

走行型 3次元路面下診断システムの概要

ジムス・ケー

GIMS-K (Ground Image Mapping System-K)

MMS と GPR の融合

片山 辰雄・青野 健治・加藤 裕将

近年、都市、地方を問わず、道路において年間 5,000 件近い道路陥没事故が発生しており、それに伴う交通災害が社会問題になりつつある。しかし、これまでは空洞発生原因やメカニズムに関する知見は少なく、道路ストックも膨大であることから、陥没の多くが発生事後対応となり、計画的な維持管理には至っていない。道路陥没事故を未然に防ぐためには、陥没事故が生じる前に陥没原因である空洞を非破壊で効率的に調査し、陥没に至る前の路面や路面下の変状といった前兆シグナルを捉えることが必要となる。本稿では、MMS と GPR を組み合わせて 2013 年に実用化された走行型 3次元路面下診断システム「GIMS-K」(以下「本システム」という)の概要と本システムの有効性について述べる。

キーワード：維持管理、道路陥没、MMS、GPR、予防保全

1. はじめに

道路法では、道路管理者の安全な通行確保の責務として「道路を常時良好な状態に保つように維持し、修繕し、もって一般交通に支障を及ぼさないように努めなければならない」と定められている。しかしながら、近年の厳しい財政状況から公共事業予算の削減が行われており、例えば国道における道路事業費と維持管理費の推移をみても、過去 10 年で道路事業費は平成 15 年度をピークに減少しており、維持管理費も年々減少し、道路事業費に占める割合は平成 23 年度で約 15% となっている。国道の路面および路面地下の管理に関しては、定期的な道路パトロールのほか、路面性状調査や路面下空洞調査が実施されているが、国道延長(国管理 22,362 km, H24 年)は道路総延長(1,210,600 km, H22 年)の 2% 程度に過ぎないことから、都道府県道、市町村道についても調査の必要性が高まっているほか、適切な維持管理の実施のため、アセットマネジメントの導入も検討されている。

重要な資産である道路ストックを長期的に安全に使用し、ライフサイクルコストを低減するためには、定期的な点検と補修により事後対策的な大規模修繕を回避する予防保全の推進が不可欠である。

道路陥没は、道路上を通行する車両等の荷重を道路舗装部が支えきれなくなることにより突然発生し、陥没規模が大きい場合は、通行車両等の転落事故を招き、人身災害を引き起こすことから、近年特に対策が

急がれている道路災害の 1 つである。道路陥没の主な原因としては、路面下に埋設されている管の破損・劣化や道路開削工事の際の埋め戻し転圧不足等が考えられ、空洞発生後、路盤や路床材が流出することで空洞が拡大し、陥没に至るものと想定される。国土交通省の調べでは、下水道管渠に起因した道路陥没件数だけでも、平成元年以降、年間 4,000 件以上生じており、平成 22 年度には 5,300 件の道路陥没が生じ、年間の発生件数はほぼ横ばいで推移している。

道路陥没事故を未然に防ぐためには、陥没危険箇所を推定するために路面下の空洞の有無を確認し、早期に空洞充填などの陥没防止対策を講じる体制構築が重要である。

このうち、路面下の空洞の有無を把握できる調査手法として地中レーダ探査手法があり、現在では交通規制を行わずに調査を行うことができるシステムが開発されており、国道を中心に調査が行われている。著者らは、道路下の空洞調査を交通規制無しで迅速に行える地中レーダ探査システムと路面の変状状況と探査位置を高速で計測できる高精度 GPS 移動計測システムを併用することにより、より効率的な路面下空洞調査システムの検討を行ってきた。

本稿は、路面下空洞調査と路面変状調査を組み合わせた新しい走行型路面下診断システムの概要について報告するものである。

2. 道路陥没のメカニズム

道路陥没は、「道路上を通行する車両の荷重を道路舗装部が支えきれなくなることにより突然発生する道路災害」と定義され、道路通行上の障害となっている。陥没の原因となる空洞のほとんどは、下水道管渠等の地下埋設物の破損、埋め戻し土の緩み、水道の影響が原因で発生していると考えられている。転圧不足による圧密沈下や地盤内の水の移動によって土粒子が移動し、空洞が発生するものと考えられ、その後次第に路面に向かって拡大上昇し、舗装直下付近まで空洞が達した後に、舗装上を走行する車両等の荷重に舗装部が耐えられず、ある日突然陥没が発生するものと考えられる(図-1)。このようなメカニズムのなかで、路面下の空洞もしくは路面の変状を捉えることができれば陥没に至る前に対策を実施することが可能となるが、両者を同時に測定し、組み合わせて評価することでより確実に早く陥没につながる危険度が高い箇所を抽出することが可能になると言える。

3. 各調査システム

(1) MMS (Mobile Mapping System : 高精度 GPS 移動計測装置)

MMSはGPSとIMU(慣性姿勢計測装置)およびオドメトリにより車輛の位置・姿勢を計算し、車輛に取り付けられたレーザスキャナとカメラにより道路周辺や路面の三次元地形モデルを計測するものである。レーザスキャナ等の計測に必要な機材は車輛の天端に取り付けられている。

制限速度内の走行で、路面および道路周辺地物の3次元点群データを効率的に取得でき、撮影した画像から点群をカラー化することにより正確かつ精密な現況把握が可能である。取得した3次元点群データから、地図情報レベル500相当の数値地形図を作成すること

ができることから、近年は公共測量においても利用実績が増加しており、国土地理院によるマニュアル整備も進んできている(例えば「移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル(案), H24.5」)。また、走行しながら周辺画像を連続的に取得していることから、それを利用して路面オルソ画像を作成し、ひび割れや補修跡といった路面の状態を把握することができる(写真-1)。このオルソ画像は衛星写真では不可能なトンネル内や高架下の画像も取得できる。



写真-1 路面オルソ画像

通常の管理では詳細な位置特定が難しい、路面表示やマンホール、電柱、道路標識といった道路付属物をMMSで取得した道路周辺環境の道路画像と3次元点群データから判定し、正確な位置情報として管理できる。これにより、路面表示や道路付属物を道路データベースとして利用し、道路インフラの統合的な維持管理システム構築に役立てることができる。

(2) GPR (Ground Penetrate Radar : 地中レーダ探査)

地中レーダ探査は、送信アンテナから地中に発射した電磁波が地中で反射して受信アンテナで捉えられるまでの伝播時間を計測して、地盤構造や埋設物の位置や形状を画像化する探査法である。反射波を並べた断面または画像処理した断面に現れるパターンから、埋

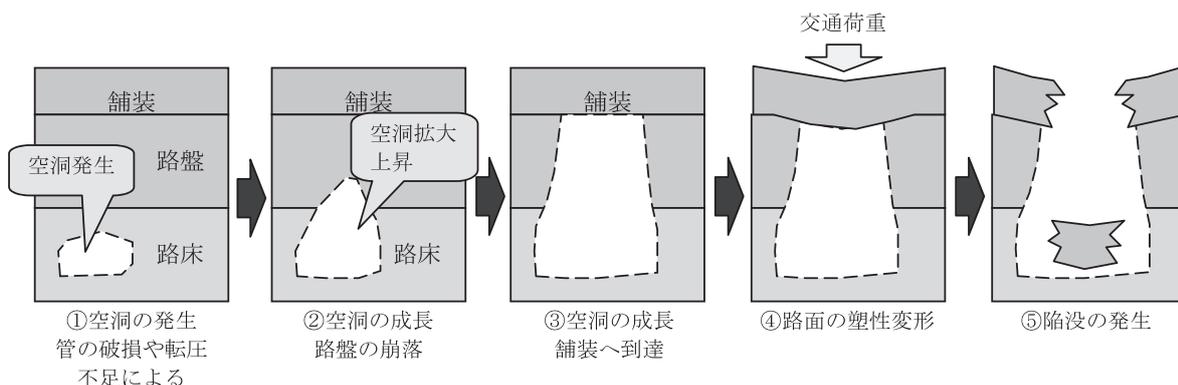


図-1 空洞発生メカニズムの一例

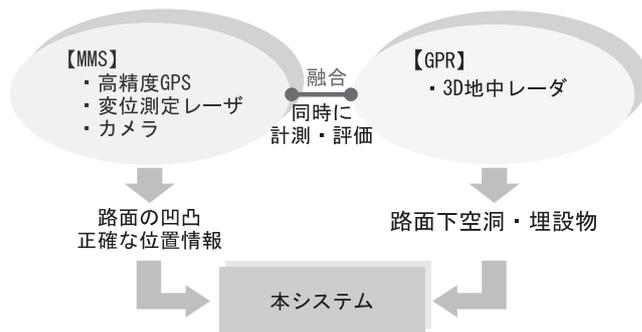
設物や地下構造の形状を推定する。

地中レーダ探査は、操作用 PC、コントローラー、送受信アンテナで構成される。送受信アンテナは、多数のアンテナが 7.5 cm 間隔で千鳥に配列されており、各々のアンテナから送信される電磁波は、一般の単数アンテナ型のレーダのように特定の周波数を持つパルスが送信されるのではなく、200 MHz ~ 3 GHz の周波数帯域の電磁波をステップ的に送信することができるため、深さ数 10 cm の比較的浅い地盤から深さ 1.5 m 程度の深い地盤まで、深さに応じた分解能で結果を出力できる。空洞や埋設物、地層境界など電気的特性（比誘電率）の異なる境界面で反射された電磁波を受信アンテナで受信し、操作用 PC に記録される。

測定は、アンテナ幅 1.8 m のものであれば、21 チャンネルの送受信アンテナによる測定が 1 回の測定で行うことができ、それぞれのアンテナで受信された反射波は、PC 上には統合化したデータとして記録される。したがって、アンテナ配列長さ分の測定データが得られるとともに、配列されたアンテナからの反射データを統合し、アンテナ幅での横断方向の測定データも同時に記録できる。さらに深さ位置の水平断面データも得られることが特徴である。なお、開発に先立ち、アンテナの能力確認と検証のため、模擬空洞や埋設管を配したモデル地盤で探査を実施し、性能確認を実施している。

4. 本システムの開発

図一 2 のコンセプトをもとに開発した本システムは、2tトラックをベース車両とし、車両天端に MMS 構成機器（GPS 3 台、レーザスキャナ 3 台、デジタルカメラ 3 台、IMU、オドメトリを各 1 台搭載）、車両後方に GPR を搭載している（写真一 2）。車両キャビン内にパソコン等が配置され、調査員が計測を実施する。計測は MMS、GPR とともに一般車両と同等速度で



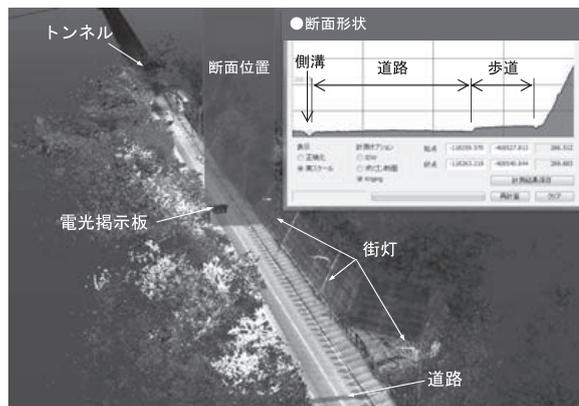
図一 2 システム開発のコンセプト

の走行で実施可能であり、交通規制等を必要としないことから長距離を迅速に調査することが可能である。調査後、解析により異常点の正確な座標が得られることで、スコープ調査や開削調査といった空洞を直接確認する 2 次調査をより効率的に実施することができる。

図一 3 は MMS で計測した道路周辺の点群である。同時に撮影した写真と重畳させることによりカラー化している。各点は 3 次元座標を持っており、標高による点群の色分けや、道路縦断・横断等断面位置計測、面積計測にも利用できる。また、図一 4 は、道路端の白線や縁石を基準高さとして相対的な道路変状を色分けで表示したものである（基準線コンター図）。通常、道路中央は排水勾配があるため、両端に比べ高くなっているため、寒色で表現される。わだちや凹凸等の変状も表現され、写真で確認できるため路面の損傷箇所等を確認することができる。ただし、基準高さとした白線や縁石に変状が見られた場合、路面の変化を正確に捉えることができないため注意が必要である。また図一 5 は数ヶ月間隔で実施した 2 回の測定において基準線コンターで使用した白線等を基準に点群の重ね合わせを行い、路面の経時変化を算出し、色分けで示したものである。色分けの幅を -5 mm、-10 mm、-15 mm と変化させることで変状の大きい箇所



写真一 2 GIMS-K 車両外観



図一 3 MMS による点群画像

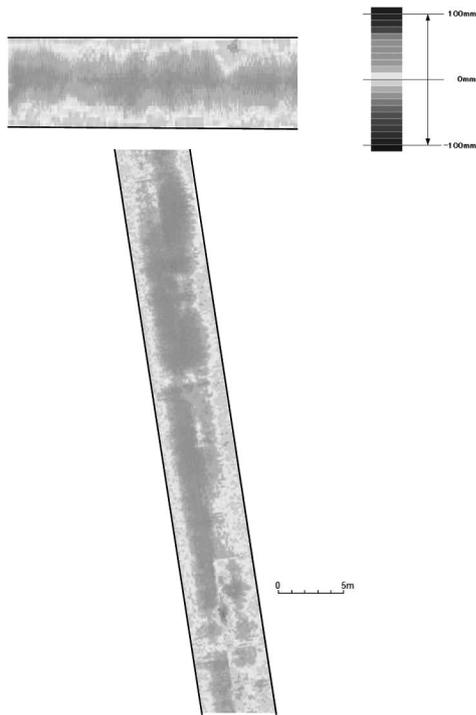


図-4 路面凹凸の基準線コンター図。路面の変状を把握

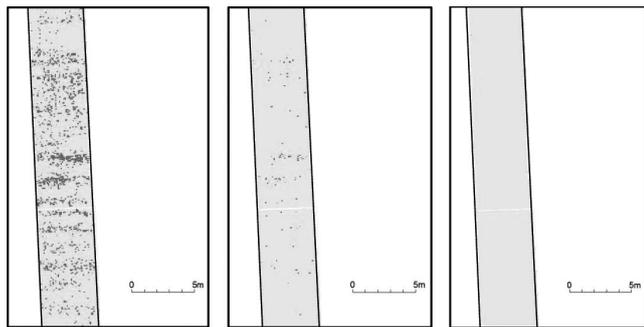


図-5 路面凹凸の経時変化図の絞込み。左から-5mm, -10mm, -15mm 変化点を黒で表示

を絞り込んでいくことができる。

図-6はGPRで捉えた空洞波形の例である。車両搭載のGPRは1.5m幅で探査でき、3次元的に波形を確認できるため、1測線毎に調査を実施する単周波数のハンディ型レーダ探査に比べて作業が効率的であ

り、異常箇所の見落としの減少が期待できる。この波形で示した空洞はGL-0.2m付近に位置しており、陥没につながる危険性が高いと考えられ、2次調査（スコープ調査）を実施した結果、空洞が確認された。その異常点位置はMMSの位置情報から座標で与えられ、写真上に点としてプロットできるため、2次調査の現場位置特定精度が高い。さらに周辺地物との距離も専用ソフト上で計測可能であるため、図面作成や投影が容易である。これにより2次調査時に実施する削孔位置確定のためのハンディ型地中レーダ探査の範囲を絞り込むことができ、交通規制範囲も短くすることが可能である。その結果、2次調査の1箇所にかかる時間を短縮することができ、効率的である。また、複数回測定において空洞の経時変化を3次元的に捉えることができる可能性があり、継続的なモニタリング調査にも有効である。

調査により得られた路面周辺および路面下の情報を国や自治体が保有する道路台帳、河川台帳、下水道台帳と融合させ、各種GISへ反映することにより、多角的な視点で道路ストックの管理を行うことが可能となる。これにより、危険性の高い不具合箇所を絞り込むことで、限られた予算のなかで対策の優先順位をつけることができる可能性がある。

5. おわりに

道路陥没は、原因となる空洞の発生→空洞の成長→陥没、というプロセスで起こるが、空洞発生からできる限り早い段階でその変状を捉えることができれば、予防保全として大きな効果が期待できる。本路面下診断システムは、路面および路面下の変状を同時に調査し、評価を行うものである。膨大な道路ストックを対象に本調査を実施していくための今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- 1) 調査目的に応じた計測、解析パラメータの設定

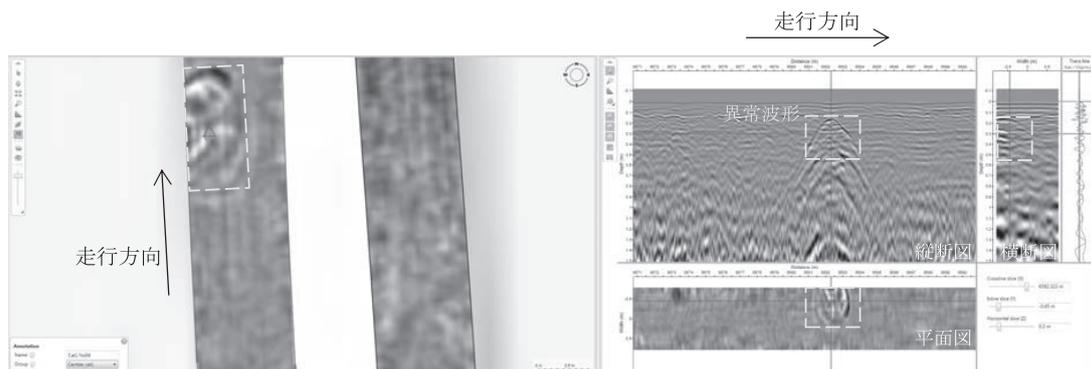


図-6 GPR 空洞波形の一例

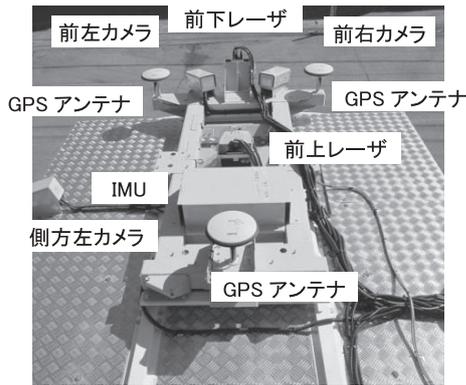


写真-3 MMS 構成機器外観

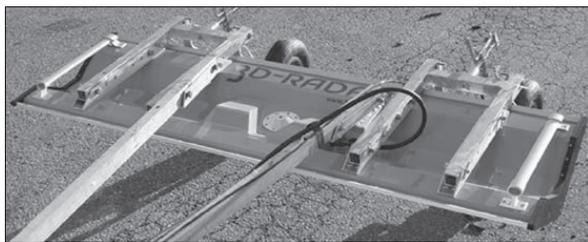


写真-4 GPR アンテナ外観

- 2) 解析の自動化推進 (MMS: 変状抽出, GPR: 異常波形抽出)
- 3) 空洞の成長速度, 空洞の成長と路面変状の関係の把握
- 4) コンターの基準となる不動点の設定方法
- 5) 空洞ボリュームの把握

各課題への対応としては、以下のとおりである。

- 1) 検証フィールドでの試験, 調査データと確認調査結果との整合性検証
- 2) 解析ソフトの改良, 高度化
- 3) 調査データの蓄積, 分析
- 4) 白線以外に基準線を設定し, 解析・評価を実施
- 5) 調査データとスコープデータ, 開削データとの比較検証

今後、調査データの蓄積、分析、整理を行っていくことで、最適な計測、解析パラメータの設定が可能になると考えられる。また、各システムでは、一度に大量の測定データが得られることから、測定データの処理、解析、保管方法についての効率化、高度化を図ることも重要となる。空洞を調査していくうえでは、地

中レーダによる情報、MMSによる情報だけではなく、舗装厚や路盤厚などの舗装情報、管渠情報などの埋設物情報、地盤・地形・地下水などの自然条件、工事履歴などを加味して、多角的に評価していくことが重要となる。

本システム走行型3次元路面下診断システムは、現状で路面下空洞、堤防管理用通路、橋梁床版といった調査に用いている。今後は調査対象、目的に沿ったより効率的な調査を提供したいと考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 「国道(国管理)の維持管理等に関する検討会」資料, 国土交通省, 2013.3
- 2) 「路面地下の適切な管理のあり方一報告書一」, 直轄国道の舗装(路面)に関する保全検討委員会, 2011.3
- 3) 佐藤真理, 「道路陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に関する基礎的検討」, 東京大学卒業論文, 2009
- 4) 小池豊, 「スケルカ技術を活用した路面下の三次元探査」, 日本非開削技術協会広報誌, Vol.78, 2012.1
- 5) 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊, 「老朽下水道損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討」, 地盤工学ジャーナル Vol.5, No.2, 349-361, 地盤工学会, 2010.7
- 6) 瀬良良子, 中村治人, 桑野玲子, 「道路路面下空洞の探査事例」, 基礎工, 2013.9
- 7) 片山辰雄, 交久瀬磨衣子, 「下水道管きょの効率的な点検調査技術に関する共同研究について」, 自治労第29回全国下水道集, 2012.5
- 8) 横田敏宏, 深谷渉, 末久正樹, 宮本豊尚, 片山辰雄, 交久瀬磨衣子, 「高精度GPS移動計測装置(MMS)を活用した下水道管渠起因の道路陥没予兆発見手法の検討」, 国土技術政策総合研究所資料 No.750, 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 2013
- 9) 「物理探査適用の手引き」, 物理探査学会, 2000.3

【筆者紹介】



片山 辰雄 (かたやま たつお)
 (株)環境総合テクノス
 土木部 理事・土木部長



青野 健治 (あおの けんじ)
 (株)環境総合テクノス
 土木部 地盤技術グループ マネージャー



加藤 裕将 (かとう ひろまさ)
 (株)環境総合テクノス
 土木部 地盤技術グループ リーダー