

高速走行型非接触レーダによる トンネル覆工の内部欠陥点検技術と 統合型診断システムの開発

パシフィックコンサルタンツ株式会社 やす だ とおる
安田 亨

1. はじめに

インフラ構造物の維持管理の目的は、利用者被害を未然に防止し、安全な通行を確保することにある。一般にトンネルの維持管理は、点検、調査、対策の流れで実施されており、点検や診断で健全性を評価した上で効果的な対策を行うことで目的を達成するものである。道路トンネルにおいては、平成26年6月に道路トンネル定期点検要領にてトンネル維持管理のあり方が見直され、近接目視と打音検査による定期点検を5年に1回の間隔で行うことが義務化された。

今年度は5年目に相当し一順することになるが、市町村など多くの地方自治体では、厳しい予算制約や技術者不足などの理由により、計画どおりに点検が進んでいないのが実情である。

一方で、従来の近接目視点検における問題点として、①スケッチによる変状の記録、②打音により点検者の主観による判定、③暗所で狭隘の作業であるため、安全性や客観性に乏しく、変状の進行を適正に評価できないなどの課題が指摘されている。

上述の課題に対する解決策として、MIS（カメラ）、MMS（レーザ）、MRS（レーダ）を搭載した統合型走行計測車両「MIMM-R（ミーム・ア

ール）」を開発した（各共同開発者：計測検査（株）、三菱電機（株）、（株）ウォールナット）。母体となるカメラ、レーザ搭載機は平成20年度に、レーダ機能を付加したMIMM-Rは平成25年度に実用化し、これまでに1,000 km以上のトンネル走行計測実績がある。

非接触型レーダの実用化により、巻厚不足や背面空洞の有無を交通規制せず迅速に把握することが可能となり、健全度診断をする上で情報量が大幅に向上した。しかし、覆工表面の「うき、ジャンカ、材質不良などの内部欠陥」については、上記車両が高速走行・非接触型であるがゆえに発見できないという課題が残っていた。

そこで、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）において、打音検査の支援・補完技術という位置付けで、覆工コンクリートの内部欠陥検出を高速走行型非接触レーダにより検出する点検技術を開発した。同時に、内部欠陥を含む多くの変状情報をレーザ計測の3次元位置情報と同期し、高精度な損傷図を3次元可視化技術によってデータベース化するとともに、健全性を総合的に評価できる統合型診断システムを開発した。

これらの開発は、平成28年度に終了し¹⁾、統合型システムとしての機能開発が概ね完了した。現在は本システムによる点検支援の確立および実用化の深度化を進めている。

本稿においては、本システムの開発目的、シス

テム機能の概要、点検を効率化・高度化し、人力による近接目視点検と打音検査の支援としての活用効果、診断の支援に関する検証結果などについて報告するものである。

2. 技術開発の目的

人力によるトンネル点検は、点検者による評価のバラツキ・見落とし、スケッチによる客観性・進行性把握の困難さ、打音検査での個人差・非効率性などの課題が挙げられ、特に交通規制を伴うことから渋滞の発生や危険作業など多くの課題が指摘されている。この課題解決のためには、規制を最小化した客観的で効率的な点検手法の導入が必要である。

本計測システムは、上記の解決を目的として開発した技術であり、覆工壁面の連続画像計測や、レーザ計測ができ、交通規制を必要とせず、高速走行しながら精度が良く客観的な変状把握が可能である。また、打音検査を支援する目的で開発した走行型非接触レーダシステムにより、覆工巻厚・空洞・内部欠陥を探索することが可能となった。

計測結果の活用として、取得した変状情報を総合化し、3D可視化データベース作成により、変状原因把握、進行性評価を行い、健全度診断を支援することができる。この計測システムを従来点

検前に交通規制なしに実施し、事前に損傷展開図を作成して要注意箇所や健全箇所を把握することによって、近接目視点検・打音検査の効率化・合理化を図ることができる。

以上のように、統合型3D走行計測システムは、カメラ、レーザ、レーダを搭載した統合型走行計測システムにより従来点検前に計測し、近接目視、打音検査の併用技術として支援するとともに、取得した3D可視化情報を総合的に活用し健全性診断を支援することを開発目的としている。

3. 走行型計測システムの概要

本システム概要を図-1、2に示す。取得できるトンネル点検用計測データ、機能は以下のとおりである。

- ① トンネルレーザ計測および変形モード解析：100万点/秒の高精度レーザスキャナにより、高密度な点群データを取得し、トンネル覆工の形状、覆工の変形（変形モード、目地・ひび割れの段差）を客観的に把握可能である。
- ② トンネル画像計測および損傷度評価：速度50～70 km/hで走行しながら取得した壁面画像より、0.3 mm程度以上のひび割れなどの損傷を把握できる。客観的・正確な展開図が作成でき、変状進行性の把握や変状原因推定が可能

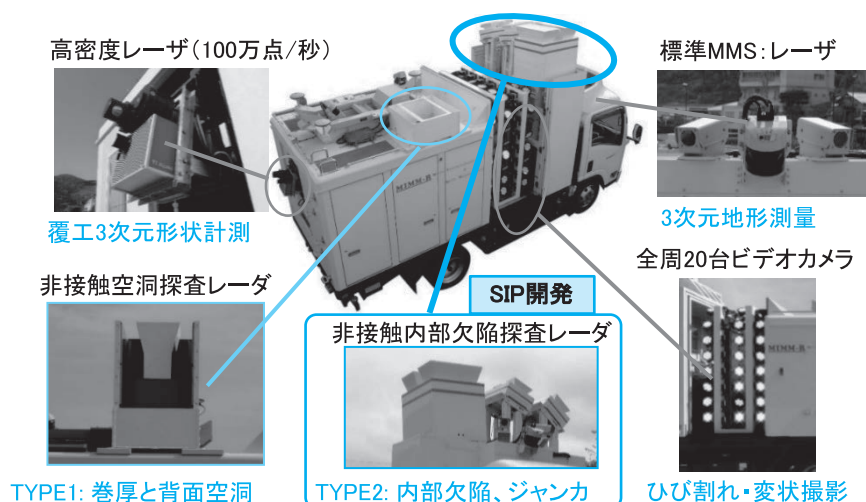
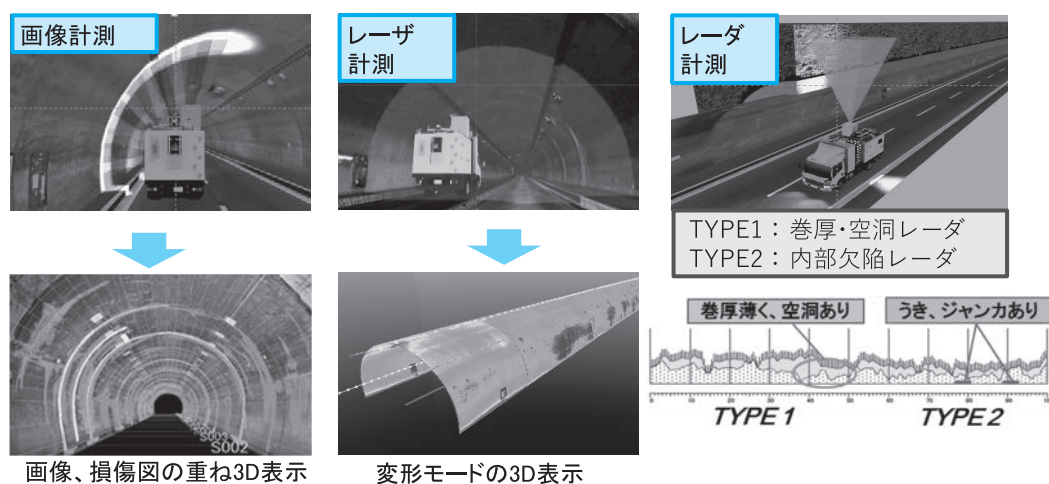


図-1 統合型3D走行計測システム（MIMM-R）



図ー 2 システム計測のイメージ

である。

- ③ 地中レーダによる探査：走行型非接触レーダにより，壁面までの離隔 3 m 程度，速度 50 km/h 程度以上で走行しながら，巻厚，背面空洞，内部欠陥を探査できる²⁾。次章に開発経緯を示すように，3 m 程度の離隔で高速探査できるレーダアンテナは世界初の技術である。

これらから得られた個々の結果を総合的に判断することで，トンネルに発生している変状原因を推定でき，要注意箇所を抽出し，効率的な近接目視点検・打音検査の支援および詳細点検・補修計画の立案が可能となる。

4. 高速走行型非接触レーダの開発

SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術において，「高速走行型非接触レーダによるトンネル覆工の内部欠陥点検技術と統合型診断システムの開発」というテーマで技術開発を実施し(平成 28 年度に完了)，打音検査の支援としての内部欠陥用レーダ開発について良好な成果をあげている¹⁾。図ー 3 にレーダアンテナの搭載状況，図ー 4 に計測状況，表ー 1 にアンテナ仕様を示す。ま

表ー 1 レーダアンテナの仕様・機能

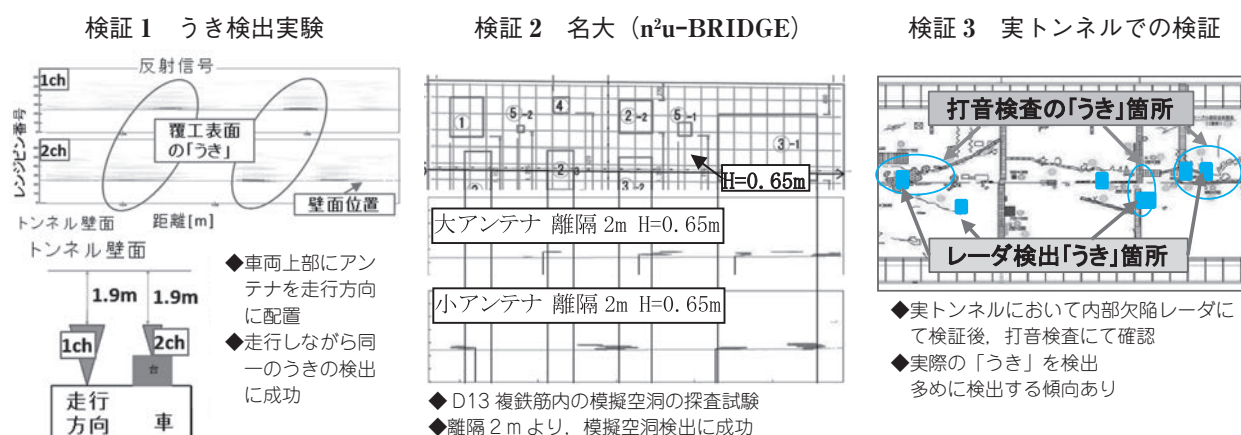
項 目	諸 元 等	備 考
主探知対象	壁面内の空洞等	主にトンネルの壁面内の異常部位（空洞等）の探査に使用する
最大探知距離 (スweepレンジ)	4 m	壁面までの距離は 3 m 程度と想定
距離分解能 (帯域幅相当値)	0.075 m	コンクリート内：0.025 m
最大計測速度	25 m/s	実速度：25[m/s]/ 使用アンテナ数
レーダ方式	FM-CW 方式	送受別アンテナ方式
中心周波数	3 GHz	
帯域幅	2 GHz	
信号処理および表示	○搭載車両の進行方向について受信信号を合成開口処理で集約できる ○壁面までの距離と反射強度を出力できる ○反射信号が空洞／金属等によるかを評価できる	



図－３ 開発レーダの計測車両への搭載状況



図－４ 計測状況



図－５ 検証結果

た図－５に開発したアンテナの検証結果を示す。検証結果のうち、名古屋大学ニューブリッジにおいて、内部空洞の規模、位置が明確な模擬供試体に対し、適正に空洞検出ができることを確認した。覆工コンクリート内の空洞、表面のうき、ジャンカなどの探査深度は20 cm程度であり、打音検査前に要注意箇所を抽出し効率的な点検を支援する。

レーダアンテナ開発に際し、事前に国内5社、海外5社のアンテナを調査した。最終的に、3D-Radar社、GSSI社が候補に残り、アンテナとして最も要求性能に見合う両社を主体として訪問調査を実施した。ヒアリングは、主に下記3項目を念頭に置き、意見交換を実施した。

- ① GPRの探査性能やGPR調査の実施内容と問題点
- ② 非接触アンテナ方式で内部欠陥を検出する際の可能性と問題点
- ③ 各国におけるGPRを規制する法律の状況

よび人体に与える影響

調査結果は、コンクリート内部の欠陥検知に対して、各社とも条件がかなり厳しいという見解であり、最大離隔は1.0 m程度との回答であった。道路トンネルでは、建築限界による制約および標識、ジェットファンなどの支障物のため、交通規制を行わず走行探査するためには、3 m程度の離隔をとる必要がある。結果として、3 m程度の離隔での非接触および高速対応のアンテナは市場にはないことが判明したため、独自にアンテナを開発するという経緯に至った。

5. 統合型診断システムの開発

本システムは、下記の機能を有する。

- ① 点群解析機能：トンネル点群から自動的に目的地位置検出を行い、スパンごとに断面形状やスパン軸を高精度に抽出し、変状モード解析のコ

ンター表示および2時期の進行性差分表示を行う機能（3D表示）

- ② 覆工壁面の損傷図作成機能：計測した覆工表面画像を点群の位置情報に基づき合成し、ひびわれ、漏水などの損傷展開図を作成する機能（3D表示）
- ③ レーダ計測結果可視化機能：内部欠陥、巻厚・空洞厚の計測・解析結果を点群情報により位置同期し、3D表示、コンター、縦・横断面図表示する機能
- ④ 3D可視化診断機能：画像、レーザ、レーダの各解析結果を3D可視化表示し、重ね合わせて表示することにより、変状原因推定や健全度診断を支援する機能
- ⑤ データベース機能：所管する多数のトンネル、複数回の点検記録をデータベース化し、変状および対策履歴を保管する機能

システム解析は3次元処理を行い、必要に応じて2次元展開出力を行っている。曲線をもつトンネルに関しては、そのまま2次元展開すると、曲線部に空白が生じてしまうため、曲線にも対応できるように機能開発を行った。

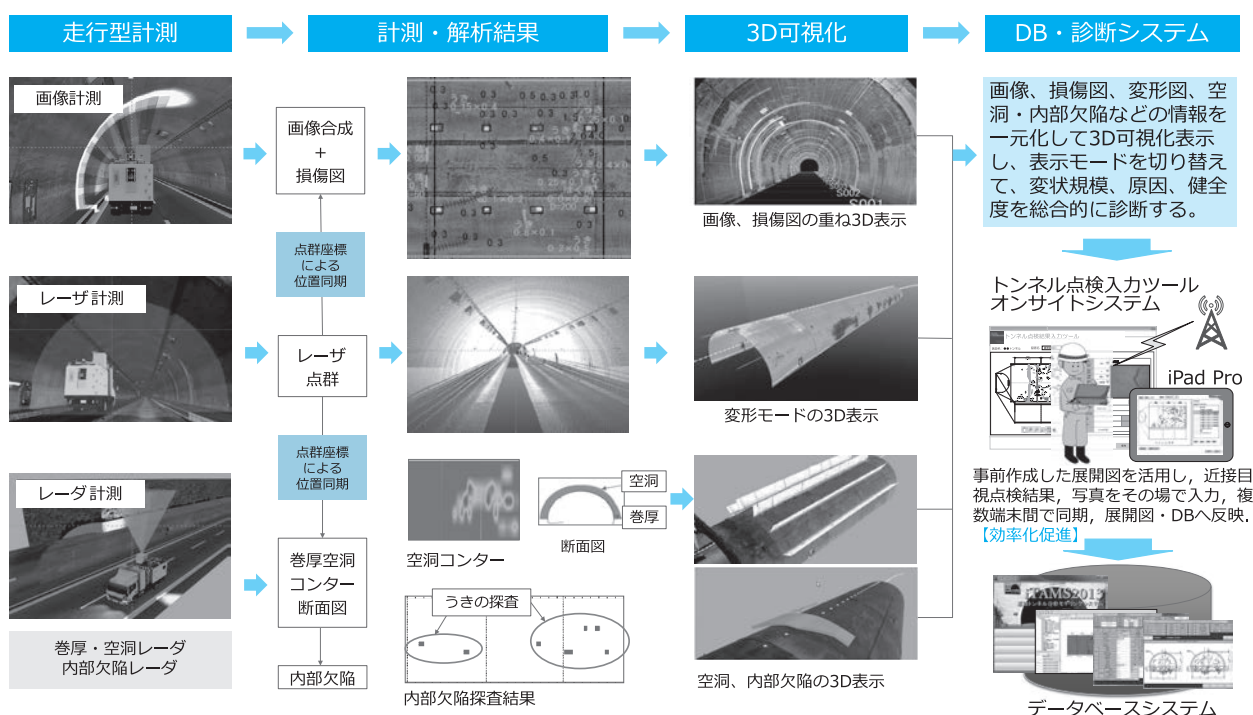
差分解析による進行性箇所検出に関する機能開発については、異なる年度に計測された情報により算出される個別の変状結果について、変状差分にて経年変化を算出する機能開発を行った。

CIM対応に関する機能開発については、本システムで計測データを解析し、3次元・2次元で可視化した情報を他のデータへエクスポートし、そのエクスポートしたデータを他システムと連携させることで、CIMシステムの構築に役立てることができるような機能開発を行った。

以上の統合型診断システムの全体像を、図－6に示す。

6. 統合型診断システムの検証結果

岐阜大学にて実施されているSIP社会実装プログラムにおいて、実際のトンネルに対してフィールド試験を実施した。本試験では、走行型計測を行い、トンネルの変状の有無やその位置・範囲などを記録するとともに、断面形状計測、空洞探查、うき探查を実施した。



図－6 統合型走行計測システムによる点検のフロー

表－２ 走行型計測の支援内容と有効性

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安

①圧ざ・ひび割れ（外力）

点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の判定の目安例

対象区分	部位区分	ひび割れ						判定区分
		幅（mm）			長さ（m）			
		5 以上	3～5	3 未満	10 以上	5～10	5 未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I～Ⅱa
			○				○	Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb～Ⅲ
		○				○		Ⅲ
	○			○			Ⅳ	

②うき、はく離（材質劣化）

うき、はく離等に対する判定の目安例

対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況	打音異常	
			有	無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合の恐れがない	Ⅱb	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱb
		ひび割れ等が閉合しブロック化している	Ⅳ	Ⅱb～Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化している	Ⅲ～Ⅳ	Ⅱb～Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅳ	Ⅱb～Ⅲ

③変形、移動、沈下

対象箇所	部位区分	変形速度（mm/年）				判定区分
		10 以上 著しい	3～10 進行がみられる	1～3 進行がみられる～緩慢	1 未満 緩慢	
覆工路面路肩	断面内				○	Ⅱb～Ⅱa
				○		Ⅱa
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

④有効巻厚の不足・減少

(矢板工法の場合)

箇所	主な原因	有効巻厚 / 設計巻厚			判定区分
		1/2 未満	1/2～2/3	2/3 以上	
アーチ・側壁	経年劣化凍害 アルカリ骨材反応 施工の不適切等			○	Ⅱb
			○		Ⅱa～Ⅲ
		○			Ⅲ～Ⅳ

⑤【参考】突発性の崩壊の可能性に対する判定の目安例

(矢板工法の場合)

覆工巻厚（cm）	背面空洞深さ（cm）	
	大 （30 以上程度）	小 （30 未満程度）
小（30 未満程度）	Ⅲ、Ⅳ	—
大（30 以上程度）	Ⅱa、Ⅲ	

「道路トンネル維持管理便覧【本体工編】H27.6」より

有効巻厚の不足・減少については定期点検（近接目視、打音検査）だけでは把握できず、次の調査が必要となる。
地中レーダ探査、削孔調査、圧縮強度試験

走行型計測の適用性

①ひび割れ

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
ひび割れ幅、長さ	画像計測	○

画像解析により、ひび割れ幅（0.3 mm 以上）、長さを判定可能。

②うき、はく離

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
ひび割れ形状	画像計測	△～○※1
表面の状態	画像計測	△～○※1
表面の凹凸	レーザ計測	△※2
うき検知	レーダ計測	△～○※3
打音（濁音）	—	×

※1：ひび割れの形状や変色状況からうき、はく離が疑われる箇所として検出できる。
※2：上記の箇所について、段差を伴う場合はさらにうき、はく離である可能性が高い。
※3：内部欠陥レーダにより、うきが懸念される箇所をスクリーニングできる（幾分多めに抽出）。

③変形

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
変形速度	レーザ計測	○

1 回の計測で変形速度自体は検出できないが、推定は可能。変形の有無や変形モードは判定可能。

④有効巻厚

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
覆工巻厚	非接触レーダ計測	○※4
圧縮強度	—	×

⑤突発性崩壊

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
背面空洞深さ	非接触レーダ計測	○※4

※4：探査深度 50 cm 程度までは巻厚不足や空洞あるいは空隙が疑われる箇所を抽出することができる。50 cm 以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダを実施する必要があるが、有効厚としては十分であり問題となることは少ない。
非接触レーダ計測で巻厚不足や空洞等が疑われる箇所については、左記の調査を実施し確認する。

「道路トンネル定期点検要領 平成 26 年 6 月国土交通省道路局国道・防災課」（以下、「点検要領」という）に示される点検結果の判定の目安に基づき、新技術により支援できる内容を評価した。

走行型計測技術は、近接目視点検、打音検査の完全代替にはならないため、別途定期点検として近接目視点検、打音検査を行い確認する必要があるが、走行型計測結果を活用することにより近接目視・打音検査前に要注意箇所や、健全箇所の抽出を行うこと、点検の効率化、客観的・正確な損傷展開図の作成支援、および健全度概略判定を行うことは十分可能であることを確認した。

表－2 に、点検要領に示される判定の目安と、その判定に活用できる走行型計測技術の支援内容と有効性をとりまとめた。

- ① 近接目視前にカメラ、レーザ、レーダ（巻厚・空洞）により近接目視で留意すべき変状を抽出し、特にその箇所を重点的に点検することによって、従来点検を効果的に支援できる。近接目視時に人力にて行う展開図スケッチについて、走行計測を活用することで効率化を図ることができる。
- ② 打音検査の前に内部欠陥レーダにより「うき」が懸念される箇所および健全箇所をスクリーニングしておくことで、打音検査の合理化、効率化を図ることができる。
- ③ 一般的に、近接目視点検時にはレーダ探査などの調査は実施せず、空洞情報を含む診断は困難であるが、事前にレーダ探査することで、客観的な健全度診断を行うことができる。

7. 従来点検に対する位置付け

従来点検に対する位置付けとしては、定期点検要領に準拠し支援することを基本方針としている。点検要領に定められている新技術導入のためのポイントは、①近接目視で行うことを基本とする、②初回点検は、全面目視、全面打音、③2回目以降は、全面目視、必要に応じ打音、④近接目

視とは、肉眼、接近、⑤近接目視と同等の評価が行える新技術の併用を妨げない、⑥必要に応じ、非破壊検査を適用する、などが挙げられる。

これらに対し、目指すべき方向性としては、①人力による近接目視、打音検査を実施することが前提、②ロボットによる点検は、人力による点検の支援、③ロボットの得意とする領域で支援する（客観的で正確な記録、高精度な位置情報、進行性評価）、④人力による点検の限界をカバーし、ヒューマンエラー防止（記録漏れ、見落とし）、打音深度補完、⑤非破壊検査、調査の支援とする。

点検要領に示された点検フローの各フェーズに対し、走行計測システムにより支援できる内容を表－3 に示す。本システムによる高度化技術により従来点検を支援し、診断は確実に人が実施するという位置付けである。客観的な位置情報を保持した記録に関してはロボットの得意とするところであり、変状進行性の把握、スケッチの省力化には特に有効であり、積極的な活用を想定している。

表－3 基本的フローに対する走行型計測による支援内容

		人による 診断	走行型計測 による支援
点検・ 調査	近接目視	実施	支援（高度化）
	打音検査要否	実施	支援
	打音検査	実施	支援（高度化）
	変状展開図作成	補完	実施
	打音検査判定	実施	支援
	応急措置要否	実施	支援
	応急対策要否	実施	支援
	調査要否	実施	支援
	対策区分判定	実施	支援（統合支援）
健全性診断		実施	支援（統合支援）
措置	本対策実施	実施	
	監視	実施	支援（高度化）
記録（DB 化）		補完	実施
		確実に人が実施	活用効果

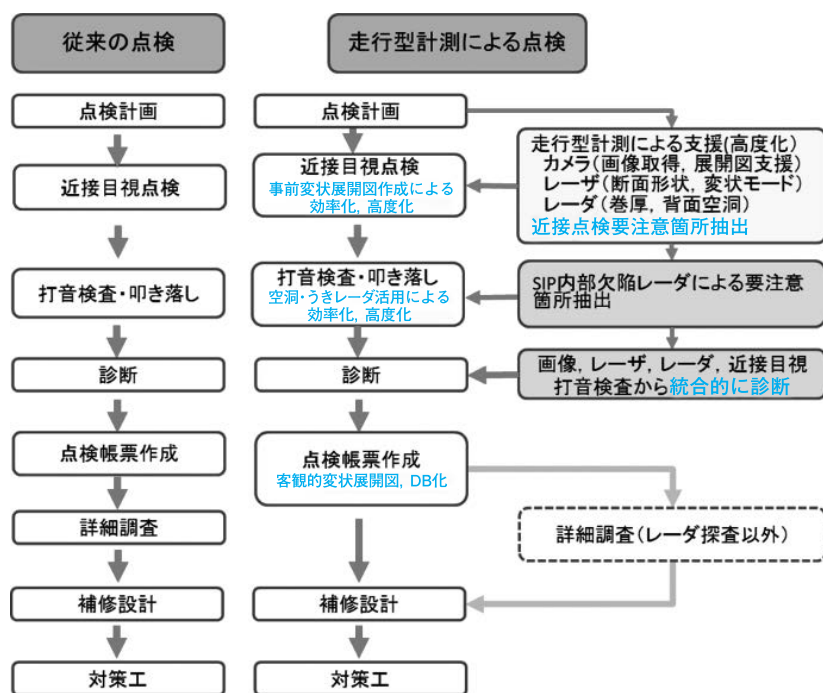


図-7 本システムによる点検フロー

8. 課題と展望

上記のように従来点検の各フェーズに対して、人力とロボットによる点検を効果的に融合することが活用の基本方針である。カメラ、レーザ、レーダを搭載した統合型走行計測システムにより、近接目視、打音検査の前に計測を実施し、近接目視、打音検査の併用技術として支援することによって、点検フロー全般の効率化、合理化、高度化、低コスト化を図るとともに、取得した3D可視化情報を総合的に活用し、健全性診断を支援する技術としての活用場面を想定している。この方針に基づいた本システムによる点検フローを図-7に示す。

期待する効果としては、①従来点検前に計測することにより近接目視点検での要注意箇所の抽出、事前変状展開図作成による効率化・高度化の実現、②内部欠陥レーダによる要注意箇所の抽出、レーダ活用による効率化、高度化、③カメラ、レーザ、レーダを近接目視、打音検査に併用支援することによる総合的診断の合理化、高度

化、④点検帳票作成支援による客観的・正確な展開図作成、DB作成の効率化、省力化、低コスト化、⑤走行型による計測時間の非交通規制化、事前計測の有効活用による近接目視時の交通規制時間短縮などが挙げられる。

走行型計測技術は、近接目視、打音検査の完全代替にはならないため、それらを別途実施することが前提である。走行型計測結果の活用により近接目視・打音検査前に要注意箇所抽出を行うこと、点検の効率化、客観的・正確な損傷展開図作成の支援、変状進行性・変状原因の把握、健全度診断の支援を行うことは十分可能であり、点検全般に渡る支援技術としての走行計測手法による点検・診断法確立に向け貢献していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) SIP 研究開発課題の各研究概要 http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/booklet_2017_A4.pdf, pp.28-29.
- 2) 安田亨, 山本秀樹, 北澤隆一, “時速 50 km でトンネル空洞探査高速非接触レーダによるトンネル覆工巻厚・空洞探査を実現”, 建設機械施工, Vol.66 No.12, 2014.