新都市社会技術融合創造研究会　研究成果報告会

建設DXにおける「トンネル点検支援技術、斜面防災・減災」の取り組み

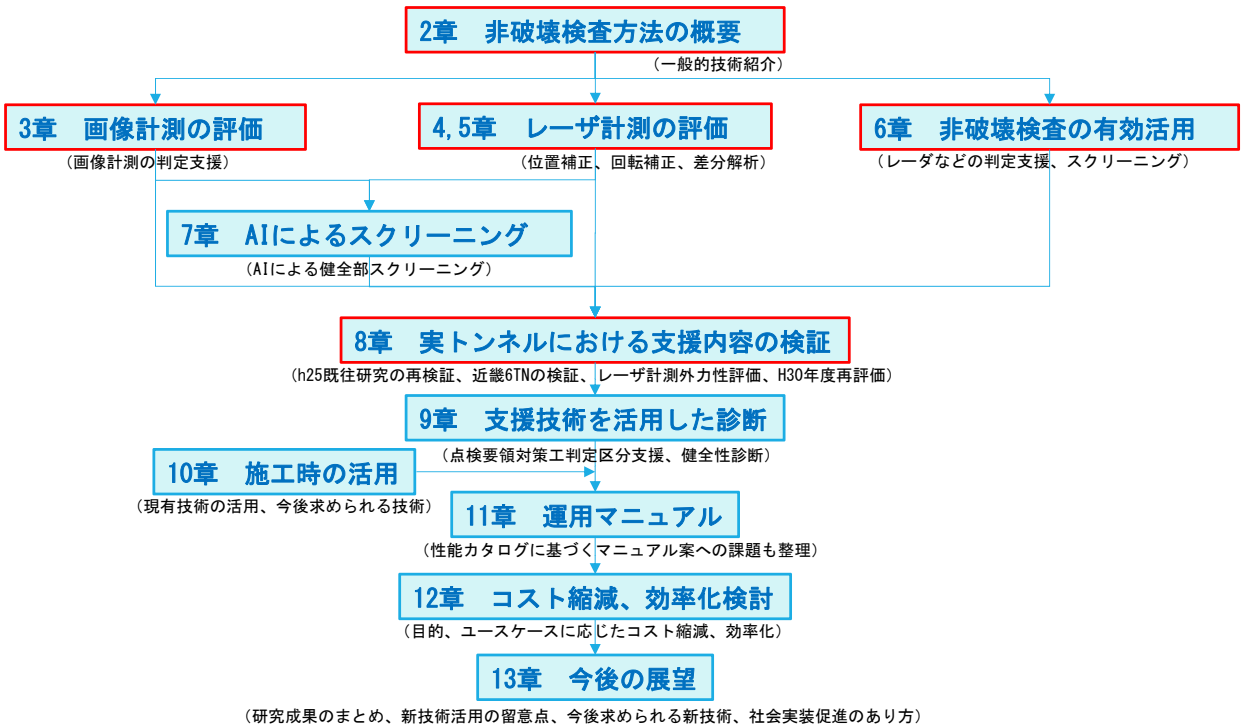
トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

2.実トンネルにおける点検支援技術の検証

パシフィックコンサルタンツ（株）
重田　佳幸

非破壊検査の高度化に対する検討方針

・本報告に関係する報告書は下記の赤枠の章となっている。



2. 非破壊検査方法の概要

性能カタログ等の技術情報の収集

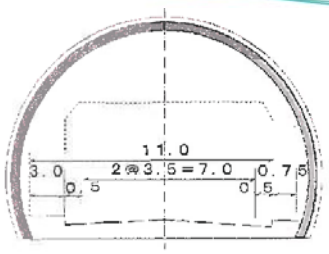
・性能カタログ（R2年度版）に加え、NETIS登録技術や、今回の新都市PJ参加企業の点検支援技術など整理する。
・単独で活用するケース、組み合わせて活用するケースについては、変状の種類別に整理し、かつ要求性能も合わせて整理する事で、ユースケースと実務レベルにおける要求性能項目をとりまとめる。

画像計測技術　（11技術）	非破壊検査技術　（9技術）	計測・モニタリング技術　（5技術）
画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ定量評価技術	デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	OSVを活用したトンネル附属物の監視技術
社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」	道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	３軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物（照明器具・標識等）の傾斜角度変位モニタリングシステム
走行型高精細画像計測システム　トンネルトレーサー	レーザー打音検査装置	MIMM-Rのレーザースキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術
一般車両搭載型トンネル点検システム	天秤方式移動型レーダ探査技術	走行型レーザ計測によるトンネル覆工幅と高さの把握
トンネル覆工表面撮影システム	打音検査ユニット	ProScan
トンネル覆工点検システム　eQドクターT	走行型高速3Dトンネル点検システムMIMM-R －レーダ探査技術－	
道路性状測定車両イーグル　L&Lシステム	ドローンレーダによる覆工探査技術	
社会インフラモニタリングシステムMMSD	トンネルマスター	
走行型高速3Dトンネル点検システムMIMM-R/MIMM	トンネルレーザ計測及び覆工巻厚・背面空洞レーダ探査システム	
3Dトンネルレーザー計測システム		
走行型近赤外線撮影によるSfM三次元画像解析システム		

□ 本研究での実証実験に使用

和知トンネルにおける検証実験

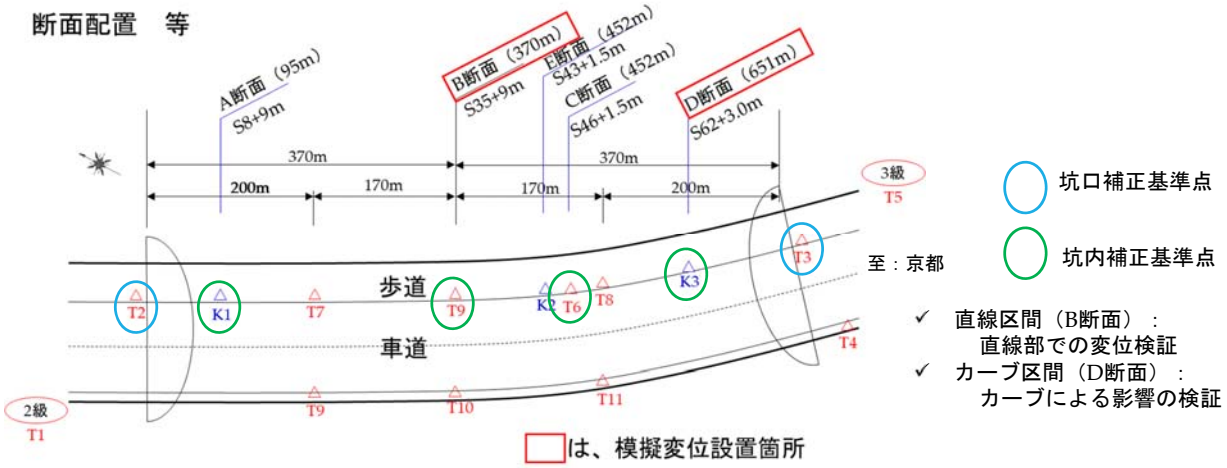
- 名称：トンネルA
- 竣工：平成10年
- 延長：740.0m
- 施工法：NATM



トンネル部

■ 2013年度　定期点検（MIMM計測）
■ 2017年度　定期点検（MIMM計測）
■ 2019年度　検証試験（MIMM計測）

断面配置　等



坑口補正基準点
坑内補正基準点

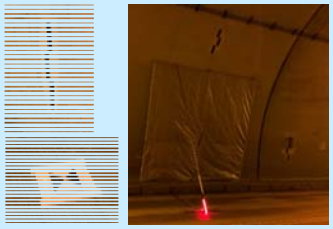
✓ 直線区間（B断面）：直線部での変位検証
✓ カーブ区間（D断面）：カーブによる影響の検証

□は、模擬変位設置箇所

実トンネルにおける検証実験　比較対象機種

Reference

Leica ScanStation P40
基準点より3D測量



レーザ計測　Test Case

R1年度

MIMM　90°

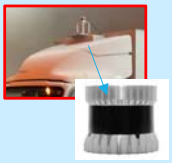
Pegasus Ⅱ 40°

MIMM＋OS1
SLAM　スキャンマッチング

R2年度　MIMM＋SLAMでの精度検証

MIMM-R

Pegasus Ⅱ 90°



MIMM-R＋OS1

MMS-DⅡ

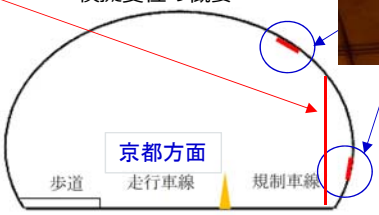
MIMM-S　Z+F

画像計測　**R2年度**　MIMM-R，MMS-DⅡ，一般車両搭載型，近赤外撮影

計測状況

画像計測の検証も実施する。
（一般車両搭載、近赤外、MMS-D）

広範囲な変形を評価する目的でシートを設置する。
（B断面近傍に単管パイプを立て掛け上部をアンカーで固定）

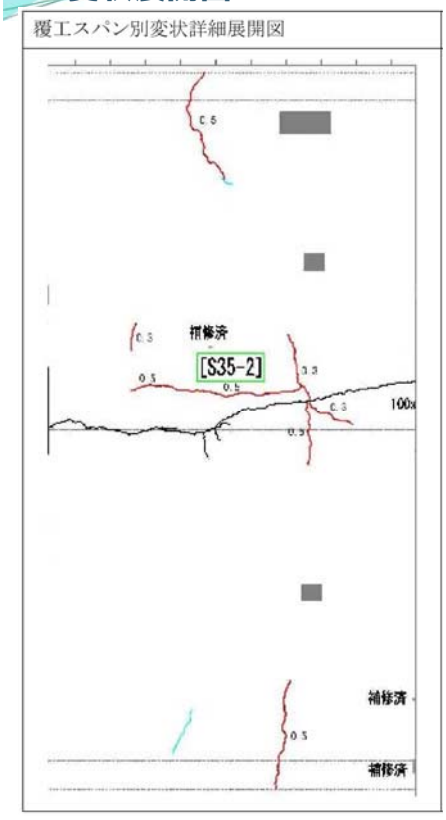


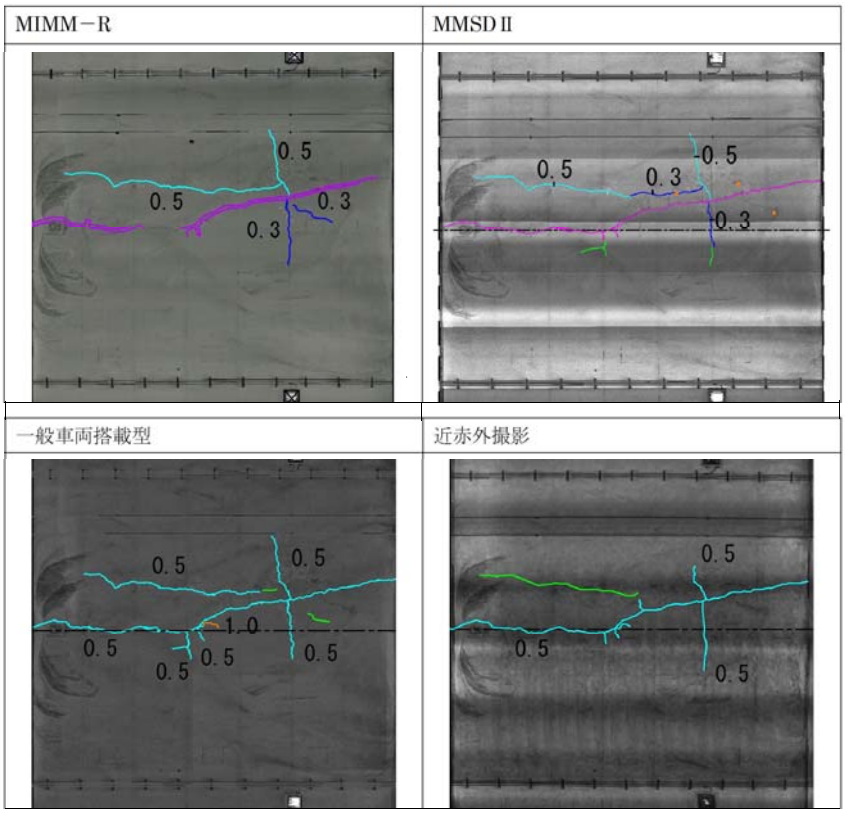
合板サイズ：
180×90（アンカー固定）
50×50、20×100、20×20

厚さ：10～15mm

3. 画像計測の評価

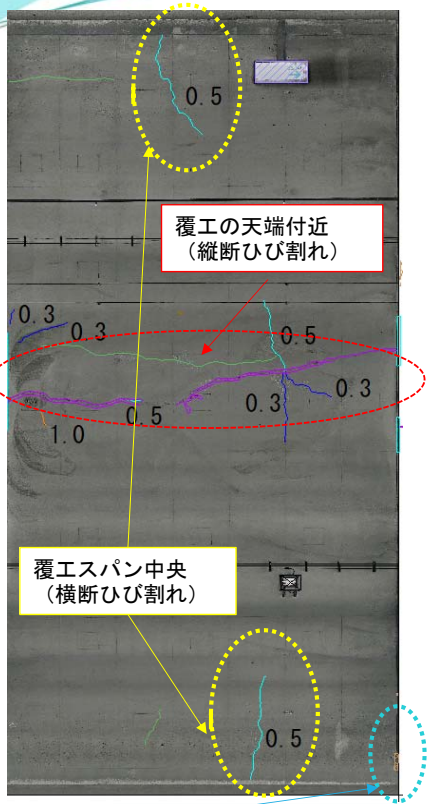
変状展開図　S035





4技術ともに、ひび割れの取得、展開図への反映ができている

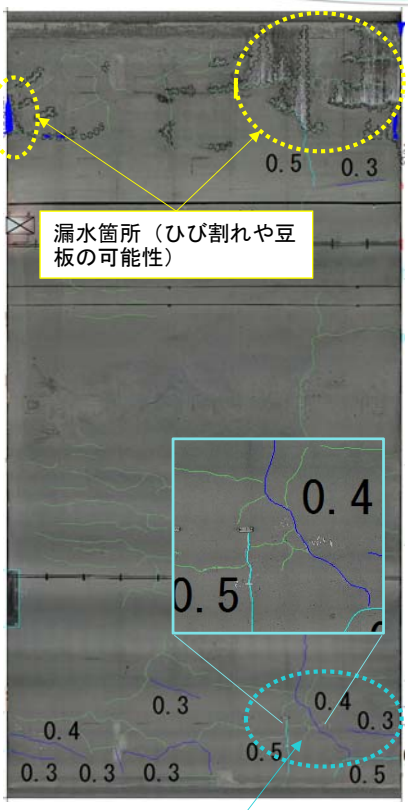
定期点検要領の着目点に対し画像計測でわかる変状



覆工の天端付近
（縦断ひび割れ）

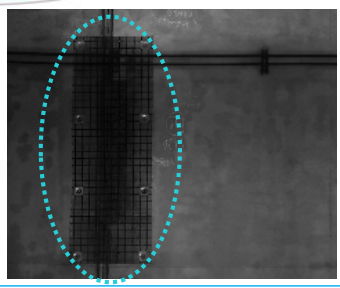
覆工スパン中央
（横断ひび割れ）

覆工の目地（横断目地の
半月状のひび割れ）

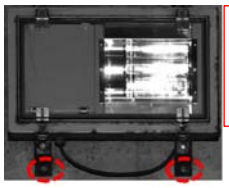


漏水箇所（ひび割れや豆
板の可能性）

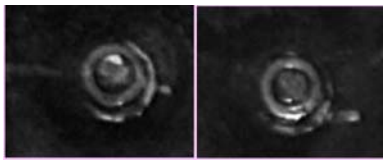
ひび割れのブロック化
（うき・はく離の可能性）



補修箇所（ボルトの脱落、補修材の
うきの可能性）



付属物（ｱﾝｶｰﾎﾞﾙﾄの脱落,
ｹｰﾌﾞﾙのたるみ可能性）



合いマークを確認

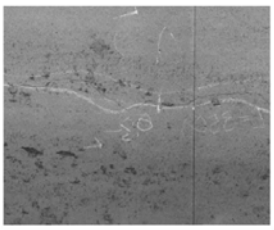
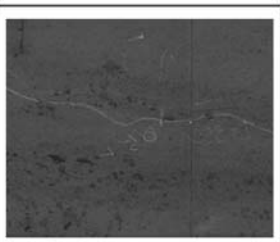
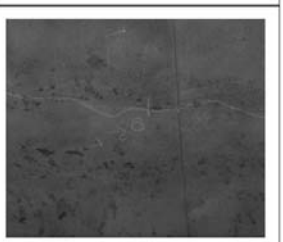
画像計測による個別変状の評価

	個別変状の評価
ひび割れ	0.3mm以上のひび割れを抽出している。さらに0.3mm以下の微細なひび割れも抽出している。 ひび割れの閉合や交差、密集なども把握でき、うきにつながる変状を予測できる。
漏水	漏水箇所及び遊離石灰箇所が確認できる。
付属物	照明灯具、ケーブル、誘導表示板が確認できる。 また、補修工のFRPネットも確認できる。

従来のスケッチと比較し、**正確に変状位置を把握**できる。

汎用化：画像データの**互換性**は確保されている。

S046

近接点検写真	MIMM－R	MMSDⅡ
		
変状の内容	一般車両搭載型	近赤外撮影
変状部位　覆工右アーチ部 変状区分　外力　ひび割れ 発生範囲　幅 0.5mm 対策区分　Ⅱｂ		

評価	・４技術ともに、ひび割れ幅と長さを確認可能 ・ひび割れについては、Ⅱｂ以上の変状はすべて確認可能 ・漏水については、量の把握は困難であるが、位置と範囲については、Ⅰ判定もすべて確認可能
課題	・うきについては、検出できない。（予測は可能） ・ひび割れは、外力か、材質劣化によるものか、画像のみでの判断は困難。 ・覆工の段差箇所は検出できない。 ・漏水の量は検出できない。

4. 位置情報の有効活用

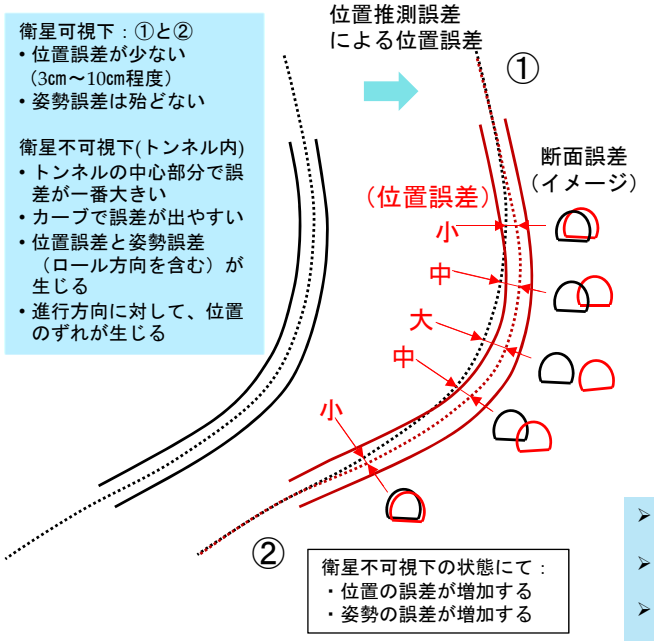
【研究項目②】回転補正、縦断方向の位置補正の実用化検討

レーザー位置精度に影響を与える要因と対策

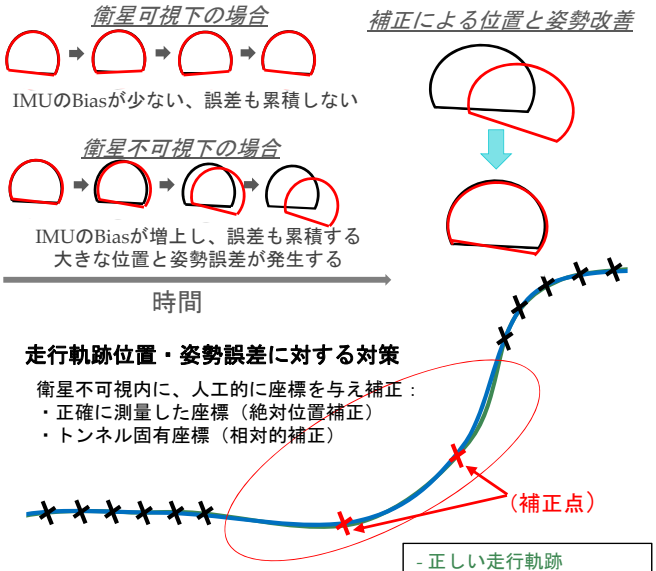
・正しい軌跡
・誤差を持つ軌跡

衛星可視下：①と②
- 位置誤差が少ない（3cm～10cm程度）
- 姿勢誤差は殆どない

衛星不可視下(トンネル内)
- トンネルの中心部分で誤差が一番大きい
- カーブで誤差が出やすい
- 位置誤差と姿勢誤差（ロール方向を含む）が生じる
- 進行方向に対して、位置のずれが生じる



衛星不可視下の状態にて：
・位置の誤差が増加する
・姿勢の誤差が増加する

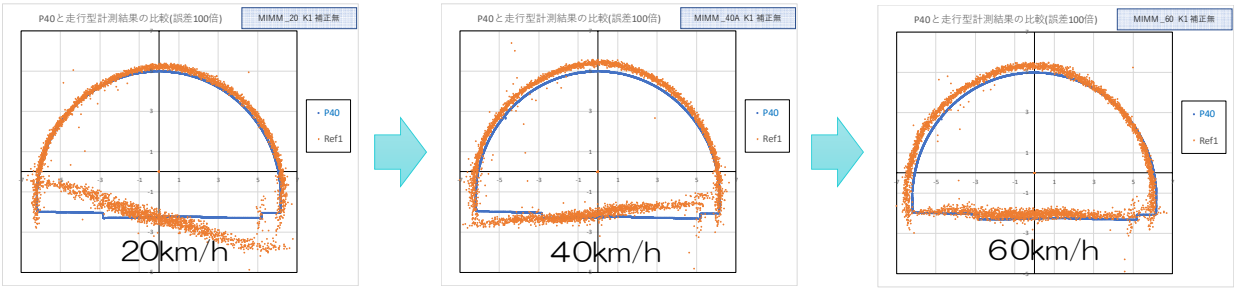


- 20秒の進行に対し1つの補正点を与え、絶対位置誤差を改善する
- 補正により姿勢情報（ロールなど）が改善するが、完全補正は困難
- 回転補正が今度のトンネル変形評価の課題となる

レーザによる断面計測および縦断位置精度

速度の違いによる断面計測精度

・Ｐ４０と計測結果との比較例（各計測点の誤差を100倍に拡大して表示）



速度差による誤差の比較（ＭＩＭＭ、Ｋ１地点補正なし）

計測機器	計測速度	誤差算出結果				
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	40度地点誤差 (m)	135度地点誤差 (m)	路面回転誤差 (度)
MIMM	20km/h	0.0028	-0.0017	-0.0003	-0.0017	-0.1252
	40km/h A	-0.0026	-0.0001	-0.0026	-0.0022	0.0671
	40km/h B	-0.0016	0.00245	-0.0053	-0.0030	0.0484
	60km/h	0.0005	-0.0018	-0.0029	-0.0002	0.0058

誤差小

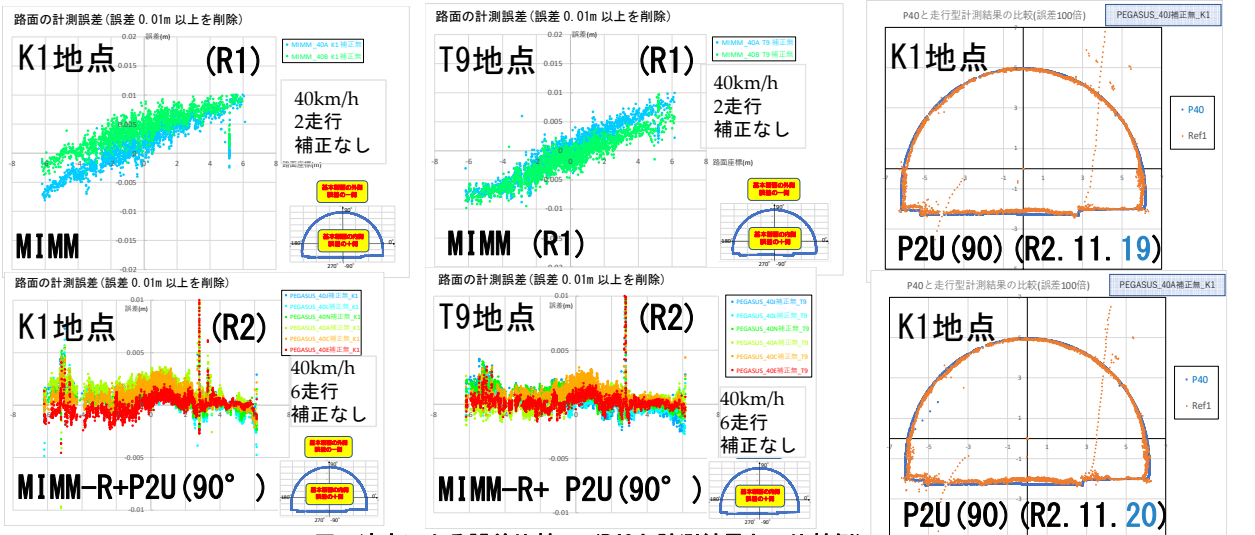
速度が上がるにつれ、誤差、回転誤差が小さくなる傾向を確認
（理由：GNSS不可視時間が短くなり、ジャイロの累積誤差が減少するため。）
計測速度は40km/h以上が望ましい

レーザによる断面計測および縦断位置精度
再現性の検討

1）再現性の検討(計測時期が異なる場合の再現性)

・各計測装置の誤差傾向は類似　・衛星受信状態によっては誤差量(回転誤差）は変動

路面の計測誤差　（各計測点の誤差を100倍に拡大して表示）

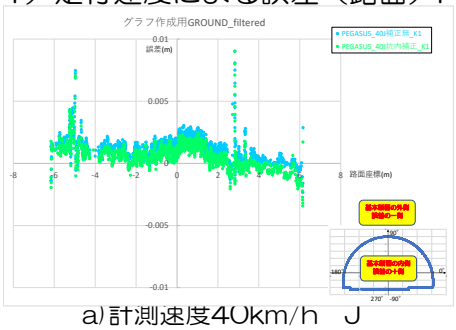


同一速度による誤差比較　（P40と計測結果との比較例）

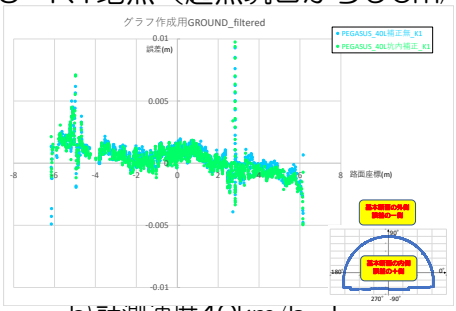
計測誤差（別装置+別年度、別計測日）の**再現性は高い**
回転誤差を修正すれば異なる計測装置でも比較可能（**データ互換性**確保）
計測方向、計測速度を合わせる、良好な衛星受信状態の時間帯を選ぶことが重要
（　計測方向、計測速度、使用機器、補正の実施の有無等の記録を残しておく　）

レーザによる断面計測および縦断位置精度
基準点による補正の検討　（坑口、坑内基準点補正）

1）走行速度による誤差（路面）P2U　K1地点（起点坑口から90m) R2



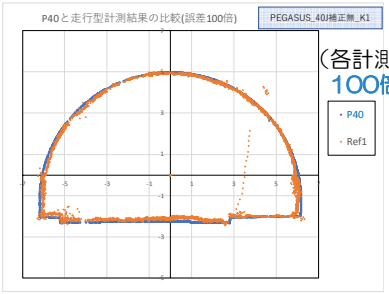
a)計測速度40km/h　J



b)計測速度40km/h　L

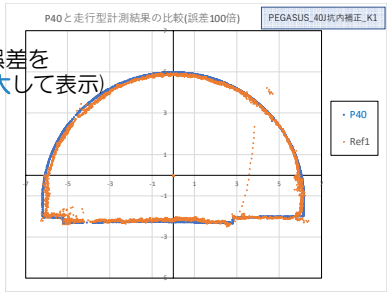
凡　例

補正無し
坑口・坑内補正
縦軸：誤差
横軸：路面座標



a)計測速度40km/h　J

（各計測点の誤差を
100倍に拡大して表示）



b)計測速度40km/h　L

・両坑口と坑内に200m程度間隔で設置した補正点を用い、補正の有無について検討を行った。
・断面の回転については補正の有無で大きな差異は見られない結果となった。しかし、トンネル中心位置のずれやトンネル縦断方向の位置は補正より改善されることがわかった。

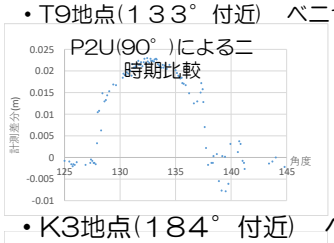
・基準点による補正を行えば、鉛直方向の計測誤差は減少傾向となる
・衛星不可視化時間が長いと、補正の効果は向上する傾向となる
・補正を行っても回転誤差は解消されない

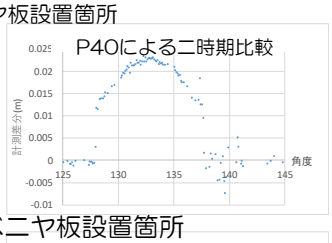
位置補正及び二時期比較を行う上での留意点

二時期比較

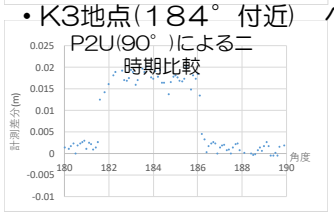
模擬変位箇所について、設置前後（R2.11.19とR2.11.20）の計測結果の差分を算出した。

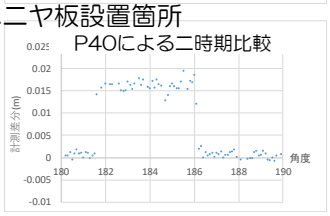
・T9地点(１３３° 付近)　ベニヤ板設置箇所





・K3地点(１８４° 付近)　ベニヤ板設置箇所

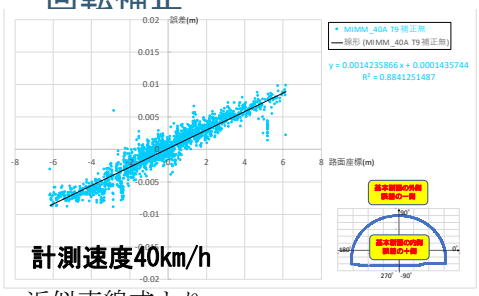




計測断面	角度	P2U(90度)差分	P40差分	誤差
K3地点	134° 付近	17.7mm	15.7mm	2.0mm
	184° 付近	17.9mm	16.3mm	1.6mm
T9地点	133° 付近	22.0mm	22.5mm	0.5mm
	184° 付近	17.8mm	18.3mm	0.5mm

誤差は0.5～2mm程度以内となり内空変形は評価できていると考えられる

回転補正



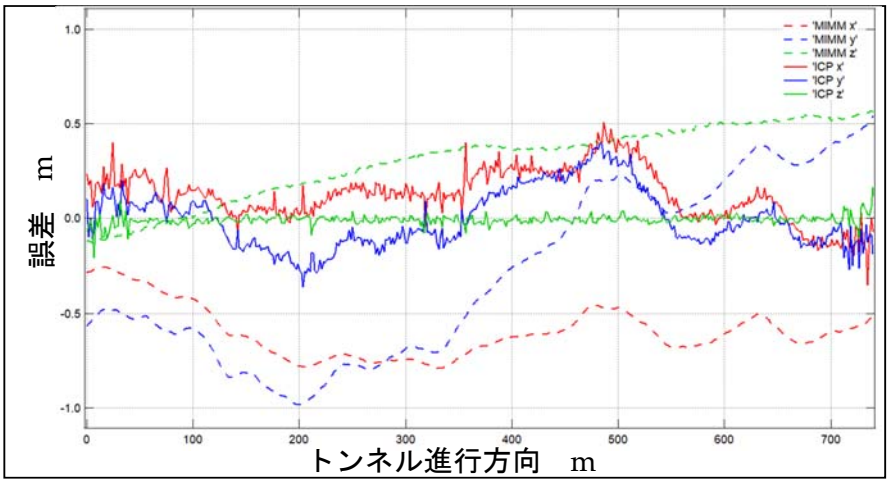
近似直線式より
Y=0.0014235866+0.0001435744より
0.081565449度

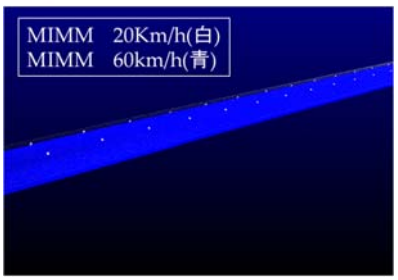
2時期の比較においてはその回転誤差を補正して比較を行う必要がある。
路面中心を基準にした回転補正方法を提案

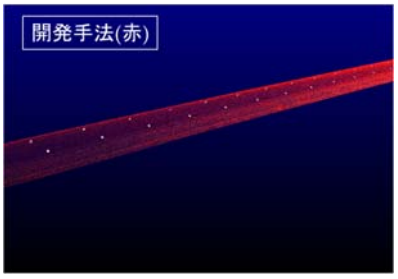
レーザ計測のまとめ
- MMSの変位計測精度　±２mm程度
- 1mm/年未満か1～3mm/年の判断は可能
- 複数回の計測により変位の進行性のトレンドを確認して評価することが望ましい。
- 外力による変状の評価や進行性の評価においては、コンター解析などにより面的な変形を確認することが重要であり、レーザー計測は有効な方法である。
- 凹凸の計測相対的な精度は1mm程度

トンネル照明位置比較によるICPスキャンマッチング自己位置推定(2時期差分)　性能評価

スキャンマッチングでは累積誤差が見られない
照明の抽出精度，計測精度が影響している可能性大←精査が必要







MIMMによる走行1回目(時速20km)と，9回目(時速60ｋｍ)を比較(点線)
MIMMによる走行1回目(時速20km)と，
OS-１点群(9回目走行時)を1回目点群へICPスキャンマッチングした結果(実線)

	X m(rms)	Y m(rms)	Z m(rms)	d m(rms)
GNSS/IMU	0.612	0.543	0.360	0.740
開発手法	0.183	0.153	0.027	0.214

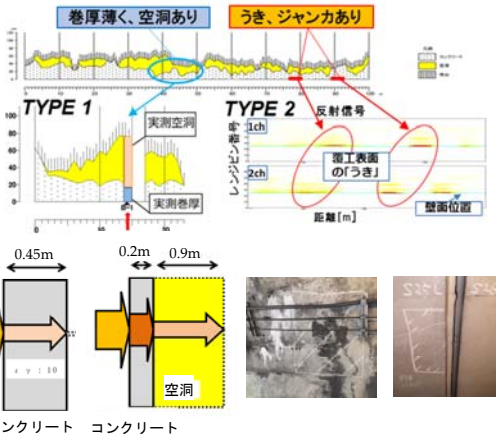
高さ方向の精度が著しく向上(5cm以下)

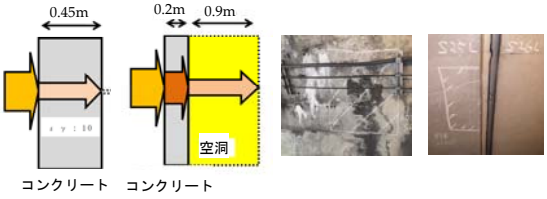
6．非破壊検査方法の有効活用概要

6章

走行型非接触レーダ

巻厚・空洞探査　　内部欠陥（うき、ジャンカ）





覆工厚（最大45cm）＋空洞厚の合計が1.0m程度まで検知可能

検出した「うき」

点検要領の判定の目安に対して支援できる内容

有効巻厚／設計巻厚

有効巻厚／設計巻厚	有効性	適　用
1/2未満	○	設計巻厚0.9m未満の場合
1/2～2/3	△	設計巻厚0.7m未満は可能
2/3以上	×	巻厚45cm以上は不明

項目：突発性の崩壊　　□ 確認が可能な項目

覆工巻厚、空洞厚	有効性	適　用
巻厚30cm未満かつ空洞30cm以上	○	検出可能
巻厚30cm以上かつ空洞30cm以上	△	覆工の厚さ45cmまで支援可能
空洞30cm未満	判定無し	〃

【効果】
- 打音しなくても良い健全部を除外するスクリーニングには有効

【課題】
- 10cmサイズ以下のうきは検出できない
- 有効巻厚の検討は、強度がわからない以上、代替手法にはならない。ただし、表層劣化の変色、ジャンカ有無、断面欠損、目地部などの低品質材質劣化状況などを総合して支援する。

接触レーダを組合わせて支援

探査深度をカバー

天秤方式移動型レーダ探査技術
（性能カタログ登録技術）

8.実トンネルにおける支援内容の検証

8章

8.1　H25既往研究(5トンネル)の再検証

8.1.3　点検要領の改訂と新技術による再検証

(1)道路トンネル点検要領の改訂

平成26年6月、平成31年3月
道路トンネル点検要領改訂

初回点検　　：覆工全面を近接目視及び打音検査
２回目以降点検：覆工全面を近接目視

(2)実トンネルのH25既往研究評価と新技術による対応

【現在での主な新技術】

画像計測技術	客観的変状位置（変状の位置精度）、高精細画像、色識別性能の向上。
非破壊検査技術	レーダ計測（うき、はく落に対する重点打音箇所の抽出、健全部の把握、巻厚不足・背面空洞の検出）
計測・モニタリング技術	レーザ計測（覆工変状の監視）
ＡＩ技術	変状箇所のスクリーニング

8.1 H25既往研究(5トンネル)の再検証

8.1.3 H25既往研究での評価と現在の技術による再評価

項目		H25既往研究での評価		H31点検要領	現在の技術による再評価
		従来点検手法	走行型計測		
現場作業全般	交通規制	交通規制が必要	交通規制が不要。	―	H25評価から変更なし
	点検環境（効率化）	高所部等厳しい条件下では時間と労力が必要。	作業時間が大幅に短縮。	―	H25評価から変更なし
＜初回点検＞	近接目視点検	・高所作業車により覆工面に近づき全面を点検。 ・目視によるスケッチ	○（代替可能） ・ひび割れ検出精度0.2㎜ ・変状（漏水、はく落等の確認可能。 ・画像取得不可の箇所あり。	近接目視	画像計測技術（高精細画像）、計測・モニタリング技術（レーザ計測）、AI等により近接目視を支援
	打音検査	近接目視と同時に必要箇所を打音。	▲（代替不可） ・非接触のため代替不可。 ・打音必要箇所抽出可能。	全面的な打音検査	非破壊計測技術（レーダ計測）による支援
	叩き落とし	応急措置が必要となる「うき」をその場で処理。	▲（代替不可） ・非接触のため代替不可。	―	H25評価から変更なし
＜2回目以降点検＞	遠望目視点検	・路面からの点検 ・現実的には明るさ、汚れ等により目的達成困難	◎（代替可能、品質向上） ・安全迅速な作業が可能 ・高精度、定量的データを取得し、効率的。	全延長に対して近接目視	画像計測技術（高精細画像）、計測・モニタリング技術（レーザ計測）、AI等により近接目視を支援
点検成果（変状展開図）の精度		・手書きスケッチ ・客観性に欠け、バラツキあり	◎（代替可能、品質向上） ・正確な位置情報、客観的な進行性を把握。 ・ヒューマンエラー少ない。	―	画像計測技術（高精細画像）による支援
点検成果（変形モード）		トンネルの変形に関しては不明。	◇（従来不可、＋α要素） ・レーザー計測により変形モードを把握。 ・外力作用の特定が可能 ・標準調査の一部を代替可能。	―	H25評価から変更なし
まとめ		―	・近接目視の代替が可能。 ・打音検査の効率化に寄与。 ・近接目視・打音検査を補完。	―	近接目視、打音検査を支援

8.1 H25既往研究(5トンネル)の再検証

8.1.4 まとめ

【Ｈ３１トンネル点検要領の判定項目に対する評価】

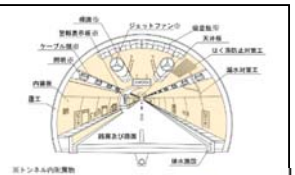
項目	既往研究	判定項目に対する新技術による対応
① 圧ざ・ひび割れ	画像計測で確認。	画像計測の高精細化による検出精度の高機能化（ひび割れ計測に有効） レーザ計測（コンター解析の併用）により進行や外力性判定の代替が可能。
② うき・はく離	画像計測からジャンカ等はく落懸念箇所（打音箇所）を抽出。	レーダ探査、ＡＩ（スクリーニング）により、より効率的な打音箇所の抽出の補完が可能。
③ 変形・移動・沈下	1回目のレーダ計測で覆工変形等を評価。	画像計測の高精細化や複数回の走行型計測（変位計測）によるレーダ解析により、より正確な外力性判定の代替が可能。
④鋼材腐食	画像計測で確認。	画像計測の高精細化により検出精度の高機能化。
⑤ 巻厚不足、背面空洞	走行型計測では確認不可。	非破壊検査技術（非接触型レーダ）により近接目視前に事前に探査し巻厚不足、突発性崩壊の判定を補完できる。
⑥ 漏水等による変状	画像計測で確認。	画像計測の高精細化によりにじみや遊離石灰の検出精度を補完できる。

8.2 実トンネルにおける支援内容の検証

近畿道路メンテナンスセンター　R2近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務より

トンネル概要

トンネル名：トンネルA（L=740m）
トンネルB(L=330m)
トンネルC(L=38m)
トンネルD(L=1,420m)
トンネルE(L=2,810m)
トンネルF(L=389m)
施工方法：NATM(4本)、矢板工法(2本)
対象部位・部材：覆工表面
対象とする変状の種類：ひび割れ、漏水、遊離石灰
トンネル断面変形モード
覆工巻厚・背面空洞



対象範囲　：対象範囲

トンネル全線の覆工コンクリートの表面に対して適用（附属物等の背面、面壁、棲壁は対象外）

従来点検

近接＋打音検査結果をスケッチにて記録

点検状況
（近接目視＋打音検査）

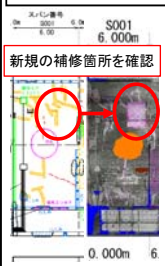
近接目視＋打音検査を実施し、その結果を現場にてスケッチして変状展開図を作成する。

変状展開図（スケッチ後に清書）

新技術活用点検

走行型画像、レーザー計測、およびレーダ計測による事前計測

画像計測技術の活用（点検支援）



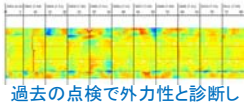
画像展開図に基づく机上点検を実施し、現地点検前に変状展開図を作成。現地点検時の重点着目箇所を事前確認。

現地点検時は、事前作成展開図の確認と、打音検査に注力。

点検支援技術

レーザー計測技術の活用（外力性の適切な診断）

目視点検では把握できない、トンネル内空断面の変形モードを算出。

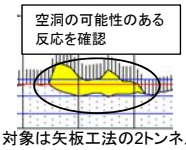


過去の点検で外力性と診断した箇所も、外力性ではないと判明し、変状原因推定、変状区分修正に有効である

レーダ計測技術の活用

①空洞レーダ

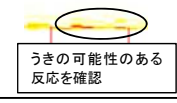
巻厚不足や背面空洞の範囲を確認。



※対象は矢板工法の2トンネル

②内部欠陥レーダ

うきの可能性ある範囲を事前抽出。
⇒現地点検時に確認



点検要領に対する支援評価

近畿道路メンテナンスセンター
R2近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務より

8.2.3　支援評価、適用性の検討

①圧さ、ひび割れ（外力）

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	○
外力性判定	レーザ計測	○

・画像解析により、ひび割れ幅(0.3mm 以上)、長さ、進行性、ひび割れ密度を判定可能
・コンタ解析により、外力影響の有無を判断。

②うき、はく離（材質劣化）

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
うき・はく離	レーザ計測	△※1
	内部欠陥レーダ	△※2
ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	○～△※3

※1：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。
※2：うきが懸念される箇所の抽出は可能であるが、現地にて打音検査等による確認が必要となる(幾分多めに抽出する設定)。
※3：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。

③変形、移動、沈下

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
変形速度	レーザー計測	○

・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鋼材腐食

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
腐食面積	画像計測	○
断面欠損	内部欠陥レーダ	△※1

・鉄筋かぶりが薄い箇所や錆汁の有無を画像により検出可能。
※1；要注意箇所として抽出できる場合がある。

⑤巻厚の不足または減少、背面空洞

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
覆工巻厚	非接触レーダー計測	△～×※1
圧縮強度	—	×

※1；探査深度 45 cm程度までは巻厚不足が疑われる箇所の抽出することができる。45cm 以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダ探査が必要となる。

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
背面空洞深さ	非接触レーダー計測	△～×※1

※1；探査深度 45 cm程度までは背面空洞が疑われる箇所の抽出することができる。45cm 以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダ探査が必要となる。

⑥漏水

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
漏水・遊離石灰、つらら、側氷	画像計測	○
漏水量	—	×
滞水・土砂流出・凍結		△※1

・画像により漏水・遊離石灰、つらら、側氷の確認が可能。
※1；路面の画像撮影はできないため、漏水の度合い、変状箇所からの推定となる。

⑦付属物

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
異常の有無	画像計測	△※1

※1；附属物本体の亀裂、腐食、欠損は画像にて確認することができるが、附属物本体や取付部材等の緩みやがたつきなどは現地点検時の触診等で確認をする必要がある。

8.4 実トンネルにおける支援内容の検証

一覧表１（※計測機器に必要な性能・仕様や計測の適用条件を満たしていることが条件）

項目		使用する技術	H30評価	点検支援	9章の適用性	適用条件 留意点など	近接目視の要否およびレベル	打音検査の要否	記載しておくべき内容など ※将来のあり方も記載できると良い ※組合せによる活用も記載できると良い
①圧ざ・ひび割れ	1.外力性判定 外力、材質劣化の変状分類	レーザ計測	△	○	○	レーザ性能・仕様 ポジショニング精度 ※判定要素のひとつ	否※	否	外力性か材質劣化かという変状分類のためにレーザコンタ解析が有効 コンタ解析により外力性の判定が可能 ※近接目視が必要なケースあり（段差、地質など） （初回点検／まだデータをとっていないトンネル では・・・）
	2.幅・長さ抽出 3.進行性 4.ひび割れ密度	画像計測	○	◎	○	画像解像度・性能	否	否	要領では、ひび割れ幅（3mm以上）、目安として1mm以上の性能 幅を厳密に求める要求性能よりも、ブロック、クロス、進展、新規ひび割れなどが画像から確認できることのほうが重要 最小分解能 0.3～0.5mmが目安、幅の検出は0.5mm刻みでOK ひび割れ幅（0.3mm以上が望ましい）、長さ、ひび割れ密度を判定可能 複数計測により進行性を判定可能
	5.微細ひび割れ	画像計測	△	○	－	画像解像度・性能	否	否	画像計測により判定可能（現状の画像解析の分解能を記載）
	6.遊離石灰・漏水	画像計測	△	△	－	画像解像度・性能	要※	否	画像から完全に判定することは難しく、 ※遊離石灰でひび割れが見えない場合目視による確認が必要
②うき・はく離	1.浮きはく離	レーダ探査	△	△	△	※変化箇所として抽出	要	要	たたかなくても良い範囲のスクリーニングに有効 小さいものはとれない⇒打音と組合せれば問題ない ひび割れを伴わない浮きの検出に有効
	2.閉合ひび割れ、交差、分岐	画像計測	○～△	△	○～△	画像解像度・性能	否	要	ひび割れは判定可能だが、浮きはく離の判定には打音検査が必要
	3.目地沿いの浮きに繋がるひび割れ	画像計測	○～△	△	－	画像解像度・性能	否	要	ひび割れは判定可能だが、浮きはく離の判定には打音検査が必要
	4.ジャンカ・はく離・かけ	画像計測	○～△	○	－	画像解像度・性能	確認程度	要	画像から判定可能
	5.変色・劣化・漏水	画像計測	△	○	－	画像解像度・性能	否	要	画像からある程度確認可能 劣化状況までは画像ではわからない（打音不要なものもあるが・・・・）

点検※支援：◎ 高機能化
○ 代替
△ 補完
× 現状の技術では代替・補完が難しい　※点検＝要領に基づく点検

8.4 実トンネルにおける支援内容の検証

一覧表２（※計測機器に必要な性能・仕様や計測の適用条件を満たしていることが条件）

項目		使用する技術	H30評価	点検支援	9章の適用性	適用条件 留意点など	近接目視の要否およびレベル	打音検査の要否	記載しておくべき内容など ※将来のあり方も記載できると良い ※組合せによる活用も記載できると良い
③変形・移動・沈下	1.レーザ計測の活用	レーザ計測	○	○	○	レーザ性能・仕様	否	否	複数回計測により変形速度を計測（要領では／年）する必要あり
	2.外力か否かの判定	レーザ計測	○	○	○	レーザ性能・仕様 ポジショニング精度 ※判定要素のひとつ	否	否	コンタ解析により外力性の判定が可能（進行性が必要なので複数回計測が必要）
④鋼材腐食・鉄筋腐食	1.表面に変状が見える場合の判定	画像計測	○～△	◎	○	画像解像度・性能	確認程度	否	鋼材が露出していれば代替可能 （露出していなければ近接目視でも不可能）
⑤巻厚不足・背面空洞	1.覆工巻厚不足・背面空洞の判定	レーダ探査	△～×	△※1	△(非接触)	探査深度(周波数) ※1深さの確認は必須	否※2	否	探査深度の範囲内で可能（非接触45cm程度，接触80cm程度） ⇒背面空洞の厚さは別なことを説明する（巻厚30cmなら1m程度） ※1：非破壊検査であるため、最終確認(コア削孔・カメラなど)は必要 ※2：近接目視点検に併せて接触型を使用するなどの対応が有効 ※有効巻厚⇒強度はGPRでは不可（ジャンカなどはわかるけど）、画像なども併せて想定（材料劣化など）はできる。
	2.有効巻厚の判定	レーダ探査	△～×	△※1	△(非接触)	探査深度(周波数)			
⑥漏水など	1.漏水・遊離石灰の位置や規模	画像計測	○～△	△	○～△	画像解像度・性能	否	否	漏水・遊離石灰の位置や規模であれば画像から判定可能
	2.漏水量の判定	－	△～×	×	×	－	－	－	計測による支援は不可

点検※支援：◎ 高機能化
○ 代替
△ 補完
× 現状の技術では代替・補完が難しい　※点検＝要領に基づく点検

8.4 まとめ

走行型計測技術等のトンネル点検支援技術の高度的活用により、**高品質化・効率化・省力化を図ることが実現**でき、更なる実装化が可能となる。

①事前の展開図作成、**スクリーニング**による近接目視時の**点検作業の効率化**
②点検表作成作業の効率化
③目視点検に先立つ**覆工展開画像活用**（変状抽出、AI活用）による効率化
④展開図の高品質化（**変状位置精度の正確性**）
⑤机上点検後の現地点検による**変状抽出漏れ防止**
⑥複数技術の実証実験により、画像、レーザともに同様の支援ができ、**データの互換性**も確保
⑦レーザについて、**断面計測精度の検証、縦断位置補正・回転補正**の方法を提案、**コンター解析による外力性診断の有効性**を実証
⑧レーダについて、**健全部を除外するスクリーニングに有効、巻厚・空洞情報を点検時に提供**でき適切な診断が可能（組合せ技術も活用）
⑨判定の目安に対する判断情報付加による**適正な健全度診断**
⑩点検要領の判定の目安および健全診断に対し、検討した**高度化技術は点検診断を有効に支援**でき、代替あるいは高機能化が可能（一部は技術の組合せにより代替可能）
⑪外業、内業を総合し**コスト縮減、効率化**を実現