

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）	所属		役職
	桑野 玲子（くわの れいこ）	東京大学生産技術研究所		教授
②研究 テーマ	名称	道路構造及び空洞特性に適応した陥没危険度評価と合理的路面下空洞対策についての研究開発		
	政策 領域	[主領域] 領域8：維持管理や 長寿命化対策 [副領域] 領域7：災害時の対応や防災	公募 タイプ	タイプIV
③研究経費（単位：万円） ※H30は精算額、R1は受託額、 R2は計画額を記入。端数切捨。	平成30年度	令和元年度	令和2年度	総合計
	1,797	3,865	4,800	10,462
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏名	所属・役職			
桑野 二郎	埼玉大学大学院理工学研究科 教授			
瀬良 良子	ジオ・サーチ（株）課長			
井原 務	（株）NIPPO 研究次長			
小堀 規行	住友大阪セメント（株） 執行役員・建材事業部長			
⑤研究の目的・目標	（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）			
<p>都市部の路面下空洞を対象とする、検査（調査）、診断、治療（補修）、予防のそれぞれの段階における課題を解決するために、既存の空洞データの分析、室内模型実験、数値解析、実物大フィールド実験、現道における空洞モニタリング等を実施し、路面下空洞の生成要因や拡大過程・陥没危険度を解明し、併せて空洞探査の高度化と空洞特性に応じた適切な補修方法を開発することにより、道路管理者に発信し得る「調査計画・空洞探査・空洞補修に係る一連の合理的プロセス」、即ち道路陥没予防ソリューションを開発する。</p>				

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでに得られた研究成果や目標の達成状況とその根拠（データ等）を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。)

目標としているソリューション（陥没予防のための合理的プロセス）開発へ向けた進捗状況とこれまでに得られた具体的成果の概要を、調査、診断、補修、予防のフェーズごとに以下に記す。

調査：

・浅層部空洞探査の精度検証

路面下空洞探査のために実務で用いられている車載型地中レーダの精度を検証した。近年のアンテナの多配列化や解析技術の向上に伴って調査精度は高くなり、平成28-30年の調査実績における的中率（補足調査を実施して空洞を確認した正解率）は88%に達する。また、図1に示すように地中レーダで探知した空洞の最浅部の深さを実測と比べたところ、20cm程度深めに評価する場合があるものの、概ねよい相関が得られた。

これらから、地中レーダ探査技術はほぼ成熟しており、実務に適用するのに十分な精度が確保されていると考えられる

・地中レーダ探査以外の方法の検討、および深層部空洞の探知方法の検討

地中レーダ探査を補完しうるような調査として、路面あるいは地中における波動探査を検討し、基礎実験および数値解析を実施した。

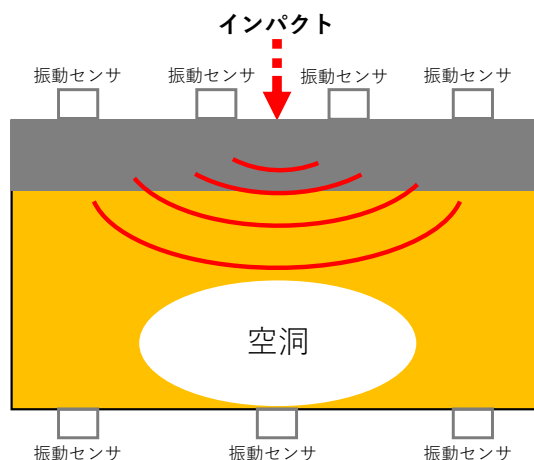


図2. 空洞周りを伝播する波動計測実験

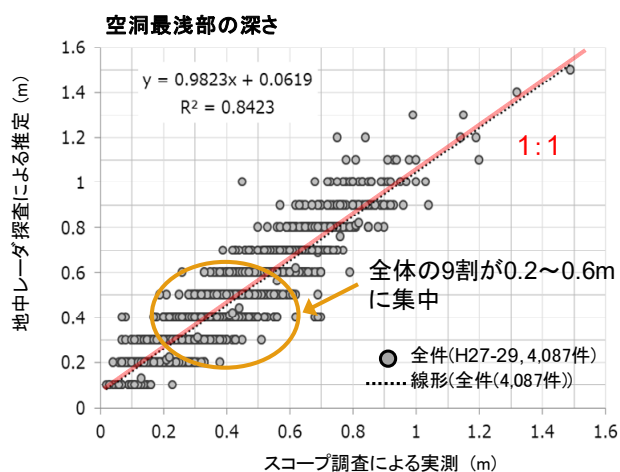


図1. 地中レーダによる推定値と実測値の比較

地中レーダ探査では得られない空洞厚に関する情報や、深い位置の空洞の情報取得の可能性を探るため、路面に設置した振動センサによる波動測定、または下水管内に設置したセンサによる常時微動測定を想定した基礎実験およびDEMによる数値解析を実施した。

空洞の成長と弾性波の速度および周波数特性に相関があることがわかり、波動探査の可能性を引き続き検討している。

また、現道（藤沢市道）の空洞箇所およびその周辺にてFWD試験を実施し、空洞の有無によるたわみ量の違いを測定した。荷重直下の最大たわみ量やたわみ形状のみからは、路面下空洞の影響を明確に整理することは困難であったが、図3に示すように、空洞深さで正規化した空洞幅（空洞短辺長を空洞天井部深さで除した値）について、それぞれの舗装構造に応じて、“一定深度において、空洞幅が広がるほど最大たわみ量大きい”という傾向がみられた。

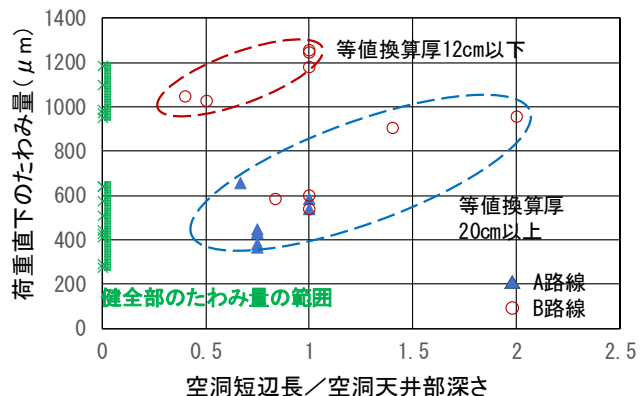


図3. 発生深度で正規化した空洞幅と最大たわみ量の関係

・空洞形状の把握の試み

空洞形状および体積の把握は補修時の充填材ボリュームの算出や空洞生成原因の推察への活用が期待できる。福岡市道で経過観察を継続している空洞を対象として、空洞の三次元形状の把握を試行した。図4に示すように、空洞上部の形状は概ね良好に把握でき、下部のゆるみの進行状況と合わせて、空洞の成長性や発生原因の推定の一助となりうる。引き続き、自動的・合理的な三次元形状測定の開発を目指す。

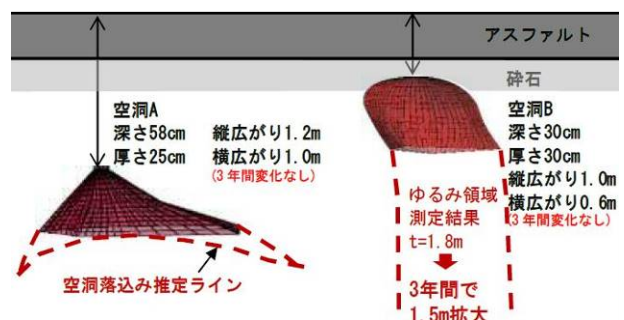


図4. 空洞の三次元計測例

診断:

・空洞生成・拡大メカニズムの解明と陥没危険度評価

①自治体（福岡市、藤沢市）管理道路、および国道の空洞データを分析し、空洞生成における支配要因とその寄与度について検討した。また、福岡市と藤沢市にそれぞれ路線を設定し3～6ヶ月ごとに空洞のモニタリング調査を行った。それらの結果を踏まえ、両市について空洞ポテンシャルマップをそれぞれ試作した。図5に藤沢市の空洞ポテンシャルマップを示す。生活道路が主体であるため、地域の道路密度を適切に反映できるよう現状では250mメッシュごとのポテンシャルとして表現している。引き続きマップの精度検証および改善を進める。藤沢市ではこれを今年度から空洞調査計画に活用開始した。

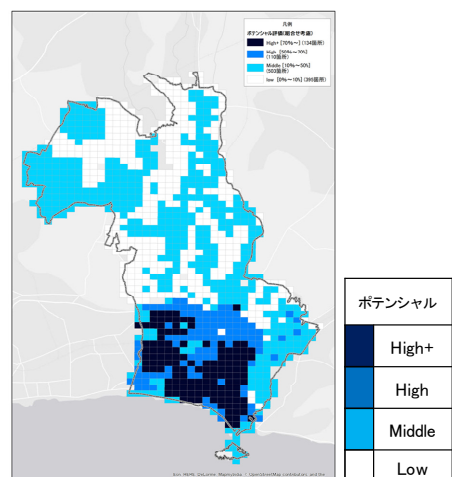


図5. 空洞ポテンシャルマップ(藤沢市)

②模型実験、数値解析により空洞生成・拡大のメカニズムを検討し、陥没危険度チャートのコンセプトを構築した。

模型実験で空洞の成長過程を観察したところ、図6に示すように、均等均質な砂地盤内の空洞が空洞上土塊の自重で崩落・陥没する場合、空洞幅と平均深さは傾き0.2~0.3の関係であることがわかった。さらに、国道における実際の空洞・陥没データと比較すると、図7に示すように、実現象も同様のパラメータで推定可能なことがわかった。すなわち、路盤・路床等地盤の支持力喪失に関する限界状態は、空洞幅(短軸)と空洞天端深さで概ね表現でき、空洞深さと空洞幅の比が0.2を切ると空洞上の土は自重による崩落の危険があるといえる。

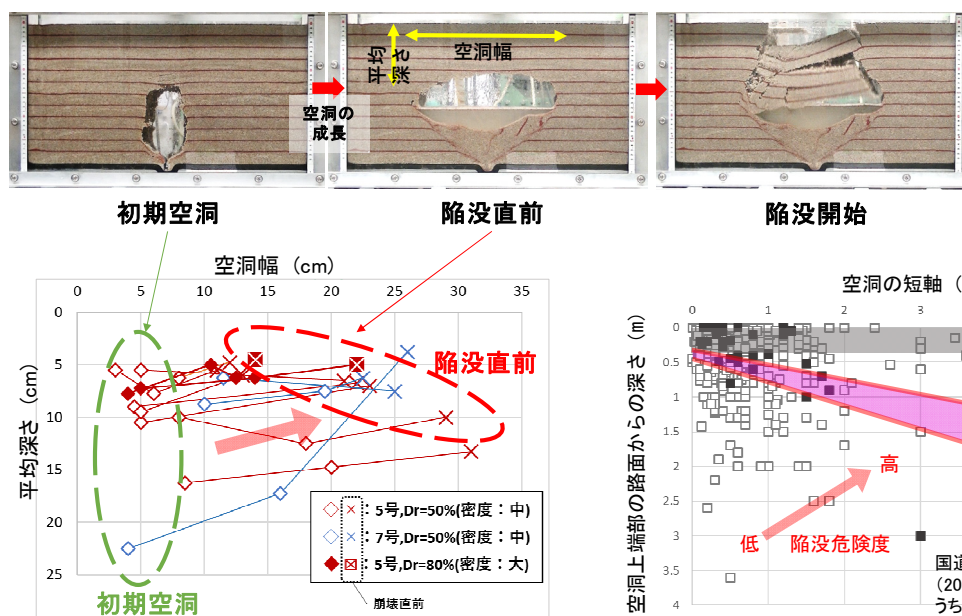


図6. 模型実験で観察された空洞の拡大過程

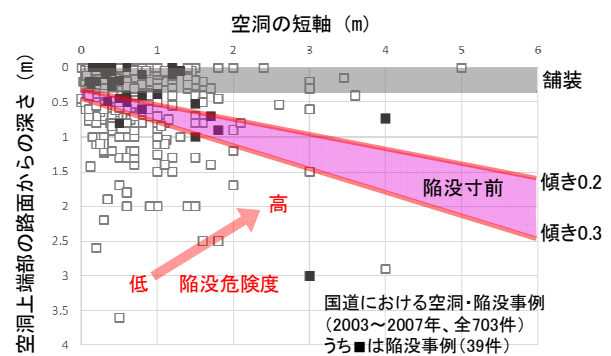
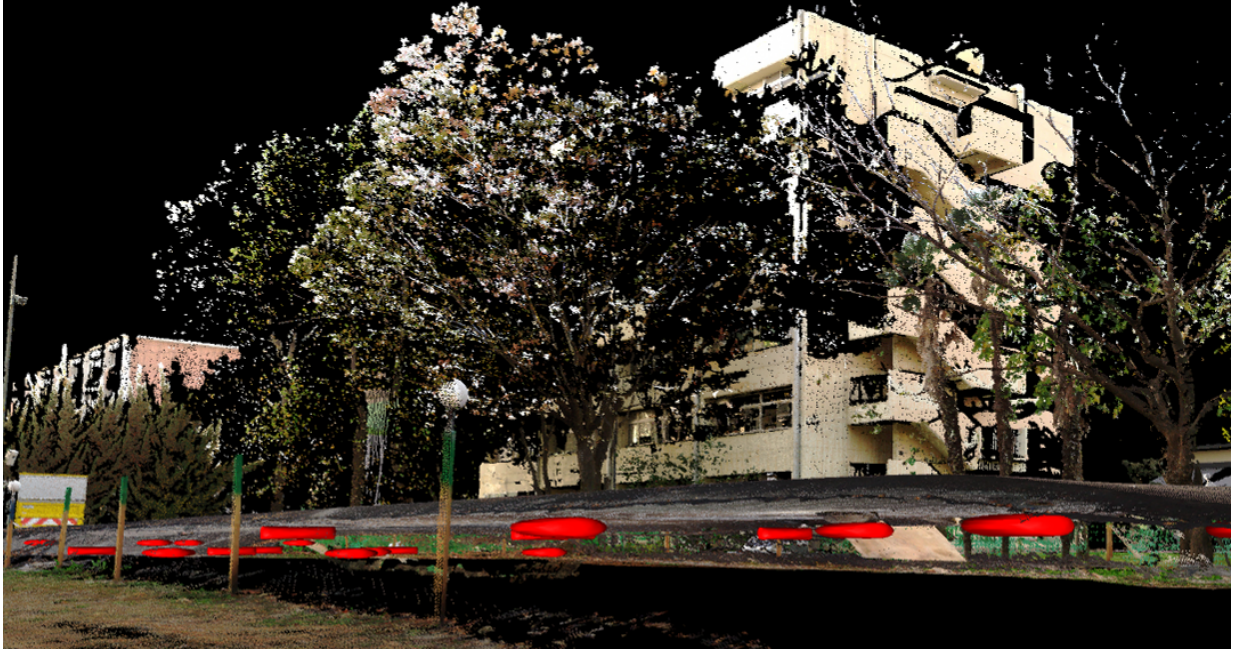


図7. 国道の空洞・陥没事例

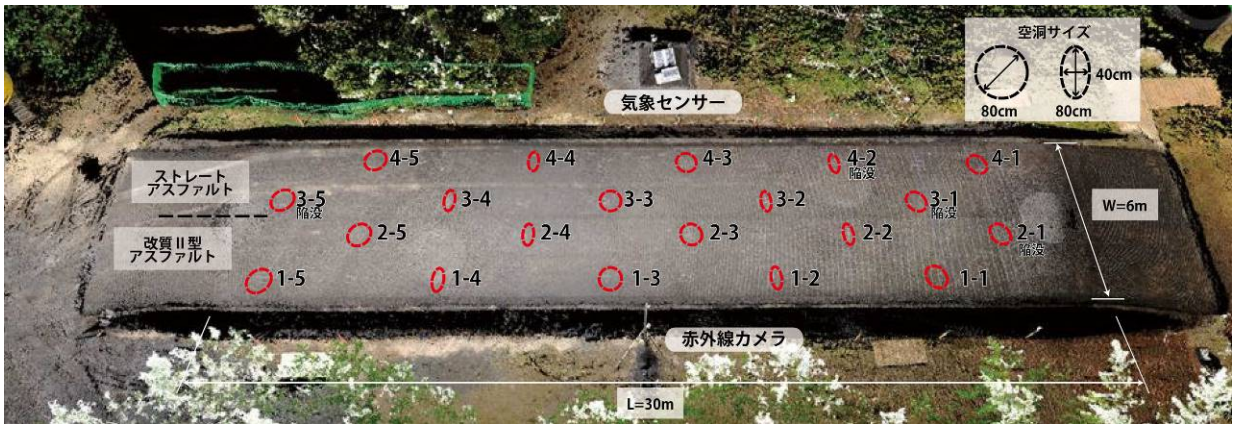
・実物大試験道路の構築と空洞载荷試験

模型実験や既存データの分析で進めてきた危険度評価方法を検証すると共に、舗装構造を考慮した評価方法を開発するために、空洞を設置した実物大試験道路を埼玉大学構内に構築し、種々の試験を実施した。試験道路の概要を図8に示す。試験道路は長さ30m×幅6mで、上層路盤内または上層路盤直下に、径80cm、または長径80cm×短径40cmの空洞(厚さは全て10cm)を計20個設置した。空洞は、細礫を詰めた土嚢を路盤内に設置した上に表基層を転圧し、路面から削孔して礫を吸引することで人工的に空洞を作成した。舗装は、表層をストレートアスファルトと改質II型アスファルトの2種類とした。また、気象センサを設置し、雨量、気温等の基本的気象データを取得すると共に、赤外線カメラで路面温度も常時測定している。これら条件下で空洞内部状況の観察、FWD試験、小型FWD試験、平板载荷試験等を実施し、空洞サイズ、深さ、舗装構造と支持力との関係を検討した。試験状況の例を図9に示す。引き続き、作成した空洞と空洞上舗装のモニタリングを継続すると共に、試験道路の一部を取壊し・再構築して次年度の試験の準備を進めている。

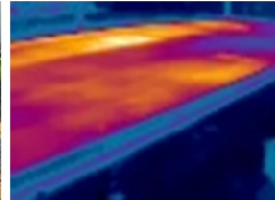
実物大陥没試験道路 延長 30m×幅員 6m [点群+空洞 三次元合成図]



空洞配置図 [人工空洞 20 か所]



気象センサ・赤外線カメラでの常時観測



空洞深さ

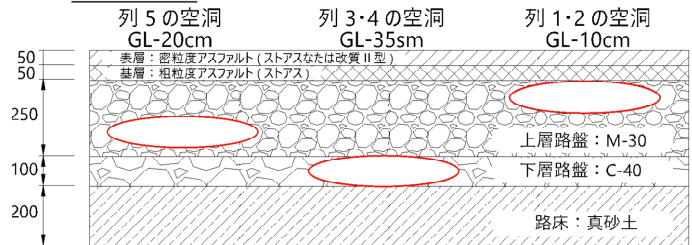
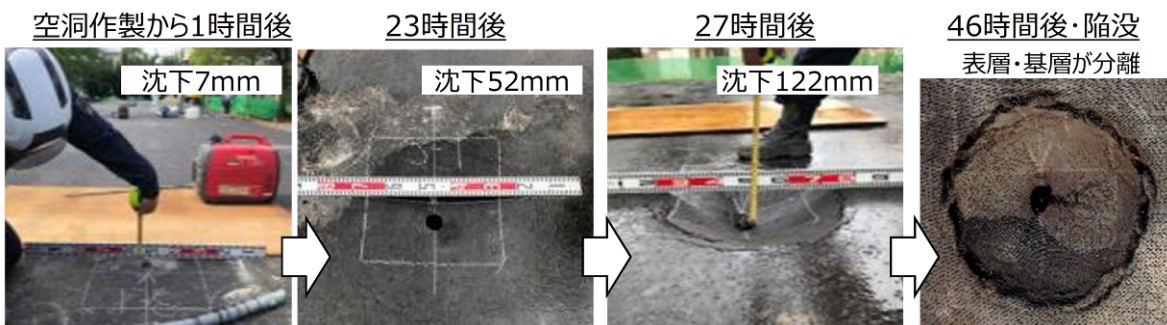


図 8. 実物大試験道路の概要

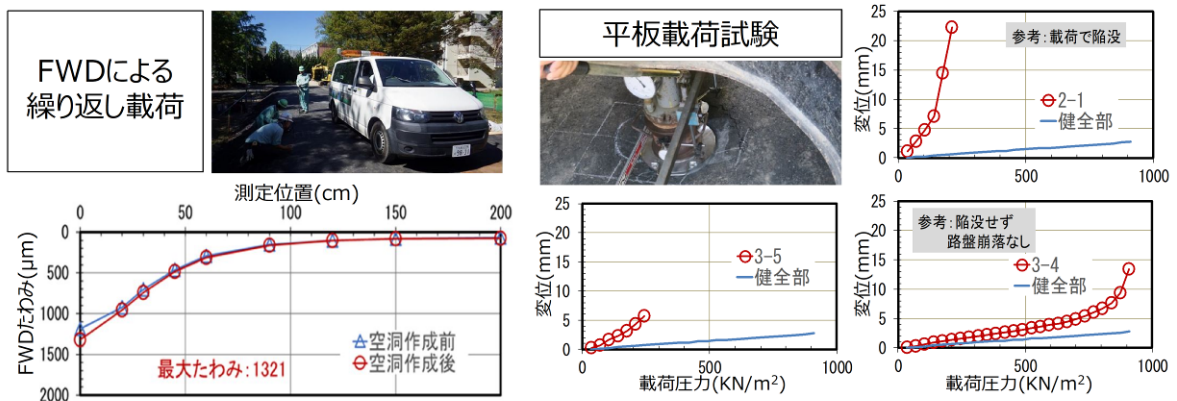
試験体の構築・・・細礫詰め土嚢を路盤内に設置し舗装を敷設、その後細礫を吸引し空洞生成



自然陥没 [ストAs・As直下(Dp10cm)・φ80cm・舗装温度約40℃]



空洞载荷試験の一例 [ストAs・上層路盤内(Dp20cm)・φ80cm・舗装温度約40℃]



载荷試験による舗装断面の変化[上層路盤が崩落]

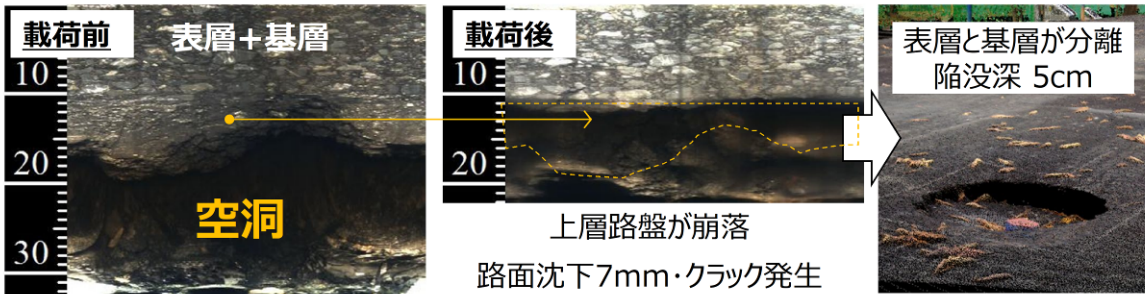


図9. 実物大試験道路の構築および陥没試験の例

補修：

・ 空洞充填材の開発

路面下空洞用の充填材として、当初、充填性（空洞の隅々まで充填されるような十分な流動性）の良い材料開発を目指していたが、現道における空洞充填において下水道への漏出が懸念される事象があり、開発目標を変更し、新規空洞補修用充填材の目標物性を、①可塑性（チキソ性）、②水中不分離性、③分離抵抗性、④単位容積質量（軽量、1.0以下）、⑤一軸圧縮強さ（再掘削性を考慮）、⑥速硬性、とした。新規空洞補修用充填材による空洞補修の考え方として、1)流動性を抑制し埋設管破損部からの漏出を防止すること、2)空洞を空隙なく充填することに拘らず、ある程度空隙を残したとしても陥没防止のための応急処置と考え、陥没危険度の低下と陥没の抑制を図ることとした。

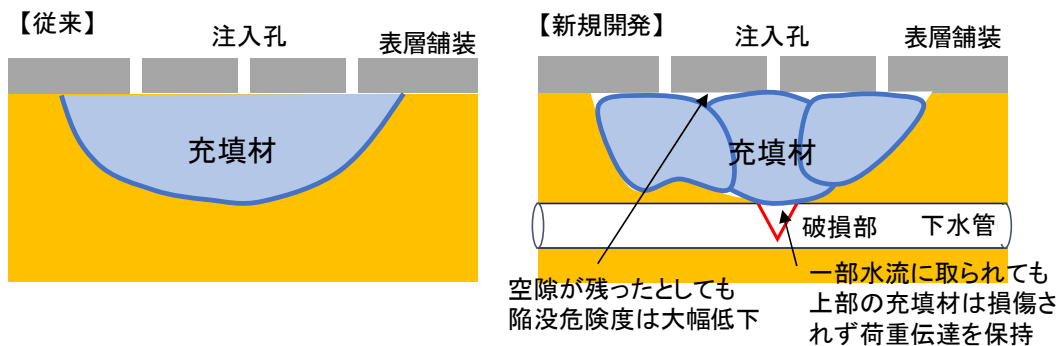


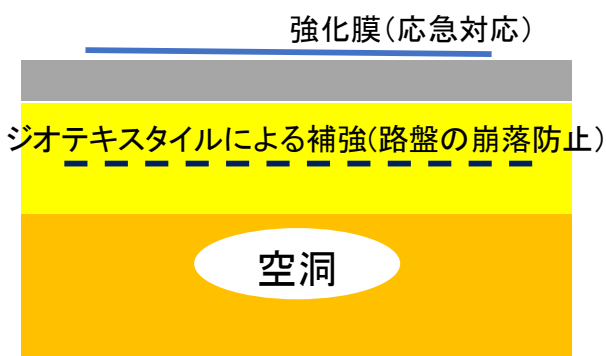
図10．空洞充填材のコンセプト

開発中の充填材は、実物大試験道路で充填試験を実施し、充填性や支持力を確認した。引き続き検討を進めると共に、特許出願を予定している。

(陥没) 予防：

・ 舗装の補強方法の開発

空洞生成・拡大の素因を有する、空洞ポテンシャルの高い路線や地域において、路面下に空洞が生成したとしても容易に陥没しにくいような舗装構造の補強方法を検討している。



路盤内または路盤上に補強材を敷き補強する方法について基礎実験を実施し、効果を確認した。また、主に空洞補修までの応急対応策として、空洞上の路面表面に補強剤を塗布し強化膜を作ることにより補強する方法も検討している。

両方法について、来年度実物大試験道路で検証する準備を進めている。

図11．路盤または路面の補強による陥没抑止

⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

本研究の成果を、学術誌、国際学会、国内学会で発表した。主な成果の17編を以下に示す。

- ・ 桑野玲子 (2019), 総説：陥没を引き起こす地盤内空洞, 地盤工学会誌, Vol.67, No.8, 1-3.
- ・ 西山博光, 藤井邦男, 瀬良良子, 桑野玲子 (2019), 官学産連携の路面下空洞対策の取り組みー路面下空洞の開削調査事例ー, 地盤工学会誌, Vol.67, No.8, 12-15.
- ・ 桑野玲子 (2019), 路面下空洞の生成メカニズムと道路陥没対策, 基礎工, Vol.47, No.12, 3-6.
- ・ Tang TINGSHEN, 桑野玲子, 瀬良良子 (2019), 路面下空洞充填材の浸透挙動における周辺地盤の影響, 第54回地盤工学研究発表会, さいたま, 2019年7月, 543-544.
- ・ 大原勇, 桑野玲子, 瀬良良子 (2019), 模型実験および陥没事例の分析に基づく陥没生成メカニズムの検討, 第54回地盤工学研究発表会, さいたま, 2019年7月, 1463-1464.
- ・ 濱也幸樹, 大野敦弘, 徳永珠未, 瀬良良子, 桑野玲子 (2019), 合理的路面下空洞対策に向けた空洞探査精度の現状と課題, 第54回地盤工学研究発表会, さいたま, 2019年7月, 3-4.
- ・ 中田祐輔, 桑野玲子, 大坪正英 (2019), 弾性波伝播特性における地盤内空洞の影響に関する基礎的検討, 第54回地盤工学研究発表会, さいたま, 2019年7月, 803-804.
- ・ 小暮峻矢, 桑野二郎, Sahil, A.W. (2019), ジオグリッドの敷設が繰り返し载荷に伴う模型地盤の沈下に及ぼす影響, 第54回地盤工学研究発表会, さいたま, 2019年7月 1111-1112.
- ・ 濱也幸樹, 瀬良良子, 佐藤雅規, 大野敦弘, 徳永珠未, 加納晋太郎, 浅見文美恵, 桑野玲子 (2019), 道路陥没対策に求められる空洞情報高度化のための基礎的検討, 第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム(札幌), 2019年9月.
- ・ 徳永珠未, 瀬良良子, 佐藤雅規, 大野敦弘, 濱也幸樹, 加納晋太郎, 桑野玲子 (2019), 道路陥没対策における空洞探査能力の指標化の意義と現状分析, 第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム(札幌), 2019年9月.
- ・ 桑野玲子, 井原務, 室井和也 (2019), 路面下空洞の陥没危険度評価のための影響要因の検討, 第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム(札幌), 2019年9月.
- ・ Kuwano,R., Ohara, Y. and Sera,R. (2019), A study on the potential size of subsurface cavities in sandy soil, 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Taipei, Taiwan ROC, Oct. 2019, SA06-005.
- ・ Sera, R., Kuwano,R. and Hotta,M. (2019), Development of Subsurface Cavity Potential Map for Prevention of Road Cave-in, 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Taipei, Taiwan ROC, Oct. 2019, SI14-005.
- ・ Soe, A.A., Kuwano, J. and Kogure, T. (2019), Estimating the confinement zone of geogrid-stabilized aggregate layer by means of direct shear test, 16th Asian Regional Conference, Taipei, Taiwan ROC, October 2019, #73.
- ・ 井原務, 桑野玲子 (2019), 路面下に空洞発生した舗装の構造特性と路面性状について, 第33回日本道路会議, 2019年11月
- ・ 室井和也, 桑野玲子, 井原務 (2019), 路面下空洞の発生位置に対する舗装のFEM解析による陥没予測の検討, 第33回日本道路会議, 2019年11月
- ・ Tan,T., Kuwano,R., Kozakai,N. and Kinjo,M. (2019), Development of Grout for Filling Subsurface Cavity, 18th International symposium on new technologies for urban safety of mega cities in Asia, USMCA, Yangon, December 2019, CD-ROM.

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

研究期間終了後に実務への展開が期待できる主な具体的成果とそれらの活用方法を以下に示す。なお、合理的な道路維持管理において、空洞調査・診断・補修・予防の対応を一貫して実施することが重要であり、ソリューションパッケージとした提案を目指す。

・空洞・陥没ポテンシャルマップ

道路維持管理の計画策定において、道路管理者の空洞探査計画の参考情報として活用できる。藤沢市では道路・下水道管理者が本研究で試作したポテンシャルマップを活用して維持管理計画を立案している。

・陥没危険度チャート

空洞の危険度判定は実務において喫緊の課題であり、現状では経験値に基づいたチャートが慣用されている。それらに科学的根拠や信頼性を付加し、国が策定作業を進めている技術ガイドラインに反映することにより道路管理者に提供する。

・陥没危険度に応じた補修・補強メニュー

路面下空洞に特化した充填剤、路面または路盤の補強による陥没抑制など、補修・補強メニューを提示し、空洞特性および周辺状況に即した対応方法を提案する。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

本研究を通じて、従来推測や漠然とした知見しかなかった事に対して、定量的な評価が可能となるような分析や事例収集が進んだ。室内試験、実物大試験道路、現道であらゆる角度から空洞～陥没～補修へのプロセスを観察し、⑥に示したように、様々な重要な知見が得られた。現時点において当初から想定していた以上の成果が得られ、研究を深化させる推進力となっている。また、今後実務への迅速な展開も可能と考えている。

特筆すべき事項として、本研究のアウトリーチ活動および情報収集の機会として、東京大学生産技術研究所にて、2019年11月13日に第1回空洞連絡会シンポジウムを開催した。国・自治体等の道路管理者、下水道管理者、鉄道管理者、インフラの維持管理に関わる民間企業の技術者を含む総勢約170名で、合理的陥没対策に向けた今後の方向性を議論した。また、翌11月14日には、100名以上の参加者を得て実物大試験道路の見学会を開催した。本問題に対する社会的要請および関心の高さを実感し、全国の陥没対策に関わる施設管理者間の連携強化とその継続が重要であることを再認識した。本研究の確実な成果とその継続的な発信を期するものである。

