状把握 | 可能 | 画像に写らないので不可能 |
| 変状の定量データ化 | 白図に記録するため寸法が不正確 | 画像からの抽出のため正確 |
| ひび割れの把握 | 微細または顕著なひび割れの把握、記録は困難 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 覆工全面にわたりまんべんなく抽出可能 ・ 幅 0.2 mm以上のひび割れを抽出可能 |
| 変状把握の個人差 | 人力による観察のため個人差あり | 基本的にソフトウェア作業のため個人差は生じにくい |

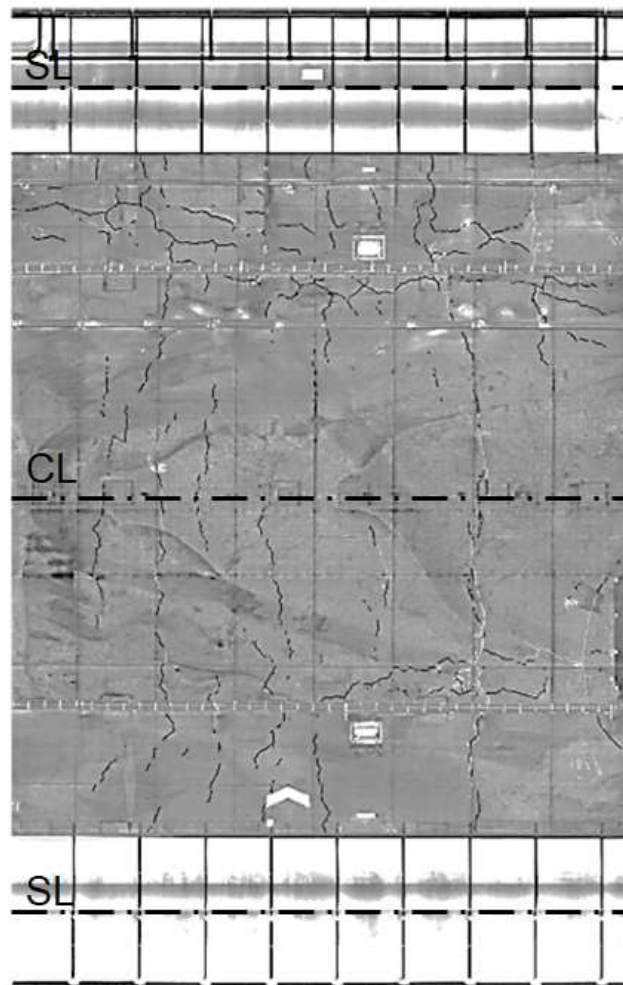


図 5.3-1 覆工表面画像およびひび割れ抽出結果の例

対象 10 スパンの覆工表面ひび割れについて抽出、図面化（以下、「ひびわれ展開図」という）した結果を図 5.3-2 に示す。なお、図中のひび割れ密度は参考として、当該スパンの単位面積当たりのひびわれ長さを示した。

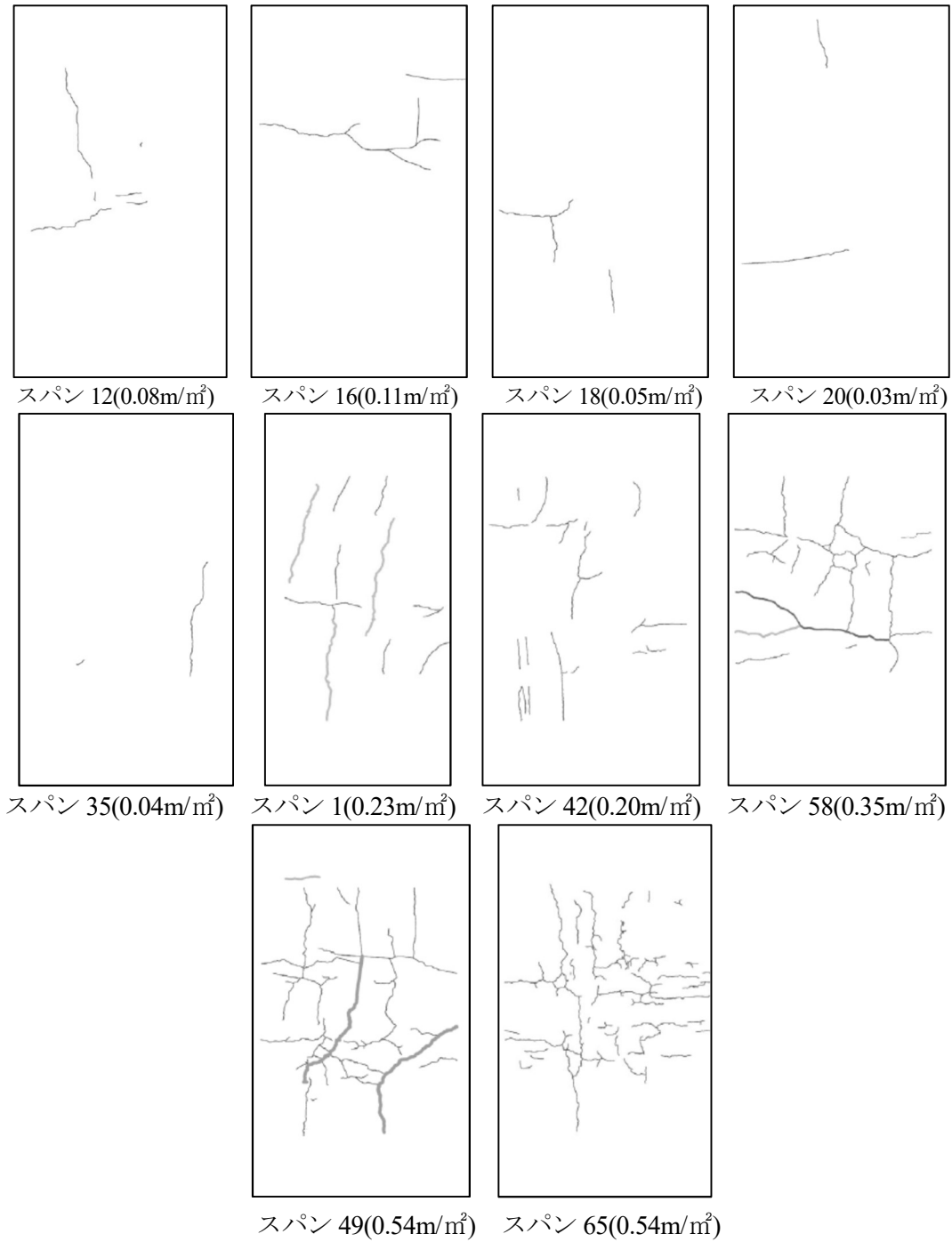


図 5.3-2 対象スパンのひび割れ展開図

5.4 ひび割れ分布の定量化

図面化したひび割れ分布の定量化は、フラクタル次元解析を行った。表 5.4-1 にフラクタル次元解析結果を示す。

5.5 現地トンネル覆工の常時微動計測

覆工の振動特性は、覆工に伝搬する常時微動を加速度計で計測し、フーリエスペクトル解析を行う手法を採用した。常時微動とは、地盤中を伝搬する人工的または自然現象による様々な振動のうち、特定の振動源から直接的に影響を受けない状態で励起される微小な地盤振動のことである。常時微動計測は1スパンごとに行い、3台の加速度計をトンネル軸方向（HOR-1）、接線方向（HOR-2）、法線方向（VER）の振動方向になるように天端付近の覆工表面へ接着剤で設置した。加速度計の仕様を表 5.5-1 に、常時微動計測システムを図 5.5-1 に、加速度計設置状況を図 5.5-2 に示す。

表 5.4-1 フラクタル次元解析結果

| スパン | フラクタル次元 |
|-----|---------|
| 1 | 1.2608 |
| 12 | 1.0665 |
| 16 | 1.1210 |
| 18 | 1.0454 |
| 20 | 1.0663 |
| 35 | 1.0072 |
| 42 | 1.0961 |
| 49 | 1.2906 |
| 58 | 1.2838 |
| 65 | 1.2229 |

表 5.5-1 加速度計仕様

| 項目 | 仕様 |
|---------|----------------------|
| 最大計測加速度 | $\pm 30\text{m/s}^2$ |
| 計測周波数範囲 | DC~100 (Max300) Hz |
| 分解能 | 1 mgal |

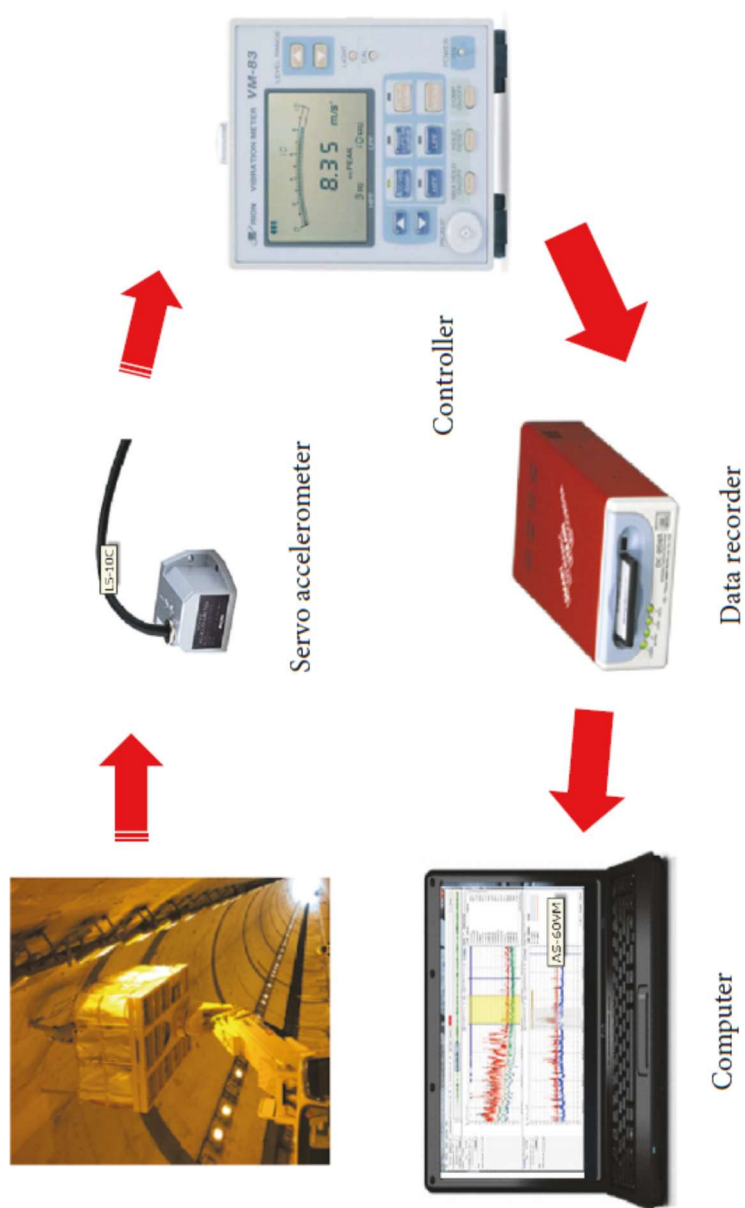


図 5.5-1 常時微動計測システム

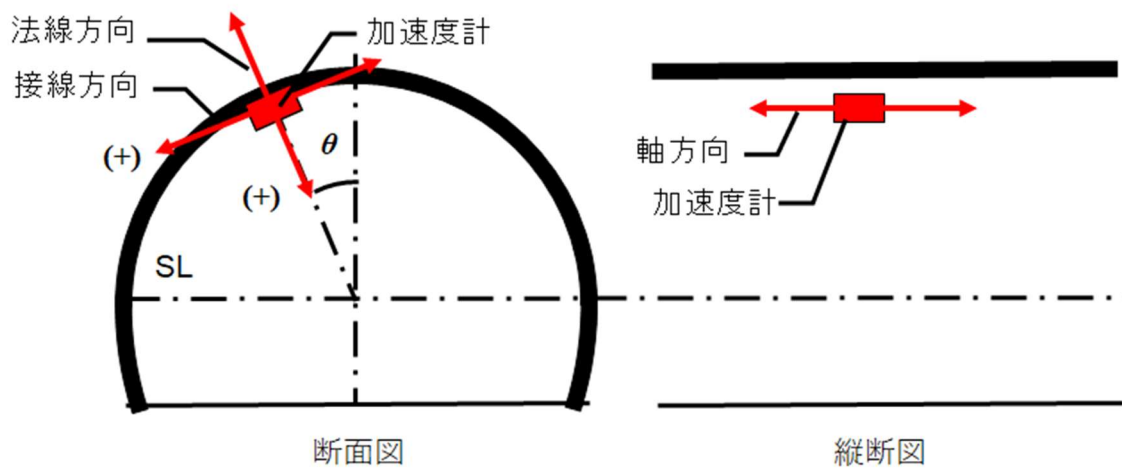


図 5.5-2 加速度計設置状況

常時微動計測は0.001秒間隔で180秒間行い、計測結果からスパイクノイズを取り除き、10秒間の加速度データを6個作成した。解析は、建築研究所のソフトウェアの「View Wave」を使用してフーリエスペクトルを求めた。1個あたりのフーリエスペクトルの代表値は、加速度計の計測周波数範囲のうち信頼性がある範囲である50Hzから200Hzまでの平均値とし、1スパンあたりの代表値は、6個のフーリエスペクトルの最小値を採用した。また、3方向合成のフーリエスペクトルは式(5.5.1)により算出した。

$$3 \text{ 方向合成フーリエスペクトル} = \sqrt{AF^2 + TF^2 + NF^2} \quad (5.5.1)$$

ここに, AF : 軸方向フーリエスペクトル

TF : 接線方向フーリエスペクトル

NF : 法線方向フーリエスペクトル

図 5.5-3 に整理後の加速度波形の例, 図 5.5-4 にフーリエスペクトル解析結果の例を示す.
また, 表 5.5-2 にフーリエスペクトルとフラクタル次元の一覧を示す.

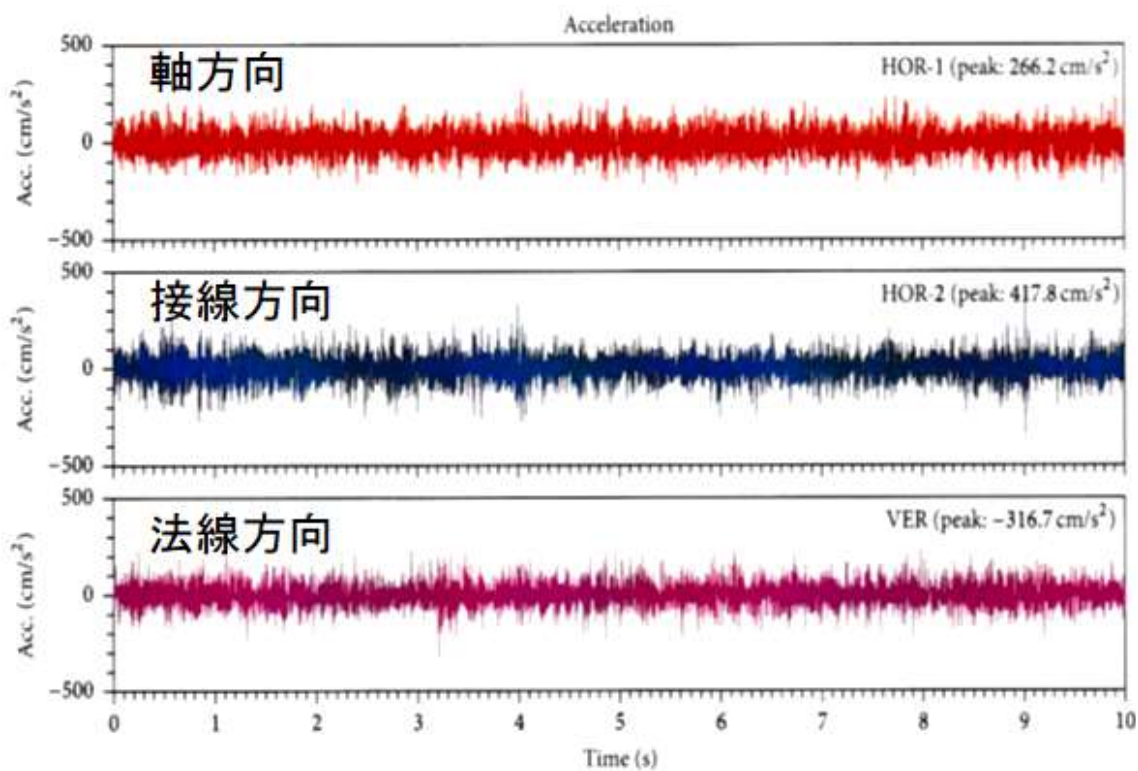
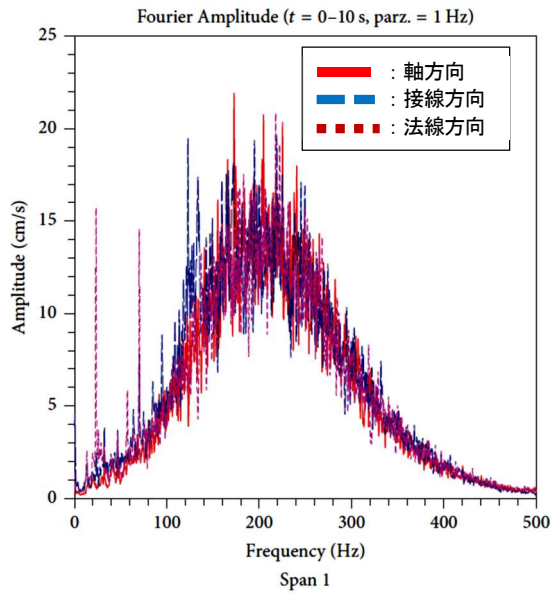
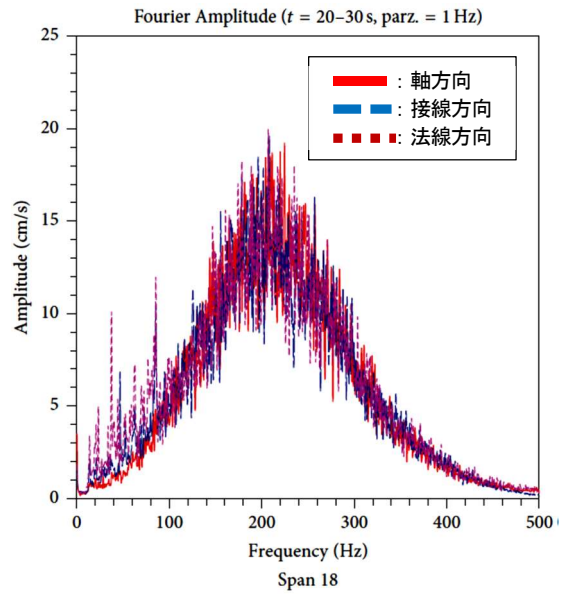


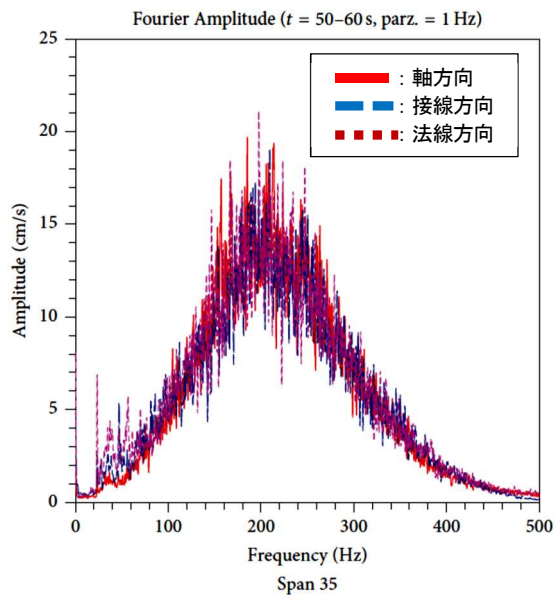
図 5.5-3 整理後の加速度波形の例



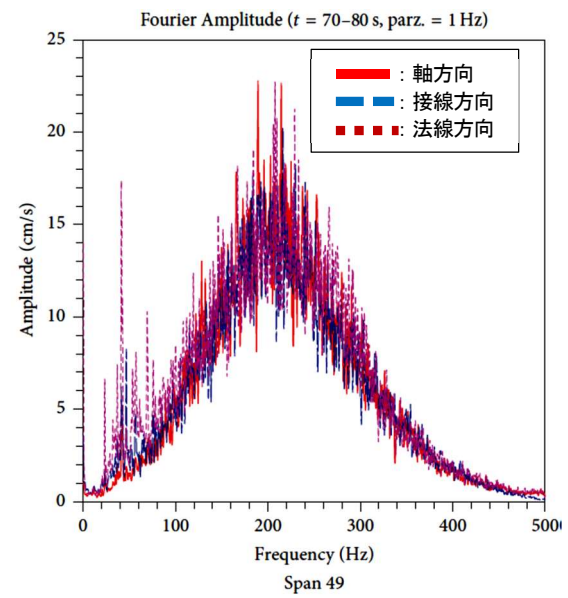
スパン 1



スパン 18



スパン 35



スパン 49

図 5.5-4 フーリエスペクトル解析結果の例

表 5.5-2 フーリエスペクトルおよびフラクタル次元解析結果

| スパン | フラクタル次元 | フーリエスペクトル | | | |
|-----|---------|-----------|-------|-------|--------|
| | | 軸方向 | 接線方向 | 法線方向 | 3方向合成 |
| 1 | 1.2608 | 7.566 | 8.591 | 7.525 | 13.699 |
| 12 | 1.0665 | 7.435 | 7.329 | 7.488 | 12.847 |
| 16 | 1.1210 | 7.420 | 7.071 | 7.612 | 12.767 |
| 18 | 1.0454 | 7.470 | 7.586 | 7.904 | 13.259 |
| 20 | 1.0663 | 7.480 | 7.484 | 8.478 | 13.558 |
| 35 | 1.0072 | 7.389 | 7.213 | 7.681 | 12.869 |
| 42 | 1.0961 | 7.642 | 7.238 | 7.209 | 12.757 |
| 49 | 1.2906 | 7.657 | 7.578 | 8.441 | 13.685 |
| 58 | 1.2838 | 7.983 | 8.771 | 7.952 | 14.274 |
| 65 | 1.2229 | 7.927 | 8.384 | 8.605 | 14.393 |

5.6 計測結果分析と考察

5.6.1 現地覆工のフーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

現地覆工のフーリエスペクトルとフラクタル次元との相関性について、トンネル軸方向、接線方向、法線方向および3方向合成の4種類で検証を実施した。ここで、相関係数の検定値を式(5.6.1)に基づいて求めて相関関係の有無を判断した。計算の結果、相関係数の検定値 r_0 を 0.58 とした。

$$r_0 = \sqrt{\frac{4}{n+2}} \quad (5.6.1)$$

ここに、 r_0 : 相関係数の検定値

n : データ数 (スパン数 10)

(1) 軸方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証

軸方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証結果を図 5.6-1 に示す。検証の結果、フラクタル次元が 1.0072 から 1.2906 まで変化するのに対し、軸方向フーリエスペクトルの変化は 7.389 から 7.983 までと、直線的な関係になった。相関係数は 0.74 と正の相関関係であることが分かった。

(2) 接線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証

接線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証結果を図 5.6-2 に示す。検証の結果、フラクタル次元が 1.0072 から 1.2906 まで変化するのに対し、接線方向フーリエスペクトルの変化は 7.071 から 8.771 までと、直線的な関係になった。相関係数は 0.75 と正の相関関係であることが分かった。

(3) 法線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証

法線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証結果を図 5.6-3 に示す。検証の結果、データのバラつきが大きく相関係数は 0.34 と相関関係を示さなかった。

(4) 3 方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証

3 方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性検証結果を図 5.6-4 に示す。検証の結果、フラクタル次元が 1.0072 から 1.2906 まで変化するのに対し、軸方向フーリエスペクトルの変化は 12.757 から 14.393 までと、直線的な関係になった。相関係数は 0.74 と正の相関関係であることが分かった。

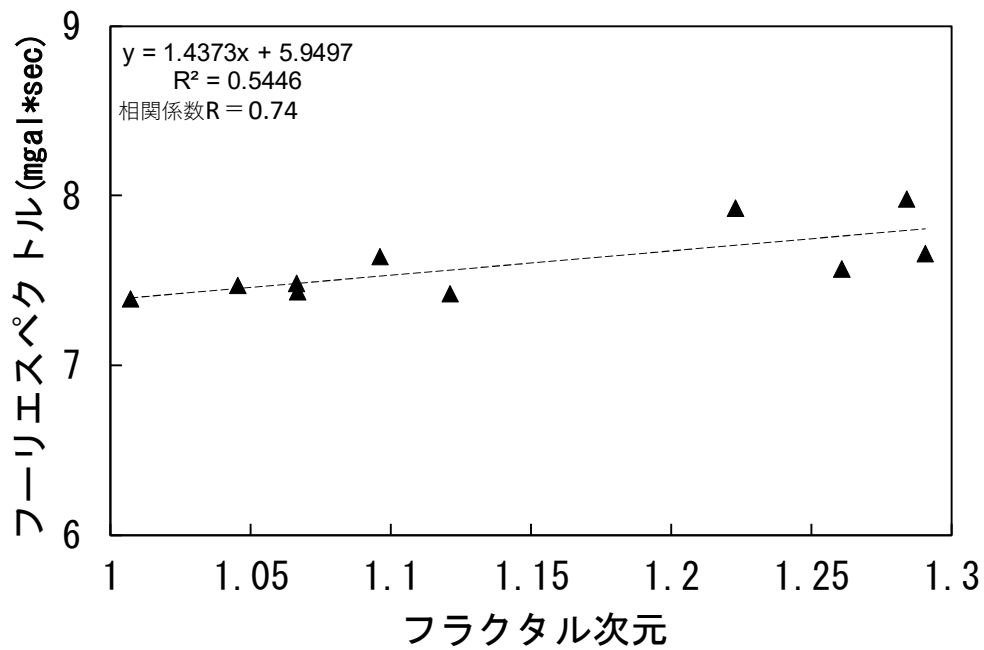


図 5.6-1 軸方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

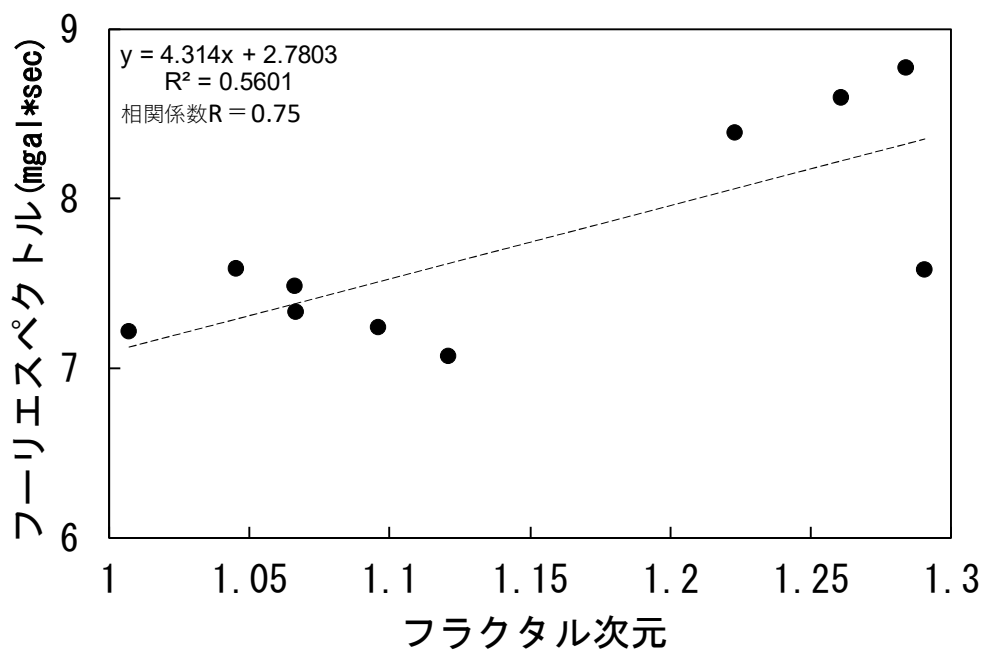


図 5.6-2 接線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

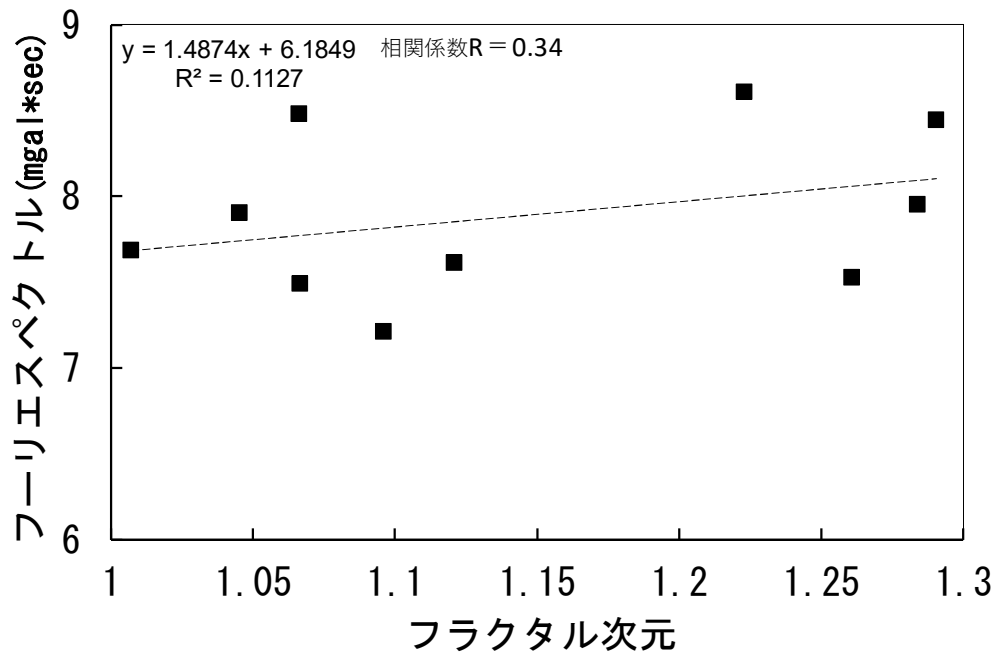


図 5.6-3 法線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

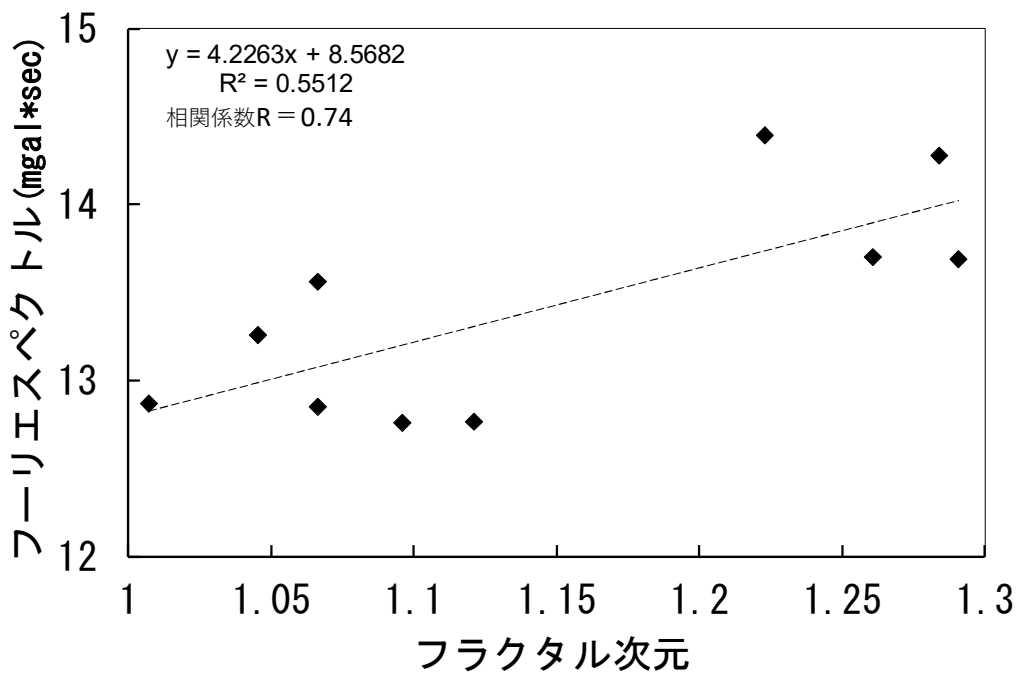


図 5.6-4 3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

5.6.2 推定覆工厚, 推定覆工背面空洞量, 岩質とフーリエスペクトルとの関連

過去の覆工背面空洞調査および背面空洞注入工事の結果から, 選定スパンにおける推定覆工厚, 推定覆工背面空洞量 (以下, 「推定空洞量」という) および岩質を表 5.6-1 のとおり整理した. なお推定空洞量は, すでに背面空洞注入工が施工されているが, 注入材料の強度が 1.5N/mm^2 と覆工コンクリートおよび地山より強度が著しく低いため背面空洞として取り扱った. 図 5.6-5 に加速度計設置位置と覆工背面空洞調査位置および背面空洞注入工の位置関係を示す. また, 図 5.6-6, 図 5.6-7, 図 5.6-8, 図 5.6-9 に選定スパンにおけるフラクタル次元(D), 推定覆工厚(T), 推定空洞量(C), 岩質(R)を整理した結果を示す. 横軸はフラクタル次元を昇順に表示している.

表 5.6-1 推定覆工厚, 推定背面空洞量, 岩質

| スパン | フラクタル次元 (D) | 推定覆工厚(T) (cm) | 推定空洞量(C) ($\text{m}^3/\text{スパン}$) | 岩質(R) |
|-----|----------------|------------------|---|---------|
| 1 | 1.2608 | 92 | 0 | 砂岩 |
| 12 | 1.0665 | 58 | 6 | 砂岩 |
| 16 | 1.1210 | 71 | 2 | 砂岩 |
| 18 | 1.0454 | 54 | 0 | 砂質凝灰岩 |
| 20 | 1.0663 | 54 | 20 | 凝灰質シルト岩 |
| 35 | 1.0072 | 48 | 16 | 玄武岩 |
| 42 | 1.0961 | 60 | 30 | 玄武岩 |
| 49 | 1.2906 | 63 | 34 | 火山礫質凝灰岩 |
| 58 | 1.2838 | 73 | 6 | 火山礫質凝灰岩 |
| 65 | 1.2229 | 70 | 0 | 火山礫質凝灰岩 |

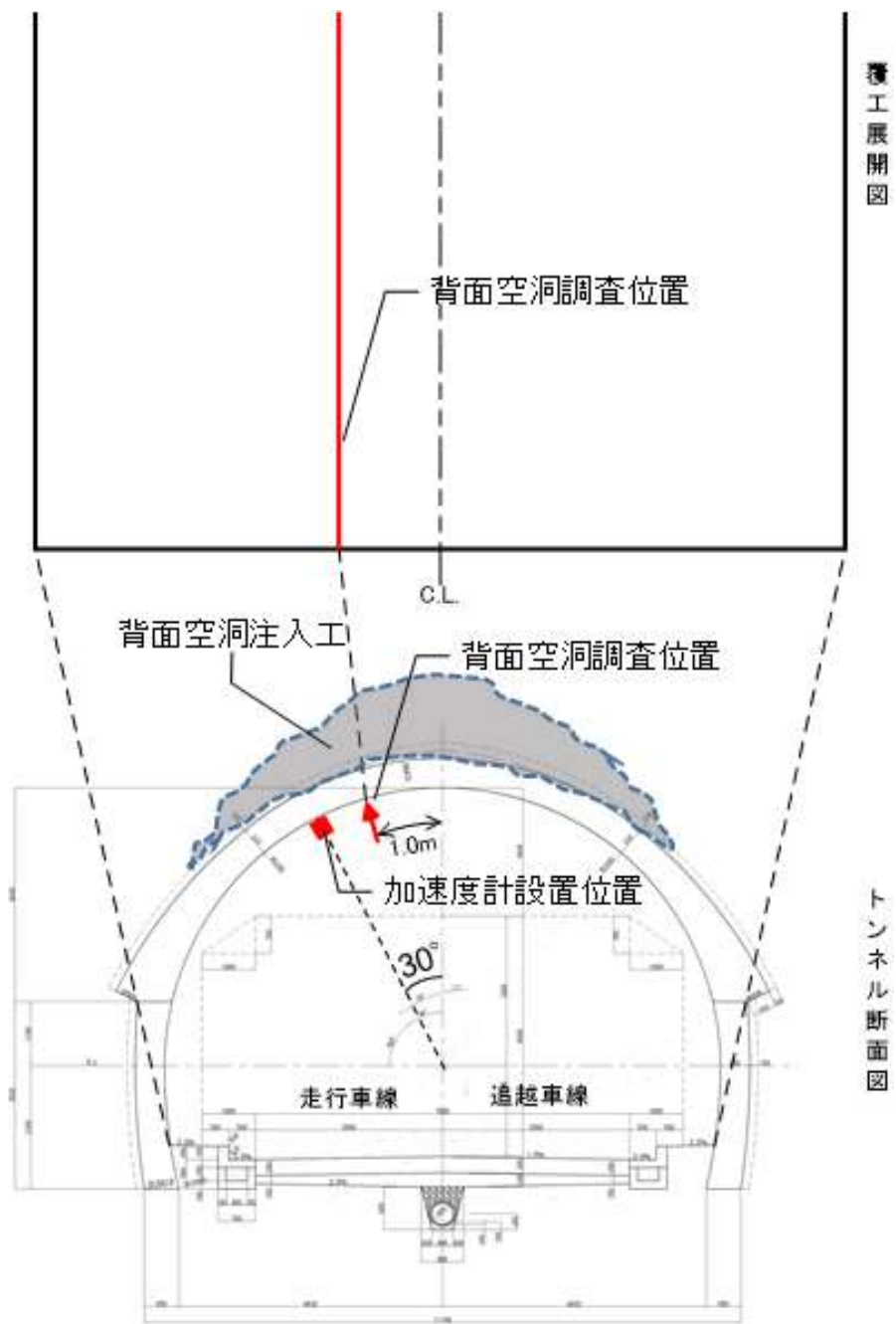


図 5.6-5 加速度計設置位置，覆工背面空洞調査位置および背面空洞注入口

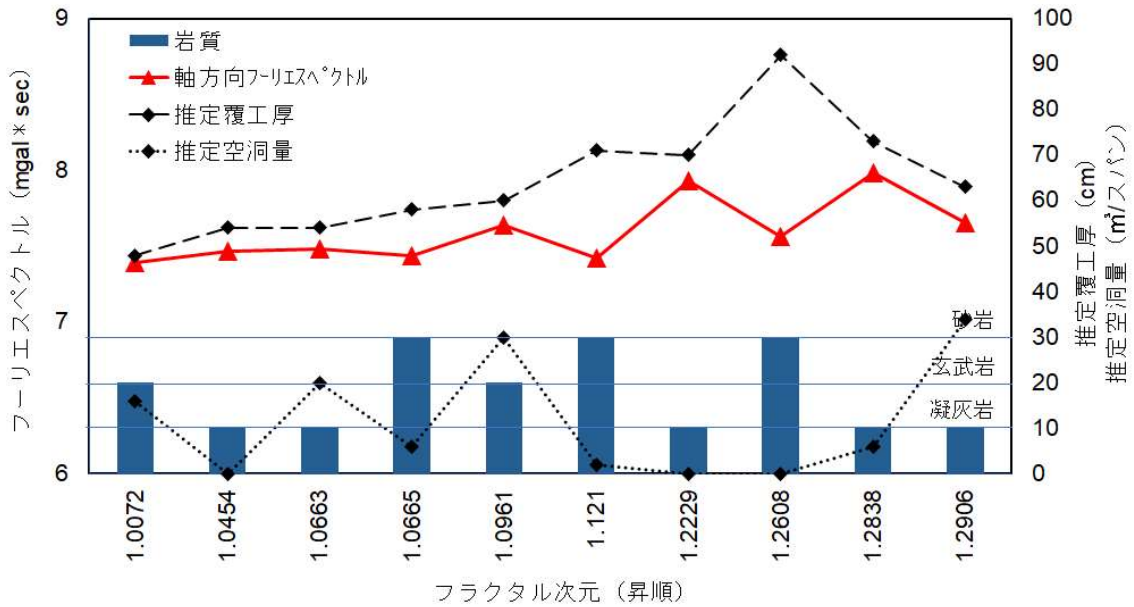


図 5.6-6 軸方向フーリエスペクトル, 推定覆工厚, 推定空洞量, 岩質

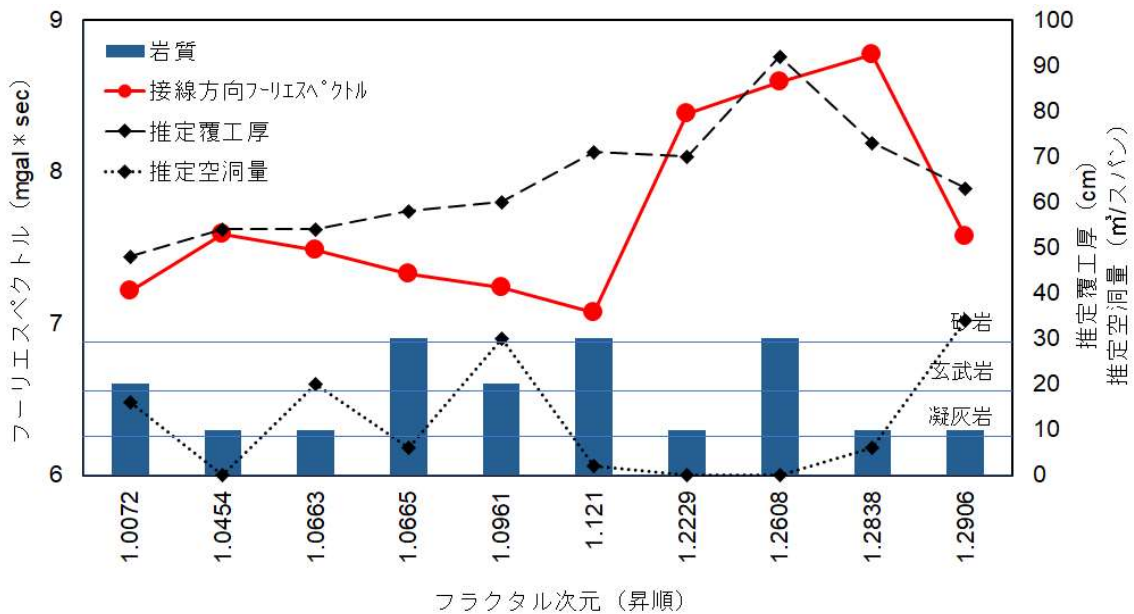


図 5.6-7 接線方向フーリエスペクトル, 推定覆工厚, 推定空洞量, 岩質

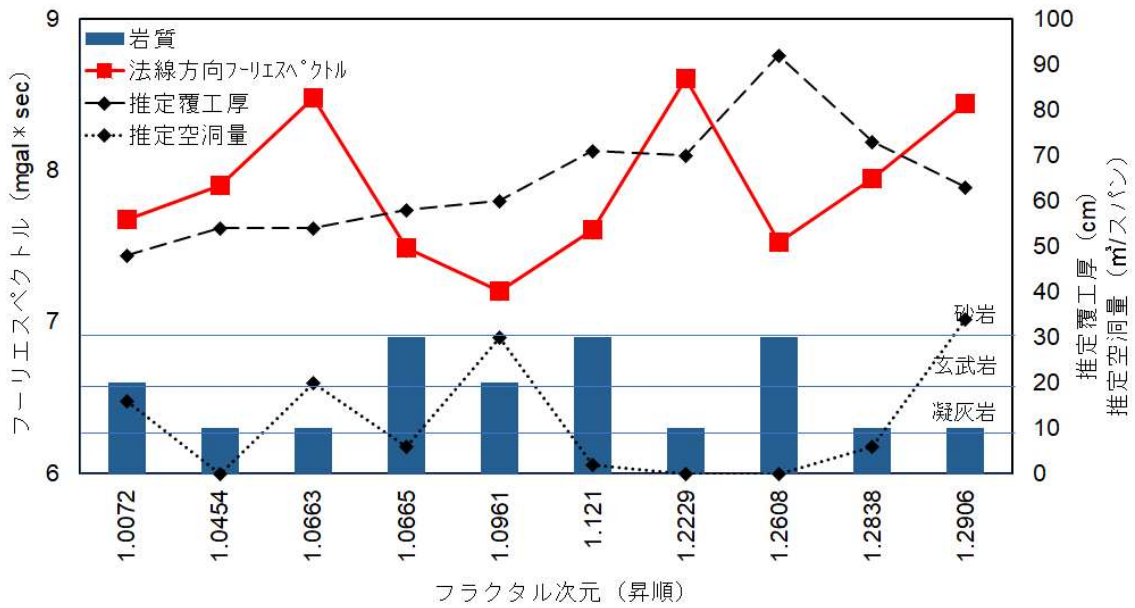


図 5.6-8 法線方向フーリエスペクトル，推定覆工厚，推定空洞量，岩質

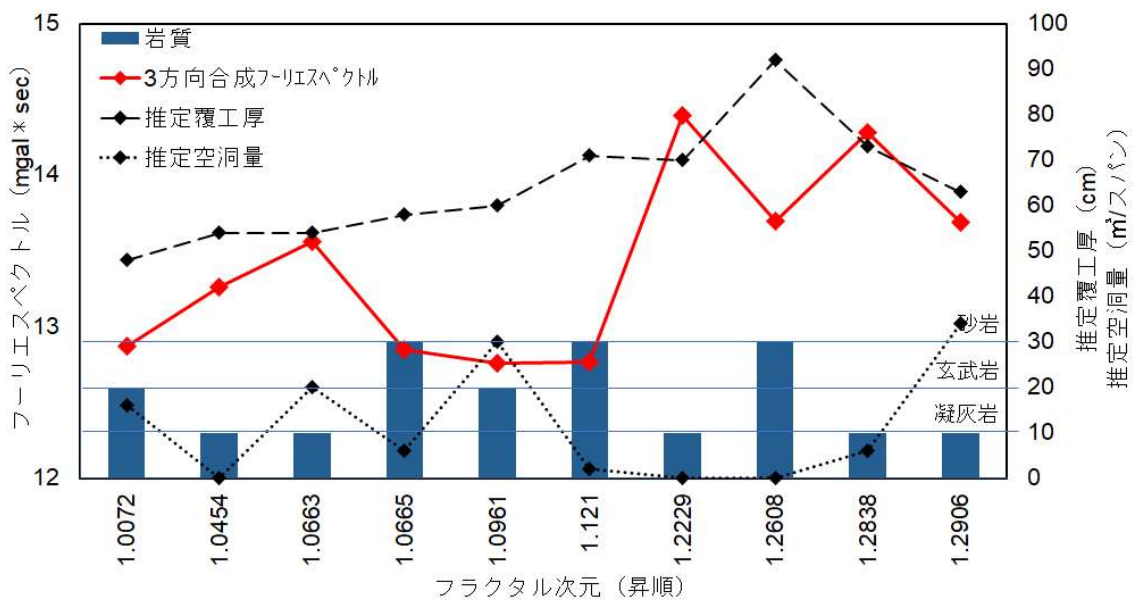


図 5.6-9 3方向合成フーリエスペクトル，推定覆工厚，推定空洞量，岩質

各フーリエスペクトルが関連する因子を把握するため、フラクタル次元、推定覆工厚、推定空洞量、岩質を説明変数に設定して、重回帰分析を実施した。分析結果を表 5.6-2 に示す。

接線方向フーリエスペクトルにおいて相関係数 0.90、自由度修正済決定係数 0.69、3 方向合成フーリエスペクトルにおいて相関係数 0.95、自由度修正済決定係数 0.82 と、接線方向および 3 方向合成のフーリエスペクトルが本説明変数で説明できる可能性があることが分かった。特に 3 方向合成フーリエスペクトルと本説明変数は、相関係数および自由度修正済決定係数が高いことから、3 方向合成フーリエスペクトルの関連因子である可能性があるかと判断した。ただし、表 5.6-3 の 3 方向合成フーリエスペクトルと説明変数との相関係数が示すように、3 方向合成フーリエスペクトルと相関関係があると考えられるのはフラクタル次元と岩質であり、推定覆工厚と推定空洞量は相関性が弱いという結果になった。

表 5.6-2 フーリエスペクトルと説明変数との重回帰分析結果

| フーリエ スペクトル | 回帰式 | 相関係数 | 自由度修正済 決定係数 |
|---------------|---|------|----------------|
| 軸方向 | $6.335\pm 1.305D-0.001T-0.003C-0.010R$ | 0.85 | 0.50 |
| 接線方向 | $5.250\pm 1.306D+0.027T-0.015C-0.034R$ | 0.90 | 0.69 |
| 法線方向 | $6.880\pm 2.261D-0.014T-0.009C-0.031R$ | 0.80 | 0.35 |
| 3 方向合成 | $10.682\pm 2.746D+0.008T-0.015C-0.044R$ | 0.95 | 0.82 |

表 5.6-3 3 方向合成フーリエスペクトルと説明変数との相関係数

| 説明変数 | 3 方向合成フーリエスペクトルとの相関係数 | t |
|---------|-----------------------|------|
| フラクタル次元 | 0.74 | 1.28 |
| 推定覆工厚 | 0.45 | 0.42 |
| 推定空洞量 | -0.22 | 1.69 |
| 岩質 | -0.60 | 2.87 |

説明変数が3方向合成フーリエスペクトルに与える影響の大きさを表す $|t|$ 値に着目すると、フラクタル次元より岩質の方が、影響が強い結果となった。推定覆工厚との相関性については、常時微動が地中を伝搬する過程において、覆工厚の変化は振動特性を変化させるほどの大きな変化にならなかったのではないかと考える。また、推定空洞量との相関性については、背面空洞注入材料が圧縮強度 1.5N/mm^2 と低強度のため空洞とみなしたことが誤りで、背面空洞が充填されている状態を示しているのではないかと推測した。既往研究においても、背面空洞により振動特性が変化することが示されていることから同様の推測ができる⁹⁾。フラクタル次元と岩質が与える3方向フーリエスペクトルへの影響の強さについては、さらに計測データを蓄積して継続的な検証を行うべきと考える。

5.7 まとめ

本研究の結果、フラクタル次元とフーリエスペクトルの相関性は、トンネル軸方向と接線方向のフーリエスペクトルおよび、3方向合成フーリエスペクトルでフラクタル次元と正の相関性があることを明らかにすることができた。また、フラクタル次元、推定覆工厚、推定空洞量、地質をフーリエスペクトルの説明変数に設定して重回帰分析を行った結果、3方向合成フーリエスペクトルにおいて、本説明変数のうちフラクタル次元と岩質が関連因子である可能性があることが明らかとなった。

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，2014.6
- 2) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領(構造物編)，2015. 4
- 3) 安保秀範, 田中雅弘, 吉田典明:水路トンネル管理支援システムの開発, 電力土木, No.287, pp.42-46, 2000.5
- 4) 佐野信夫, 伊藤哲男, 馬場弘二, 小島芳之, 津野究, 川島義和, 松岡茂：ひび割れ進展と剛性変化に基づいたトンネル覆工の健全度評価, 土木学会論文集 F Vol.62, No.2, pp.194-202, 2006.4
- 5) 山内淑人, 蔣宇静, 李博, 小川能克, 大嶽剛志：常時微動計測によるトンネル覆工コンクリート健全度評価の可能性, JCOSSAR 2011 論文集, pp.645-648, 2011

第 6 章 ひび割れ分布定量化手法の検証

6.1 概説

本章では、第 4 章で得られた覆工表面画像とひび割れ自動抽出ソフトによるひび割れ自動抽出結果が実用上問題ないという結論をもとに、NEXCO 保全点検要領の健全度評価手法に対するひび割れ自動抽出結果の適用可能性を検証する。また、フラクタル次元と TCI を比較して、フラクタル次元のひび割れ定量化手法としての妥当性を検証する。

6.2 ひび割れ自動抽出結果を用いた健全度評価適用検証

NEXCO のトンネル定期点検で行われている覆工表面画像からのひび割れ抽出、図化は、点検技術者が覆工表面画像を観察してひび割れを手動でなぞり書きしている。自動抽出したひび割れと覆工表面画像を手動でなぞり書きしたひび割れは、線形の形状が異なる。この違いにより健全度評価が著しく異なる場合は、ひび割れ自動抽出結果をそのまま健全度評価に適用することが困難である。そこで、ひび割れ自動抽出結果が健全度評価へ適用可能か否かを判断することを目的として、両者のひび割れ線形の相違による健全度評価結果の比較検証および考察を行った。

6.2.1 ひび割れ抽出方法の相違によるひび割れ線形の傾向

点検技術者が覆工表面画像を観察して手動でなぞり書きしたひび割れ（以下、「手動抽出ひび割れ」という）と自動抽出ひび割れの相違点の例を図 6.2-1 に示す。手動抽出ひび割れの場合は、ひび割れの折れ点を細くなぞらないため、滑らかなひび割れ線形になる傾向にある（ケース 1）。自動抽出ひび割れの場合は、ひび割れ線形を正確に図面化する（ケース 2）。ただし、ひび割れ線形の中に幅 0.2mm 未満の部分が混在する場合は、当該部分は抽出されず断続的な線形になる（ケース 3）。また、ひび割れ線形が断続的である場合、自動抽出ひび割れはあるがままの線形になるが（ケース 4）、手動抽出ひび割れの場合はひび割れが連続していると見みなしてなぞり書きする可能性がある（ケース 5）。このような各ひび割れ抽出方法におけるひび割れ線形の相違が与える評価点への影響を検証した。評価点は、第 3 章 3.2 に示す NEXCO の評価点算出方法に従って算出した。

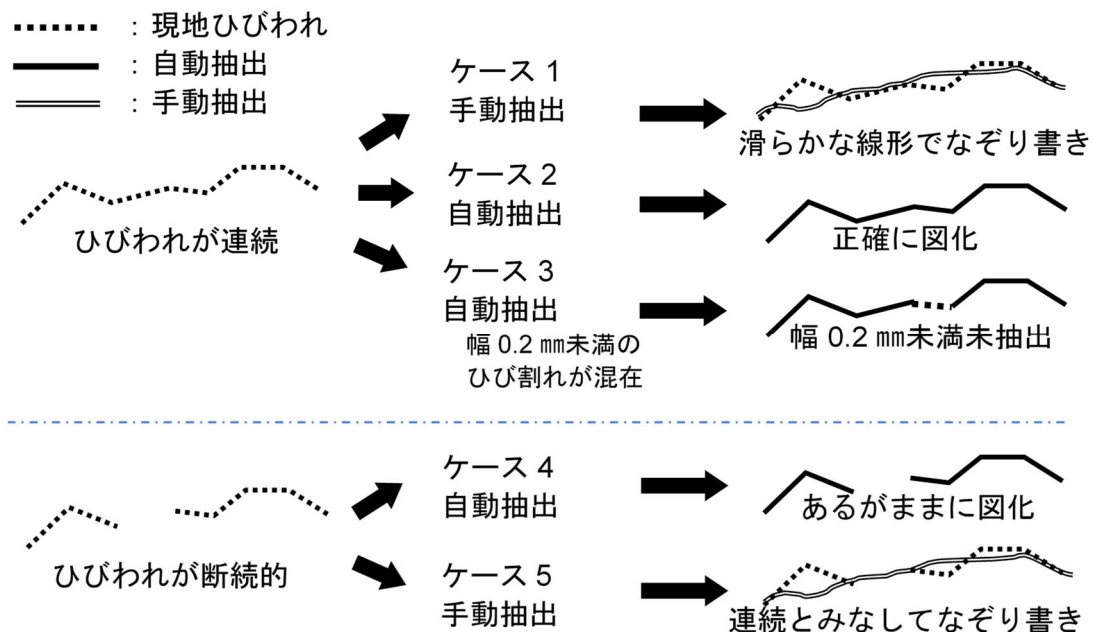


図 6.2-1 手動抽出ひび割れと自動抽出ひび割れの線形の相違点

6.2.2 検証内容

(1) 本検証に使用するひび割れの定義

本検証に使用するひび割れの定義を次のとおりとする。

- ①自動抽出ひび割れ：覆工表面画像からトンネル覆工点検システムのひび割れ自動抽出ソフトウェアを使用して抽出したものをいう。
- ②手動抽出ひび割れ：ひび割れ線形の違い以外の影響を排除するため、自動抽出ひび割れと同一個所を、覆工表面画像を観察しながら手動でなぞり書きしたものをいう。
- ③近接目視ひび割れ：トンネル定期点検結果のうち、ひび割れのみのことをいう。このひび割れは手動で記録されるので、線形の傾向は手動抽出ひび割れと同様である。

検証対象トンネルおよびスパン数を表 6.2-1 に示す。対象スパンは、3 種類のひび割れ密度範囲区分を設定して合計 100 スパンとした。

表 6.2-1 検証対象トンネル

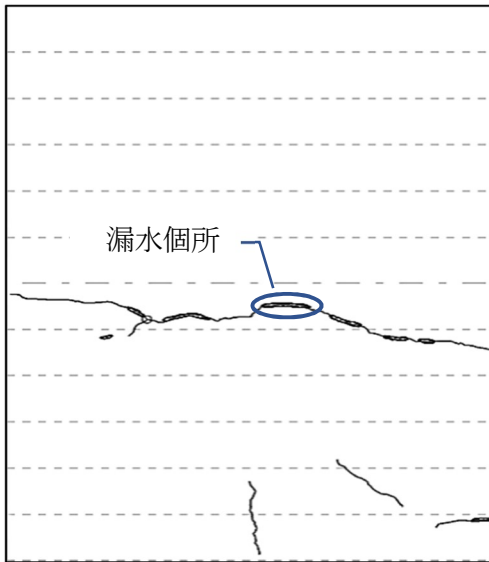
| トンネル名 | トンネル延長 (m) | 供用年数 (年) | 工法 | ひび割れ密度別対象スパン数 Hi:ひびわれ密度 (m/m) | | |
|-----------------------|------------|----------|------|----------------------------------|-------------------|--------|
| | | | | 0.2 \geq Hi | 0.2<Hi \leq 0.5 | 0.5<Hi |
| 関門自動車道 和布刈トンネル下り線 | 582 | 44 | 矢板工法 | 5 | 8 | 8 |
| 九州自動車道 白岳第二トンネル上り線 | 201 | 28 | NATM | 5 | 3 | 1 |
| 長崎自動車道 中里トンネル | 1,472 | 13 | NATM | 5 | | |
| 関門自動車道 大久保トンネル下り線 | 412 | 44 | 矢板工法 | | | 5 |
| 長崎自動車道 城原トンネル下り線 | 186 | 32 | 矢板工法 | | 4 | 1 |
| 九州自動車道 加久藤トンネル上り線 | 6,255 | 22 | NATM | 9 | 27 | 19 |
| 合計 | | | | 24 | 42 | 34 |

(2) 自動抽出ひび割れおよび手動抽出ひび割れと近接目視ひび割れとの比較

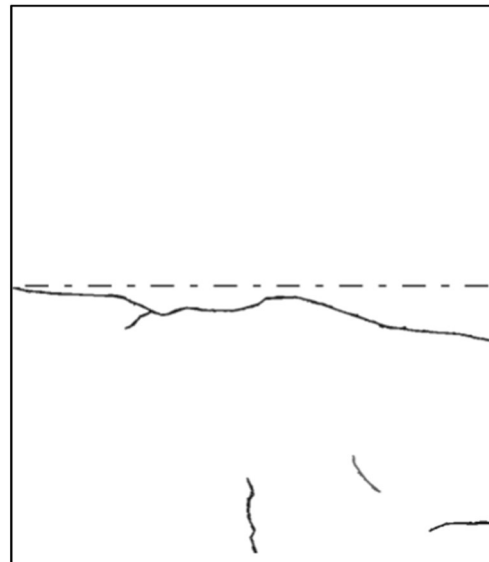
本検証は、和布刈トンネル下り線 21 スパンを対象とする。トンネル定期点検結果から算出した評価点は、図 6.2-2 に示す詳細点検 A シートのとおり①ひび割れの幅、長さ、分布、②ひび割れの方向性、③ひび割れの形状パターン、④エフロレッセンス、漏水の有無を要素とした⑤外力評価点と⑥はく落評価点で構成されている。なお、①②については、第 3 章 3.2 の TCI によって求められる。図 6.2-3 に、トンネル定期点検結果と自動抽出ひび割れの例を示す。図中のトンネル定期点検結果の○印はひび割れの交差個所、ハッチングは漏水箇所あるいは補修個所を示す。

検証手順は次のとおりである。

- 手順 1： トンネル定期点検の詳細点検 A シートを用いてひび割れ評価点 (①②) とその他の変状による評価点 (③④) を分類し評価点の内訳を整理する。①②が近接目視ひび割れの評価点である。
- 手順 2： 自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れをから TCI を算出し、ひび割れ評価点を求める。
- 手順 3： 自動抽出ひび割れおよび手動抽出ひび割れと近接目視ひび割れの評価点を比較し、評価点の相違の有無や相違がある場合の要因を考察する。

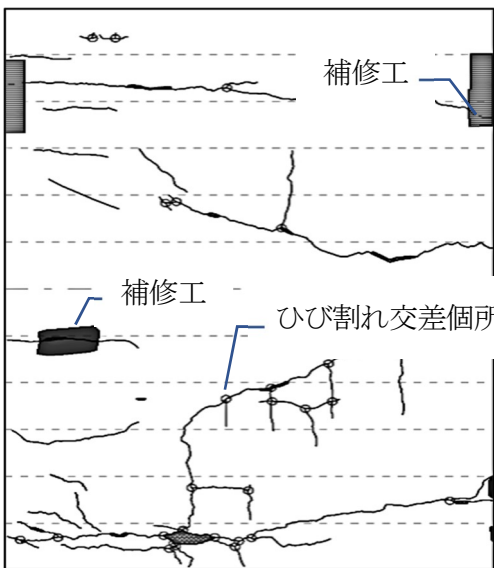


トンネル定期点検結果

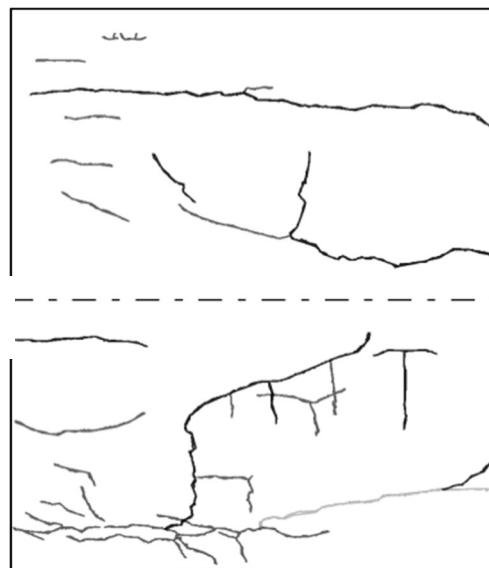


ひび割れ自動抽出結果

和布刈トンネル下り線の例(ひびわれ密度 $H_i=0.18\text{m}^2$)



トンネル定期点検結果



ひび割れ自動抽出結果

和布刈トンネル下り線の例(ひびわれ密度 $H_i=0.85\text{m}^2$)

図 6.2-3 トンネル定期点検および自動抽出ひび割れの例

(3) 自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れとの比較

本検証は全トンネル 100 スパンを対象とする。自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れについて、TCI および評価点を算出して比較し、両ひび割れの TCI の相関性および評価点の相違の傾向について考察した。

6.2.3 検証結果と考察

(1) 自動抽出ひび割れおよび手動抽出ひび割れと近接目視ひび割れとの比較

近接目視ひび割れ,

図 6.2-4 にひび割れ抽出方法種別ごとの評価点の構成を示す。図中の点数は 21 スパンの平均点である。トンネル定期点検結果に対する近接目視ひび割れの評価点の割合は、外力評価点では 88%、はく落評価点では 58%であった。これは、外力評価においてひび割れ評価点が合計評価点に大きく影響を及ぼすことを示す。近接目視ひび割れと自動抽出ひび割れの評価点は、ひび割れ幅、長さ、分布において外力評価点が 43 点と 41 点、はく落評価点が 22 点と 21 点と、若干の違いが生じた。この原因は、抽出されたひび割れ個所の相違

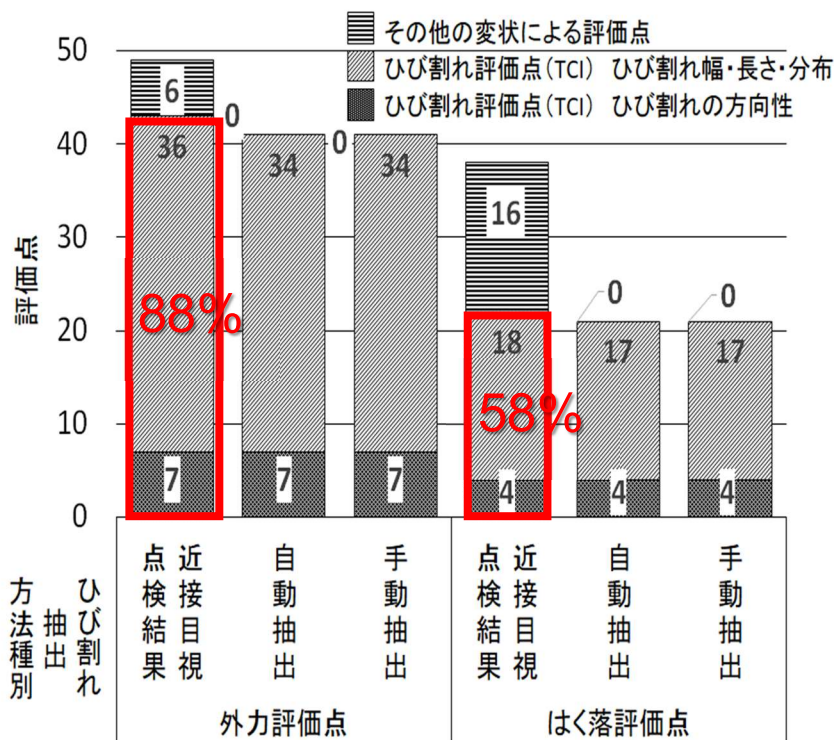


図 6.2-4 ひび割れ抽出方法種別ごと健全度評価点内訳比較表

や同一ひび割れの長さの相違，ひび割れ角度成分の相違が考えられる．その一方で，自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの評価点は同点であった．自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの線形の実例を図 6.2-5 に示す．図 6.2-1 ケース 1 と同様の線形の違いがあることから本検証によるひび割れ線形の相違による評価点への影響は少なかったと考えられる．

(2) 自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れとの比較

1) 自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの TCI の相関性

図 6.2-6 に自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れから算出した TCI の相関を示す．相関

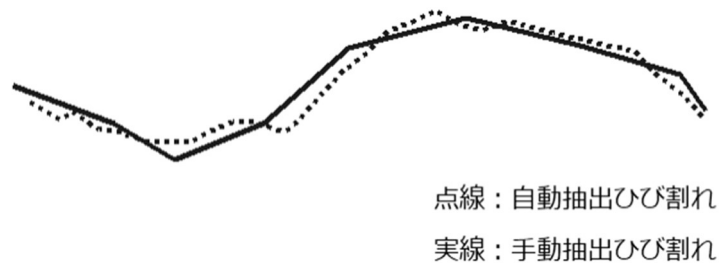


図 6.2-5 自動抽出と手動抽出のひび割れ線の実例

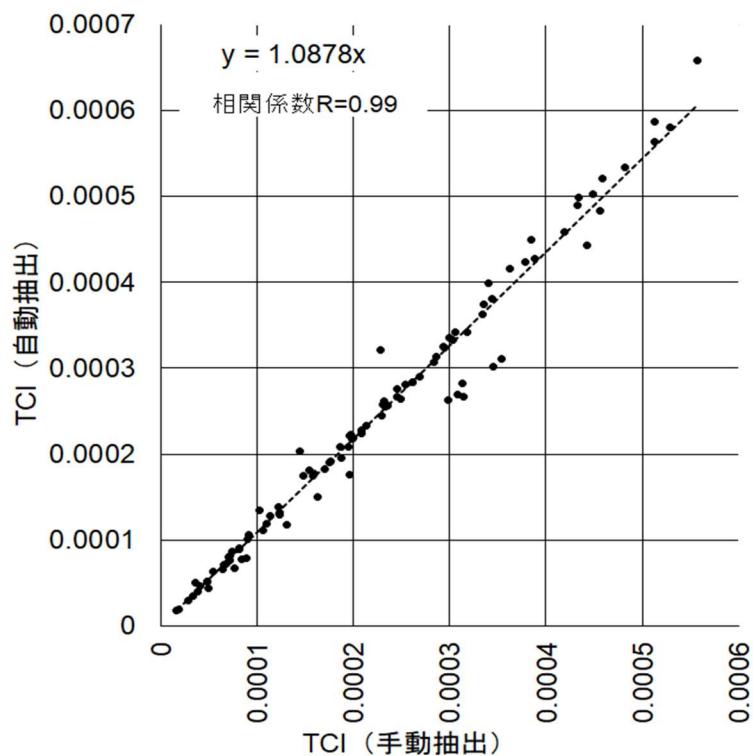


図 6.2-6 手動抽出と自動抽出ひび割れの TCI (F0) の相関性

係数が約 0.99 と、正の相関性があることが分かった。また、手動抽出ひび割れの TCI に対して自動抽出ひび割れの TCI は 8%程度高くなる傾向がみられた。これは、ひび割れ線形の相違により TCI 値の相違が鋭敏に表れた結果と考えられる。

2) ひび割れ幅、長さ、分布における自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの評価点比較

ひび割れ幅、長さ、分布に対する外力評価点およびはく落評価点について、自動抽出ひび割れに対する手動抽出ひび割れの評価点比を算出し、図 6.2-7、図 6.2-8 のとおりヒストグラムで表現した。その結果、外力評価では評価点比 0.98 のスパンが最も多く、はく落

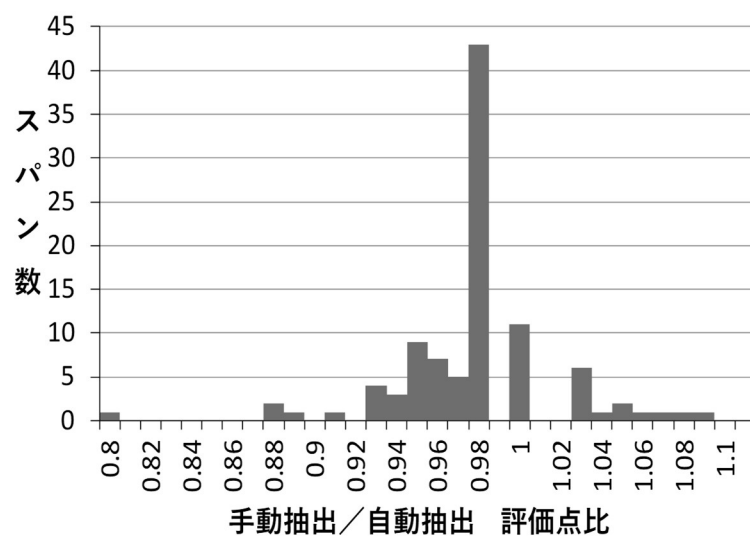


図 6.2-7 ひび割れ幅、長さ、分布に対する外力評価の評価点比

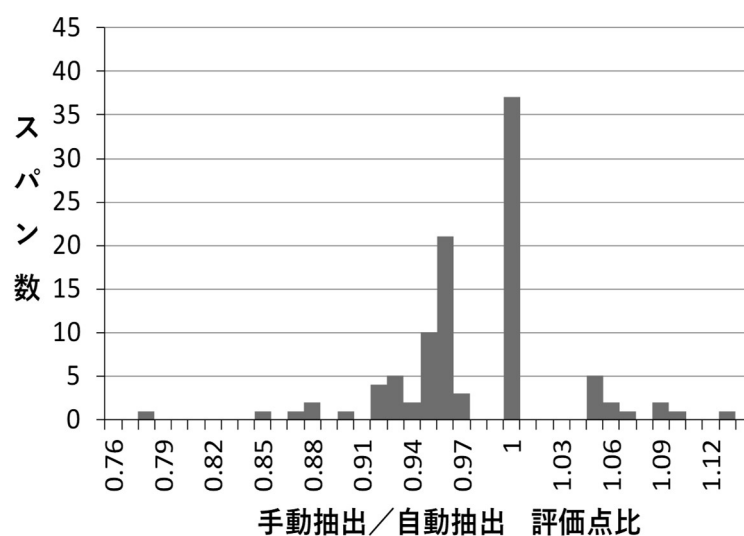


図 6.2-8 ひび割れ幅、長さ、分布に対するはく落評価の評価点比

評価では評価点比1が最も多い結果となった。これにより自動抽出ひび割れは、手動抽出ひび割れと比較して若干低めからほぼ同等の健全度評価結果を得られることが明らかとなった。

3) ひび割れの方向性における自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの評価点比較

図 6.2-9, 図 6.2-10 にひび割れの方向性に対する評価点比のヒストグラムを示す。外力

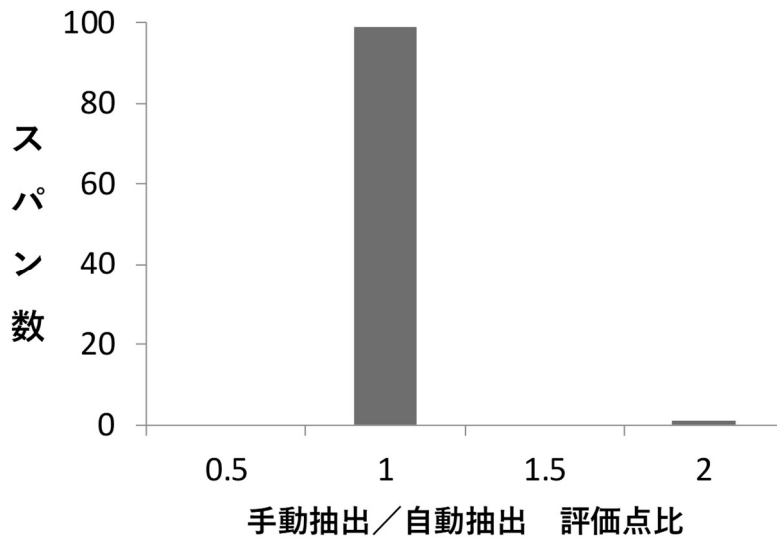


図 6.2-9 ひび割れの方向性に対する外力評価の評価点比

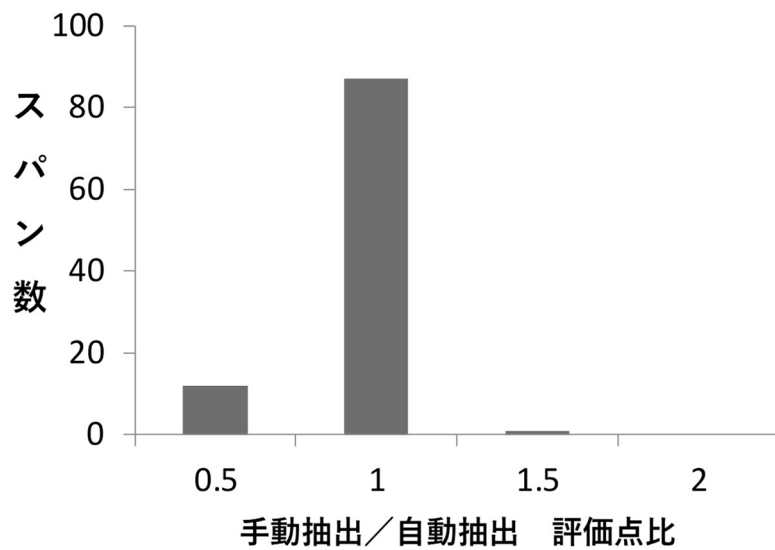


図 6.2-10 ひび割れの方向性に対するはく落評価の評価点比

評価、はく落評価ともほぼすべてのスパンで評価点比1という結果となったことから、ほぼ同等の健全度評価結果を得られることが明らかとなった。

以上の結果、自動抽出ひび割れによる健全度評価は若干低めから同等の評価点を得られることから、自動抽出ひび割れが健全度を過大に健全な方向へ評価するといった悪影響は少ないと判断できる。なお、NEXCOの健全度評価と国土交通省のトンネル定期点検要領の健全性診断区分は対比できるため²⁾、ひび割れ自動抽出技術は国土交通省をはじめ地方自治体の定期点検にも活用できるというメリットがある。

6.3 TCI とフラクタル次元との相関性検証

前節で、自動抽出ひび割れを用いたTCIが、NEXCOの健全度評価に適用可能であることを確認した。次は、自動抽出ひび割れから求めたフラクタル次元と同スパンのTCIの相関性の有無について検証した。検証に使用するデータは、第5章で対象とした日岳トンネル10スパンのフラクタル次元とし、同スパンのTCIはトンネル定期点検結果から抜粋した。対象スパンのフラクタル次元およびTCIを表6.3-1に示す。

表 6.3-1 日岳トンネル対象スパンのフラクタル次元およびTCI

| スパン | フラクタル次元 | TCI (F0 * 10 000) |
|-----|---------|----------------------|
| 1 | 1.2608 | 1.73533 |
| 12 | 1.0665 | 0.39326 |
| 16 | 1.1210 | 0.20397 |
| 18 | 1.0454 | 0.26453 |
| 20 | 1.0663 | 0.4163 |
| 35 | 1.0072 | 0.18892 |
| 42 | 1.0961 | 1.00495 |
| 49 | 1.2906 | 4.02816 |
| 58 | 1.2838 | 3.06416 |
| 65 | 1.2229 | 2.61172 |

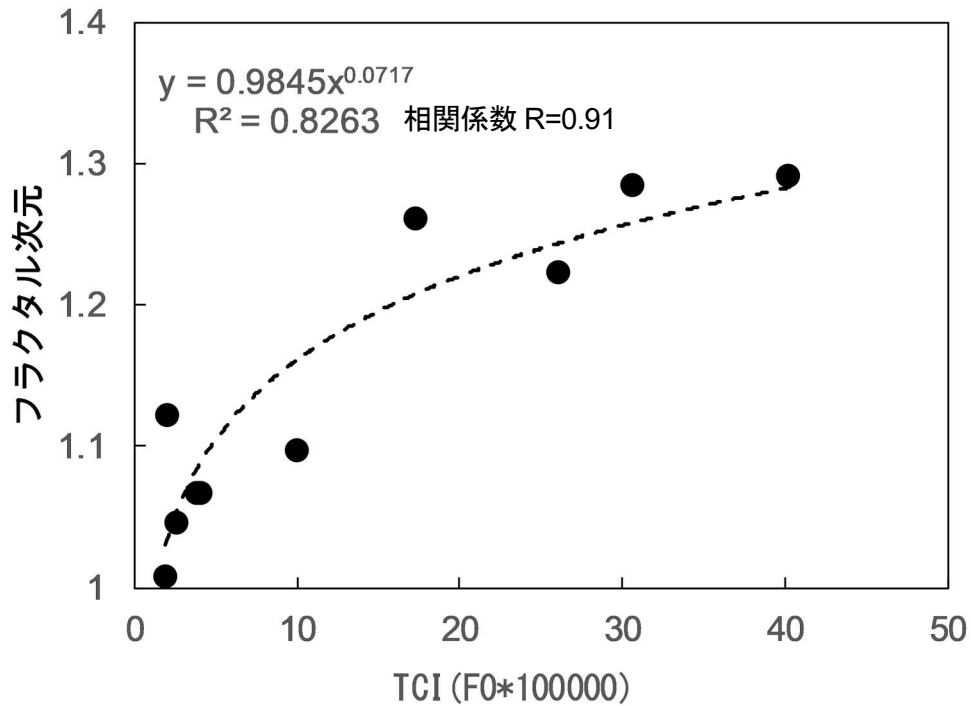


図 6.3-1 TCI とフラクタル次元の相関性

図 6.3-1 に TCI とフラクタル次元の相関を示す。検証の結果、相関係数が 0.91 と強い正の相関関係があることが分かった。

6.4 まとめ

トンネル覆工点検システムを使用して得た自動抽出ひび割れを用いた NEXCO 健全度評価は、手動抽出ひび割れとほぼ同等の結果を得られることが明らかとなった。したがって本自動抽出ひび割れは、NEXCO の健全度評価手法に適用可能であると判断できた。

またフラクタル次元は、TCI と強い相関関係があることが明らかとなったため、フラクタル次元はひび割れの分布状況を定量的に表現することが可能であると判断できた。

参考文献

- 1) 東日本，中日本，西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編）補足資料(案)
【技術資料】，pp.5-39，2015.4
- 2) 東日本，中日本，西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編），p.167，2015.4

第7章 ひび割れ定量化手法を用いた覆工ひびわれ発生区間の調査および補強対策検討

7.1 概説

本章では、トンネル覆工表面画像を用いたひび割れ抽出、図化結果と近接目視点検結果に基づいて健全度評価および変状原因の仮定を行い、各種調査の実施結果と併せて変状原因を推定し、覆工補強工法を選定した。また、第6章で検証したTCIとフラクタル次元の相関性について、本トンネルの全スパンを対象に再検証した。さらに、第5章で明らかとなった3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関に対する同スパンのNEXCO健全度評価結果との関連性について検証を行った。

7.2 日岳トンネルの変状概要

7.2.1 概要

日岳トンネルは、長崎自動車道の大村ICと諫早ICの間に位置し、供用年数36年の矢板工法で建設されたトンネルである。図7.2-1に日岳トンネルの位置、図7.2-2に標準断



図 7.2-1 日岳トンネル位置図

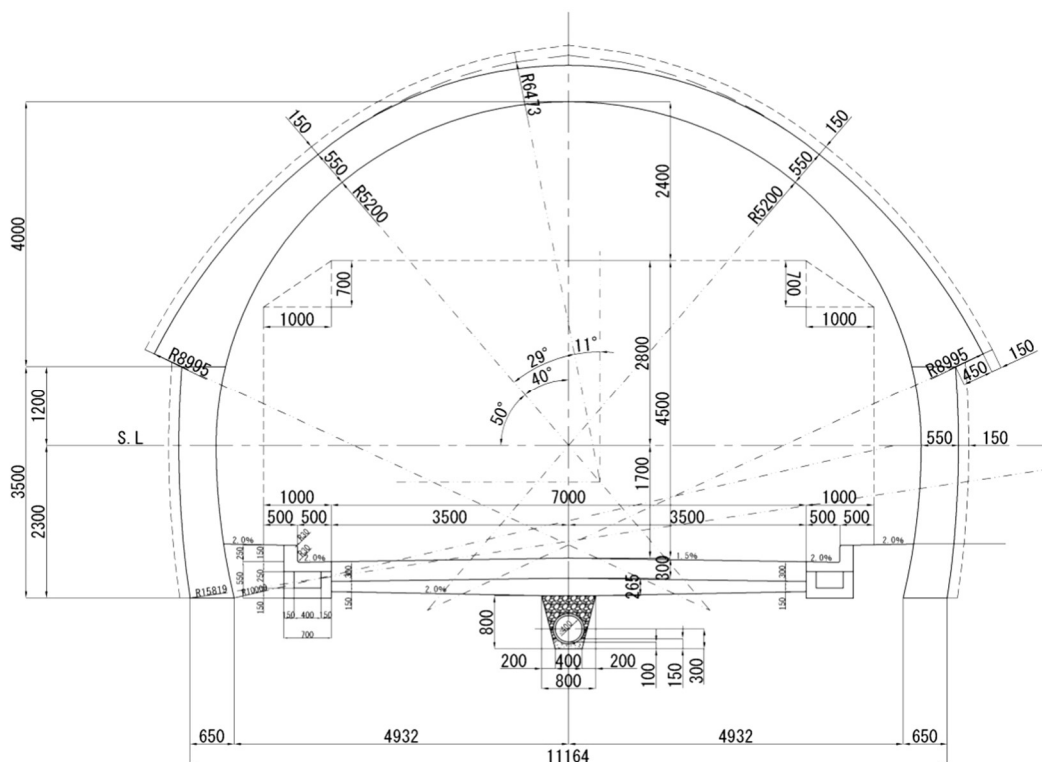


図 7.2-2 日岳トンネル標準断面図

表 7.2-1 日岳トンネルの諸元

| | |
|--------|---|
| 所在地 | 長崎県大村市 |
| 延長 | 上り線：777m, 下り線：780m |
| 供用年数 | 36年(昭和57年供用) |
| 地質 | 火山礫凝灰岩, 凝灰質礫岩, 玄武岩 凝灰質シルト岩, 砂質凝灰岩, 砂岩 |
| 施工方法 | 矢板工法 |
| 主な補修履歴 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 部分的なはく落対策工(メッシュシートなど) ・ 覆工背面空洞注入工(エアモルタル注入, 平成17~20年度施工) ・ 漏水対策工(導水樋) |

面図を示す。上下線は別線でそれぞれ2車線断面である。トンネル周辺の地質は、火山礫凝灰岩、凝灰質礫岩、玄武岩、凝灰質シルト岩、砂質凝灰岩、砂岩が分布する。主な過去の補修は、メッシュシートなどによる部分的なはく落対策工、エアモルタルによる覆工背面空洞注入工、導水樋などによる漏水対策工が施工されている。表 7.2-1 に日岳トンネル

の諸元を示す。

7.2.2 トンネルの変状概要

図 7.2-3 に、日岳トンネルの地質縦断図およびひび割れ展開図を示す。トンネル覆工のひび割れ発生状況は、上下線ともに諫早側の約 300m 区間において分布が顕著である。当該区間の地質は、主に火山礫質凝灰岩である。また、全線にわたり上半と下半の水平打継目やひび割れから漏水が生じている。

7.3. トンネル定期点検結果

7.3.1 ひび割れ展開図と健全度評価

図 7.3-1, 図 7.3-2 に平成 26 年度トンネル定期点検のひび割れ展開図, ひび割れ評価点および健全度評価結果を示す。トンネル定期点検および健全度評価は, NEXCO 保全点検要領に従って行った^{1) 2)}。上下線とも諫早側坑口から約 300m 区間にひび割れ評価点が高く健全度ランクⅢ-1 のスパンが集中している。但し近接目視の結果, ひび割れに段差, 圧力は認められなかった。これらの状況から, 当該区間を対策検討区間とした(以下, 「ひび割れ区間」という)。

7.3.2 ひび割れの経年変化

日岳トンネルは, 平成 16 年度, 平成 21 年度および平成 26 年度に詳細点検が実施されている。図 7.3-3 に各年度の覆工表面画像およびひび割れ展開図を示す。平成 16 年度と平成 21 年度のひび割れ展開図は, 寸法が正確でないため定量的な比較が困難であるが, 各年度のひび割れ展開図を目視で比較した結果, 大きな経年変化は認められなかった。また平成 21 年および平成 26 年度の覆工表面画像から確認できるとおり, ひび割れや上下半水平打継目からの漏水が定常的に発生していることが分かる。

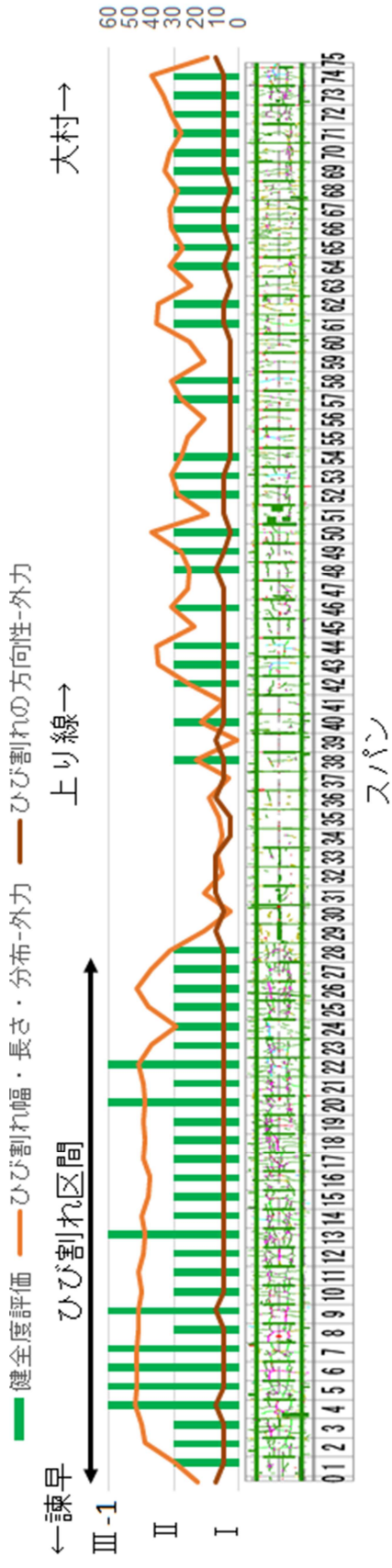


図 7.3-1 平成 26 年度トンネル定期点検のひび割れ展開図，ひび割れ評価点および健全度ランク（上り線）

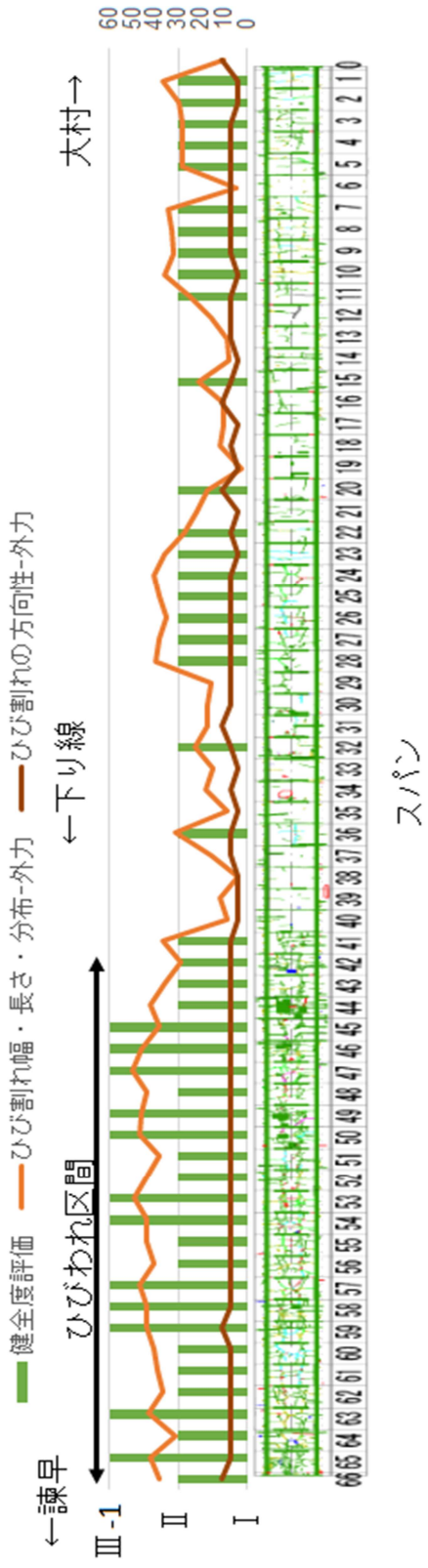


図 7.3-2 平成 26 年度トンネル定期点検のひび割れ展開図，ひび割れ評価点および健全度ランク（下り線）

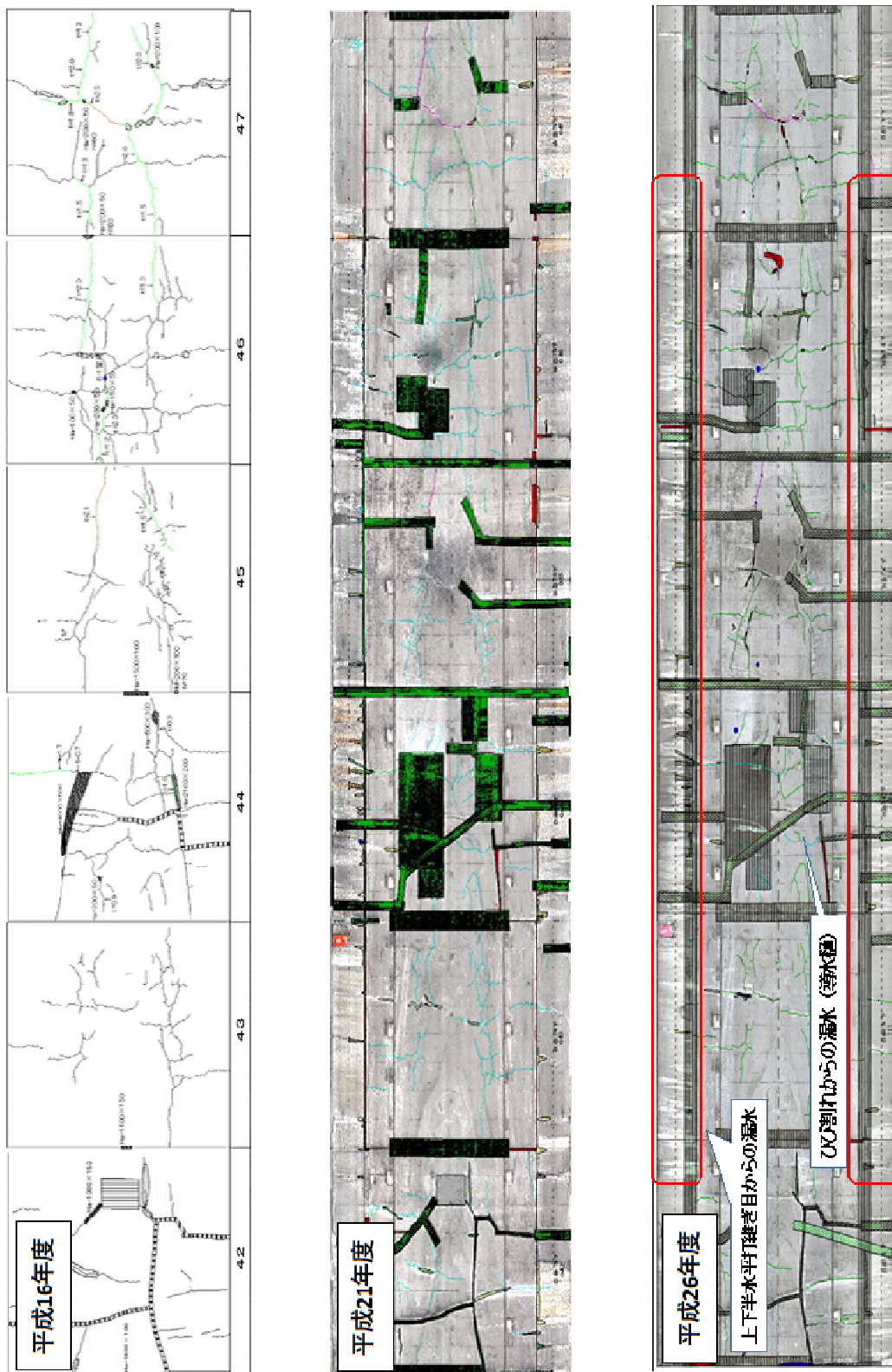


図 7.3-3 各年度の覆工表面画像およびひび割れ展開図比較の例
(下り線 No.42~47 スパン)

7.4 ひび割れ発生の原因究明

7.4.1 原因究明のための着目点

トンネル定期点検で判明した特徴を次のとおり整理した。

- ① ひび割れ評価点が高く，健全度ランクⅢ-1と診断されたスパンが上下線とも諫早側の約300m区間に集中している。（ひび割れ区間）
- ② 300m区間のひび割れに段差や圧ぎは生じていない。
- ③ 過去の詳細点検結果からひび割れの経年変化はない。
- ④ ひび割れや上下半水平打継目から漏水が継続して生じている。
- ⑤ 背面空洞注入工が平成17～20年に実施済みである。

これらの特徴から，ひび割れ発生の原因を「外力作用」と「覆工コンクリートの品質」の可能性と仮定し，表7.4-1に示す「現況構造調査」，「外力の可能性調査」，「覆工コンクリートの品質調査」を実施した。

表 7.4-1 調査項目と目的

| 調査項目 | | 調査目的 |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 現況構造 調査 | 覆工電磁波探査, 削孔空洞調査 | 既施工の背面空洞注入工の注入状況を確認 |
| | 水質分析試験 | 漏水が覆工の劣化に影響を与える水質か否か確認 |
| 外力の 可能性調査 | 調査ボーリング, 岩石試験 | ひび割れ区間における膨張性地山の有無を確認 |
| 覆工 コンクリート の品質調査 | 使用骨材産地調査 | ひび割れ区間の覆工コンクリートにおける反応性骨材使用の有無 |
| | アルカリ骨材反応試験 | ひび割れ区間の覆工コンクリートにおけるアルカリ骨材反応の可能性 |
| | 覆工強度調査 (シュミットハンマー) | ひび割れと覆工コンクリート強度の関連 |

7.4.2 現況構造調査

(1) 覆工電磁波探査, 削孔空洞調査

過去に実施された背面空洞注入工の注入状況を確認することを目的として、天端部縦断方向に覆工電磁波探査を、過去に空洞が存在した個所に対する削孔およびファイバースコープによる目視調査を実施した。調査の結果、写真 7.4-1 のとおり空洞が無く、覆工コンクリートは十分な厚さを有し健全な状態であることを確認した。

(2) 水質分析試験の結果

削孔空洞調査の際に流出した覆工背面の水および覆工からの漏水を採取し、水素イオン濃度 pH, 電気伝導率 EC, イオン分析を行った。試験の結果、覆工コンクリートに悪影響を及ぼす水質ではないことを確認した。

7.4.3 外力の可能性調査

(1) 調査ボーリング結果

ひび割れ区間において、図 7.4-1 に示す位置に、地質に粘土鉱物が含まれるか、また膨



写真 7.4-1 削孔空洞調査孔内状況の例

潤性の地質であるかを確認することを目的として調査ボーリングを実施した。

写真 7.4-2, 写真 7.4-3に調査ボーリングコアの写真を示す。コアは棒状であり未固結部分は存在しなかった。但し、一般的に風化しやすい岩といわれる凝灰岩を確認した。

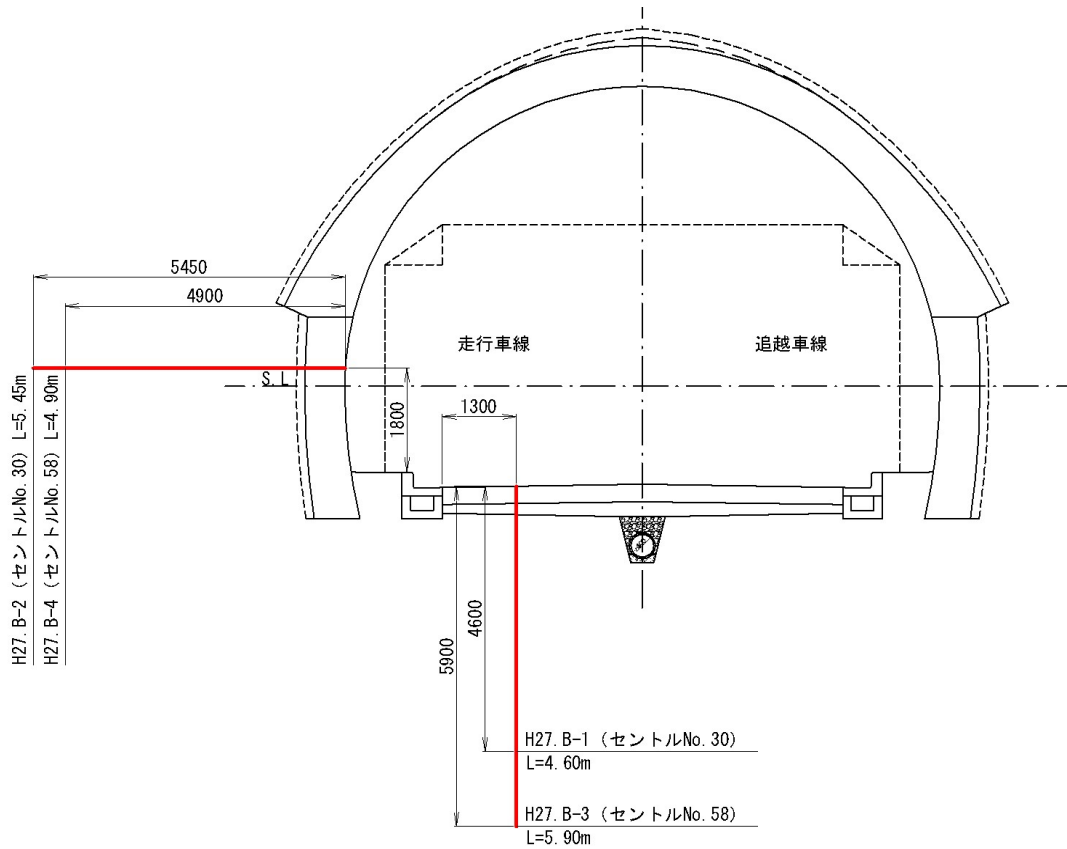


図 7.4-1 調査ボーリング削孔位置



写真 7.4-2 調査ボーリングコア写真 (鉛直, 下り, No.58)



写真 7.4-3 調査ボーリングコア写真（水平，下り，No.58）

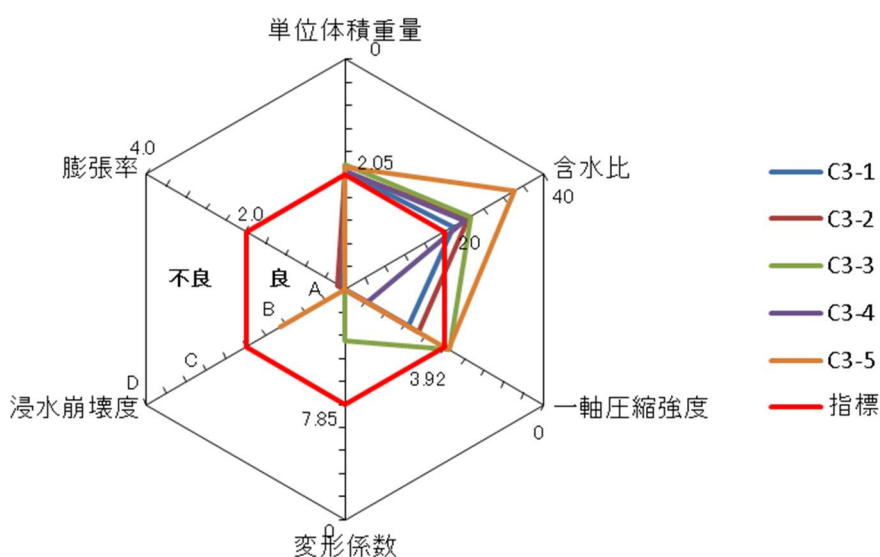


図 7.4-2 膨張性指標ダイヤグラム（鉛直，下り，No.58）

(2) 岩石試験結果

地山の膨張性の有無を明らかにするため、調査ボーリングコアで岩石試験を行った。図 7.4-2、図 7.4-3に膨張性指標ダイヤグラムを示す。ダイヤグラム中の赤線は、表 7.4-2 に示すトンネル標準示方書の「地山の膨張性を示す指標の例」³⁾を参考にした。鉛直コアにおいては、含水比、単位体積重量、一軸圧縮試験について指標を上回るものもあるが、変形係数、浸水崩壊、膨張率では膨張性を示さなかった。水平コアにおいては、すべての項目で膨張性を示さない結果となった。加えて、X線粉末回析による膨潤性を持つ粘土鉱物の有無を確認した結果、サポナイトが検出されたが含有量が微量であったため、トンネル周辺の地山は膨張性の可能性が低い地山と判断した。

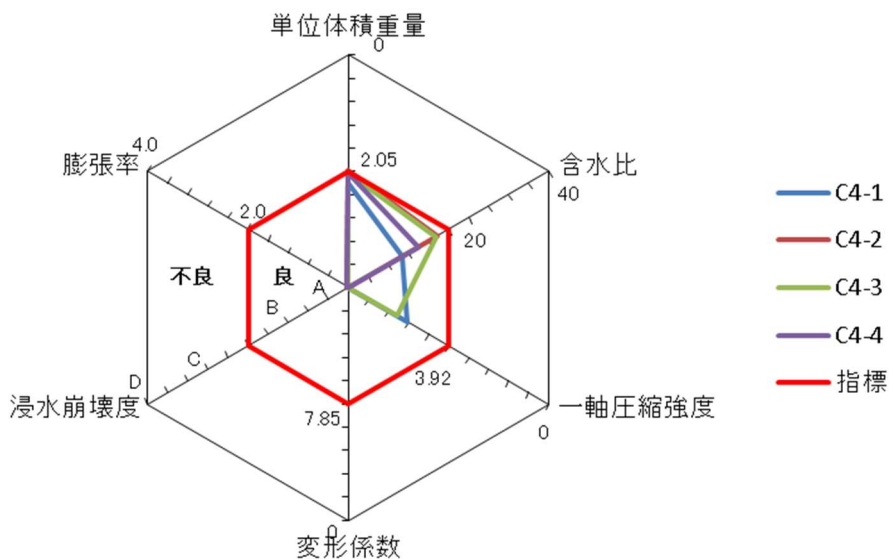


図 7.4-3 膨張性指標ダイヤグラム (水平, 下り, No.58)

表 7.4-2 地山の膨張性を示す指標の例 (一部抜粋)³⁾

| | 仲野 (1975) | 日本鉄道建設公団 (1977) | 大塚 功 (1980) | 佐藤 功 (1980) | 吉川 功 (1988) |
|-------------------------------|--|---|--|---|---|
| 膨張性を示す指標 | 地山強剪比 (G_n) = $\sigma_c / \gamma H$ σ_c : 一軸圧縮強度 γ : 単位体積重量 H : 土被り厚 | 地圧発生の可能性が非常に大きいものに ①岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト ② $2\mu\text{m}$ 以下粒子含有率 $\geq 30\%$ ③塑性指数 $\geq 70\%$ ④陽イオン交換容量 $\geq 35\text{meq}/100\text{g}$ ⑤浸水崩壊度D ⑥ボーリングサンプル中破砕部多い | ①変形係数 $\leq 8.000\text{kgf}/\text{cm}^2$ ②一軸圧縮強度 $\leq 40\text{kgf}/\text{cm}^2$ ③単位体積重量 $\leq 2.05\text{gf}/\text{cm}^3$ ④自然含水比 $\geq 20\%$ ⑤液性限界 $\geq 100\%$ ⑥塑性指数 $\geq 70\%$ ⑦液性指数 $\geq 20\%$ ⑧ $2\mu\text{m}$ 以下粒子含有率 $\geq 30\%$ ⑨陽イオン交換容量 $\geq 35\text{meq}/100\text{g}$ ⑩膨張率 $> \text{no}/2.0\%$ | ①自然含水比 $\geq 20\%$ ②単位体積重量 (乾燥) $\leq 1.8\text{gf}/\text{cm}^3$ ③ (第1回吸水量/自然含水比) ≤ 0 ④浸水崩壊度C~D ⑤モンモリロナイト含有量 $\geq 30\%$ ⑥RD $\leq 30\%$ | 著しい膨張性を呈する地山 ①ボーリング時 ・無水掘りが必要 ・コア膨張が顕著 ② $G_n \leq 1.5$ (< 0.5 で顕著) ③モンモリロナイト含有量 $\geq 20\%$ かつ自然含水比 $\geq 20\%$ ④浸水崩壊度D 膨張性を呈する地山 ①ボーリング時 ・コア採取率低い ・コアディスキングが顕著 (< 0.5 で顕著) ② $1.5 \leq G_n < 2.0$ ③モンモリロナイト含有量 $\geq 20\%$ または自然含水比 $\geq 20\%$ |
| | ① $G_n \leq 2$ 押出し性~膨張性 | ③陽イオン交換容量 $\geq 35\text{meq}/100\text{g}$ 膨張発生の可能性あり | | | |
| | ② $2 < G_n \leq 4$ 強度の押出し性~地圧が大きいと推定される | ④陽イオン交換容量 $\geq 35\text{meq}/100\text{g}$ 膨張発生の可能性あり | | | |
| | ③ $4 < G_n \leq 6$ 地圧が大きいと推定可 | ⑤浸水崩壊度D 膨張発生の可能性あり | | | |
| | ④ $6 < G_n \leq 10$ 地圧があると推定可 | ⑥ボーリングサンプル中破砕部多い 膨張発生の可能性あり | | | |
| ⑤ $10 < G_n$ 地圧がほとんどないと推定可 | ⑦液性指数 $\geq 20\%$ ⑧ $2\mu\text{m}$ 以下粒子含有率 $\geq 20\%$ ⑨陽イオン交換容量 $\geq 20\text{meq}/100\text{g}$ | | | | |

地山強度比を表 7.4-3に示す。日本道路協会 道路トンネル維持管理便覧（本体工編）⁴⁾において、地山強度比は2より小さくなると膨張性が顕著になるとされている。地山強度比は、式(7.4.1)に基づいて算出される

$$\alpha = \frac{qu}{(\gamma \times H)} \quad (7.4.1)$$

ここに、 α ：地山強度比

qu ：トンネル周辺地山の一軸圧縮強度(N/m²)

γ ：地山の単位体積重量(N/m³)

H ：土被り高さ(m)

本調査結果では、概ね2より大きいことから膨張性土圧の発生は考えにくい地山であると判断した。

7.4.4 覆工コンクリートの品質調査

(1) 使用骨材産地調査およびアルカリ骨材反応試験結果

ひび割れの分布状況が格子状であるため、アルカリ骨材反応を疑った。本覆工コンクリートに使用された骨材の産地を調査したところ、近傍他構造物でアルカリシリカ反応をおこしている骨材と同じ産地の安山岩であることが分かった。次にアルカリ骨材反応試験結

表 7.4-3 地山強度比

| セトルNo. | 掘進方向 | 試料番号 | 一軸圧縮強さqu | | 単位体積重量 | | | 土被り m | 地山強度比 α | 平均 |
|--------|------|------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------|-------------------|-----|
| | | | MN/m ² | N/m ² | g/cm ³ | kN/m ³ | N/m ³ | | | |
| 30 | 鉛直 | C1-1 | 14.20 | 14,200,000 | 1.963 | 19.3 | 19,257 | 103 | 7.2 | 3.6 |
| | | C1-2 | 3.75 | 3,750,000 | 1.915 | 18.8 | 18,786 | | 1.9 | |
| | | C1-3 | 2.77 | 2,770,000 | 1.864 | 18.3 | 18,286 | | 1.5 | |
| | | C1-4 | 7.21 | 7,210,000 | 1.870 | 18.3 | 18,345 | | 3.8 | |
| 30 | 水平 | C2-1 | 4.02 | 4,020,000 | 1.899 | 18.6 | 18,629 | 53 | 2.1 | 3.9 |
| | | C2-2 | 9.80 | 9,800,000 | 1.978 | 19.4 | 19,404 | | 4.9 | |
| | | C2-3 | 9.93 | 9,930,000 | 1.978 | 19.4 | 19,404 | | 5.0 | |
| | | C2-4 | 7.00 | 7,000,000 | 1.966 | 19.3 | 19,286 | | 3.5 | |
| 58 | 鉛直 | C3-1 | 5.35 | 5,350,000 | 2.003 | 19.6 | 19,649 | 53 | 5.1 | 4.8 |
| | | C3-2 | 4.95 | 4,950,000 | 2.011 | 19.7 | 19,728 | | 4.7 | |
| | | C3-3 | 3.75 | 3,750,000 | 1.878 | 18.4 | 18,423 | | 3.8 | |
| | | C3-4 | 6.96 | 6,960,000 | 1.990 | 19.5 | 19,522 | | 6.7 | |
| | | C3-5 | 3.78 | 3,780,000 | 1.913 | 18.8 | 18,767 | | 3.8 | |
| 58 | 水平 | C4-1 | 5.57 | 5,570,000 | 2.250 | 22.1 | 22,073 | 53 | 4.8 | 6.4 |
| | | C4-2 | 8.39 | 8,390,000 | 2.027 | 19.9 | 19,885 | | 8.0 | |
| | | C4-3 | 5.95 | 5,950,000 | 2.077 | 20.4 | 20,375 | | 5.5 | |
| | | C4-4 | 7.86 | 7,860,000 | 2.069 | 20.3 | 20,297 | | 7.3 | |

果を図 7.4-4に示す。すべてのコアは材齢14日間で膨張率が0.10%以下であり、無害と判定される。なお、C-4は材齢24, 28日で0.11%となるが、28日間で0.11%に収束していることから、「潜在的に有害な膨張性はない」と判断した。

(2) 覆工コンクリート強度調査

覆工コンクリートの強度をシュミットハンマーにより推定した。調査対象スパンおよびコンクリート強度測定位置は、図 7.4-5 のとおり覆工打設模様の有無およびひび割れ分布の程度によって選定した。その結果、表 7.4-4 に示すとおりすべての測定位置で設計基準強度は満たしており、覆工コンクリートの品質は良好であることを確認できた。

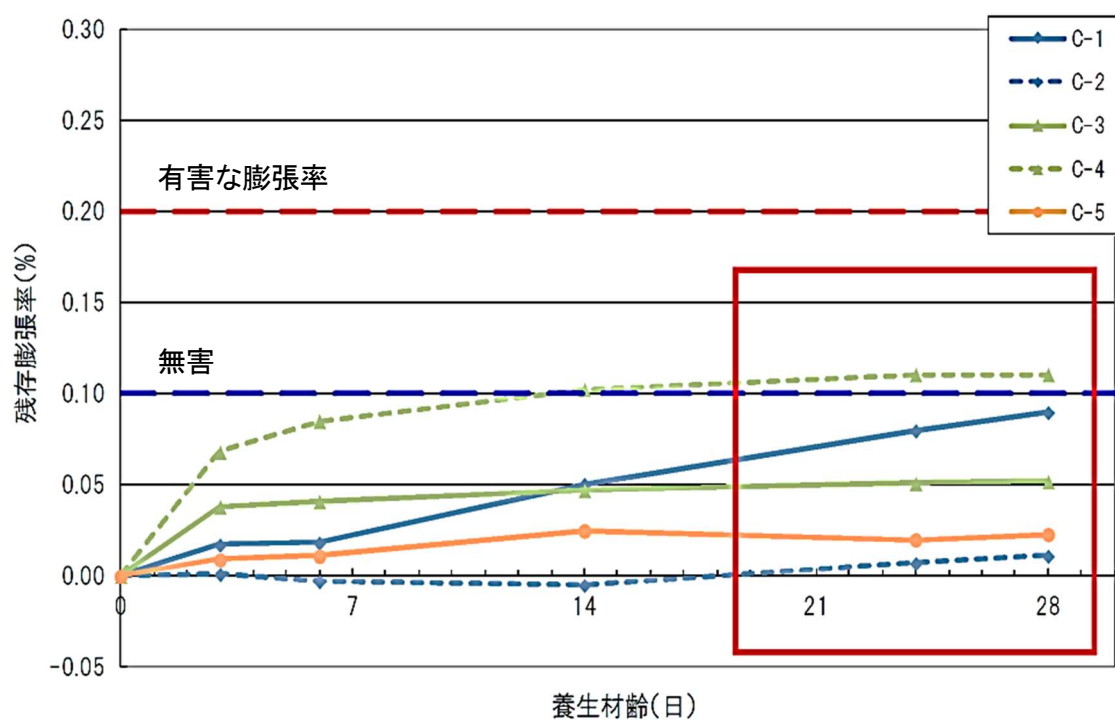
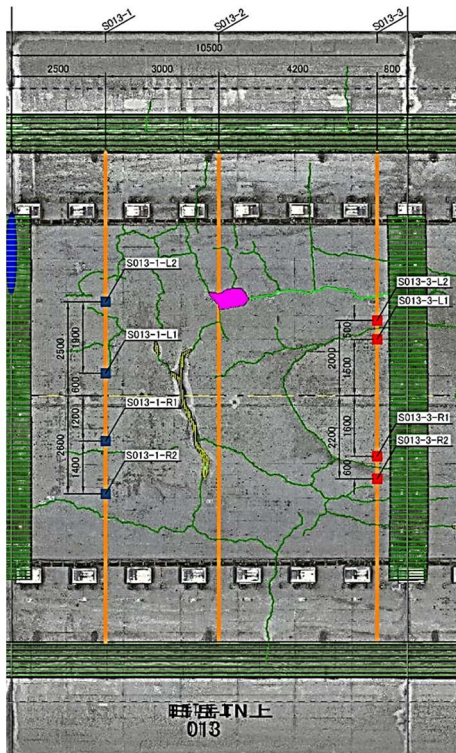
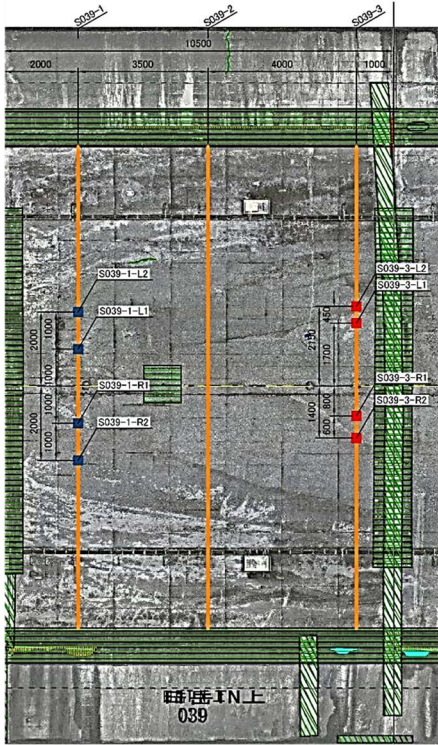


図 7.4-4 アルカリ骨材反応試験結果

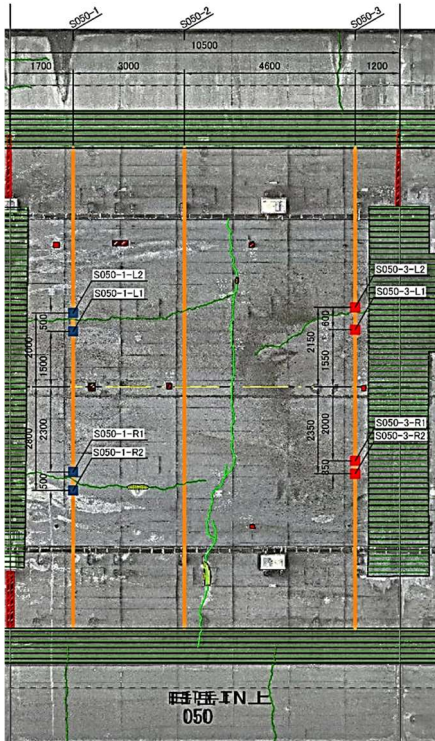


- : シュミットハンマー打撃位置
(覆工打設模様有り)
- : シュミットハンマー打撃位置
(覆工打設模様無し)

上り, No.13, ひび割れ多い



上り, No.39, ひび割れ少ない



上り, No.50, ひび割れ中位

図 7.4-5 覆工コンクリート強度調査対象スパンおよび測定位置

表 7.4-4 覆工コンクリート強度調査結果

| スパン No. | 調査位置 | 覆工コンクリート強度 (N/mm ²) |
|------------------|-----------|------------------------------------|
| 13 (覆工打設模様無し) | S013-1-L1 | 43.6 |
| | S013-1-L2 | 40.7 |
| | S013-1-R1 | 38.1 |
| | S013-1-R2 | 52.0 |
| 13 (覆工打設模様有り) | S013-3-L1 | 31.5 |
| | S013-3-L2 | 37.0 |
| | S013-3-R1 | 38.6 |
| | S013-3-R2 | 38.9 |
| 39 (覆工打設模様無し) | S039-1-L1 | 52.9 |
| | S039-1-L2 | 44.9 |
| | S039-1-R1 | 50.8 |
| | S039-1-R2 | 45.1 |
| 39 (覆工打設模様有り) | S039-3-L1 | 38.0 |
| | S039-3-L2 | 39.8 |
| | S039-3-R1 | 34.7 |
| | S039-3-R2 | 39.8 |
| 50 (覆工打設模様無し) | S050-1-L1 | 50.3 |
| | S050-1-L2 | 52.7 |
| | S050-1-R1 | 42.5 |
| | S050-1-R2 | 44.2 |
| 50 (覆工打設模様有り) | S050-3-L1 | 37.5 |
| | S050-3-L2 | 44.0 |
| | S050-3-R1 | 39.7 |
| | S050-3-R2 | 41.9 |

7.4.5 ひび割れ発生原因の究明と対策方針

詳細点検および各種調査結果から判明した状況を整理すると次のとおりとなる。

a) 外力作用の可能性

- ① ひび割れの進行性は認められない
- ② 背面空洞注入実施済み
- ③ 有害な地下水はみとめられない
- ④ 地山に膨張性は認められない

b) 覆工コンクリートの品質

- ① アルカリ骨材反応は認められない
- ② コンクリート強度は設計基準強度を満足する

詳細点検結果および各種調査結果から総合的に勘案すると、地山に膨張性は認められず、背面空洞もないことから継続的な外力の作用は考えられない。また、覆工コンクリートは十分な強度を有し、アルカリ骨材反応もないことから、コンクリートの品質が原因とも考

えられない。したがってひび割れ発生の原因は、施工後初期の段階で初期地圧の作用や背面空洞による緩み土圧の作用により発生したものと考えられる。なお、ひび割れは進行がみられないためトンネル構造としては安定した状態と考えられるが、覆工コンクリートがひび割れによりブロック化しているため、ひび割れの補強による覆工の一体化が必要と判断した。

7.5 補強対策工の選定

日岳トンネルのひび割れ区間の発生原因は、ひび割れは施工後初期の段階で初期地圧の作用や背面空洞による緩み土圧の作用と推定した。補強対策工は、NEXCO の設計要領第三集トンネル保全編⁵⁾に従い、健全度評価結果およびひび割れの分布状況をもとに補強ランクを選定し、対策工を選定した。

表 7.5-1 に健全度ランクと補強ランクを示す。ひび割れ区間の健全度評価結果は、断続的であるが一連の区間としてはⅢ-1 と判断する。したがって補強ランクは D を選定する。

表 7.5-2 に地山の緩みによる鉛直圧に起因する変状の補強ランクを示す。実際のひび割れ分布状況と照合すると、ひび割れ区間の状況は「引張ひび割れ（軸方向・直角方向）が交差」が適切であることから、補強ランクを C に変更することとした。

表 7.5-3 に標準設計における変状原因ごとの対策工を示す。緩みによる鉛直圧に起因する対策工は、ロックボルトもしくは内面接着工または内巻工となる。施工条件として、車線規制を行い通行車両の直近で実施する必要があるため、材料搬入が簡易でひび割れを補強する効果があり、十分な接着が期待できる内面接着工の炭素繊維シート接着工法を選定した。なお当該施工範囲は、事前にひび割れ止水注入工を施工する。図 7.5-1 に補強対策工施工標準図、図 7.5-2、図 7.5-3 に補強対策工施工範囲図を示す。

表 7.5-1 健全度ランクと補強ランク¹⁾

| 健全度 ランク | 対策時期 | 対応 | 設計要領 第三集 トンネル(トンネル本体工保全編) | |
|------------|------|---------------|----------------------------|--|
| | | | 補強ランク | |
| | | | 補強工 トンネル構造の耐荷力 回復・向上 | |
| V | 緊急 | 緊急・応急処 置 | — | — |
| | | 調査 ・ 対策 | A | 変状の規模が特に大きくかつ進行し、通行車両に対して危険であるため、早急に何らかの補強が必要なもの。 |
| IV | 早急 | 調査 ・ 対策 | B | 変状が大きくかつ進行し、通行車両に対して危険であるため、早急に何らかの補強が必要なもの。 |
| III-2 | 速やか | | C | 変状があり、それらが進行して、近い将来通行車両に対して危険を与えるため速やかな補強が必要なもの。 |
| III-1 | 計画的 | | D | 変状があり、将来、通行車両に対して危険を与える可能性があるため重点的に監視し、適切な時期に補強が必要なもの。 |
| II | — | 要監視 | | |
| I | — | 対応不要 | | |

表 7.5-2 地山の緩みによる鉛直圧に起因する変状の補強ランク⁵⁾

| 補強ランク | A | B | C | D |
|-----------------------|--------------------------|---|-----------------------------|----------------------|
| アーチ部の 変状現象 | アーチの変形が 顕著（崩落の恐 れ） | 以下のいずれか ①放射状ひび割れ ②ひび割れにより ブロック化 ③圧ぎまたはせん 断ひび割れ | 引張ひび割れ （軸方向・直角方 向）が交差 | クラウン部に軸方 向の引張ひび割れ |
| 変状の進行性 （内空変位速度の目安） | 大 （10mm/年以上） | やや大 （3～10mm/年） | 有り （3mm/年未満） | |

表 7.5-3 標準設計における変状原因ごとの対策工⁵⁾

| 補強ランク | 塑性圧に起因する変状 | | 偏圧に起因する変状 | | 緩みによる鉛直圧に起因する | | |
|-------|------------|------------|-----------|------------|---------------|------------|--|
| | 基本パターン | 基本パターンの代替え | 基本パターン | 基本パターンの代替え | 基本パターン | 基本パターンの代替え | |
| B | | | | | | | |
| C | | | | | | | |
| D | | | | | | | |

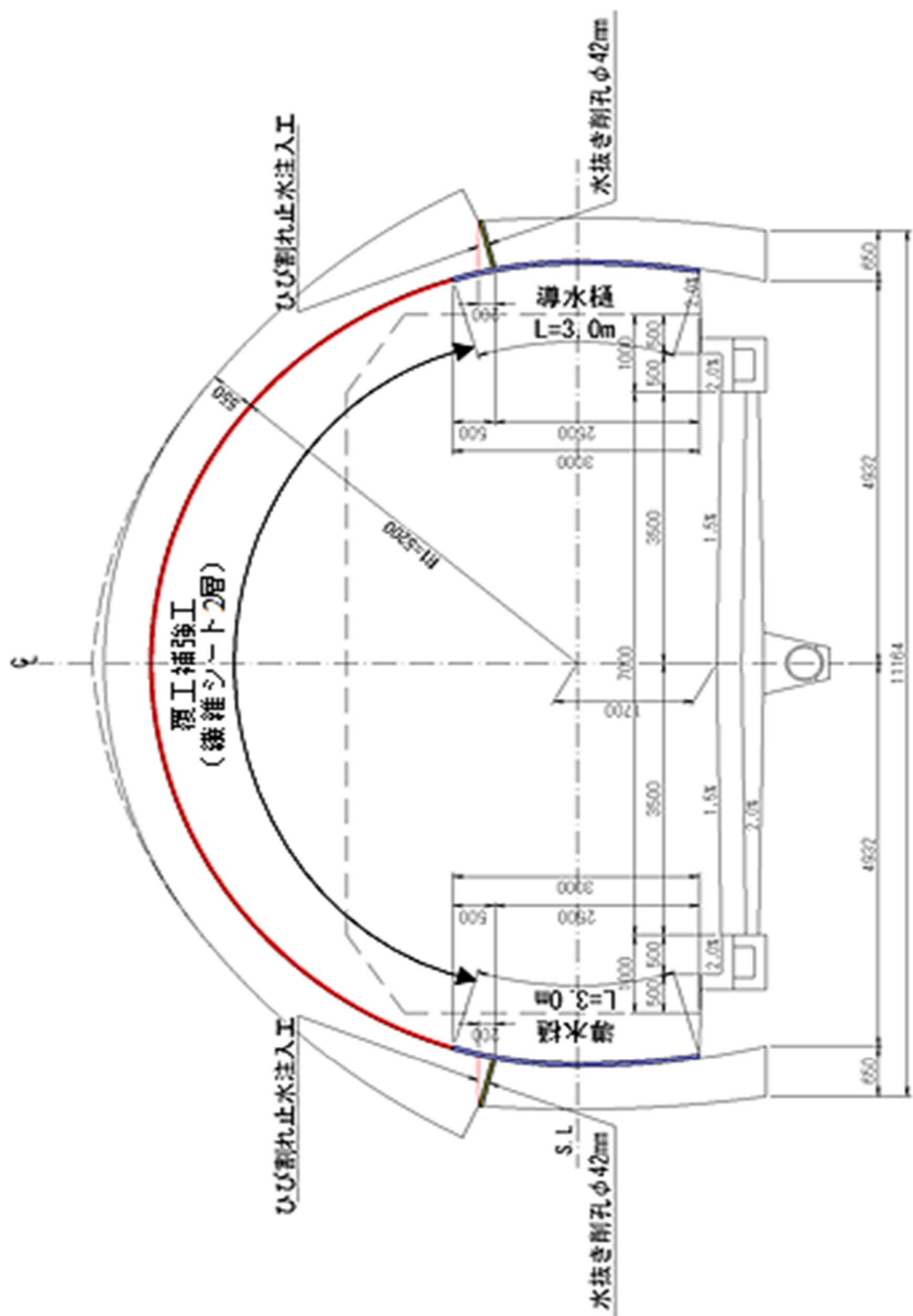


図 7.5-1 補強対策工および漏水対策工

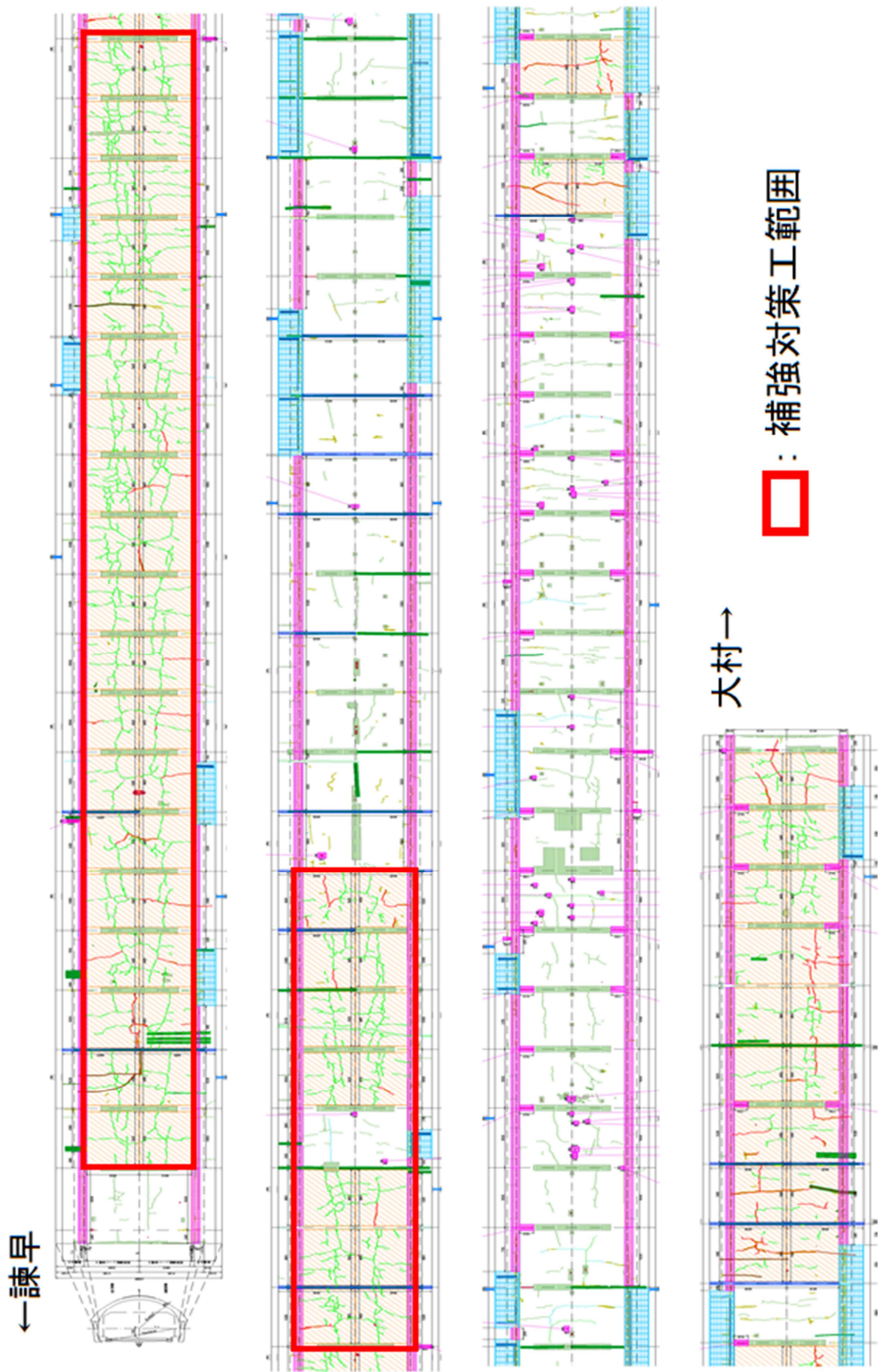


図 7.5-2 補強対策工施工範囲図（上り線）

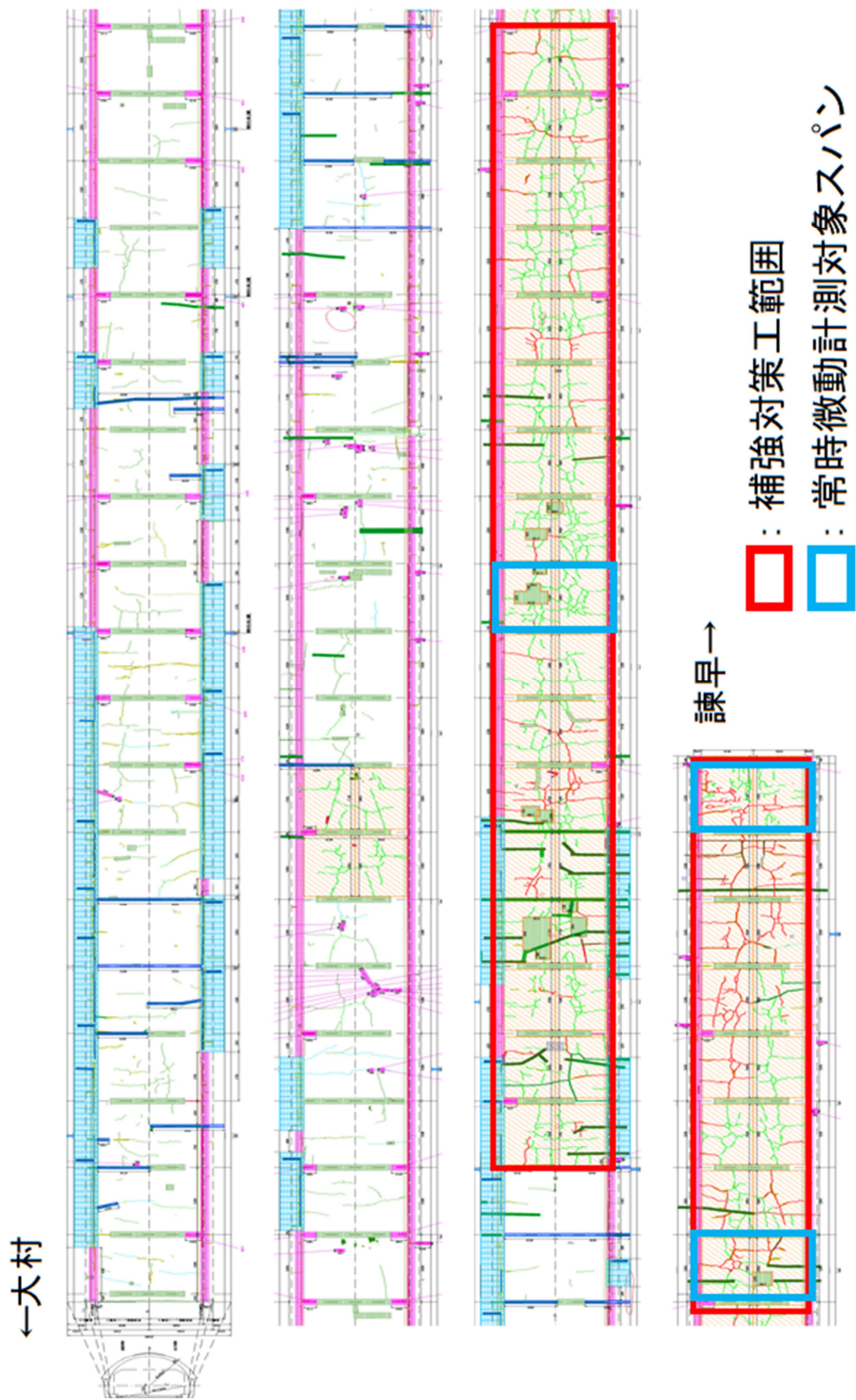


図 7.5-3 補強対策工施工範囲図 (下り線)

7.6 実トンネルにおけるフラクタル次元とフーリエスペクトルとの相関性再検証

第6章6.3において、TCIとフラクタル次元に相関関係があることが明らかとなった。そこで、日岳トンネル全スパンでの両者の相関性について再検証を行った。また、第5章5.6で明らかとなったフラクタル次元と3方向合成フーリエスペクトルの相関関係について、日岳トンネルのトンネル定期点検における健全度評価結果との関連性を再検証した。

7.6.1 TCIとフラクタル次元の相関

7.3.1に示されたひび割れ評価点の根拠である各スパンのTCIと、同一スパンのフラクタル次元を図7.6-1に比較した。その結果、第6章6.3と同様に相関関係があり、その傾向は相関係数0.91から0.93へ強くなっていることが明らかとなった。

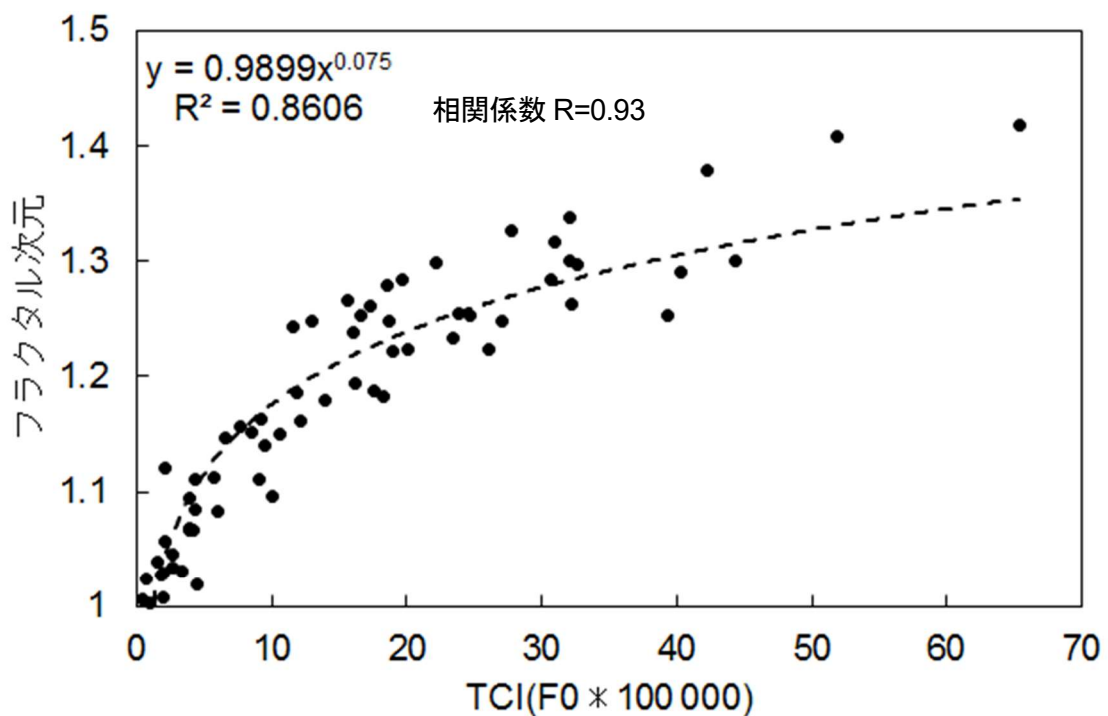


図 7.6-1 TCIとフラクタル次元の相関性

7.6.2 フラクタル次元および3方向合成フーリエスペクトルと健全度評価との相関性検証

図 7.6-2 に3方向合成フーリエスペクトルとNEXCOの健全度評価および外力評価点を示す。横軸は当該スパンのフラクタル次元を昇順に整列した。3方向合成フーリエスペクトルは、その結果、バラつきはあるが概ね健全度評価および外力評価点と同様の分布傾向

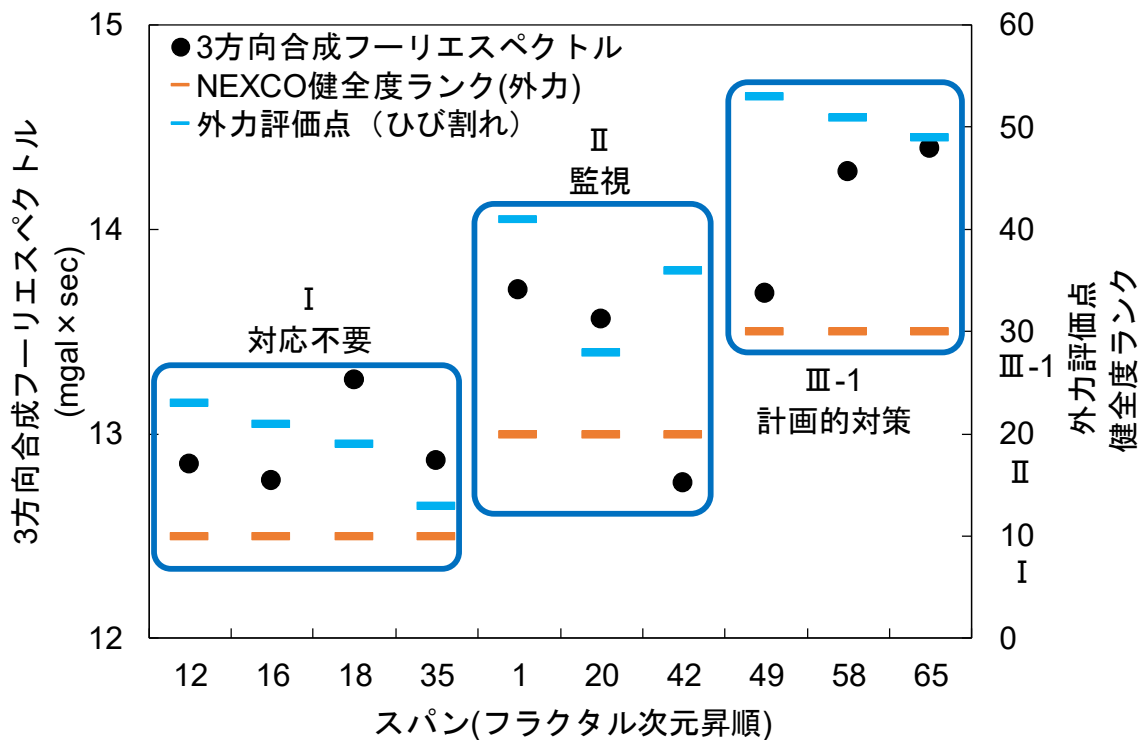


図 7.6-2 フラクタル次元および3方向合成フーリエスペクトルと健全度評価を示している。

7.7 まとめ

ひび割れ区間の補強工検討にあたって、覆工表面画像を用いてひび割れを抽出、図面化して健全度評価を実施した。ひび割れ分布を定量化することによって、健全度評価を画一的に判定することができ、トンネル覆工に発生するひび割れに対する必要な調査や補強対

策工選定など，対策検討を実施する際に有効であることが確認できた。

また，日岳トンネル下り線の覆工全 67 スパンの TCI とフラクタル次元には，第 6 章と同様に相関関係が認められ，その傾向はより強くなっていることが明らかとなった。したがって，本章の結果からもフラクタル次元がひび割れ分布定量化手法として信頼性があると判断できる。

フラクタル次元と 3 方向合成フーリエスペクトルの相関関係については，日岳トンネル下り線の同スパンの健全度評価結果とほぼ同様の傾向であることが明らかとなった。したがってフラクタル次元と 3 方向合成フーリエスペクトルは，トンネル覆工の健全度を表現できる可能性があると判断できる。

参考文献

- 1) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領構造物編，p161，2015.4
- 2) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編）補足資料（案）【技術資料】，
pp.5-21，2015.4
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書[共通編]・同解説／[山岳工法編]・同解説，p45，2016
- 4) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，p46，2015.6
- 5) 西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル保全編（変状対策），pp.2-15，
pp.4-10，2016.8

第 8 章 常時微動計測の再現性検証および補強対策工前後における常時微動計測結果の変化

8.1 概説

本章では、第 5 章で常時微動計測を実施した日岳トンネルにおいて、異なる時期に再度常時微動計測を行い、得られたフーリエスペクトルの再現性を検証した。また、第 7 章で選定したひび割れ充填工および炭素繊維補強工（以下、「補強対策工」という）を施工したスパンに常時微動計測を行い、同一スパンの補強対策工前との変化について検証した。

8.2 検証内容

表 8.2-1 に検証対象スパンと計測時期および補強対策工範囲を示す。対象スパン No.1 から No.42 までは補強対策工対象外のスパンであり、異なる時期に 2 回行った常時微動計測によるフーリエスペクトルとフラクタル次元の相関性について再現性を検証する。なお、第 1 回と第 2 回の加速度計設置位置は異なっており、第 1 回はトンネル中心線から 30° の位置に、第 2 回は 22° の位置に設置した。図 8.3-1 上図に加速度計設置位置を示す。

対象スパン No.49 から No.65 については補強対策工対象スパンであり、補強対策工施工後に再度常時微動計測を行い、補強対策工施工前後におけるフーリエスペクトルの変化に

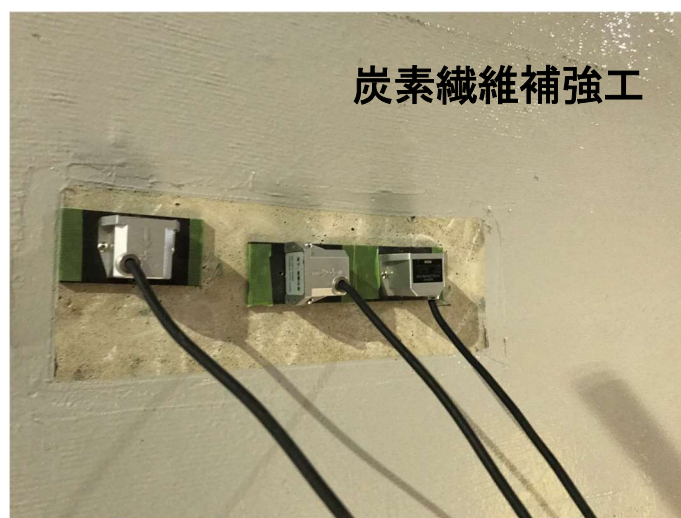
表 8.2-1 検証対象スパンと計測時期および補強対策工範囲

| | | | |
|----------------------------|-------|----------------------------|-------------------------|
| 検証対象スパン | | 1, 12, 16, 18, 20, 35, 42 | 49, 58, 65 |
| 補強対策工の有無 | | なし | ひび割れ充填工 炭素繊維補強工 |
| 計測時期 | 第 1 回 | H28.11.17(第 5 章) | |
| | 第 2 回 | H29.9.26 | |
| 検証内容 | | フーリエスペクトル 再現性検証 | 補強対策工前後でのフーリエスペクトルの変化検証 |
| 加速度計設置角度 (トンネル中心線からの角度) | | 第 1 回 : 30° 第 2 回 : 22° | 22° |

ついて検証する。加速度計設置位置は、補強対策工前後で同位置である。写真 8.2-1 に補強対策工施工前後の加速度計設置状況を示す。



補強対策工施工前



補強対策工施工後

写真 8.2-1 炭素繊維補強工施工前後における加速度計設置状況

8.3 フーリエスペクトルの方向補正

本検証を行うにあたっては、異なる加速度計設置位置のフーリエスペクトルを統一的に比較するため、式(8.3.1)、式(8.3.2)によりフーリエスペクトルを水平方向および鉛直方向に補正した。図 8.3-1 下図にフーリエスペクトル方向補正模式図を示す。

$$HF=TF \times \cos \theta - NF \times \sin \theta \quad (8.3.1)$$

$$VF=TF \times \sin \theta + NF \times \cos \theta \quad (8.3.2)$$

ここに、 HF ：水平方向フーリエスペクトル(mgal*sec)

VF ：鉛直方向フーリエスペクトル(mgal*sec)

TF ：接線方向フーリエスペクトル(mgal*sec)

NF ：法線方向フーリエスペクトル(mgal*sec)

θ ：トンネル中心線から加速度計設置位置の角度(°)

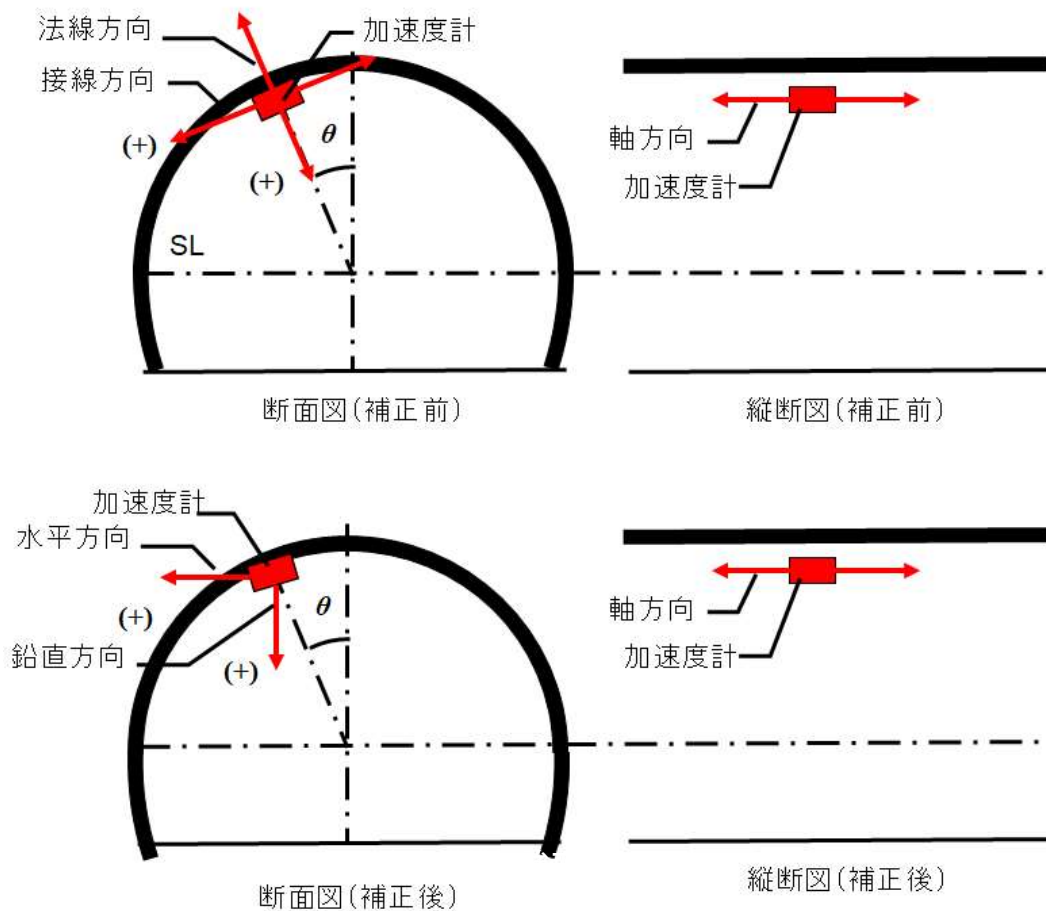


図 8.3-1 加速度計設置位置およびフーリエスペクトル方向補正模式図

8.4 第2回常時微動計測およびフーリエスペクトル解析結果

第1回の常時微動計測は第5章で実施した。第2回は、第1回と同様の計測方法および解析方法で軸方向、接線方向、法線方向のフーリエスペクトルを求め、接線方向および法線方向を水平方向および鉛直方向へ補正した。

表 8.4-1 に第1回、第2回のフーリエスペクトル、加速度計設置角度および補強対策工施工内容を示す。

表 8.4-1 第1回, 第2回フーリエスペクトル, 加速度計設置角度および補強対策工施工内容

| | | 第1回 常時微動計測 | | | | | | 第2回 常時微動計測 | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|--------|------------|---------------------|---------------------|------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| スパン No. | フラクタル 次元 | 加速度計 設置角度 (°) | フーリエスペクトル(mgal*sec) | | | | | 補強工事内容 | 加速度計 設置角度 (°) | フーリエスペクトル(mgal*sec) | | | | | | | | | |
| | | | 軸方向 | 横断方向 | 上下方向 | 水平方向 | 鉛直方向 | | | 3方向合成 | 軸方向 | 横断方向 | 上下方向 | 水平方向 | 鉛直方向 | 3方向合成 | | | |
| 1 | 1.2608 | 30 | 7.566 | 8.591 | 7.525 | 3.677 | 10.812 | 13.699 | | 22 | 8.095 | 8.958 | 7.717 | 5.410 | 10.513 | 14.329 | | | |
| 12 | 1.0665 | 30 | 7.435 | 7.329 | 7.488 | 2.603 | 10.149 | 12.848 | | 22 | 8.121 | 8.884 | 8.305 | 5.121 | 11.030 | 14.623 | | | |
| 16 | 1.121 | 30 | 7.42 | 7.071 | 7.612 | 2.317 | 10.127 | 12.767 | | 22 | 8.158 | 9.061 | 8.014 | 5.394 | 10.827 | 14.590 | | | |
| 18 | 1.0454 | 30 | 7.47 | 7.586 | 7.904 | 2.617 | 10.638 | 13.260 | | 22 | 7.978 | 8.980 | 8.181 | 5.257 | 10.951 | 14.533 | | | |
| 20 | 1.0663 | 30 | 7.48 | 7.484 | 8.478 | 2.242 | 11.084 | 13.558 | | 22 | 8.198 | 9.116 | 8.921 | 5.105 | 11.688 | 15.162 | | | |
| 35 | 1.0072 | 30 | 7.389 | 7.213 | 7.681 | 2.406 | 10.258 | 12.869 | | 22 | 7.016 | 8.794 | 8.362 | 5.016 | 11.050 | 14.017 | | | |
| 42 | 1.0961 | 30 | 7.642 | 7.238 | 7.209 | 2.664 | 9.862 | 12.758 | | 22 | 7.060 | 8.719 | 7.960 | 5.098 | 10.648 | 13.756 | | | |
| 49 | 1.2906 | 30 | 7.657 | 7.578 | 8.441 | 2.342 | 11.099 | 13.686 | ひび割れ充填 炭素繊維補強工 | 30 | 8.062 | 8.988 | 7.904 | 3.831 | 11.339 | 14.431 | | | |
| 58 | 1.2838 | 30 | 7.983 | 8.771 | 7.952 | 3.620 | 11.272 | 14.279 | ひび割れ充填 炭素繊維補強工 | 30 | 8.142 | 8.829 | 7.505 | 3.893 | 10.913 | 14.162 | | | |
| 65 | 1.2229 | 30 | 7.927 | 8.384 | 8.605 | 2.958 | 11.644 | 14.393 | ひび割れ充填 炭素繊維補強工 | 30 | 8.672 | 9.397 | 8.192 | 4.042 | 11.793 | 15.186 | | | |
| No.1~No.42フーリエスペクトル平均値 | | | 7.502 | | | | | 7.700 | 2.647 | 10.419 | No.1~No.42フーリエスペクトル平均値 | | | | | 8.930 | 8.209 | 5.200 | 10.958 |
| | | | | | | | | | | | 第2回/第1回 | | | | | 1.19 | 1.07 | 1.96 | 1.05 |

8.5 フーリエスペクトルの再現性検証

8.5.1 第1回常時微動計測の補正後フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関

第5章で実施した第1回常時微動計測の接線方向および法線方向フーリエスペクトルについて、水平並びに鉛直方向へ補正した結果とフラクタル次元との相関性を検証した。なお相関関係の検定値は、5.6.1より $r_0=0.58$ である。

図8.5-1に水平方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関を示す。検証の結果、相関係数0.62と、接線方向と同様に正の相関関係があることが分かった。

図8.5-2に鉛直方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関を示す。検証の結果、接線方向では相関係数0.34と相関関係を示さなかったが、鉛直方向では相関係数0.63と正の相関があることが分かった。

図8.5-3に軸方向、水平方向、鉛直方向を合成した3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関を示す。検証の結果、補正後においても相関係数0.74と正の相関があることが分かった。

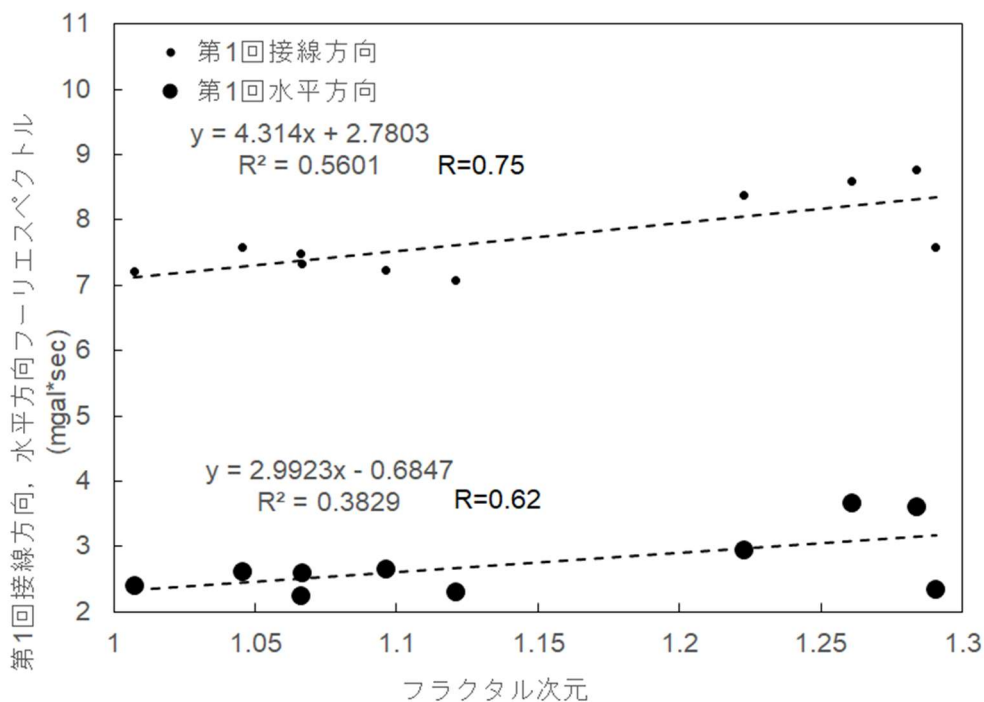


図 8.5-1 第1回常時微動計測における接線方向および水平方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

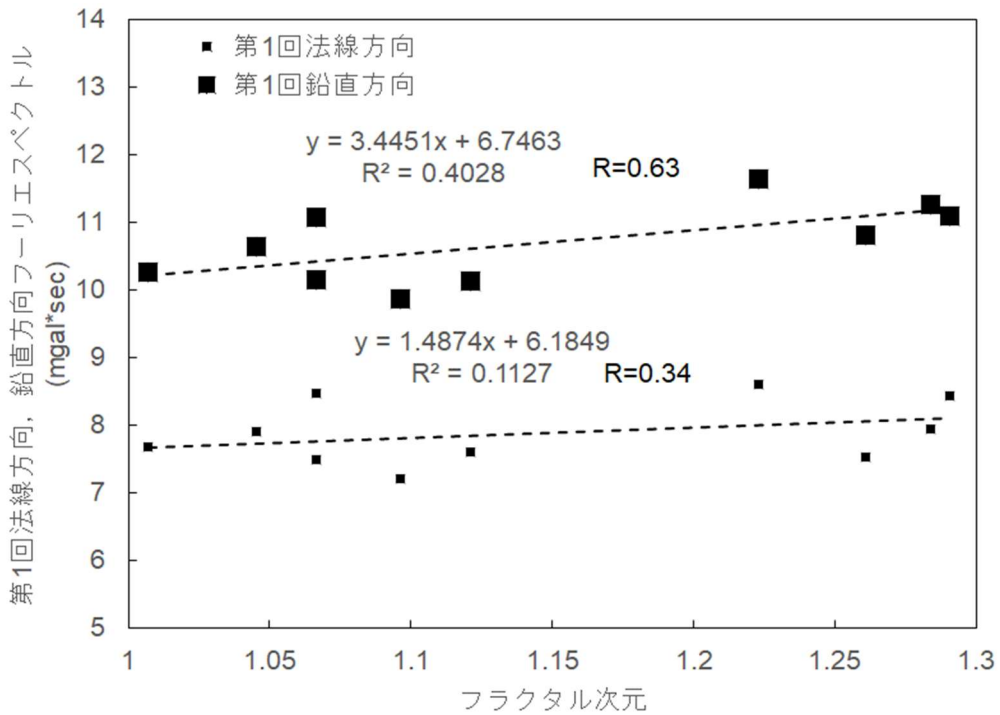


図 8.5-2 第1回常時微動計測における法線方向および鉛直方向フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

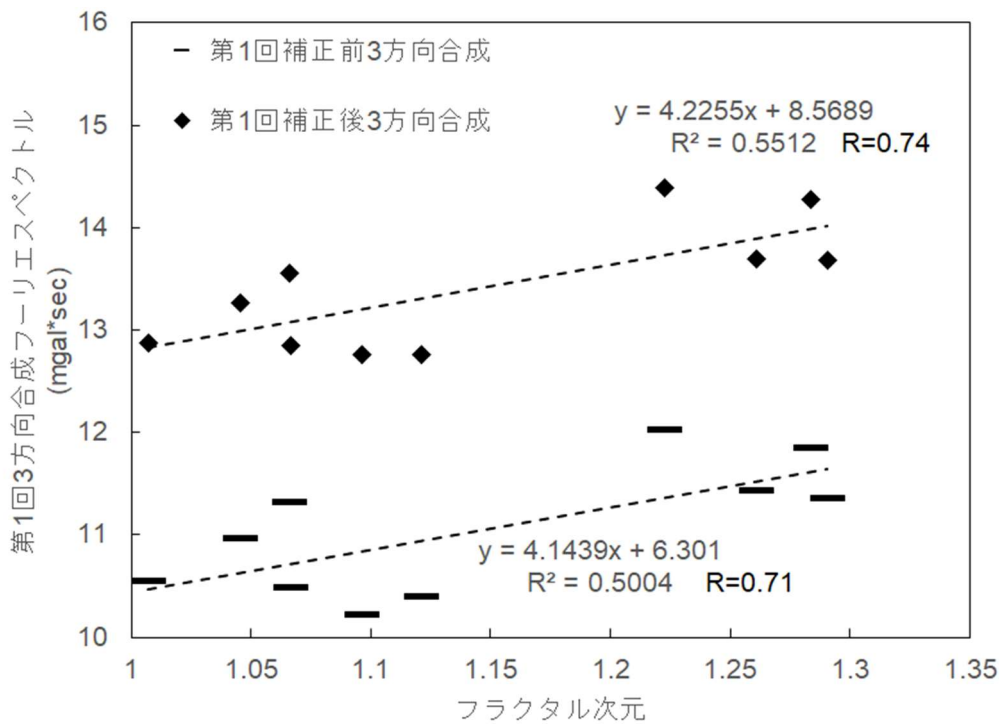


図 8.5-3 第1回常時微動計測における3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元との相関

8.5.2 第2回常時微動計測のフーリエスペクトルとフラクタル次元の相関

第2回常時微動計測のフーリエスペクトルとフラクタル次元について相関性の検証を行った。なお本検証は、補強対策工範囲外のスパン No.1 から No.42 の7スパンであるため、相関係数の検定値は $r_0=0.67$ とした。

図 8.5-4 に軸方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関を示す。検証の結果、相関係数は 0.37 と相関関係は認められなかった。

図 8.5-5 に水平方向へ補正したフーリエスペクトルとフラクタル次元との相関を示す。検証の結果、接線方向の相関係数 0.19 に対して相関係数 0.76 と、水平方向へ補正することによって正の相関関係となることが分かった。

図 8.5-6 に鉛直方向へ補正したフーリエスペクトルとフラクタル次元との相関を示す。検証の結果、法線方向の相関係数-0.65 に対して相関係数-0.58 と相関関係は認められなかった。

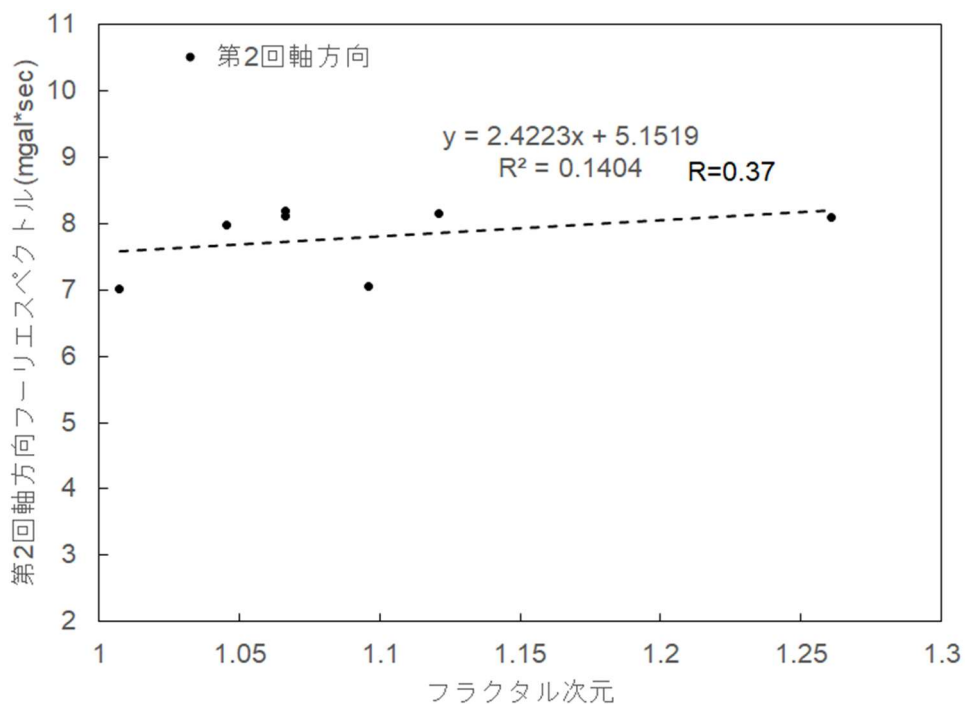


図 8.5-4 第2回常時微動計測における軸方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関

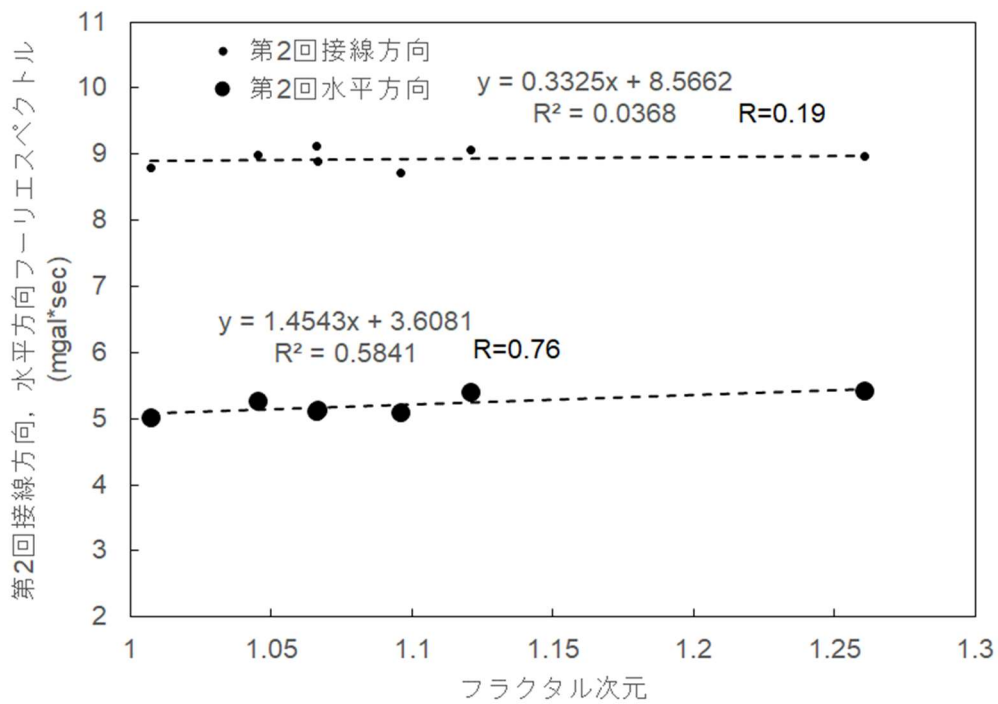


図 8.5-5 第2回常時微動計測における接線方向および水平方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関

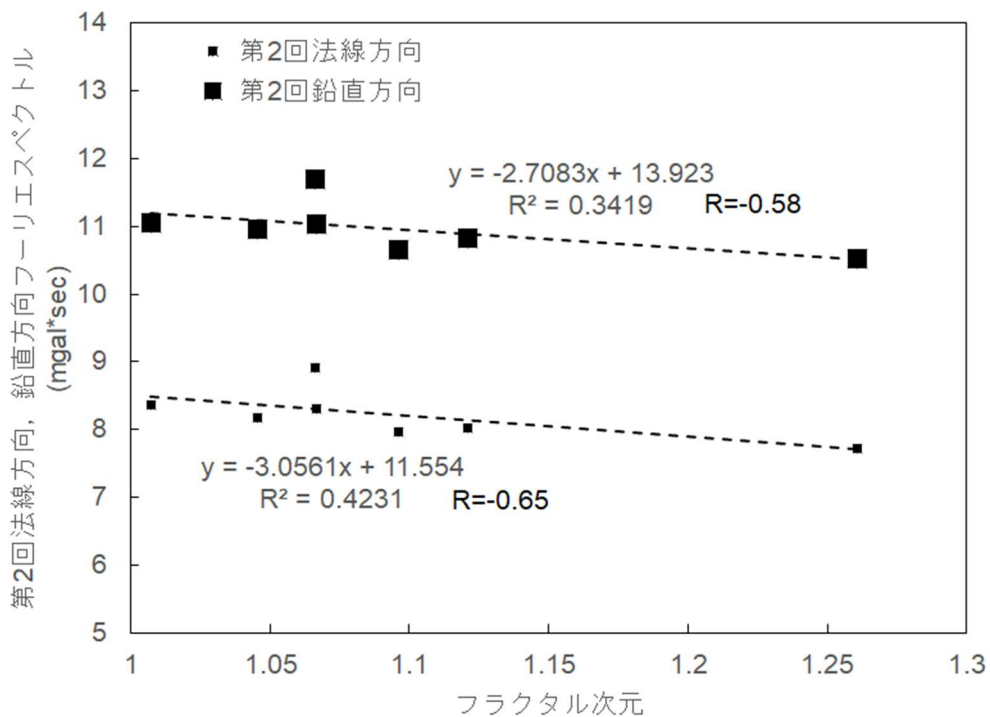


図 8.5-6 第2回常時微動計測における法線方向および鉛直方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関

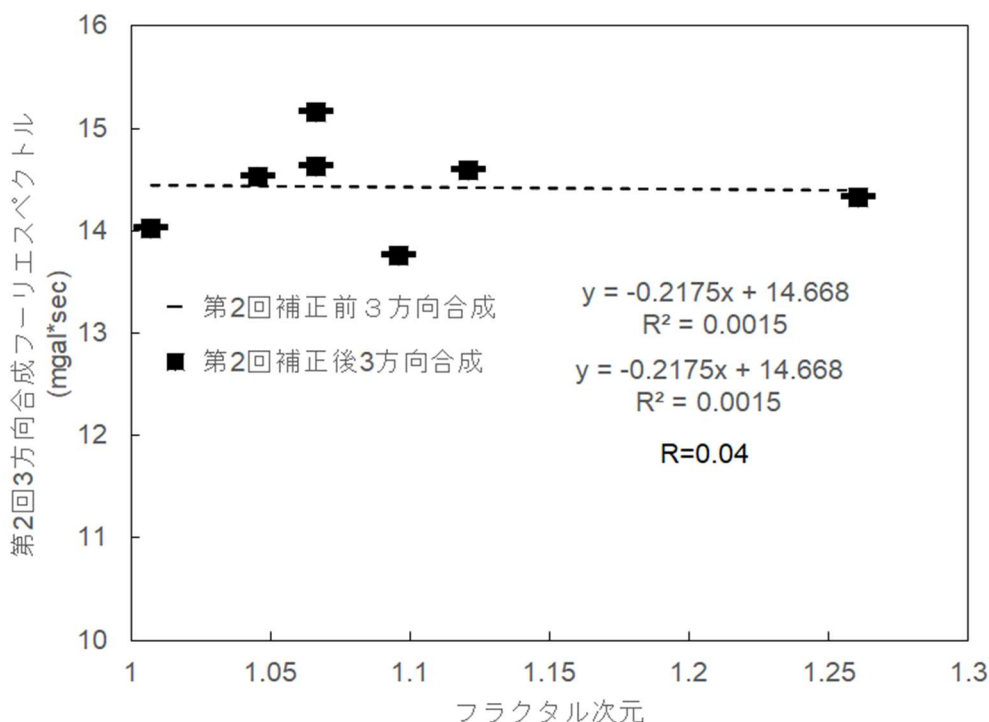


図 8.5-7 第2回常時微動計測における3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関

図 8.5-7 に軸方向，水平方向，鉛直方向を合成した3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関を示す。検証の結果，相関係数 0.04 と相関関係は認められなかった。第2回の相関係数が低くなったことは，検証対象スパンのフラクタル次元の分布が偏っていることが要因と考えられる。

8.5.3 第1回と第2回におけるフーリエスペクトルとフラクタル次元の比較

(1) 相関関係の再現性の検証

図 8.5-8 に軸方向のフーリエスペクトルとフラクタル次元の相関を比較した。第2回の相関係数は低い値であったが，値自体は第1回とほぼ同様の分布状況であることから，第1回と第2回ではほぼ同様の計測結果であると判断した。

図 8.5-9 に水平方向のフーリエスペクトルとフラクタル次元の相関を比較した。値の分布域は異なるが，第1回，第2回とも正の相関性があることがわかった。

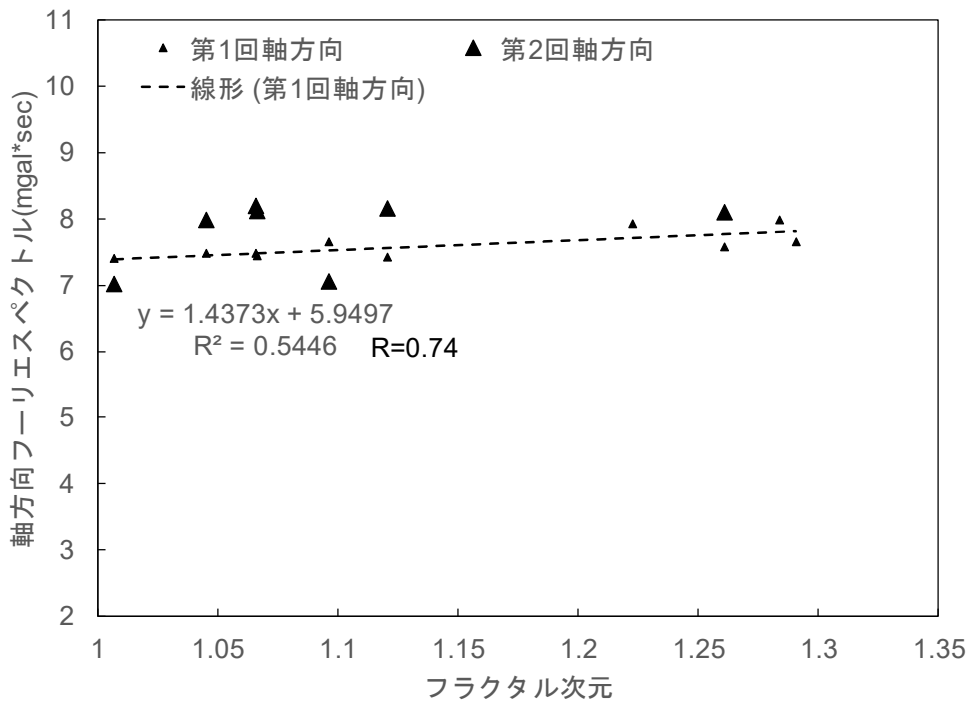


図 8.5-8 軸方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関の比較

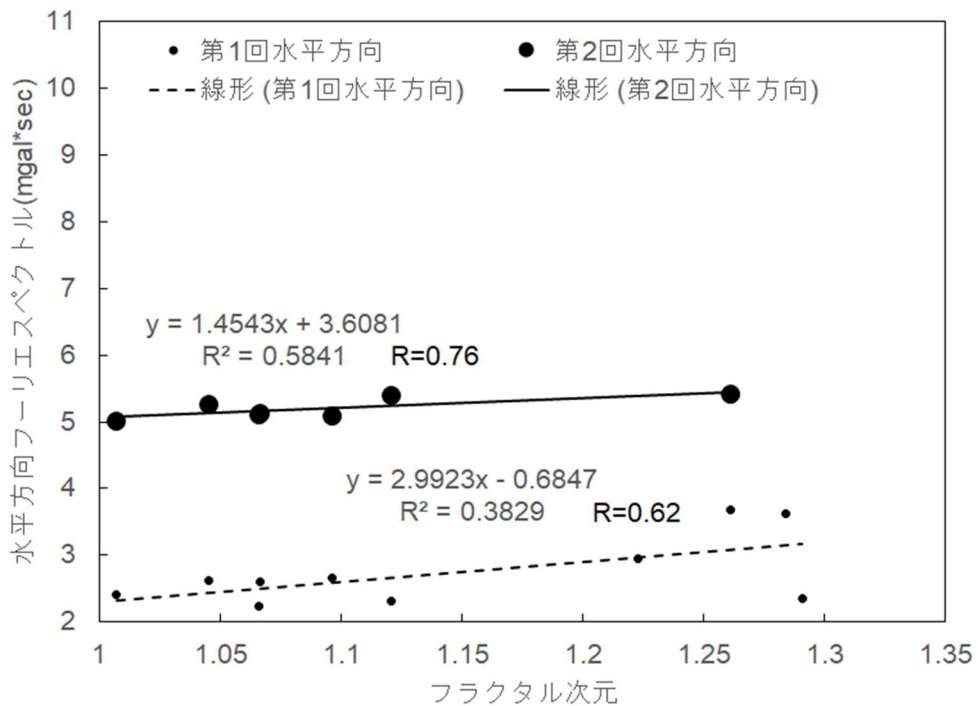


図 8.5-9 水平方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関の比較

図 8.5-10 に鉛直方向のフーリエスペクトルとフラクタル次元の相関を比較した。第 1 回が正の相関性を示したのに対し第 2 回は相関係数が低い値であったが、値自体は第 1 回とほぼ同様な分布状況であることが明らかとなった。したがって、第 1 回と第 2 回ではほぼ同様の計測結果であると判断した。

図 8.5-11 に 3 方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関を比較した。相関関係は、第 1 回では認められたが第 2 回は認められなかった。これは、第 2 回の軸方向および鉛直方向フーリエスペクトルの相関性に起因すると考えられる。

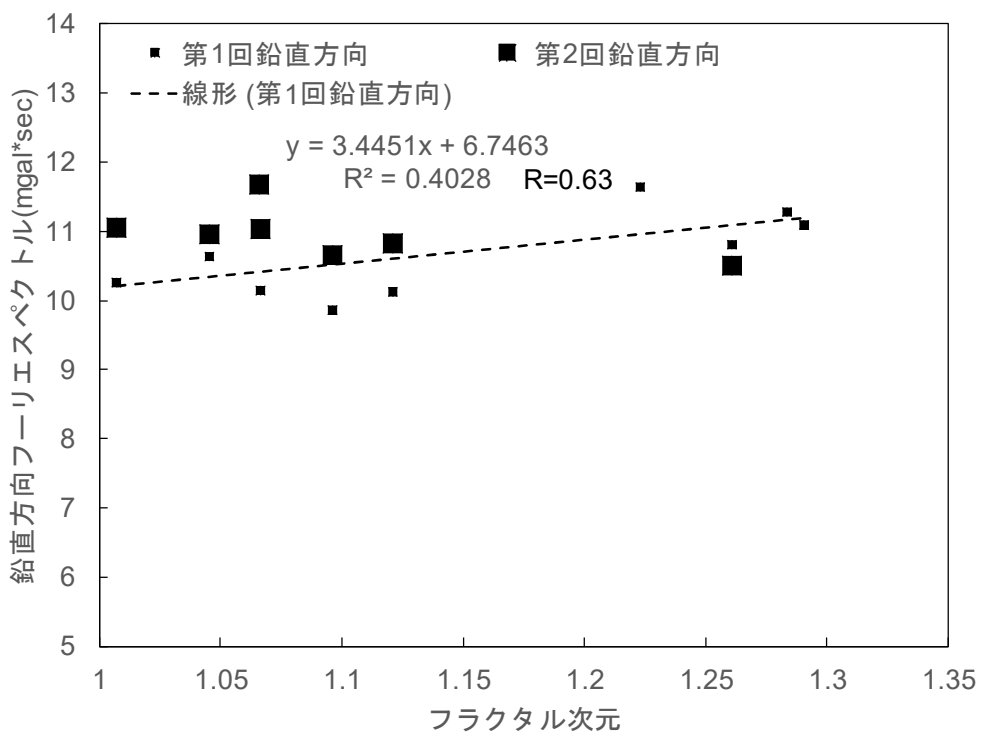


図 8.5-10 鉛直方向フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関の比較

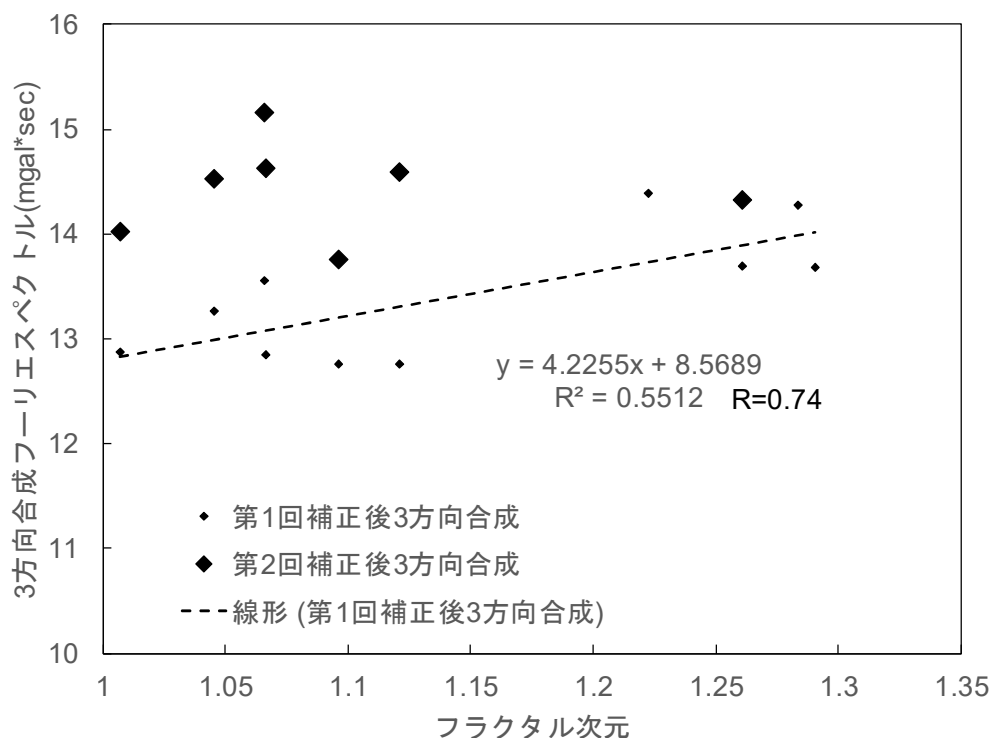


図 8.5-11 3方向合成フーリエスペクトルとフラクタル次元の相関の比較

(2) フーリエスペクトルの値の比較

フーリエスペクトルの値に着目すると、第1回と第2回は同程度の値になることを想定していたが、表 8.4-1 に示すとおり第2回の水平方向フーリエスペクトルが第1回より平均で1.96倍高い値になった。以下に、第1回と第2回の水平方向フーリエスペクトルが同程度の値になる場合の第2回接線方向フーリエスペクトルの試算結果を示す。

- ① 第1回と第2回で同じ水平方向フーリエスペクトルが1となる接線方向フーリエスペクトル(基本値)を式(8.3.1)および式(8.3.2)から逆算する。

$$\text{第1回接線方向フーリエスペクトル(基本値)} = 1.365$$

$$\text{第2回接線方向フーリエスペクトル(基本値)} = 1.270$$

- ② ①の結果から、第1回接線方向フーリエスペクトル(実測値, 平均7.502)をもとに第1回と同値になる第2回接線方向フーリエスペクトル(計算値)を算出する。

$$\text{第2回接線方向フーリエスペクトル(計算値)} = 7.129$$

実測値の第2回接線方向フーリエスペクトル(平均値, 平均値8.930)は、計算値より25%程度大きな値である。これらを鑑みて次のとおり考察する。

- ① 水平方向フーリエスペクトルにおいて、全てのスパンで第2回の方が高い値を示していることから、それぞれのスパンの局部的な位置の値を示しているとは考えにくい。
- ② 接線方向フーリエスペクトルの試算の結果、実測値は計算値より高い結果となった。この要因は、第1回と第2回の加速度計設置角度の違いのほか、他の要因の複合によるものではないかと推測される。参考として、表 8.5-2 に第1回計測時と第2回計測時における検証トンネルの計測環境の違いを、図 8.5-12 に、表 8.5-2 中の上下半打継目断面修復工を示す。また、図 8.5-13 に鉛直方向フーリエスペクトルと推定覆工厚、推定空洞量および岩質の比較図を示す。

表 8.5-2 第1回と第2回常時微動計測時のトンネル内環境

| 比較項目 | 第1回計測時 | 第2回計測時 |
|------------|-------------|-------------|
| 計測日 | H28.11.17 | H29.9.26 |
| トンネル内気温、湿度 | 16.1°C, 67% | 26.1°C, 52% |
| 補修工事内容 | — | 上下半打継目断面修復工 |

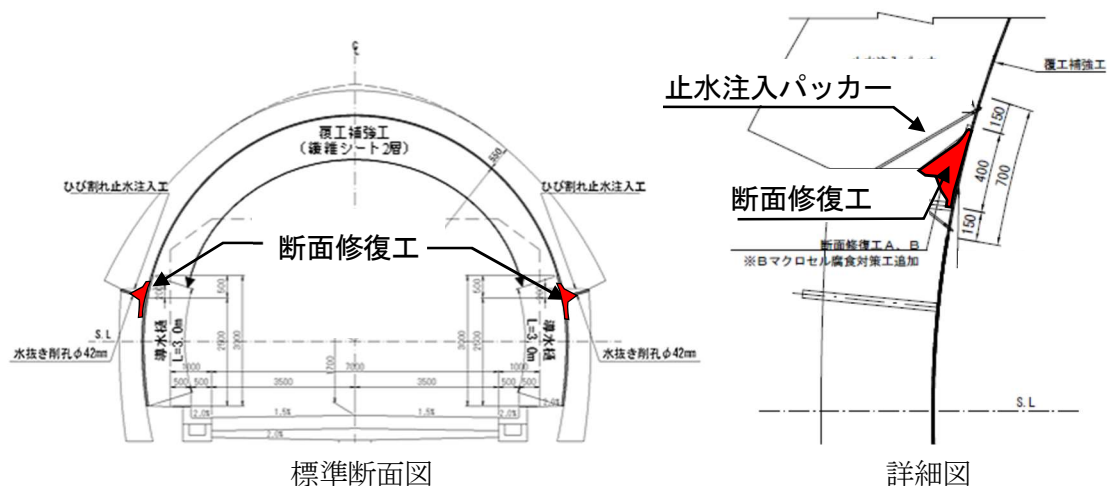


図 8.5-12 上下半水平打継目断面修復工図

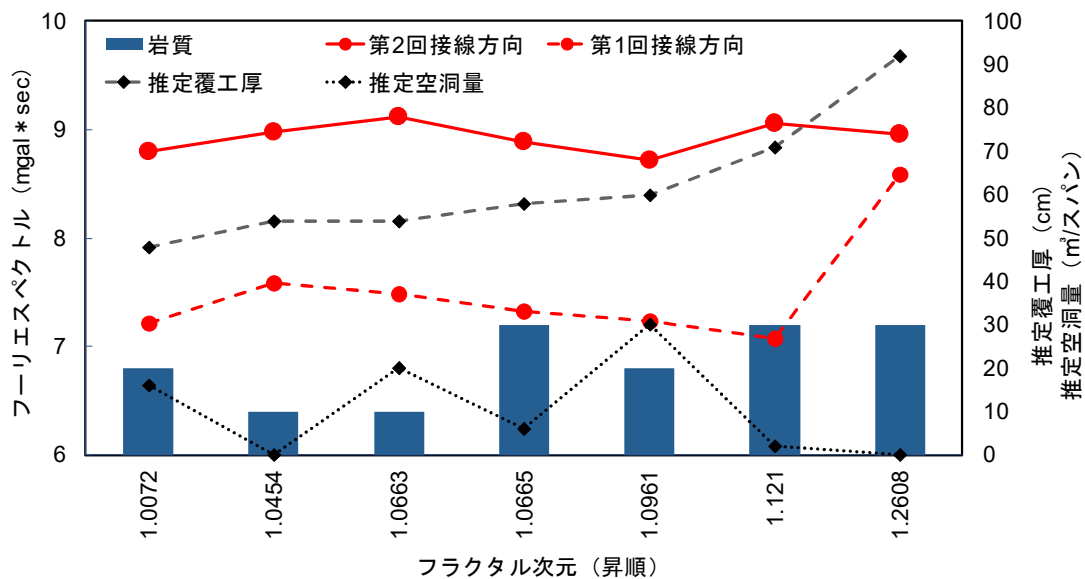


図 8.5-13 第1回, 第2回接線方向フーリエスペクトルとフラクタル次元, 推定覆工厚および推定空洞量の比較

8.5.4 補強対策工前後におけるフーリエスペクトルの比較

補強対策工が実施されたスパン No.49, No.58, No.65 について, 補強対策工前後において常時微動計測を実施しフーリエスペクトルの変化の検証を行った. 本検証は, 補強対策工前後の加速度計設置位置が同位置であるため補正せず比較するものとした. 図 8.5-14 に軸方向, 図 8.5-15 に接線方向, 図 8.5-16 に法線方向, 図 8.5-17 に3方向合成のフーリエスペクトル比較結果を示す.

検証の結果, 法線方向フーリエスペクトルにおいて3スパン全てで補強対策工後の値が減少した. これは, 図 8.5-18 の塑性圧が作用した際のトンネル形状に示すように, 覆工コンクリート内面に施工した炭素繊維補強工により引張側の耐荷性が向上したことを示す可能性があると考えられる. 但し検証数が3スパンと, 十分な検証数ではないため引き続き検証数を蓄積する必要がある.

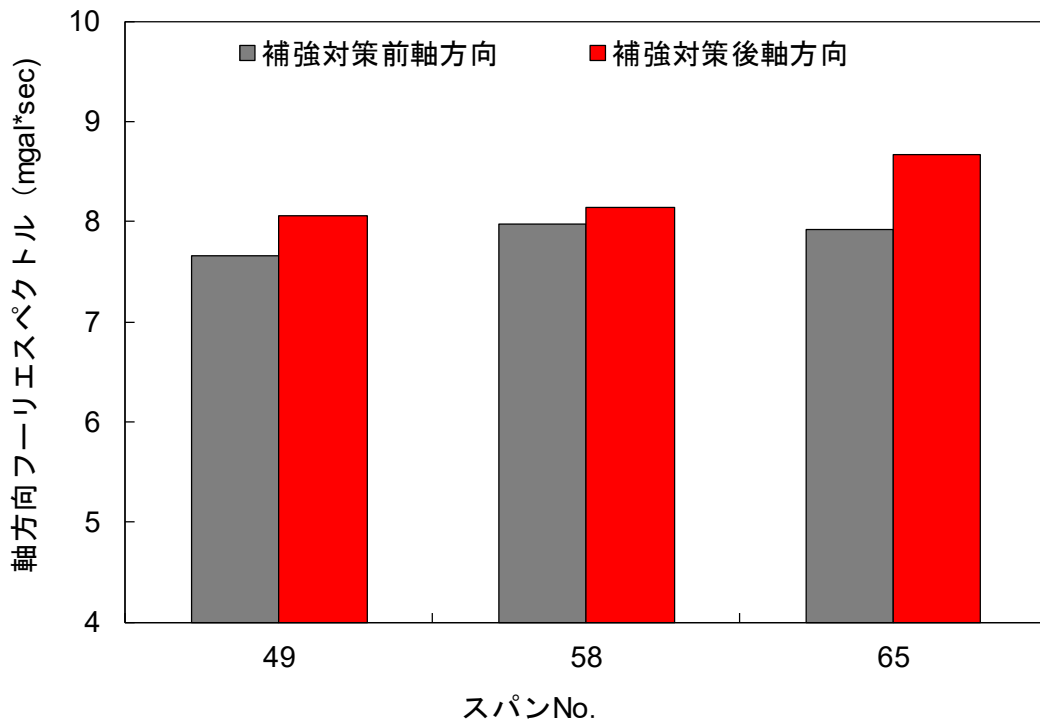


図 8.5-14 補強対策工前後における軸方向フーリエスペクトルの比較結果

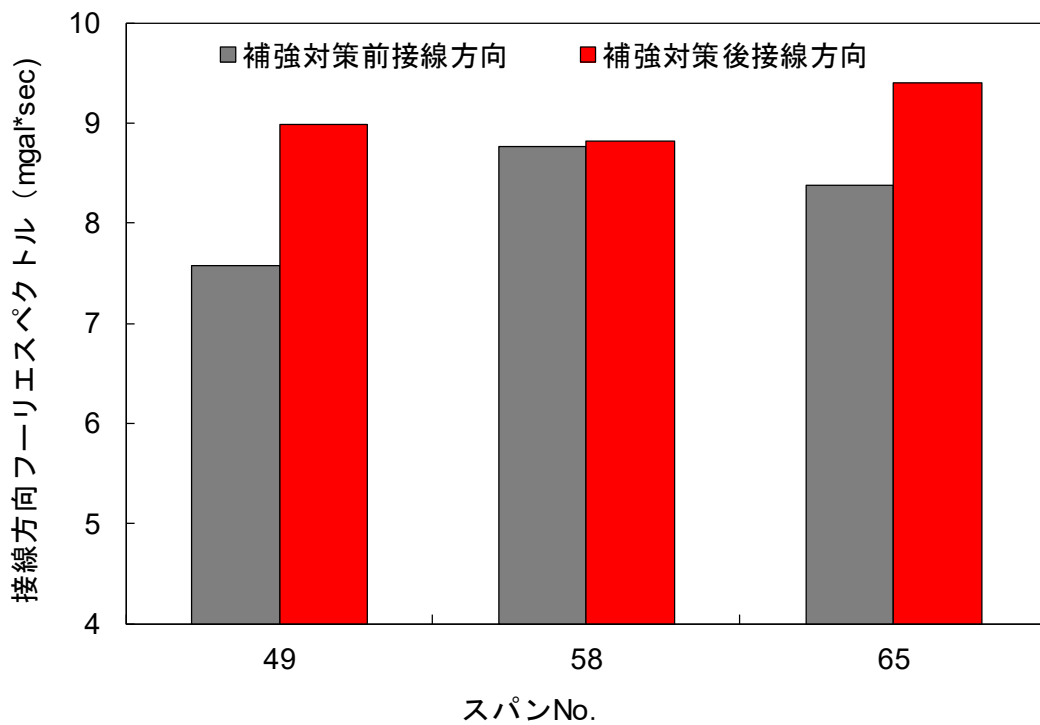


図 8.5-15 補強対策工前後における接線方向フーリエスペクトルの比較結果

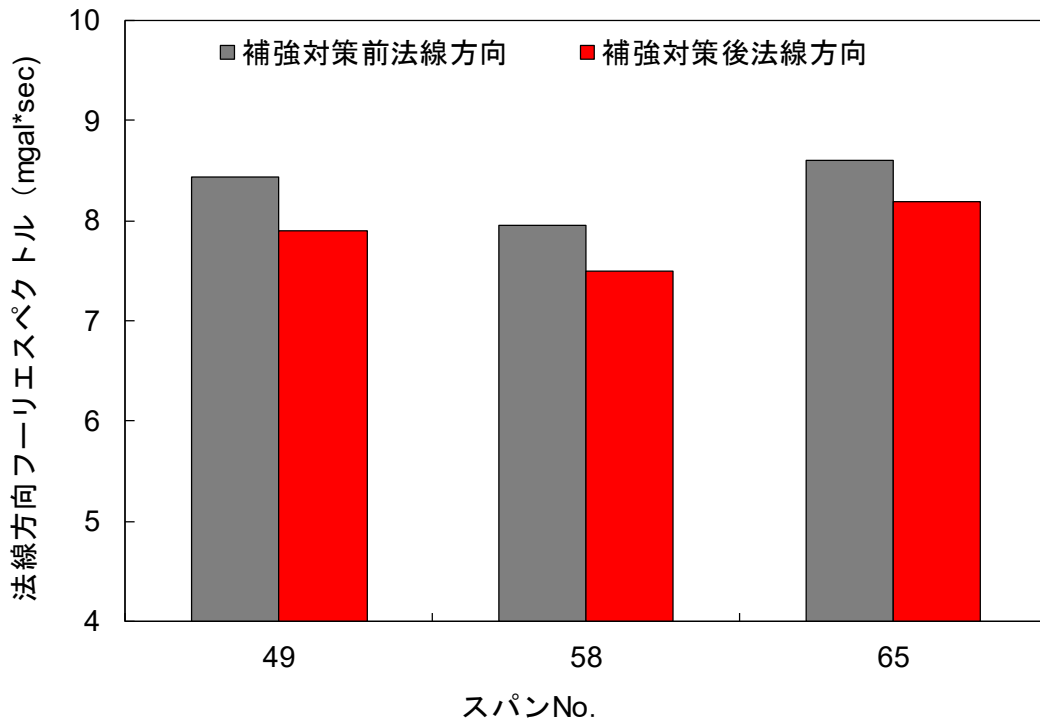


図 8.5-16 補強対策工前後における法線方向フーリエスペクトルの比較結果

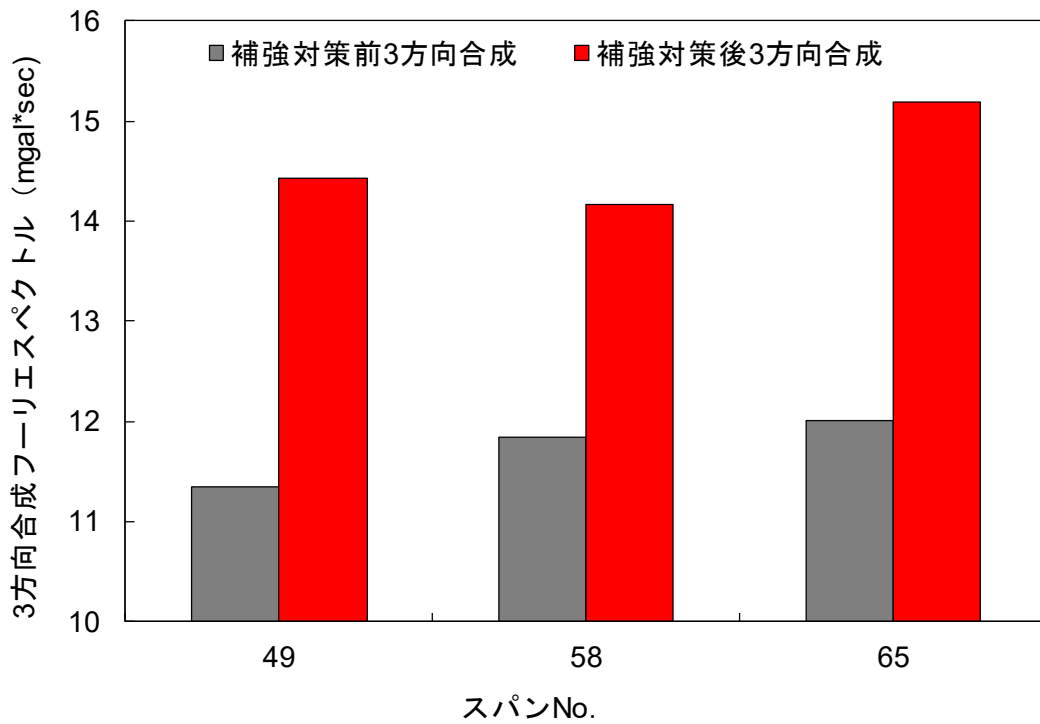


図 8.5-17 補強対策工前後における3方向合成フーリエスペクトルの比較結果

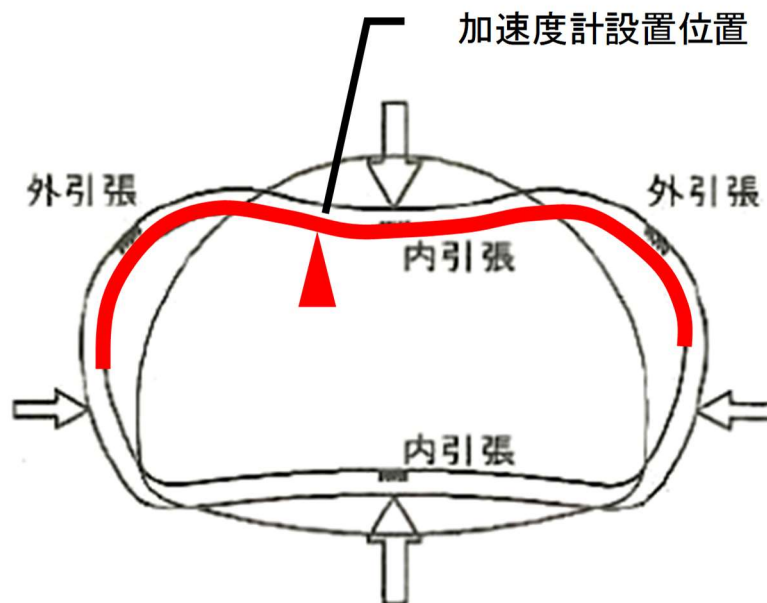


図 8.5-18 塑性圧が作用した際のトンネル形状¹⁾

8.6 まとめ

加速度計の設置位置が異なる同一スパンで行った2回の常時微動計測結果については、水平方向フーリエスペクトルとフラクタル次元に相関関係があることから、水平方向フーリエスペクトルはひび割れの分布状況を表現でき、再現性がある可能性があることが明らかとなった。また第2回軸方向および鉛直方向フーリエスペクトルは、値が第1回とほぼ同様の分布であったことから第1回と第2回ではほぼ同様の計測結果が得られたと判断した。但し同時に、第2回水平方向フーリエスペクトルの分布が第1回と異なる範囲に分布したことから、計測値は加速度計の設置角度や設置位置精度の違いにより鋭敏に異なることも判明した。実務的な評価手法を確立するには、加速度計設置位置の違いなどによりどのように計測値に変化が生ずるかなど、引き続き様々なケースの検証を行う必要がある。

補強対策工前後の常時微動計測において、補強対策工後の法線方向フーリエスペクトルが減少した。この結果から法線方向フーリエスペクトルは、炭素繊維補強工の引張側の補強効果を表している可能性があることが判明した。但し、検証スパン数が3スパンと少数であったため、引き続き同様の計測実績を蓄積して検証を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルの変状メカニズム， p54， 2003.11

第9章 結論

本研究では、トンネル覆工に発生するひび割れの分布の把握、記録および健全度評価を効率的かつ正確に行うために、覆工表面画像を取得、解析してひび割れを自動抽出するシステムを開発し、自動抽出したひび割れの図面を用いた健全度評価を可能にすることを第一の目的とした。また、定量化したトンネル覆工に発生するひび割れの分布と常時微動計測を組み合わせて、覆工の剛性に着目した健全度評価手法構築の可能性を明らかにすることを第二の目的とした。

以下に、本研究で得られた研究成果をまとめる。

第1章では、道路トンネルを取り巻く社会情勢と定期点検の進捗について実態を示した。そして、膨大な道路トンネルに対する維持管理の困難さを解決すべく行われている、変状の効率的な把握および、トンネル覆工の健全度評価に関する既往の研究や国土交通省などの取組について整理した。この中で、覆工表面画像の解析により自動抽出したひび割れを道路管理者が定める健全度評価へ適用した事例や、トンネル覆工の剛性に着目した健全度評価を目的として、ひび割れの分布と覆工本体の振動特性を用いた研究事例が皆無であることを明らかにした。この結果をもとに本研究の位置づけを整理し、本論文の全体構成を概説した。

第2章では、道路トンネル点検の現状として、国土交通省とNEXCOのトンネル定期点検について概説し、定期点検および健全度評価の方法の違いを比較した。その中で、NEXCOで実施されている近接目視点検の実施前に覆工表面画像から変状を把握して、念入りに近接目視点検を行う必要がある個所を選定する手法の有効性について述べた。トンネル定期点検の問題点としては、①近接目視点検は事故のリスクが高く、変状の把握、記録に個人差と多大な労力が生じる、②覆工表面画像観察による変状把握が、個人の観察技術の技量によって結果が左右されることにより健全度評価へ影響を与える可能性がある、③現在の健全度は変状の状況から定性的に評価されるため、トンネル覆工の補強の可否を定量的に判断しがたいという点を提起した。したがって、近接目視点検の作業負担軽減、トンネル覆工ひび割れの抽出、図面作成の自動化による作業軽減および画一化、覆工の剛性に着目した健全度評価手法による覆工補強要否判定を課題として整理した。

第3章では、第2章で提起した課題に対し、トンネル覆工に発生するひび割れ分布を定量化する手法を整理した。まずNEXCOのひび割れ分布定量化手法として運用している、最大ひび割れ幅、最大ひび割れ幅の長さ、ひび割れの分布、ひび割れの方向性について判

定が可能な TCI (Tunnel-Lining Crack Index) について概説した。次に、本研究で提案するひび割れ分布定量化手法として、形状、密度、粗さなどを算出することが可能なフラクタル次元解析を概説し、その適用性について検証した。検証は、ひび割れ開口面積率、ひび割れの本数、幅、交差個所が変化する複数のひび割れのモデル図に対してフラクタル次元解析を行い、それぞれのひび割れの変化とフラクタル次元の変化を比較して相関関係があることを明らかにした。これにより、フラクタル次元がひび割れの分布を定量的に表現する手法として本研究で検証するものとした。

第4章では、覆工表面画像を撮影、画像合成により取得し、ひび割れを画像解析により自動で抽出、図面化する「トンネル覆工点検システム」の開発内容および、本システムを活用したひび割れの自動抽出の精度検証を行った。トンネル覆工点検システムは、①覆工表面撮影システム、②覆工表面画像作成ソフトウェア、③ひび割れ自動抽出ソフトウェアで構成している。トンネル覆工点検システムの目標性能は、撮影最高速度 100 km/h、撮影時照明の不可視化、解像度 0.5mm/画素の高画質画像、ひび割れ自動抽出・図面化技術である。覆工表面撮影システムは、撮影用カメラ、近赤外線照明の選定、カメラと照明を組み合わせたユニット、ユニットの姿勢を制御するソフトウェア、搭載車両について検討、開発を行った。覆工表面画像作成ソフトウェアは、撮影したカメラごとの画像の輝度補正、歪み、隣り合う画像同士の位置合わせについて検討し、ソフトウェア開発を行った。ひび割れ自動抽出ソフトウェアは、画像の輝度の正規化、縦方向細線検出、画像を回転し全方向の細線を検出、検出した線の接続、ノイズ除去などの手順でひび割れを抽出、図面化する検討を行い、ソフトウェア開発を行った。完成したトンネル覆工点検システムを活用して、NATM のトンネル覆工 5 スパン、矢板工法のトンネル覆工 5 スパンについて、覆工表面画像の取得、ひび割れ自動抽出を行い、現地でひび割れ分布を詳細確認した結果と比較してひび割れ自動抽出整合率を検証した。その結果、NATM では 93%、矢板工法では 88%と、実用上問題ない精度で自動抽出することが可能であることを確認したため、従来手動で行われていたひび割れ分布の把握、図面化を、自動化により効率化できる可能性があることを明らかにすることができた。但し、本研究ではひび割れ幅について言及しておらず、ひび割れ幅の適切な定義手法については今後の検討課題としたい。

第5章では、第3章で提案したフラクタル次元解析と、現地トンネル覆工の常時微動計測によるフーリエスペクトルとの相関性を検証した。フラクタル次元解析は、覆工表面画像から抽出、図面化したひび割れ図面を使用してフラクタル次元を求めた。常時微動計測は、現地トンネル覆工に対してトンネル軸方向、接線方向、法線方向に加速度計を設置し、

得られた加速度データからフーリエスペクトルを求めた。研究対象トンネルは矢板工法のトンネルとし、ひび割れ密度区分を3タイプ設定して合計10スパンを選定した。フラクタル次元とフーリエスペクトルの相関性を検証した結果、トンネル軸方向、接線方向、3方向合成で相関関係があることが判明した。また、3方向合成フーリエスペクトルの説明変数としてフラクタル次元、推定覆工厚、推定空洞量、地質と仮定して重回帰分析および相関性の検証を行った。その結果、本説明変数のうち、フラクタル次元と岩質が3方向合成フーリエスペクトルの関連因子である可能性があるという知見を得ることができた。フーリエスペクトルとの関連因子については、計測実績の蓄積と再検証により引き続き究明していくことが今後の課題である。

第6章では、第4章のひび割れ自動抽出結果が実用上問題ないという結論をもとに、NEXCOの健全度評価手法に対するひび割れ自動抽出結果の適用性を検証した。また、TCIとフラクタル次元の相関性を検証し、フラクタル次元のひび割れ分布定量化手法としての適用性を検証した。

覆工表面画像を手動で観察してひび割れを抽出、図面化した場合、とひび割れ自動抽出ソフトウェアで抽出、図面化した場合では、ひび割れの線形形状が異なる場合がある。これによる健全度評価点への影響について覆工100スパンを対象に検証した。検証の結果、自動抽出による健全度評価は、若干低い評価から同等の評価であることを明らかにすることができた。したがって、ひび割れ自動抽出結果は現NEXCOの健全度評価手法に適用可能であると判断することが出来た。

第5章で選定した覆工10スパンを対象に、TCIとフラクタル次元を比較して相関性を検証した。検証の結果、相関係数が0.91と相関関係があることから、フラクタル次元はTCIと同様に、ひび割れ分布を定量的に表現可能であると判断することが出来た。

第7章では、長崎自動車道日岳トンネルにおいてトンネル覆工のひび割れ分布をTCIにより定量化し、健全度評価を行った結果から詳細調査を行い、補強工法を選定した実績について述べた。日岳トンネルは、一部範囲の覆工にひび割れが縦横に分布しており、補強の要否を判断する必要がある。そこで、覆工表面画像から図面化したひび割れ分布をもとにTCI計算および健全度評価を行った。また、過去の定期点検結果を比較して経年変化の有無も確認した。これらの結果をもとに詳細調査を行ったうえで変状原因を推定し、補強レベルを選定してNEXCOの設計要領に従って補強工法の選定を行った。このように、ひび割れ分布を定量化し、画一的に健全度を判定することができたことから、劣化したトンネルの補強対策を選定する際に有効であることが分かった。

日岳トンネルの覆工全スパンにおいて、健全度評価の根拠である TCI とフラクタル次元の相関性を再検証した。その結果、第 6 章と同様に相関関係が認められ、その傾向はより強くなっていることが判明した。したがって、本章の結果からもフラクタル次元がひび割れ分布定量化手法として信頼性があると判断することが出来た。

日岳トンネルの同ースパンにおける、3 方向合成フーリエスペクトルおよびフラクタル次元の相関関係と NEXCO の健全度評価点を比較したところ、概ね同様の分布であることが判明した。この結果から、フーリエスペクトルが覆工の健全性を表現している可能性があると判断することが出来た。

以上の研究結果から、ひび割れ自動抽出および図面化、フラクタル次元、フーリエスペクトルを組み合わせた健全度評価手法を構築できる可能性があることを明らかにした。具体的な健全度評価手法の検討については、引き続き同手法の計測、解析実績を蓄積して本知見を検証することで、知見の信頼性を向上させることが必要であり、また実用上の作業内容や解析内容を整理する必要があるため、今後の検討課題とする。

第 8 章では、異なる時期に実施する 2 回の常時微動計測において、水平方向フーリエスペクトルがひび割れの分布状況を表現でき、再現性がある可能性があることを明らかにした。軸方向および鉛直方向フーリエスペクトルについても、第 1 回と第 2 回ではほぼ同様の計測結果が得られた。但し、加速度計設置位置などによって水平方向の計測値の分布が鋭敏に変化することが分かった。また、補強対策工前後の常時微動計測において、法線方向フーリエスペクトルは炭素繊維補強工の補強効果を表している可能性があることを明らかにした。

本検証は、計測データおよび検証の実績が十分でないため、引き続き計測実績を蓄積して検証を深度化させ、安定的な再現性を実現する最適な常時微動計測方法や解析手法を確立することが今後の課題である。

第 9 章では、本研究の統括とし、各章の研究成果を要約した。

謝 辞

本論文は、長崎大学大学院工学研究科博士後期課程において、長崎大学大学院工学研究科蔣宇静教授のご指導のもとで取りまとめたものです。本論文を取りまとめるにあたり、蔣宇静教授をはじめ、多くの皆様にご指導を賜りました。特に蔣宇静教授には、研究への道を開いていただくとともに、研究の取り組み方や楽しさを交えながら、トンネル保全技術の向上を目指す私に終始ご指導、ご助言を賜りました。ここに厚く感謝と御礼を申し上げます。

長崎大学大学院工学研究科の松田浩教授と大嶺聖教授におかれましては、学位論文の構成や内容について多大なるアドバイスを賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 早川和利氏、藤間秀之氏、米田利博氏をはじめ取締役の皆様並びに田中克則博士におかれましては、本学への入学と研究の機会を与えていただき、また多大なご支援をいただきました。若手技術者時代から今日に至るまで山岳トンネルの建設、維持管理、詳細点検などについて多くを学ばせていただきました。これらの積み重ねが本論文を取りまとめる礎となりました。ここに厚く感謝申し上げます。

松尾建設株式会社 草原勝巳氏、西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 土木技術第二部 溜渕孝治氏はじめトンネル技術課の仲間、営業部 徳丸昌敬氏はじめ営業部の仲間におかれましては、日々の業務が多忙な中、本学への通学、学会への出席および発表において、多大なご配慮、ご協力をいただきました。特に我が課の仲間である、東克徳氏、堀田利一氏、池田智昌氏、北原京氏には、本学への通学に快く送り出してくれたことに厚く感謝申し上げます。

九州大学名誉教授 故 江崎哲郎博士におかれましては、研究の目的や取り組み方、論文の構成について貴重なご助言をいただきました。ここに御礼申し上げますとともに、ご冥福をお祈りいたします。

西日本高速道路株式会社 竹國一也氏、福永靖雄氏、兼澤秀和氏、徳田尚器氏、村上豊和氏、下清水秀則氏におかれましては、トンネル覆工点検システムの開発にあたり多大なご指導、ご助言をいただきました。西日本高速道路株式会社九州支社 本山和幸氏、平山賢太郎氏におかれましては、長崎自動車道日岳トンネルの健全度評価および補強工法選定にあたり、貴重な資料のご提供および多大なご指導、ご助言をいただきました。西日本高速道路株式会社九州支社長崎高速道路事務所 大塚弘雅氏、荒木英司氏、沖縄高速道路事務所 山戸隆秀氏におかれましては、日岳トンネルの常時微動計測にあたり、多大なご協

方とご指導をいただき、また日岳トンネルの補強対策工事について貴重な情報をご提供いただきました。西日本高速道路株式会社 トンネル伝承塾の皆様におかれましては、学会発表に際してご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。

株式会社ケー・エフ・シー 安井利彦氏、松島太司氏、清水達也氏におかれましては、長崎自動車道日岳トンネルでの常時微動計測作業において、スケジュール調整をはじめ現場での様々なご配慮をいただきました。厚く御礼申し上げます。

フジエンジニアリング株式会社 杵本正信博士、濱博和博士、仲田慶正氏、築山彰氏ほかスタッフの皆様、株式会社エルゴビジョン 内田勇治氏、藤井英郎氏、福田和生氏、森直幸氏、田中宏和氏ほかスタッフの皆様におかれましては、覆工点検システムの開発において多大なご協力をいただきました。開発段階においては、休日や深夜にシステムの検証や精度検証を共に行うなど、生みの苦しみを共有し、実用化まで辿り着けたことは私の糧となりました。また論文作成においても、査読や多くの専門技術をご教示いただきました。厚く御礼申し上げます。

長崎大学大学院工学研究科地盤環境研究室の草場雅也氏、吳学震氏におかれましては、研究におけるデータ整理、解析のご協力をいただき、また考察について議論させていただきました。心より感謝いたします。

株式会社片平新日本技研 吉田幸信博士におかれましては、研究テーマや論文の構成の考え方について、貴重なご指導とご助言をいただきました。ここに御礼申し上げます。

私の恩師である熊本高等専門学校中村裕一名誉教授におかれましては、在校生時代の時は研究の考え方やレポートの書き方を、社会人になってからは共同研究や論文作成のアドバイス、学位挑戦に対して励ましをいただくなど、公私共に多大なご指導を賜り、技術者としての礎を築いていただきました。心より感謝申し上げます。

株式会社建設プロジェクトセンター 中村秀樹氏におかれましては、若手技術者時代から技術者のあるべき姿や資格取得などに関して多大なご指導を賜りました。このような教えをいただいたことが、学位取得を目指す後押しとなりました。三谷プランニング株式会社 三谷浩二博士におかれましては、若手技術者時代からトンネル技術者として技術面や論文のまとめ方、海外の技術、海外に通用する技術者像などを学ばせていただきました。学位取得の挑戦を決意したのも、三谷浩二博士というお手本があったからこそでした。ここに厚く御礼申し上げます。

長崎大学及び大学院の蔣宇静教授研究室の学生諸君におかれましては、中年学生である私を受け入れていただき、楽しい時を過ごさせていただきました。また、学会発表の際に

聴講に来ていただくなど大変励みになりました。心より感謝いたします。

最後に、父の介護と仕事を両立し、体力的、精神的にも大変な状況の中、私の学位取得挑戦を黙って見守ってくれた母、身体がいうことをきかない中でも会うたびに気にかけてくれた父、仕事と学位取得の両立により休みが取れない私を一生懸命支えてくれた妻 玲子、長女 藍子、長男 惣一郎、妻の両親に心から感謝し、本論文を捧げます。



蔣宇静先生、(株)ケ・エフ・シー安井氏と協力していただいた学生の皆様

2018年1月

谷口 徹也