

論文の内容の要旨

氏名：佐藤 克己

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：舗装の健全性を考慮した簡易な路面下空洞評価に関する研究

近年の路面下空洞に起因する道路陥没の頻発は、我が国のみならず世界的にも社会問題化している。道路陥没が発生すると第三者被害を引き起こす危険性があるので、道路管理者ならびに占用管理者は、路面下に発生した空洞を速やかに発見し、空洞箇所の補修あるいは舗装を含めた修繕の早急な実施を行う必要がある。現在の空洞探査は、いくつかある非破壊探査手法のうち、地中レーダーを用いた探査が主流となっている。発見された空洞は、大小を問わず全てを補修することが望ましいが、財政上や交通規制の問題で全てを補修することは難しい。したがって、空洞の規模や発生位置、さらに成長履歴を総合的に判断して、現時点あるいは近い将来陥没の危険性の高い空洞に対して補修することを決定している。ただし、この判断においては定量的な判断手法が存在せず、これまでの補修経験をもとに判定している現状である。

路面下空洞の発生要因には様々なものがあり、主な要因としては、地震による液状化現象、軟弱な地盤の圧密などの自然的要因と、交通施設、地下埋設管路、地下構造物の工事などによって発生する人工的要因に大別される。なかでも、下水道管路破損部への土砂流出に起因した空洞による路面の陥没は、年間約5,000件が確認されており、調査年によっては6,000件を上回る年もある。下水道管の老朽化による破損は、今後も増え続けることが予想されており、陥没した際の影響は深刻となる。一方、空洞直上の路面の陥没のメカニズムについては、空洞の成長過程に関する研究はあるものの、アスファルト混合物層の崩落に関するメカニズムの解明には至っていない。

このように、空洞の存在が第三者被害を引き起こす可能性が大きいことや、路面下空洞に関する研究成果が乏しい現状などを背景に、これまでの経験から空洞の可能性の低いもの、あるいは極めて小規模の空洞を除いて、地中レーダーにより検出された空洞と思われる異常信号は、危険な空洞と判定し、舗装の健全性に関わらずその大部分を補修している。したがって、国内に無数に散在し、今後も発生し、かつ成長し続ける路面下空洞に対して、その危険性を判断するための評価手法が必要不可欠であり、路面下空洞の存在を簡易に把握できる手法と、さらに舗装の健全性を考慮して空洞補修工事の優先度を策定する手法の確立が望まれている。

そこで、本研究は地中レーダーによる空洞探査結果と FWD 試験結果を用いて、危険あるいは経過観察となる空洞の判断資料となり、舗装の維持修繕計画立案のための参考資料となるよう、舗装の健全性を考慮した路面下空洞の簡易評価手法の提案を目的とした。本論文では、まず、国道調査データ用い、空洞が存在したときの諸データを比較分析し、それらの相関関係を検討するとともに FEM 解析を実施し、空洞の規模、位置および舗装の支持力が空洞直上のたわみに与える影響を把握した。つぎに、国道調査データと等方性円板モデルによる解析結果を用いることで、舗装の健全性を考慮した空洞評価を実施した。その上で、空洞による路面の陥没の危険性について、その高低を判断可能な簡易評価手法と、補修優先順位の評価手法について提案を行った。

本論文は、全6章から構成されており、以下に各章ごとの要旨を述べる。

第1章 序論

舗装は、車両や歩行者が接触する構造物であるため、沈下や陥没などは第三者被害を引き起こす原因となる。発見された空洞は、大小を問わず全てを補修することが望ましいが、道路管理者にとっては、財政上や交通規制の問題で全てを補修することは難しい。したがって、空洞の危険性の大小を評価できる手法の確立が望まれている。

本章は、路面下空洞による道路陥没の実態、原因、および既存の路面下空洞調査方法について本研究の背景を概説し、本研究の目的および論文の構成について述べた。

第2章 既往の技術・研究

空洞直上の路面陥没のメカニズムについては、空洞の成長過程に関する研究、屋外試験ヤードで模擬的

な路面下空洞を作成し、繰り返し載荷試験による空洞の成長過程や FWD によるたわみ変化を調べた調査研究などがあるものの、アスファルト混合物層が崩落に至るまでのメカニズムを研究したものは見あたらない。一方で、道路陥没事故による第三者への被害が社会問題化する昨今、道路陥没を未然に防止するため、路面下空洞の調査技術は急速に進歩している。

本章は、路面下空洞調査技術の変遷をまとめ、空洞調査の既往の技術、道路管理者による管理の現状、下水道管理者による空洞発生防止に向けた取組の一例、さらに空洞評価に関する既往の研究についてまとめ、本研究の意義を明確にした。

第3章 重交通路線の空洞データおよび分析

本章では、直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会での指摘を受けて、国土交通省関東地方整備局が実施した同整備局管内の国道調査データを用い、空洞が存在したときの諸データを比較分析し、それらの相関関係を検討した。つぎに、空洞の有無、大小、さらには深度とたわみの関係について二次元有限要素法（FEM）を用いた分析を行い、それぞれの特性を把握した上で、実測された空洞データと FWD 試験結果の関係について考察を行った。

その結果、まず、地中レーダーおよびスコープ調査結果より、空洞の深さに対する空洞の厚さ、面積あるいは体積の間に相関関係は存在せず、地中レーダーによる空洞探査だけでは、空洞の特性を判断することや、ある空洞に対する危険性を判断することは難しいことを確認した。つぎに、FWD 試験結果より、空洞直上のたわみが周辺部のたわみより必ずしも大きくなるとは限らないが、空洞の存在は明らかに周辺部も含めた舗装の健全性に影響を与えることを示した。さらに、FEM 解析により、空洞情報（空洞深さ・空洞径）あるいは舗装の強度と表面たわみの関係には、ある一定の関係が存在することを明らかにした。しかしながら、実際の地中レーダー探査結果と FWD 試験結果から空洞の規模や位置と FWD たわみの関係には、FEM 解析で得られるような一定の関係は存在しないことを示した。

第4章 路面下空洞の危険性に対する評価手法

本章では、路面下空洞の危険性に対する本研究の考え方を示した上で、等方性円板モデルによる解析を実施し、この解析結果を用いた異常信号箇所における陥没あるいは沈下の危険性に対する簡易な評価手法について検討を行った。

その結果、まず、アスファルト混合物層が沈下を生じる前の空洞やゆるみについて、高温時に少ない交通輪数で疲労破壊する可能性があるか否かで評価する手法であれば、安全性を考慮した評価となると同時に、二次調査で行うボーリングデータ（空洞やゆるみの厚さ）を必要としない非破壊での調査が十分可能となり、交通規制をできるだけ短時間とした経済性に有利な調査手法となるという路面下空洞評価に対する本研究の考え方を示した。その上で、空洞の平面形を円形とし、その直上にある舗装を等方性円板と仮定した場合のモデルを設定し、陥没の危険性の高い円板中央の下面ひずみが 300μ となる円板直径の同定手法を示した。つぎに、等方性円板の円板直径の同定手法を用いて国道調査データを評価する空洞評価手法を示し、これを用いて空洞の危険性の大小を分類した結果、分類されたデータの内、許容たわみを超えるような空洞が危険性の高い空洞と評価されていることから、本手法による分類は概ね妥当と考えられ、重交通路線に存在する空洞の危険性の大小を適正に評価する手法であることを明確にした。

第5章 路面下空洞の補修優先順位評価手法

本章では、前章において、空洞直上の舗装を等方性円板と仮定した解析結果と FWD 試験結果を用いることで、路面下空洞の危険性の大小を簡易に評価することができたことから、陥没の危険性の高い路面下空洞を抽出し効率的に補修計画が策定できるよう路面下空洞の補修優先順位の評価手法について検討した。

その結果、まず、深さを FWD たわみで除したものを仮想深度、信号幅に FWD たわみを乗じたものを仮想信号幅と称することとし、両者の関係を 2 次元平面上で表した場合、縦軸に仮想深度、横軸に仮想信号幅の逆数とすることで、この座標軸上にプロットされた空洞は、原点に近いものほど危険性が高く、原点より離れているものほど危険性が低い空洞と評価できるという概念図を示した。その上で、第4章において、危険性の大小を分類した空洞データを仮想深度と仮想信号幅の 2 次元平面上にプロットした場合、危険性の高い空洞は原点に近く、危険性の低い空洞ほど原点から遠い位置に存在していることを明らかにした。これより、仮想深度と仮想信号幅の 2 次元平面を用いることで、空洞の陥没の危険性に対する補修優先順位を決めることが可能であることを明らかにした。

第6章 総括

本章では、各章から得られた結果を総括した上で、舗装の健全性を考慮した路面下空洞評価における本提案手法の有用性と今後の課題について言及した。