

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

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	公募 タイプ	タイプIV		
	[副領域] 領域7： 災害時の対応や防災					
③研究経費 (単位：万円) ※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと	平成30年度	令和元年度	令和2年度	総合計		
	1, 797	3, 865	2, 996	8, 658		
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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 (※令和3年3月31日現在)				
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) 部長				
井原 務		(株) NIPPO 研究次長				
小堺 規行		住友大阪セメント (株) 執行役員・研究所長				
⑤研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)						
<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・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

道路陥没予防ソリューション開発という目的を達成するため、路面下空洞の調査・診断・補修・予防などの各段階の技術開発を目指した。空洞探査、道路舗装、充填材開発等それぞれの領域の専門家の共同研究体を組織して研究を実施した。各検討項目と得られた具体的成果、研究の体制および役割分担を以下に示す。

	検討項目	具体的成果	
調査	空洞探査方法の高度化と精度検証 空洞生成・拡大に寄与する環境要因の分析	地中レーダ探査の適用範囲と精度検証 空洞体積・形状測定方法の開発 空洞ポテンシャルマップの開発	研究代表者：東京大学 桑野玲子 役割：研究総括 空洞の生成・拡大メカニズムの解明、陥没危険度評価
			共同研究者：埼玉大学 桑野二郎 役割：空洞の地震時挙動の解明、舗装補強
診断	空洞拡大メカニズムの解明 空洞の陥没危険度評価	陥没危険度評価指標の提案	共同研究者：ジオ・サーチ(株) 瀬良良子 役割：調査計画、現道モニタリング
			共同研究者：(株)NIPPO 井原務 役割：実物大試験道路、舗装補強
補修 予防	空洞補修および陥没予防方法の検討	空洞補修充填材の開発 路面補強・路盤補強方法の開発	共同研究者：住友大阪セメント(株) 小塚規行 役割：空洞充填剤の開発
			研究協力者：福岡市、藤沢市、他協力自治体 役割：モニタリング路線提供、関連情報提供
			外注：現道における作業時の安全管理、実物大試験道路構築、計測の一部

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

令和元年度中間評価における指摘：

1. 本研究において高度化される路面下空洞の危険度評価について、現場での利活用も想定し、体系的に示していただきたい。
2. 埋設物などの局部的な要因が大きく影響する空洞発生について、空洞ポテンシャルマップの有効性や必要性が現段階では不明確である。ポテンシャルマップの作成を主要研究事項とする場合は、実務の中でどのように活用しうるのかの観点から必要に応じて改善のうえで進めるとともに、その有効性を明確にしていきたい。

令和2年度中間評価における指摘：

1. 本研究の成果が実務のどのような場面で利活用されるのかを意識した研究成果がとりまとめられることを期待する。

対応：

本研究では、空洞の調査・診断・補修・予防のそれぞれの段階の対策に資する技術を開発し、さらにそれらを統合したソリューションを提案している。それぞれの要素技術には追加検討やアップデートを要するものもあるが、ほぼ実務で活用可能な段階に達している。空洞ポテンシャルマップはその有効性・信頼性を藤沢市の空洞・陥没実績を利用して検証し、同市で今後の調査計画に活用されている。他都市への展開も可能である。空洞の危険度評価は、地中レーダ探査で取得可能な空洞幅と空洞天井深さから指標を設定し、既存の経験的評価手法に対して科学的根拠を示した。補修・予防に関しては、空洞補修用可塑性充填材を開発し既に実務で活用されている他、路面補強工法も実用化への目途がついている。

⑧研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究では、道路陥没対策に関わる現状の技術的課題を整理し、①地中の状態の把握が困難で、②空洞の成長速度や陥没危険度が不明であり、③合理的な補修方法の選択肢がないことから、①～③のそれぞれを解決し、さらに空洞・陥没の予防に資するような対策の提案を目指した。すなわち、空洞の調査、診断、補修、予防の各段階における要素技術を開発し、それらを統合したソリューションを提案した。

調査

地中レーダ探査の適用範囲と精度検証：

既存の空洞探査データを用いて探査精度の指標のうちの中率、空洞深度を検証し、高い精度を確保できていることが確認された。

空洞体積・形状測定装置の開発：

空洞特性・発生原因や補修時の充填材体積の把握のために空洞形状を簡便に測定できる装置を開発した。

空洞・陥没ポテンシャルマップの開発 (図1)：

福岡市、藤沢市の協力を得て、空洞生成・拡大に寄与する環境要因を定量的に分析し、空洞・陥没ポテンシャルマップを開発した。これは、必要な情報があれば他都市においても適用可能で、今後の調査の合理化に寄与するものである。

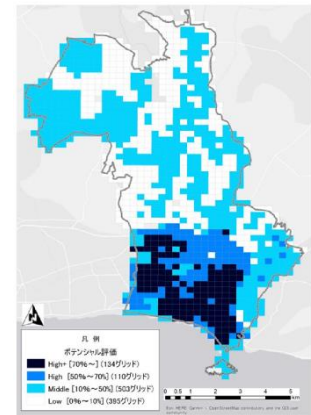


図 1. 藤沢市道の陥没ポテンシャルマップ

診断

空洞の陥没危険度を、現道における空洞モニタリング、室内模型実験、振動台実験、人口空洞を設置した実物大試験道路における各種試験、数値解析を実施して評価した。

地盤の陥没危険度：

一様砂地盤の模型実験で空洞生成・拡大メカニズムを検討し (図2)、図3に模式的に示すように陥没危険度は空洞幅と空洞深さで評価可能であることを示した。ここで、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、空洞深と空洞幅の比は0.2~0.3の関係であり、これは路面下空洞の実態や道路管理者の経験的感覚とほぼ一致している。空洞深さ・空洞幅のプロットで左下部に位置する場合は陥没危険度が低く、右上方に動くにつれて危険度が高くなる。なお、路面下空洞の広がりには必ずしも平面的に等方ではないが、空洞幅として短軸を考慮して差しつかえない。また、陥没に至った場合の深刻度を考えると空洞厚もパラメータのひとつとして挙げられるが、現状の路面下空洞探査において空洞厚は地中レーダ探査から容易に得られないので、実務的には空洞深さと空洞幅で評価することが妥当である。

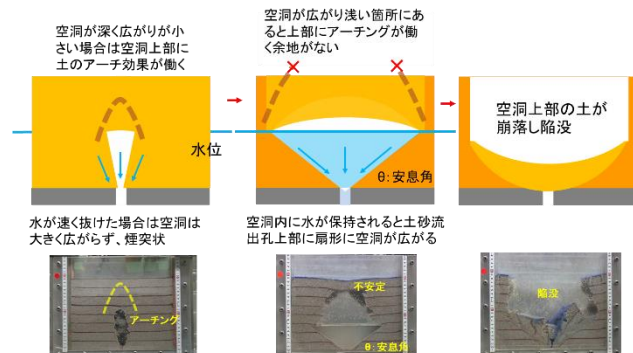


図 2. 空洞生成・拡大のプロセス

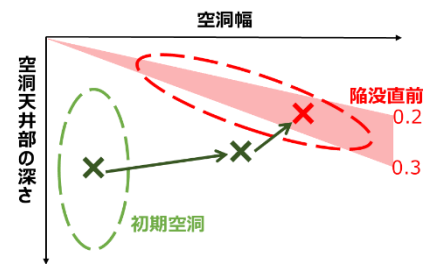


図 3. 模型実験で確認された空洞経路と陥没危険度

空洞深さと空洞幅の比が0.2より大きい場合は、その値が大きいほど陥没危険ゾーンから遠く、危険度が低いと考えられる。しかしながら、地震による揺れが強い場合、初期空洞のような深くて小さい空洞も、空洞内への周囲の土のすべり破壊により一気に危険領域に至る可能性があることを振動台実験により確認した。

道路の路面陥没危険度：

実物大試験道路で各種試験を実施し、空洞を有する舗装道路の支持力および陥没耐力を評価したと

⑧研究成果（つづき）

ころ、図4に示すように、空洞深さが異なる場合舗装の支持力が大きく異なった。

一方、空洞をアスファルト混合物直下に設置した場合、図5に示すように自重で陥没したり、FWD試験で大きなたわみが観測されたり（その後陥没に至った）、陥没耐力はかなり低いことがわかった。特に夏季に路面温度が高くなり表層が軟化すると路盤で支持されていないアスファルト層は自重で陥没に至る。路面の支持力を保持するためには路盤の保全に努めることが肝要である。また、路面下空洞の陥没危険度を評価する際には、表層・基層を除外し、路盤表面からの深さを“空洞天井深さ”とするのが適切である。さらに、地震時には陥没危険度が振動により一気に上昇する可能性がある。（図6）

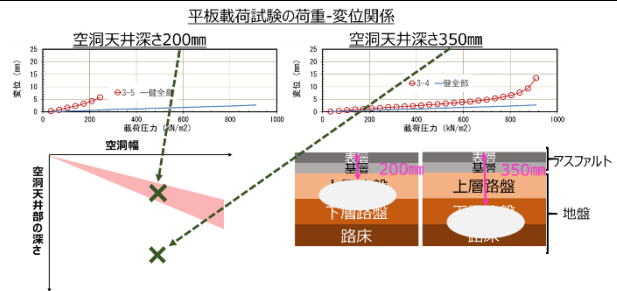


図4. 深さが異なる空洞の平板荷重試験

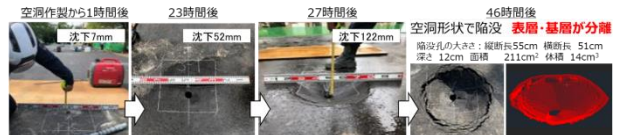


図5. 自重陥没した空洞(アスファルト直下)：空洞作成後46時間

補修および陥没予防

各々の空洞について、大きさ（広がり）と深さから陥没危険度を評価し、補修の緊急度や具体的な補修方法を決定する。本研究では補修および陥没予防対策として、図7に示すような充填材、路面補強、路盤補強を開発した。陥没危険度が低く成長性も小さいと思われる場合は経過観察で対応でき、そうでなければ開削埋戻しまたは充填で対応する。本研究で開発した空洞補修用可塑性充填

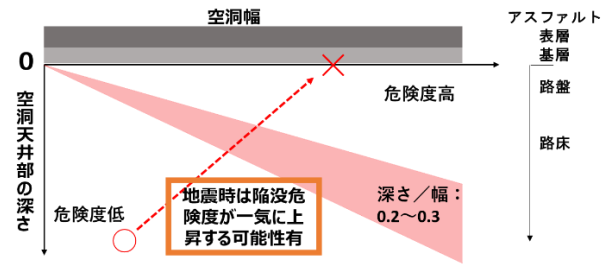


図6. 路面下空洞の陥没危険度評価

材は、水の添加率によって充填材の流動性を調整でき、周囲に破損した下水管がある場合は低流動性、無い場合は高流動性の使用が可能である。なお、本充填材は、埋設インフラ周辺の道路の再掘削を考慮して強度を必要十分に抑えている。さらに、比較的危険度の高い空洞が見つかった場合も即時補修できるとは限らないため、応急対策のための路面補強を開発した。また、仮に空洞が生成しても路盤に侵食しなければ舗装の支持力はある程度確保され陥没危険度は低く抑えられることから、空洞生成の素因を持つエリアでは、道路新設時あるいは維持管理時にジオテキスタイルなどの補強材で路盤補強することが効果的である。

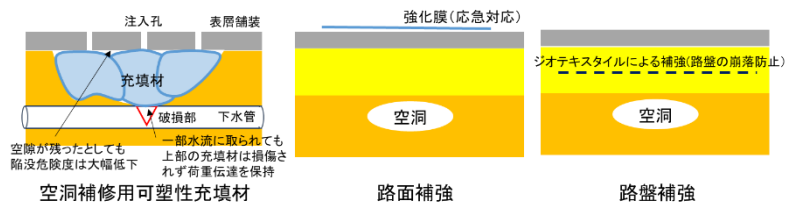


図7. 補修・陥没予防方法

陥没予防ソリューションの提案

路面下空洞の調査・診断・補修・予防の各段階の対策は相互に関連する。本研究で開発・改良した技術にもとづいて、陥没予防対策の合理化に向けた一連の流れや道筋

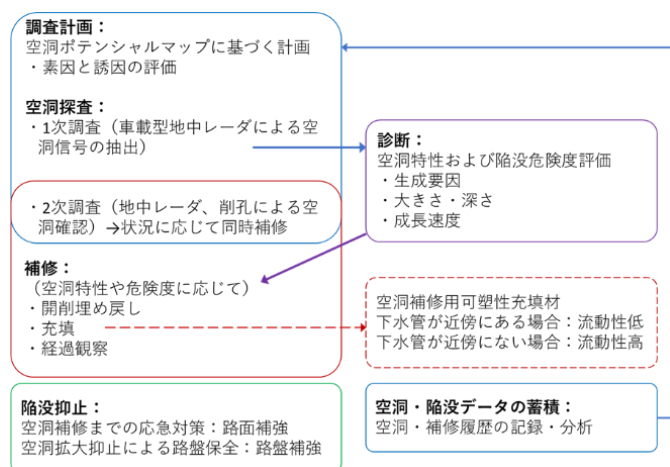


図8. 陥没予防ソリューション

を図8に示した。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会妙録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

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

1. TAN 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、pp. 543-544.
2. 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、pp. 1463-1464.
3. 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、pp. 3-4.
4. 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)。
5. 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)。
6. 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)。
7. 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。
8. 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。
9. 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, CD-ROM.
10. Tan Tingshen、桑野玲子、金城瑞樹、小塚規行 (2020)、再掘削性を考慮した空洞補修用可塑性充填材の開発、第55回地盤工学研究発表会。
11. 平野裕、桑野玲子、井原務、室井和也、桑野二郎、瀬良良子 (2020)、路面下空洞の陥没危険度評価のための実物大試験道路の構築と空洞載荷試験の概要、第55回地盤工学研究発表会。
12. 唐崎遥平、金子かのん、桑野玲子、桑野二郎 (2020)、埋設管接合部の止水不良箇所における路面下空洞の生成・成長過程の検討、第55回地盤工学研究発表会。
13. 田口牽、久野洵、桑野玲子 (2020)、地下流水音測定による水みち探査の可能性、第55回地盤工学研究発表会。
14. 瀬良良子、加納晋太郎、井原務、室井和也、桑野玲子 (2020)、路面陥没に至る空洞上部アスファルトの挙動観測報告(実物大試験道路)、第55回地盤工学研究発表会。
15. Pradeep Pokhrel、加藤舜大、桑野二郎、平野裕、桑野玲子 (2020)、地盤内空洞の生成と地震時安定性に及ぼす地下水位の影響、第55回地盤工学研究発表会。
16. 濱也幸樹、大野敦弘、森山鉄平、浅見文美恵、瀬良良子、桑野玲子 (2020)、空洞下ゆりみ情報を用いた高度空洞診断事例の報告、第55回地盤工学研究発表会。
17. 大野敦弘、雑賀正嗣、佐藤雅規、瀬良良子、井原務、室井和也、桑野玲子 (2020)、合理的路面下空洞対策にむけた路面補強工法に関する研究、第55回地盤工学研究発表会。
18. 大野敦弘、佐藤雅規、瀬良良子、井原務、室井和也、桑野玲子 (2020)、路面下空洞上の路面補強方法に関する研究、土木学会第75回年次学術講演会。
19. 加納晋太郎、瀬良良子、井原務、室井和也、桑野玲子 (2020)、路面陥没に至る空洞上部アスファルト混合物層の挙動の考察、土木学会第75回年次学術講演会。
20. 室井和也、井原務、桑野玲子 (2020)、路面下空洞上の舗装支持力に関する検討—FWDの繰り返

し、載荷試験と押し抜き試験結果の報告、土木学会第75回年次学術講演会。

21. 桑野玲子、桑野二郎、井原務、瀬良良子 (2020)、路面下空洞の陥没危険度評価のための実物大試験道路の構築、生産研究、72巻4号、pp. 319-322.
22. Kamal Prasad REGMI, 桑野二郎、山登泰希 (2020)、ジオシンセティックスが路盤内空洞の安定性に与える影響、第35回ジオシンセティックスシンポジウム。
23. Pradeep POKHREL, 桑野二郎 (2020)、地盤内空洞の地震時安定性に及ぼすジオシンセティックスの影響、第35回ジオシンセティックスシンポジウム。
24. 平野裕、桑野玲子、桑野二郎、Pradeep Pokhrel (2021)、路面下空洞の陥没危険度評価における地震動の影響、第56回地盤工学研究発表会。
25. 久野洵、桑野玲子 (2021)、路面下空洞観測孔に挿入可能な点群観測装置、第56回地盤工学研究発表会。
26. 大野敦弘、佐藤雅規、瀬良良子、井原務、室井和也、桑野玲子 (2021)、アラミド繊維シートを用いた路面補強工法に関する研究、第56回地盤工学研究発表会。
27. 濱也幸樹、大野敦弘、瀬良良子、桑野玲子 (2021)、空洞下ゆるみ領域の複数点測定による空洞診断の高度化事例、第56回地盤工学研究発表会。
28. 桑野二郎、桑野玲子、井原務、室井和也 (2021)、ジオシンセティックスで補強された路盤内空洞の安定性、第56回地盤工学研究発表会。
29. 大野敦弘、佐藤雅規、瀬良良子、井原務、室井和也、桑野玲子 (2021)、路面下空洞上の路面補強方法に関する研究 (補強材料の比較)、土木学会第76回年次学術講演会。
30. 加納晋太郎、瀬良良子、大野敦弘、濱也幸樹、桑野玲子 (2021)、強制陥没試験後の空洞上舗装の破壊現象、土木学会第76回年次学術講演会。

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

本研究の成果発信および情報収集の機会として、インフラ施設管理者・関係者を対象として路面下空洞対策連絡会を実施した。関連情報や資料は以下のurlに公開している。

<https://geo.iis.u-tokyo.ac.jp/category/urcmlm/>

第1回路面下空洞対策連絡会

2019年11月13日 空洞対策連絡会シンポジウム@東京大学生産技術研究所

「合理的な道路陥没対策に向けた知見と経験の共有」を副題とし、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等の参加を得た。東京大学、国土技術政策総合研究所のほか、路面下空洞対策を先進的に実践している福岡市、札幌市、神戸市、藤沢市から話題提供があり、パネルディスカッションでは当日会場から集約した質問事項も取り入れて、会場全体で合理的陥没対策に向けた今後の方向性を議論した。参加者169名

2019年11月14日 実物大試験道路見学会@埼玉大学構内

実物大試験道路にて、空洞上のFWD試験、小型FWD、ハンディ地中レーダ、充填材デモなど。参加者102名

第2回路面下空洞対策連絡会

2020年12月3日 実物大試験道路見学会、空洞対策連絡会シンポジウム

実物大試験道路見学会 (現地：埼玉大学+YouTubeライブ配信)

地中レーダ探査車、ハンディ地中レーダ探査、空洞内点群測定、小型FWD、充填材デモ、路盤補強、路面補強、空洞上の車両走行による陥没デモ。 現地参加者75名

シンポジウム (現地：埼玉大学+オンライン)

前年に引き続き「合理的な道路陥没対策に向けた知見と経験の共有」をテーマとし、本研究の成果を紹介すると共に、福岡県、川崎市、千葉市、福岡市より話題提供をいただき、最近の豪雨・冠水の路面下空洞への影響を中心に議論した。

現地参加者68名+オンライン参加者100名程度

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究で得られた主な知見のうち、今後の課題を残すものを以下にあげる。

- ・路面下空洞探査で主に用いられる地中レーダは、深度1.5m程度までの浅層空洞の探査に有効で、既存データから算出した的中率は88%、空洞深さの探査精度も十分であった。ただし、検知率の精度検証が今後求められる。
- ・地下2m以深の空洞の探査方法については、いまだ決定的な方法がない。引き続き検討が必要である。3次元DEMにより空洞周りの波動伝播について検討し深部空洞探査への応用を模索している。
- ・空洞および陥没の発生頻度と都市の関連情報から、空洞・陥没ポテンシャルマップを作成した。このマップの有効性は今後のデータの蓄積・分析により継続的検証が必要である。
- ・砂質地盤の土砂流出模型実験、振動台実験、実物大試験道路、数値解析等で、空洞の陥没危険度は、空洞深さと空洞幅の比に依存することを確認し、実務で経験的に用いられている陥没危険度チャートの科学的根拠を示した。一方、現道における空洞モニタリングでは、土砂流出が起りやすい条件が揃うと、従来考えられているよりも短期間で空洞の成長が進行する可能性が示された。空洞の成長速度の定量評価については引き続き検討を要する。
- ・開発した空洞補修用充填材は既に実用化されている。路面補強、路盤補強は、実用化に向けて、仕様の細部を検討する必要がある。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

現状の道路陥没対策は、調査計画を策定して路面下空洞探査を実施し、見つかった空洞は道路管理者の判断により順次補修するのが通常の流れである。すなわち、陥没の芽となる空洞を見つけ、陥没に至る前に補修を施すことにより、陥没抑止に効果を上げている。一方、陥没対策をより効率的に実施するためには、現状の“調査で空洞を見つけ補修する”という対策に加えて、対象地の空洞の発生傾向を把握し必要十分な調査計画を立案すること、空洞の陥没危険度を評価し空洞特性に応じた適切な補修(対応)を選択し実施すること、空洞や補修履歴を管理し次の調査計画に生かすことが肝要である。本研究では、調査、診断、補修、予防の各段階に資する要素技術を開発した他、それらを活用した陥没対策の一連の流れを図8に示すように提案した。

開発したソリューションを適用することにより、従来、路面下空洞を見つけて(多くの場合開削で)埋め戻す、という対症療法的対策が主であったものが、空洞の陥没危険度や成長速度に応じて適切で合理的な補修方法を選択できることが望まれる。なお、空洞・陥没データは蓄積し分析することで、都市や地域の空洞傾向を把握し、調査計画や陥没危険度評価にフィードバックしてアップデートし、次年度以降の空洞調査計画に生かすことができる。また、都市間、道路管理者間で陥没対策の知見や経験を共有することが、道路陥没対策の合理化につながる。今後、道路管理者やインフラ施設管理者の連携体制の整備が望まれる。

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

現状の道路陥没対策における技術的課題を解決し対策の合理化をはかるという研究の目的は、空洞の調査・診断・補修・予防に関する要素技術の開発、およびそれらを統合したソリューションの提案により、概ね達成できた。本検討は陥没対策に関わる異なる領域の技術者・研究者が協同することによってのみ成しえるものである。

研究費の多くを実物大試験道路構築、およびそこでの各種試験に要したが、舗装構造を考慮した空洞の陥没現象を調べた事例は国内外でも前例がなく、現道における空洞モニタリングと併せて多くの知見を得た。開発した要素技術のうち一部については実用化のためにまだ検討を要するものもあるが、いずれも検証・確認すべき項目は明らかで、実用化への道筋は見えている。次段階として、提案したソリューションを社会実装し、使いながらアップデートしていくしくみが必要と考える。なお、本研究の主な検討範囲ではなかったものの、地下2m以深の深層空洞の探査に関しては、今回の研究機関内で効果的な方法を見つけることができなかった。これは今後再び基礎的検討から進めて積み上げていくべきであろう。

以上より、本研究により道路陥没対策に進化・改善をもたらし道路政策の質の向上に寄与すべき十分な成果をあげることができたと自己評価する。