

# MMSを活用した陥没危険箇所基礎調査手法

日當 卓也・本地 光一・北川 知秀・安井 嘉文・木村 清聡・藤井 愛子(株式会社パスコ)  
青野 健治(株式会社環境総合テクノス)

## 1. はじめに

中央自動車道上り線の笹子トンネルでは、2012年12月2日に、天井のコンクリート板が約130mの区間にわたって落下し、走行中の車が複数台巻き込まれる大事故が発生した。事故後に実施した緊急点検では、詳細点検の不備が明らかになった。また、事故調査委員会の報告書では、国は点検要領の整備や設計基準の改定を着実に進めるべきであると指摘されている<sup>1)</sup>。これを受けて、国土交通省では、安全で円滑な交通の確保、および、第三者被害を防止する観点から、道路ストック総点検「総点検実施要領(案)」<sup>2)</sup>を公表した。本要領(案)【舗装編】では、ひび割れ、わだち掘れ、縦断凹凸(以下、IRI)、ポットホール等の路面性状調査、および、路面陥没危険箇所調査が必須とされている。路面性状調査では、MMS(Mobile Mapping System)を利用した調査が数多く実施されている。一方、路面陥没危険箇所調査では、道路パトロールによる舗装面の「目視点検」と、「路面下空洞探査車、探査機器による点検」等の手法が実施されている。この参考資料では、路面下の空洞が成長すると舗装路面の変状が確認される場合があると記載されている。舗装路面の変状を把握することは、MMSのレーザ計測の得意とするところである。MMSの計測で、路面下の空洞の可能性が少しでもわかるのであれば、路面性状調査と同時に効率良く調査できることになる。

しかしながら、既往の研究では、地中レーダの探査による空洞に関する研究事例<sup>3) 4) 5) 6)</sup>はあるものの、路面の変状と地中レーダの探査

結果の関係を研究した報告はない。

そこで、本研究では、MMSによる路面性状調査に合わせて、車両に搭載した地中レーダで路面下の空洞探査を実施し、路面の変状と空洞探査結果の関係を調べることにした。まず、MMSのレーザ点群データから標高グラデーション表示により路面の変状を抽出し、その陥没量と大きさの計測を行う。次に、地中レーダの探査結果から、路面下で異常が見られる信号を解析し抽出を行う。また、これらの結果を比較して、路面の変状と地中レーダ探査データの関係を考察したものである。さらに、路面変状の原因を地中レーダ探査の解析結果をもとに推定することとした。

## 2. 対象地域及び調査機器

### 2.1 対象地域

本研究の対象路線は、新潟県村上市の市道である。図1は、対象地域と調査対象路線の位置を示す。青い線は、MMSで路面性状調査した市道500kmであり、桃色の線は、MMSと地中レーダの両方の調査を実施する市道16km(18路線)である。

### 2.2 調査機器

#### (1) 路面性状調査のMMSの仕様

調査に使用する三菱電機社製MMS-X640の仕様を表1に示す。GNSSはApplanix社製で、車両の自己位置を示すセンサは、車両に3台のGNSSアンテナを配置することで自己位置のほか方位角の決定に用いる。また、車両の姿勢計測はIMUを用いて、加速度および角加



図1 対象地域(新潟県村上市道)

速度を1秒間に200回計測する。車速および走行距離を計測するために、1台のオドメータを車道側後輪へ設置する。

搭載するセンサは、6台のカメラと4台のレーザスキャナである。カメラは、Point Grey社製で、2,448 × 2,048のピクセル数を持ち、1秒間に最大10フレームの撮影が可能である。レーザスキャナはSICK社製で、最大到達距離は65m、取得密度は1台あたり27,100点/秒である。

(2) 路面下の空洞探査のセンサの仕様

地中レーダによる空洞調査は、レーダアンテナから送信される電磁波が、物質が異なる境界で反射・散乱が起こる特性を利用した調査法である。本探査には、図2に示すGIMS-K (Ground Image Mapping System) に搭載している3D-RADAR社製の地中レーダ探査システムを用いた。表2に、その性能を示す。21個のアンテナを内蔵し、周波数は200～3000MHzで、1.5mの深度まで測定できる。また、7.5cm間隔(スキャンレート:10,000波形/秒)で測定できるため、高速走行しながら地中の高精度な3次元データを取得できる。

表1 MMS 搭載センサの仕様

項目		MMS-X (640)
GNSS	取得間隔	GNSS アンテナ3台
	計測方法	RTK 又は VRS
IMU	取得間隔	200Hz
	姿勢精度	ロール&ピッチ角
オドメータ		1台
カメラ PointGreyReserch 社製 GRAS - 50S5C	搭載台数	6台
	ピクセルサイズ	2,448 × 2,048 ピクセル
	視野角	1台あたり
		水平方向 80°
		垂直方向 64°
	設定方向	CH1: 前左向き
		CH2: 前右向き
		CH3: 横左向き
		CH4: 横右向き
		CH5: 後左向き
	CH6: 後右向き	
	最速撮影枚数	最大 10 フレーム / 秒
絶対精度	標準レーザ	7m地点で 10cm (ms) 以内
相対精度		1cm (ms) 以内
自己位置精度		6cm (ms) 以内
レーザスキャナ SICK 社製 LMS291	搭載台数	4台
	設定方向 (設定角度)	CH1: 前下 (-25°)
		CH2: 前上 (25°)
		CH3: 後上 (45°)
		CH4: 後下 (-45°)
到達距離最大	65 m	
取得密度	27,100 点 / 秒	
走査範囲	180度、1°間隔、75回/秒	



図2 GIMS - Kの外観

3. 実証実験の方法

本実証実験の方法は、図3に示す通りである。以下に詳細を述べる。

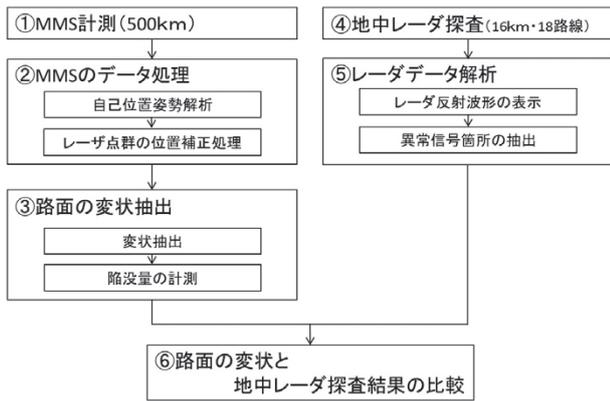


図3 実証実験の方法

### ①MMSの走行計測 (500km)

MMS計測は、データ取得に障害が及ばないよう雨天や降雪時期を避け、気象条件が良好な時に行う。MMSの走行する速度は法定速度内の約40km/hとし、カメラのシャッター間隔は走行速度に対して性能的に最短の2m走行毎に1枚とする。

### ②MMSのデータ処理

GNSS、IMU、オドメータで取得する自己位置姿勢データと電子基準点(新潟山北、村上、P鼠ヶ関、黒川、山形小国、朝日)のGNSSデータを用いて自己位置・姿勢解析を行う。

自己位置・姿勢解析後は、MMSの位置姿勢情報とレーザスキャナの距離と角度のデータを用いてレーザ点群の位置を真位置に補正する。

### ③路面の変状抽出

レーザ点群データの標高値を色分け(標高グラデーション)表示し、舗装路面で色が急に変わっている箇所を変状として抽出する。抽出した箇所は、MMSの画像データを用いて周辺の構造物、段差、道路の排水勾配等を確認し、変状以外は除外する。路面の変状は、レーザ

表2 地中レーダの性能

項目	性能
レーダアンテナ	21チャンネル
ピッチ	7.5cm
周波数	200～3000MHz
探査深度	1.5m
スキャンレート	10,000波形/秒

点群データから陥没箇所の深さと、車両進行方向に対する陥没の長さおよび鉛直方向の陥没の幅を計測する。

### ④地中レーダ探査 (16km、18 路線)

地中レーダによる空洞調査では、MMS計測により路面の変状を抽出した箇所と同じ路線(16km、18 路線)について、地中レーダを搭載したGIMS-Kで調査を行う。

### ⑤レーダデータ解析

地中レーダ探査によって得られたデータは、反射信号の大きさと反射波の方向により、白黒の濃淡の画像として表示できる。また、振幅が大きい程濃い色調となる。この濃淡画像の波形の特徴と反射波の方向から地中部の異常を推定する。この推定は、反射信号の大きさや反射波の方向の判読だけでなく、経験と現地検証結果のノウハウを有する技術者が行う。

### ⑥路面の変状箇所と地中レーダ探査結果の比較

地中レーダによる路面下空洞探査の結果と、MMSのレーザ点群データを活用して抽出した変状を比較し、それらの関係を考察する。また、変状の原因を、地中レーダ探査の解析結果をもとに推定する。

## 4. 結果および考察

### 4.1 路面変状の抽出結果

図4はMMSのレーザ点群を画像に重畳した結果である。このレーザ点群を3mm毎に標高値

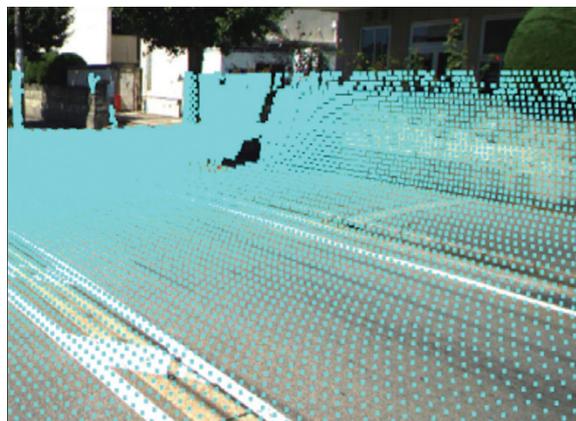


図4 MMSのレーザ点群表示

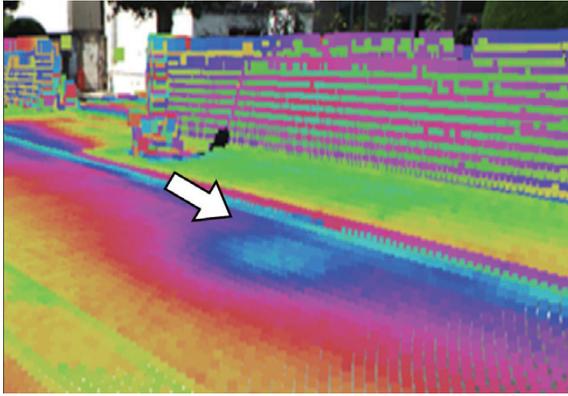


図5 標高グラデーション表示した路面変状箇所

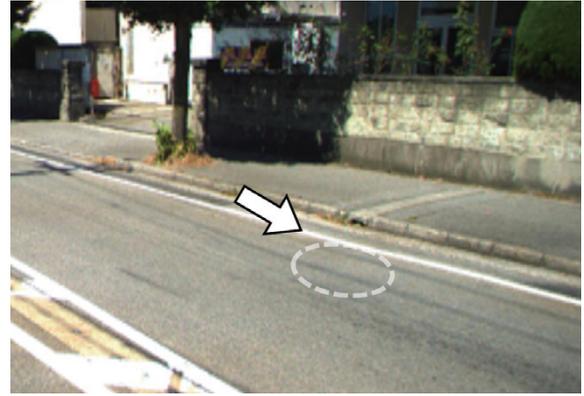


図6 路面変状の抽出結果

で色分け（標高グラデーション）表示したものが図5である。舗装路面で急に色が変わっている青色の円形の箇所が変状として確認できる。図6はMMSで取得した画像である。この画像から周辺地形や構造物、段差、道路の排水勾配等の状況を確認し、図中の円形の箇所を変状と特定した。陥没は深さ48mm、長さ約80cm、幅約90cmの大きさであった

本調査では、26箇所の路面の変状を抽出した。

#### 4.2 地中レーダ探査結果

変状箇所の地中レーダ探査結果を図7に示す。図の上段中央は反射信号の縦断データで、

右側が横断データである。横軸は探査方向、縦軸は深度を示す。また、上段の右端の図は、黄色の枠の中心地点の反射波形で、反射の方向と強度を表している。図の下段は、反射信号を水平方向に展開して表示したものである。図7では、地表付近の層状の凹波形と強い反射信号が見られる。図8は空洞と推定した箇所である。空洞が存在する場合は、前面と背面の二つの反射面と凸型の波形を示すことから多重反射や散乱波を発生したり、路盤層底面からの反射波を切断するように周辺とは異なった反射波が現れることがある。本事象は、凸型の波形と多重反射を示すことから前者の事例である。

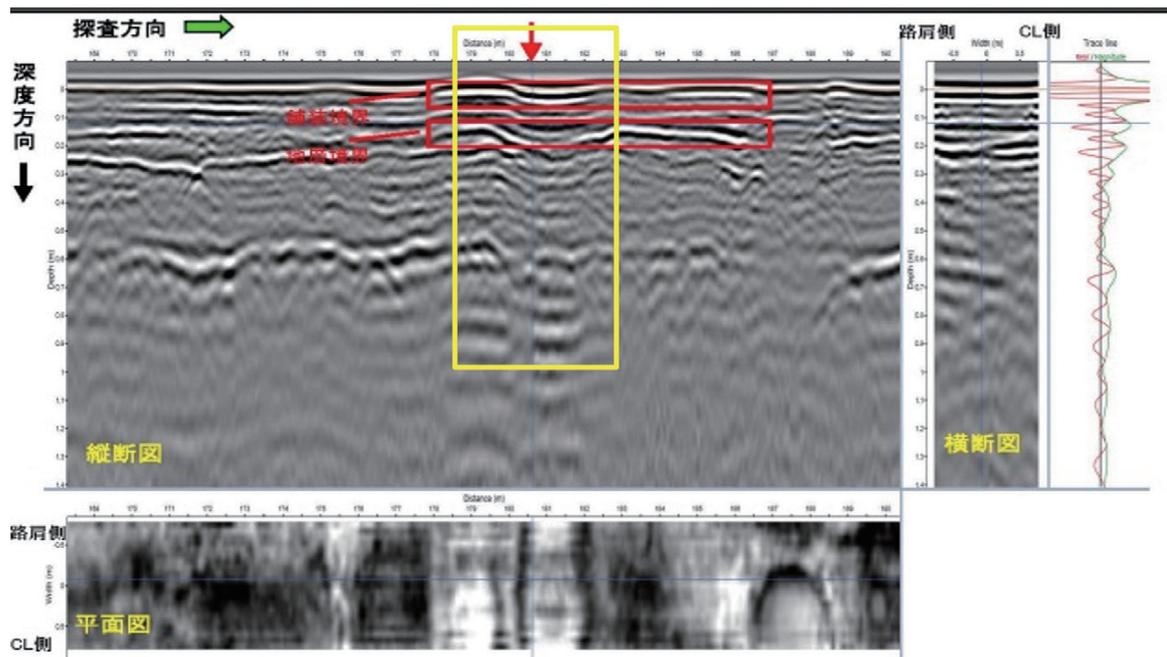


図7 路面の変状箇所の地中レーダ探査結果

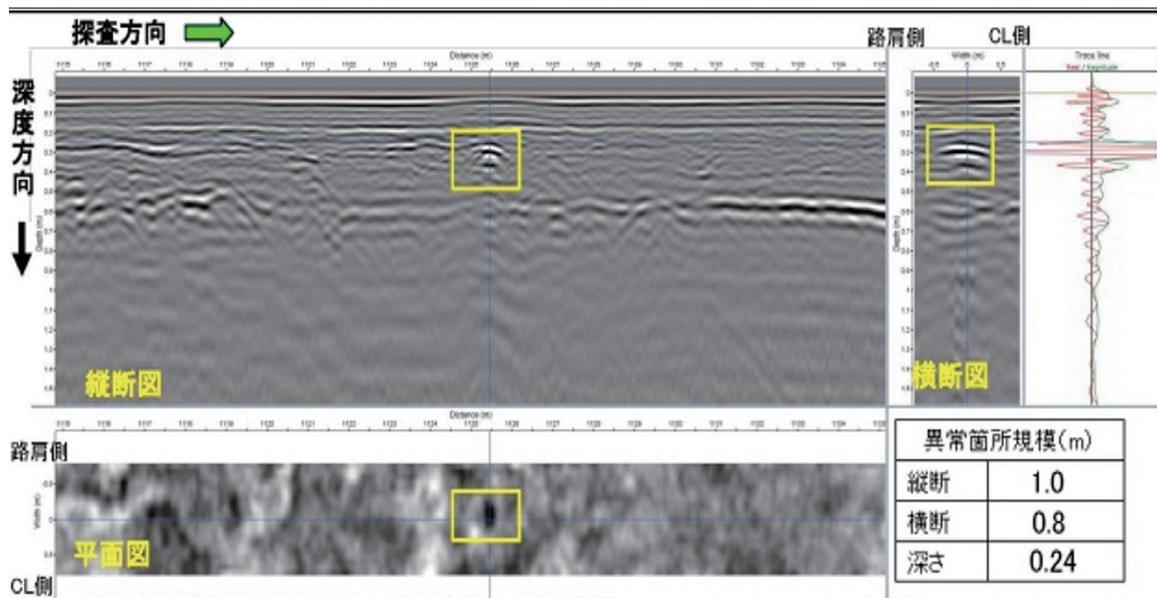


図8 空洞と推定した箇所の地中レーダ探査結果

本調査では、空洞と推定した箇所は7箇所であり、地中部に何らかの異常の信号が確認できた箇所は26箇所であった。

#### 4.3 路面の変状と地中レーダ探査結果の比較

表3は、路面の変状と地中レーダ探査の結果を比較したものである。まず、表の左側に対象となる路線番号を表示した。表の中央には、MMS計測結果より確認できた変状の陥没量として、陥没の深さと陥没の大きさ(長さ・幅)を表示した。また、表の右側には、地中レーダ探査結果より、空洞と推定した信号の有無、埋設管特有信号の有無、反射信号の強度、地表付近の層状凹波形の有無について示した。

表3の結果から、路面の変状箇所では地中レーダ探査により、以下のような特徴的な信号が確認された。

- 1) MMSによる路面の変状がある箇所では、空洞と推定した箇所が検出されなかった。
- 2) 地中レーダ探査で空洞と推定した箇所にも、路面に変状が見られなかった。
- 3) 一部の路面の変状箇所では、埋設管の特有の信号が検出された。

4) 一部の路面の変状箇所では、反射信号が強く、かつ、地表付近の層状凹波形が見られた。

5) 一部の路面の変状箇所では、反射信号が弱く、かつ、地表近くに周囲とは異なる波のような波形が見られた。

ただし、表3の路面の変状の深さや大きさと、前述の特徴的な信号との相関は、確認することができなかった。

#### 4.4 地中レーダ探査結果による路面変状の原因の推定

図9は、変状の原因を、地中レーダ探査結果から得られた3つのパターンと陥没原因の推定結果である。上段は地中レーダ探査結果、中段にMMS計測結果、下段に陥没の要因として推定できる事項を対比したものである。パターン1では、地表付近で比較的強い反射信号が局所的に認められる箇所である。路面の陥没が地中部に影響していると考えられることから、路盤や路床部の緩みにより、陥没が生じたものであると推定される。パターン2は、局所的に強い反射信号が認められない箇所である。地中部に局所的な反射信号等の特異な反射が認

表3 路面の変状箇所と地中レーダ探査の比較結果

路線番号	MMS 計測結果			地中レーダ探査結果			
	陥没量			① 空洞と推定 される信号	② 埋設管 特有信号	③ 反射信号 の強度	④ 地表付近の 層状凹波形
	深さ (mm)	長さ (cm)	幅 (cm)				
路線 1-1	82	150	210	—	—	強	○
路線 1-2	33	210	120	—	—	強	○
路線 1-3	46	80	40	—	—	強	○
路線 1-4	—	—	—	○	—	強	—
路線 1-5	26	250	230	—	—	弱	—
路線 1-6	14	80	180	—	—	弱	—
路線 1-7	16	60	180	—	—	弱	—
路線 1-8	59	60	50	—	—	弱	—
路線 2-1	22	90	60	—	—	弱	—
路線 2-2	31	500	40	—	○	—	—
路線 2-3	21	90	80	—	—	弱	—
路線 2-4	33	110	70	—	○	—	—
路線 2-5	—	—	—	○	—	強	—
路線 3-1	14	210	60	—	—	強	○
路線 3-2	18	150	60	—	—	弱	—
路線 3-3	28	230	60	—	○	—	—
路線 3-4	19	240	70	—	○	—	—
路線 3-5	24	180	50	—	○	—	—
路線 3-6	32	210	60	—	○	—	—
路線 3-7	32	110	60	—	○	—	—
路線 3-8	50	230	40	—	—	強	○
路線 3-9	52	110	70	—	—	弱	—
路線 3-10	38	30	30	—	—	強	○
路線 3-11	14	50	60	—	—	強	○
路線 3-12	51	310	90	—	—	弱	—
路線 3-13	48	80	90	—	—	強	○
路線 3-14	—	—	—	○	—	強	—
路線 3-15	—	—	—	○	—	強	—
路線 3-16	—	—	—	○	—	強	—
路線 3-17	—	—	—	○	—	強	—
路線 3-18	—	—	—	○	—	強	—
路線 4-1	29	70	110	—	—	弱	—
路線 4-2	42	90	130	—	—	強	○

められないことから、路面の舗装部の沈下や路面下のごく浅い部分の路盤の緩みであり、転圧不足の影響が関係していると思われる。パターン3は、埋設物と推定した反射信号が確認された箇所、埋設管の損傷や敷設時の転圧不足等により、空隙や緩みが生じ、その後の交通車両の走行荷重により、空隙のゆるみが圧密さ

れ局所的な陥没が生じたと考えられる。

したがって、地中の異状により路面が陥没する場合は、以下の事象が起こっている可能性が高いと考えられる。

- 1) 補修等で埋戻しを行った箇所や舗装時に路盤材等の転圧が局所的に不足している場合で、交通車両の走行荷重等の

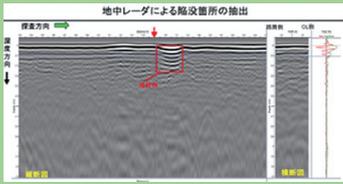
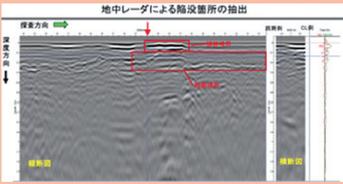
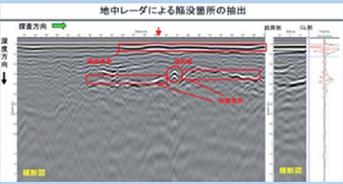
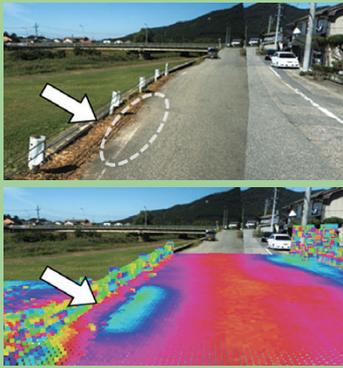
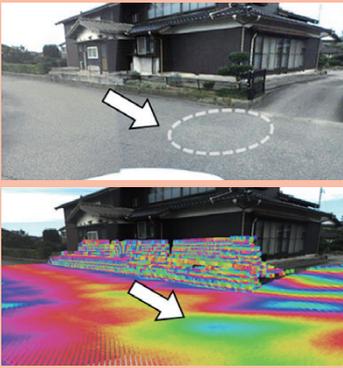
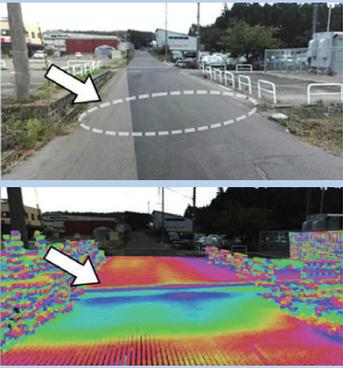
	パターン 1	パターン 2	パターン 3
地中レーダ 探査結果	 <p>【特徴】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・強い反射信号</li> <li>・地表近くに層状の凹波形</li> </ul>	 <p>【特徴】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・微弱な反射波形</li> <li>・地表近くに波のような波形</li> </ul>	 <p>【特徴】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・埋設管特有の信号</li> <li>・上に凸の放射線状の波形</li> </ul>
MMS 計測結果			
陥没原因	路盤のゆるみ	転圧不足	埋設管

図9 地中レーダ探査結果から得られた3つのパターンと陥没原因の推定結果

繰り返しにより陥没する事象

- 2) 路盤以下の地盤の圧密や温度差による舗装材と路盤材との伸縮の差異が起こり、舗装材が変形し陥没する事象
- 3) 路盤や路床部で、埋設管が存在する場合は、埋設管が損傷して、路盤や路床の一部が管内に流入することで空隙や緩みが生じ、その後の交通車両の走行荷重により、空隙や緩みが圧密され局所的な陥没が生じる事象

以上の結果より、MMSの計測結果から確認できた路面に変状がある箇所では、地中レーダ探査結果から空洞と推定した箇所が検出されなかった。また、空洞と推定した箇所にも、路面に変状が見られなかった。一方、変状の原因を、地中レーダ探査の解析結果をもとに推定した結果では、路盤の緩み、転圧不足、埋設管が原因で生じていることが推定された。

## 5. まとめ

本研究では、MMSによる路面性状調査に

合わせて、車両に搭載した地中レーダで路面下の空洞探査を実施して路面の変状と空洞探査結果の関係を調べた。これらの結果を比較して、路面の変状と地中レーダ探査データの関係を考察+するとともに、路面変状の原因を地中レーダ探査の解析結果をもとに推定したものである。

路面の変状と地中レーダ探査結果の比較では、MMSによる路面の変状がある箇所では、空洞と推定した箇所が検出されなかった。また、空洞と推定された箇所は、路面に変状が見られなかった。したがって、本研究の結果では路面の変状と空洞との関係を明らかにすることができなかった。一方、地中レーダ探査の解析結果をもとに変状の原因を推定した結果では、路盤の緩み、転圧不足、埋設管が原因で生じていることが推定できた。

今後は、さらに多くの実証を重ね、MMSで継続的に路面を計測することで、陥没の兆候を把握することを目指したい。

## ■謝辞

本報告にあたり、新潟県村上市建設課の方々より貴重なご意見を賜り、調査成果の使用についてご協力を頂いた。また、本研究をまとめるにあたり、株式会社パスコの島村秀樹氏、橋菊生氏、吉村充則氏、松本正芳氏に貴重な御助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## ■参考文献

- 1) 国土交通省トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会、“トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会 報告書”、pp.1-49,2013
- 2) 国土交通省道路局、“総点検実施要領(案)”、2013
- 3) 前川聡、山下善弘、村上弘行、“路面下探査車「ロードビジュアライザー」の開発”、応用地質技術年報 No.30,pp.81-89,2011
- 4) 田辺政人、城本政一、竹内康、岡澤宏、緑川兼広、“小型 FWD を用いた簡易な路面下空洞調査方法に関する検討”、農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.820-821,2013
- 5) 雑賀正嗣、太田雅彦、ウィルヘルム P.J. ヴァンデルメア、“道路・港湾施設の予防保全

における地中レーダ技術の活用の変遷と成果”、社団法人物理探査学会 第 119 回 学術講演会資料、pp.153-161,2008

- 6) 森充広、長東勇、畑山元晴、“地下レーダ法の測定原理と適用事例”、農業土木学会誌第 67 巻第 11 号 ,pp.1215-1222,1999

## ■執筆者

日當 卓也 (ひなた たくや)

株式会社パスコ

Taatka4101@pasco.co.jp



## (共著者)

本地 光一 (ほんじ こういち)

株式会社パスコ

北川 知秀 (きたがわ ともひで)

株式会社パスコ

安井 嘉文 (やすい よしふみ)

株式会社パスコ

木村 清聡 (きむら きよあき)

株式会社パスコ

藤井 愛子 (ふじい あいこ)

株式会社パスコ

青野 健治 (あおの けんじ)

株式会社環境総合テクノス