

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

佐藤克己

# 目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	6
1.3 論文および研究の構成	11
第 1 章の参考文献	16
第 2 章 既往の技術・研究	19
2.1 概説	19
2.2 路面下空洞調査技術の変遷	22
2.3 路面下空洞調査に関する既往の技術	27
2.3.1 路面地下の管理の現状	27
2.3.2 GPR による空洞評価手法	29
2.3.3 FWD 試験	35
2.4 下水道管理者の空洞発生防止に向けた取組の現状	40
2.4.1 下水道管が原因の空洞について	40
2.4.2 下水道管が原因の空洞成長メカニズムと調査技術	41
2.5 空洞評価に関する既往の研究	45
2.5.1 桑野らの研究	45

2.5.2	城本らの研究	48
2.5.3	東京都の研究	49
2.5.4	久保による検討	51
2.5.5	その他の研究	53
2.6	まとめ	55
	第2章の参考文献	57
第3章	重交通路線の空洞データおよび分析	61
3.1	概説	61
3.2	舗装の健全性	63
3.3	調査概要および結果	66
3.3.1	調査概要	66
3.3.2	地中レーダーおよびスコープ調査結果	68
3.3.3	FWD 試験結果	71
3.4	FEM 解析による空洞とたわみの関係	75
3.4.1	解析モデル	75
3.4.2	解析結果の妥当性の検討	77
3.4.3	空洞深さ一定における空洞径と表面たわみ量の関係	78
3.4.4	空洞径一定における空洞深さと表面たわみ量の関係	79
3.4.5	空洞径・深さ一定における舗装体強度と表面たわみ量の関係	80

3.5	空洞情報と FWD たわみの関係	81
3.6	まとめ	85
	第 3 章の参考文献	87
第 4 章	路面下空洞の危険性に関する評価手法	89
4.1	概説	89
4.2	路面下空洞の危険性に対する本研究の考え方	91
4.3	等方性円板モデルによる解析	97
4.3.1	等方性円板モデルによる空洞幅の解析	97
4.3.2	等方性円板直径の同定	102
4.4	評価手法	104
4.4.1	入力条件	104
4.4.2	評価手法	108
4.5	評価結果	110
4.6	まとめ	116
	第 4 章の参考文献	118
第 5 章	路面下空洞の補修優先順位評価手法	121
5.1	概説	121
5.2	路面下空洞と舗装の健全性との関係	122

5.3 評価手法の適用例	126
5.4 まとめ	130
第5章の参考文献	131
第6章 総括	133
6.1 結論	133
6.2 今後の課題と展望	137
謝辞	139

# Study on Simple Estimation of Cavity below Road Surface Considering Soundness of Pavement

Katsumi Sato

Recently, the road cave-in to be caused by the road surface lower cavity has the risk to cause third party damage. Therefore, there is a need to discover before depression of the cavity occurs under the road surface. And it is necessary for the road administrator to perform maintenance such as the repair of the hollow point or its pavement immediately. It is desirable for the discovered cavity to repair all. However, it is difficult to repair a total cavity in reasons of financial and traffic regulatory issues. Therefore, the road administrator judges a hollow scale and an outbreak position, its growth history generally and decides to repair it in the near future for the cavity that is at great risk of the cave-in. But there is not quantitative judgment technique by this judgment, and it is the present conditions to judge based on past repair experience. This study aimed that simple evaluation method of cavity below the road surface considering soundness of pavement was proposed by applying results of FWD test and underground radar at national highways.

At first, this study examined a correlation between the cavity information (thickness, area or volume of cavity) for the depth in the results of underground radar and scope findings. As a result, those relations did not have the correlation and confirmed that it was difficult to judge the characteristic and risk for the cavity that there was from only the cavity exploration with the underground radar. On the other hand, by FEM analysis, the relationship between the cavity information, pavement strength and surface deflection was confirmed. However, from the actual ground radar results and FWD test results, correlation of cavity information with the surface deflection was not confirmed.

Then, this study set the model assuming isotropic disc pavement in directly above the cavity, and carrying out the analysis. And, by using this analysis result, it was demanded the disk diameter that it became  $300\mu$  undersurface

distortion of the disk center that was at great risk of the cave-in. As a result of having evaluated the cavity data on the national highway with this technique, this technique clarified that it is possible to evaluate the risk for the cavity detected by underground radar appropriately.

Furthermore, it incorporates the concept of a cavity of the virtual depth and the virtual signal width to represent the relationship between them on the two-dimensional plane. In this case, a cavity plotted on this coordinate axis is evaluated the thing which is near to the origin is high-risk and the thing which is far from the origin is at low risk. Thus, by using the relationship between the virtual signal width and the virtual depth, it revealed that it is possible to determine the repair priority for the risk of the cavity.

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

近年，路面下空洞に起因する道路陥没が頻発し社会問題化している．道路管理者ならびに占用管理者は，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，路面下に発生した空洞を未然に発見し，空洞箇所の補修あるいは舗装を含めた修繕を早急に対応することが求められている．

路面下空洞の発生要因には様々なものがあり，主要要因としては自然的要因と人工的要因に大別される．自然的要因には，1)地震の液状化現象，2)軟弱な地盤の圧密，3)地震等の振動などに分類でき，また，人工的要因には，1)交通施設，2)地下埋設管路，3)地下構造物の工事などに分類できる<sup>1)</sup>．

2011 年に発生した東日本大震災での液状化被災地では，液状化により地中の砂が地表に噴砂して地中が空洞化した結果，広範囲にわたって道路陥没が発生した（写真-1.1.1 参照）．

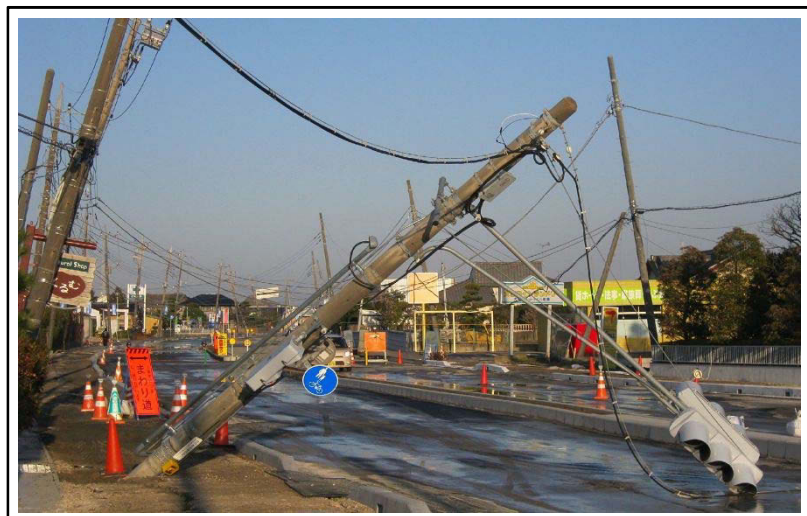


写真-1.1.1 液状化による道路陥没・損壊の例（潮来市）



液状化現象は、主に沖積砂層や比較的新しく盛土した人工地盤において発生し、東日本大震災では震源地から離れた湾岸および内陸埋立部で甚大な被害が発生した。こうした被災地では、被災直後やしばらく時間経過した後に道路が陥没する状況が続いた。

一方、近年報告されている陥没事例の原因の多くは、地下あるいは基礎構造物施工時の地山の取り込み過多や周辺地盤の締固め不足、地下埋設管の損傷部にその周辺の土が流入するために空洞が発生するなどの人工的な要因によるものである<sup>2)</sup>。

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、**図-1.1.1**に示すとおり年間約 5,000 件が確認されており<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、調査年によっては

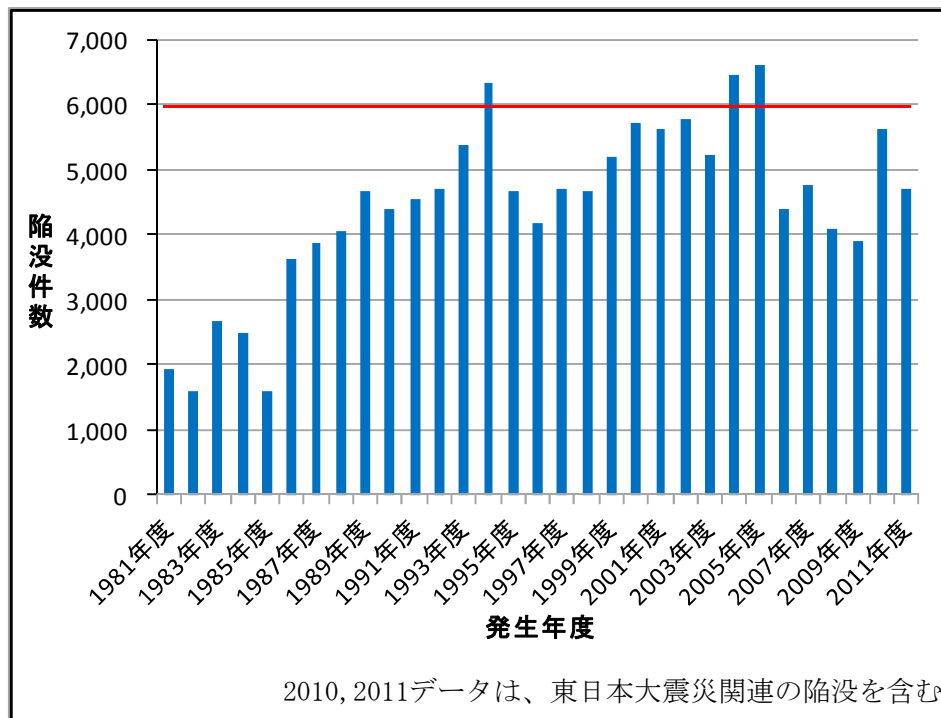


図-1.1.1 下水道が原因の道路陥没件数<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>

6,000 件を上回る年もあり，陥没した際の影響は深刻である（写真-1.1.2, 1.1.3 参照）。



写真-1.1.2 下水道管渠老朽化による道路陥没の例（東京都）<sup>5)</sup>



写真-1.1.3 東日本大震災での下水道破損による道路陥没の例（習志野市）

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いるので、道路陥没は一層深刻な問題となりうる。一方、前述のとおり、路面下空洞は下水道管の老朽化だけではなく、それ以外の要因でも発生する。東京都の調査<sup>2)</sup>では空洞の発生要因として、最大が「埋戻し転圧不足, 埋戻し材の不良」で全体の32%, 次が下水道管などの地下埋設管の破損による「直接原因及び直接的要因」が28%, 以下「埋設物の輻輳」が14%, 「H鋼, 矢板, 木杭などの出現」が11%と続いている。いずれにせよ、空洞が発生し、その成長が進行して路面の陥没に至るため、人命に関わる事故を未然に防ぐ上でも空洞の発見は必要不可欠である。

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。しかしながら、国土交通省関東地方整備局「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」第1回委員会（2009年5月21日）配付資料<sup>6)</sup>において、図-1.1.2に示すような陥没のメカニズム（仮説）が示されている。

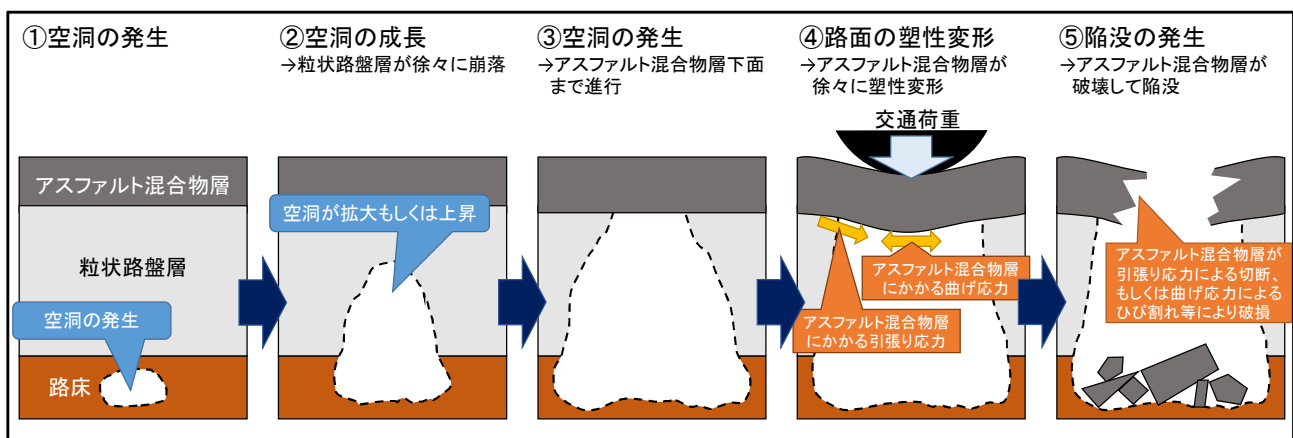


図-1.1.2 路面下空洞による陥没のメカニズム（仮説）<sup>7)</sup>

これによれば、まず、空洞が発生し成長する（図中①～③）。つぎに、ある程度成長したところで空洞直上の路面が塑性変形を起こすようになる（図中④）。その後陥没が発生する（図中⑤）ことになるが、破壊（崩落）は、交通荷重による路面沈下の進行に伴い、アスファルト混合物層の曲げ破壊あるいはアスファルト混合物層の空洞端部での引張り応力による破断などが主たる要因と考えられている。おそらくこのような陥没のメカニズムであると思われるが、それを解明している研究成果は見あたらない。

このため、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る。

## 1.2 研究の目的

既存の探査手法のうち、地中レーダーは物質中を伝搬する電磁波の反射到達時間と反射往復時間の違いから物質の違いを判定するもので、特に浅層部（およそ1.5m以内）における異質物探査には有効とされている<sup>7)</sup>。路面下の空洞探査においては、現在、この目的で開発された空洞探査車によって実施されており、交通規制を伴わずに路面下の異質物を瞬時に把握可能という利点から普及している。

図-1.2.1 に一般的な路面下空洞の調査方法を示す<sup>8)</sup>。地中レーダーによる路面下の空洞探査は、まず空洞探査車によって異質物による異常信号（本研究では地中レーダー画像に現れる異常波形を表す）を抽出し、過去の空洞の成長履歴を含む空洞特定経験から、空洞と思われる異質物の規模と路面下の位置を特定する（以下、一次調査）。ここでいう異質物の規模とは面的な広がりのみで深さ方向の厚さは把握できない。これらの情報は装置を保有している企業や団体の機種・画像解析手法の違いにより多少異なり、特に面的な広がりについては大きく異なる場合もある。また、空洞判別の精度は向上しているものの、一次調査時点で、その異質物が空洞なのか空洞以外の異質物なのかなどの判断が困難な場合もある。

一次調査で得られる異常信号は、空洞、ゆるみ（周辺と比較して密度の低下している領域）<sup>7)</sup>あるいは埋設管などの異質物によるものである。前述したように一次調査ではそれらの判別が難しい場合もあることから、ハンディ型地中レーダーによる異常箇所の確認とボーリングによるスコープ調査（以下、二次調査）により、確実に空洞と確認されれば復旧を実施している<sup>9)</sup>。なお、空洞やゆるみを伴わない埋設管による異常信号は、その埋設情報を加えることで二次調査の対象外となり得る。このように、路面下空洞探査は空洞の特定に特化したものであ



図-1.2.1 路面下空洞調査方法<sup>8)</sup>

り、舗装の破損や事故の防止に必要不可欠な調査である。

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。しかしながら、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ことから、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<sup>9)</sup>。特に、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。路面陥没が起こるか否かは、空洞の規模と空洞直上にある舗装の健全性に影響されると考えられる。たとえば、舗装構成が同じ道路に存在する空洞に関して、空洞の規模および深さが同一の場合、空洞直上にある舗装の疲労度合いなどの健全性の違いによって陥没の時期や程度が異なることは明らかである。したがって、このように舗装の健全性を考慮した判定手法が確立されれば、現時点での空洞による道路陥没の危険性と補修の必要性を定量的に判断することが容易になる。

一方、空洞に関連して舗装の健全性に影響を与えるのは、前述した路面下のゆるみも同じであり、これにより**写真-1.2.1**に示すような路面の局所的な沈下が進行することや、場合によっては陥没の危険性を招く可能性が考えられるので、走行安全性上無視できない。



写真-1.2.1 ゆるみによる路面の沈下<sup>7)</sup>

空洞探査で得るべき情報は、空洞の規模（面的な広がりと厚さ）、位置（空洞の深さ）、成長速度に関する情報で、これらは道路陥没による事故を未然に防ぐことに役立つ。桑野等<sup>7)</sup>は下水道管の老朽化に伴う空洞発生および成長のメカニズムを調べ、危険な空洞・ゆるみの抽出を目指した研究を実施している。しかしながら、様々な要因による空洞の発生およびその成長過程、さらには道路陥没のメカニズムを全て解明することは難しく、特に、空洞探査だけで発生原因ならびに陥没の危険性のある空洞を断定することは極めて難しいと考えられる。

以上のように、空洞探査によって得られる異常信号では、その箇所に道路陥没の危険性がどの程度潜在しているかを判断する客観的データを得ることが難しい。これを評価する現場試験の実施が必要となり、現場試験としては重錘落下式たわみ測定装置（Falling Weight Deflectometer：FWD、以下FWDと表す）によるたわみ測定が適当と考えられる。FWDは、衝撃荷重を舗装路面に与えることで変形する路面の形状を測定する装置であり、舗装の支持力を評価する非破壊試験装置である。重交通路線において地中レーダーによる空洞探査とFWD試験が実施<sup>10)</sup>された。その結果、重交通路線では、よほど成長した空洞であれば健全な舗装とのたわみ差が生じるが、そうではない場合にはたわみ差は生じにくいことが判明した。東京都では、屋外ヤードにおいて路面下空洞を模擬的に作製し、繰返し載荷試験による空洞の成長過程やFWDによるたわみの変化を調べている<sup>11)</sup>。しかしながら、空洞の成長と路面の陥没の関係までは把握されていない。

このような研究成果に乏しい現状と、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などを背景に、異常信号に対しては、これまでの経験から空洞でない可能性が高いか、あるいはきわめて小規模の空洞を除いて、舗装の健全性に関わらず発見された空洞の大部分が補修されている。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、その確立が望まれている<sup>12)</sup>。

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。本研究では、まず、国道調査データ（以下、重交通路線データ）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するとともに二次元有限要素法（2 Dimensions Finite Element Method : 2D-FEM, 以下 2D-FEM と表す）による解析を実施し、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、重交通路線の調査で得られたデータを分析・整理した上で、舗装の健全性を考慮して空洞を評価した。さらに、この結果から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を検討するとともに、補修優先順位の評価手法について検討を実施した。

### 1.3 論文および研究の構成

本論文は、図-1.3.1 に示すとおり全6章から構成されている。

まず、第1章および第2章では、研究の背景・目的、路面下空洞によって引き起こされる道路陥没の実態と現状、路面下空洞に関する既往の研究や国土交通省における空洞評価手法について明らかにした。つぎに第3章から第5章では、国土交通省関東地方整備局で実施されたFWD試験と空洞探査調査のデータ（重交通路線データ）を分析・検討し、FWD試験値と空洞深さや面積との相関関係を導くとともに、1)力学モデルを使い舗装の健全性を考慮した路面下空洞の危険性に関する評価、2)路面下空洞の補修優先順位の評価手法を提案した。さらに、第6章では、これらの成果を総括した上で、「舗装の健全性を考慮した簡易な路面下空洞評価」についてその課題と展望を述べた。以下に各章ごとの要旨を述べる。

#### 第1章 序論

大量の自動車交通を支える道路に求められる安全性・信頼性を確保するため、道路管理者は、日々維持管理を実施している。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。また、道路は本格的な維持・更新の時代を迎え、今後、急速に老朽化していく構造物をどのように維持していくか、さらには舗装の管理レベルをどの程度に設定すべきかといった課題に直面している。

本章は、「研究の背景・目的」として、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概説し、本研究の目的を明らかにした。

#### 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、1)空洞の成長過程に関する研究、

2)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 によるたわみ変化の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。また、国土交通省をはじめとする道路管理者は、急速に老朽化していく構造物をどのように維持していくのかといった課題に対して解決の途を探っているのが現状である。

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

路面下空洞による道路陥没を防止するための路面地下の管理は、道路管理者にとってきわめて重要である。道路管理者は、道路パトロールによる舗装面の確認といった日々の維持管理に加え、空洞探査車による空洞探査を地域や路線によって1年あるいは数年に1回の割合で調査頻度を設定して実施している。空洞探査車によって得られる情報は、空洞個々の①空洞情報（位置、規模、深さ）のほか、過年度調査の情報を加味した②信号の経年変化や③周辺空洞の実績、さらに維持管理台帳から得られる④空洞補修履歴がある。一次判定では、それらデータのほかに考慮すべき要素として①舗装構造、②工事履歴、③地下埋設物、④地下水、⑤交通量、⑥大型車混入率、⑦舗裝修繕計画の有無などがあり、これらを加味して検討する。さらにスコープ調査の実施の有無を判断する二次判定では、信号の面積・深さなどを考慮して判定を行う。

本章では、まず本研究のテーマである“舗装の健全性”に関して、FWD 試験

による舗装の健全性評価方法について整理した。そして、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（以下、重交通路線データ）を使用して、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 2D-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。

#### 第 4 章 路面下空洞の危険性に対する評価手法

路面下に発生した空洞が陥没に至るまでのメカニズムは、その空洞が成長していき、路面の沈下、そして陥没すると考えられている。また、沈下の進行や陥没には、①舗装構成、特にアスファルト混合物層の厚さ、②舗装の健全性、もしくは舗装の疲労度合い、③空洞の規模や形状などが影響されると推測され、どのタイミングで陥没が生じるかの判断は難しい。しかし、どのタイミングであってもアスファルト混合物の破断ひずみを超えたときに陥没が発生すると予想できる。

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。

#### 第 5 章 路面下空洞の補修優先順位評価手法

政府は、平成 25 年 10 月「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」を設置し、国民生活やあらゆる社会経済活動を支える各種施設をインフラとして幅広く対象とし、戦略的な維持管理・更新などの方向性を示す基本的な行動として、「インフラ長寿命化基本計画」をとりまとめた。さらに、この基本計画に基づき国土交通省が管理・所管するあらゆるインフラの維持管理・更新などを着

実に推進するための中長期的な取組の方向性を明らかにする計画としてインフラ長寿命化計画（行動計画）<sup>12)</sup>を策定した。厳しい財政状況下において、維持管理・更新などに係る計画的な投資を行うためには、あらゆる角度から維持管理・更新などに係るトータルコストの縮減を図るとともに、維持管理・更新には優先順位付けをし、効率的で計画的な予算配分に努めることが重要である。

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。

## 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簡易な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。

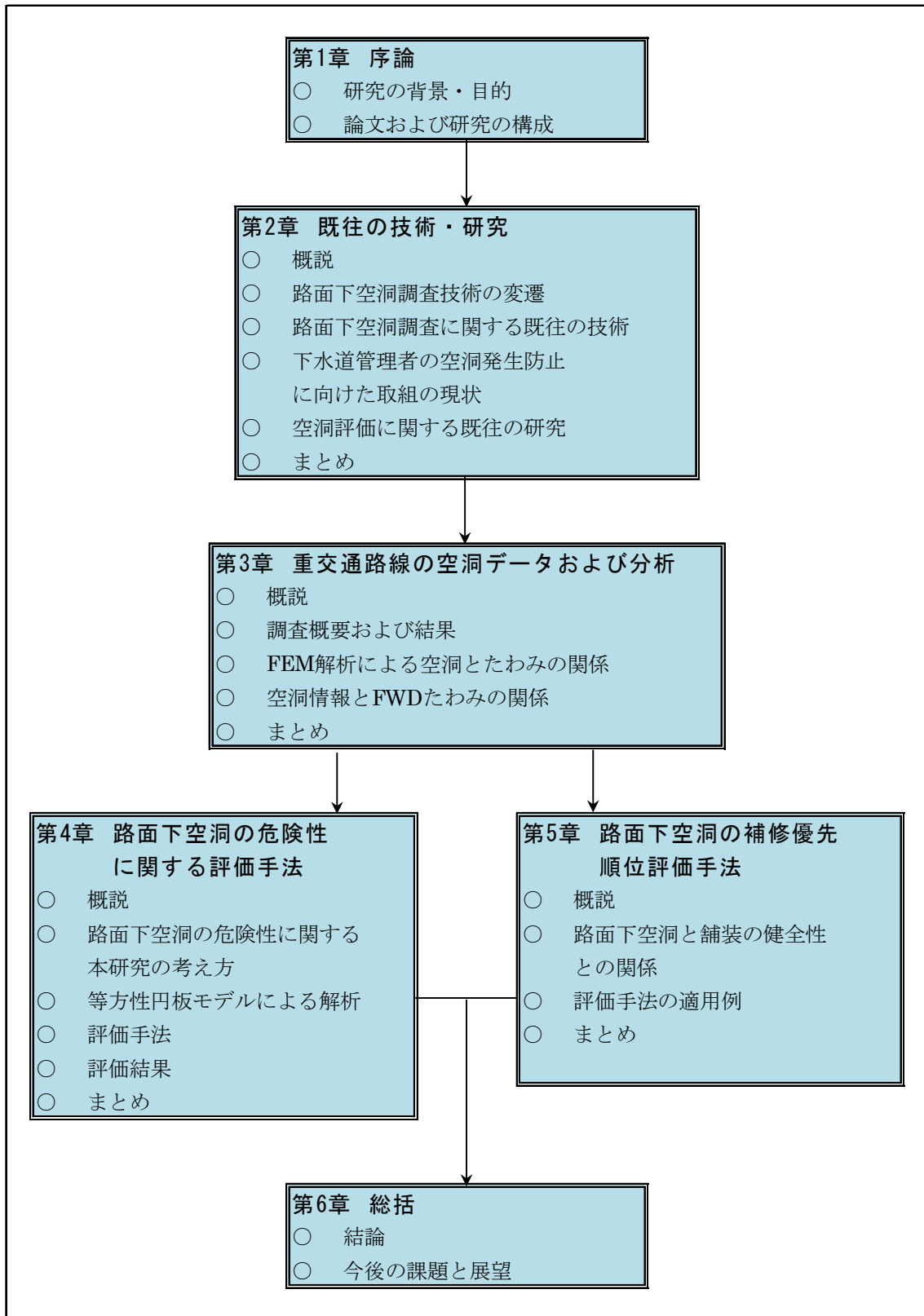


図-1.3.1 本研究および論文の構成図

## 第 1 章の参考文献

- 1) 秋葉正一・城本政一・加納陽輔・島崎勝・佐藤克己：地中レーダーと FWD 試験を併用した舗装診断に関する一考察 —市街地道路に対する簡易評価手法の検討—, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.2, 2015.6.
- 2) 内山博文・大石雅登：路面下空洞の開削状況調査結果, 東京都土木技術支援・人材育成センター年報, pp.227-232, 2012.
- 3) 横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚:下水道管路施設に起因する道路陥没の現状(2006-2009年度), 国土技術政策総合研究所資料, No.668, 2012.
- 4) 深谷渉：取付管の視点から見た道路陥没の現状, NPO21 世紀水倶楽部, 2013.  
[www.21water.jp/G130327-1.pdf](http://www.21water.jp/G130327-1.pdf)
- 5) [http://www.gesui.metro.tokyo.jp/kanko/kankou/2005\\_of\\_tokyo/07.htm](http://www.gesui.metro.tokyo.jp/kanko/kankou/2005_of_tokyo/07.htm) (2015 年 11 月 11 日確認)
- 6) 国土交通省関東地方整備局 web サイト (直轄国道の舗装 (路面) に関する保全検討委員会, 第 1 回委員会配布資料, 2015 年 10 月 1 日確認)  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010896.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010896.pdf)
- 7) 桑野玲子, 佐藤真理・瀬良良子：地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.219-229, 2010.
- 8) 国土交通省東北地方整備局東北技術事務所 web サイト (技術支援, 保全技術の支援—道路, 路面下空洞調査, 2015 年 10 月 1 日確認)  
<http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/kensetsu/hozen/kudou.html>
- 9) 国土交通省関東地方整備局 web サイト (直轄国道の舗装 (路面) に関する保全検討委員会, 路面地下の適切な管理のあり方について, 2015 年 10 月 1 日確認)

[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010896.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010896.pdf)

- 10) 国土交通省関東地方整備局 web サイト（直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会，第4回委員会配布資料，2015年10月1日確認）

[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010896.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010896.pdf)

- 11) 住吉卓・橋原正周・大石雅登：路面下空洞上での繰返し載荷実験，東京都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.115-130，2011.

- 12) 国土交通省総合政策 web サイト（国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画），2015年11月11日確認）

[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei\\_point\\_mn\\_000011.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000011.html)





## 第2章 既往の技術・研究

### 2.1 概説

道路陥没が発生した際の道路管理者の対応は、現状では対処療法的で事後保全型の対応が主流と言わざるを得ず、すなわち、「陥没が発生したら、その都度、補修工事を行う。」ことである。これには、

- 1) 陥没が突然発生する、またその予測できない。
- 2) 第三者への被害が予想される。
- 3) 補修には通行止めなどの措置が必要となり、交通への障害が長期間にわたる場合が多い。
- 4) 不意に多額の費用が発生する。

などの問題があり、道路管理者や占用管理者の重要な課題の一つである。こうした状況から近年では、予防保全の考え方が主流となりつつあり、公共土木構造物の多くが長寿命化計画を立案し、計画的で効率的な維持管理を図っている。

一方、道路陥没に力点を置いた道路管理者の維持管理対応は、

- 1) 陥没発生前の予兆がわかりにくく、あってもその直後に陥没に至ることが多い。
- 2) 陥没の現象に未解明な部分がある。
- 3) 原因が道路ではなく、埋設占用物であることが多い。

などの理由のため、対策が後手に回るケースが多い。しかしながら、道路管理者は計画的な道路表面の巡回点検（一次調査）や問題箇所の精密点検（詳細調査）、占用管理者は占用物の劣化診断や耐震診断による構造物の調査を計画的に実施し、

道路陥没の前兆を未然に把握することに注力している。

現在の空洞探査技術は、地中レーダー探査（電磁波）、弾性波探査、電気探査、重力波探査などの手法がある。いずれの手法も、交通や周辺工場の振動や外来電磁波などのノイズの影響を受けやすい、手間がかかる、交通規制が伴うなど、特に都市部での探査ではその適用範囲が限定される。最近では、都市部のノイズを受けにくいとされている自然宇宙線のミュオン粒子を活用した探査手法の研究開発も行われているが、システム構成や解析手法など解決すべき問題点が多いとされている。現在、汎用している手法のうち、地中レーダーは物質中を伝播する電磁波の反射到達時間と反射往復時間の違いから物質の違いを判定するもので、浅層部（およそ GL-1.5m 以内）における異質物探査には有効とされている<sup>1)</sup>。路面下の空洞探査については、現在この目的で開発された空洞探査車によって行われており、探査速度が時速 45 km 程度ということもあって、通行規制を伴わずに路面下の異質物を瞬時に把握可能という利点から、地中レーダーによる探査が空洞探査の主流となっている。

国土交通省においては、2009 年 5 月に学識経験者からなる「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」を立ち上げ、「直轄国道の管理の将来ビジョン」<sup>2)</sup> について議論し、2011 年 3 月に「路面地下の適切な管理のあり方について」<sup>3)</sup> 答申した。さらに、これを受けて 2013 年 2 月に「総点検実施要領（案）【舗装編】」<sup>4)</sup> を策定し、道路の路面下の空洞に起因した陥没による第三者被害を防止する観点から、路面下に発生した空洞を発見し、陥没の予防措置を講じることを目的とした路面性状基礎調査および路面陥没危険箇所調査の実施要領をまとめた。

一方、下水道管理者の視点からも種々の研究が行われている。下水道に起因する道路陥没は、年間 5,000 件以上発生する年<sup>5)</sup> もあり、また下水道管路ストック

は2013年度末で46万km<sup>5)</sup>を超えた。こうした状況のなか、計画的な長寿命化と効率的な維持管理を図るための対策が研究されている。たとえば、下水道管に損傷部があった場合、そこから地下水浸入水や雨天時浸入水といった不明水が管路部へ流入する。その際に管直上部にある土砂がこれらによって崩壊して管路内へ流出する。そして地盤の空洞化が生じ、道路陥没に至る危険性が指摘されている。このため、下水道管理者は、管路の内部からテレビカメラによる調査などを行って損傷箇所の特定に努めている。しかしながら、膨大な延長の下水道管を調査することにおいて、効率的で経済的な調査技術が少なく、対処療法的な補修を行っているのが現状である。

こうした現状のなか、路面下空洞に関する研究では、桑野らのグループでの路面下空洞・ゆるみの生成・進展の過程を実験室規模で再現してそのメカニズムを探る研究、住吉らのグループでの屋外ヤードに空洞を人為的に作成して直上の路面に繰り返し载荷を行い、空洞の変化を観察した研究などがある。

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。

## 2.2 路面下空洞調査技術の変遷

2008年までの路面下空洞調査技術の変遷は、雑賀らによってまとめられている

6). これを引用して調査技術の変遷を述べる.

1988年6月、東京都中央区銀座を中心に2週間で12件もの道路陥没が発生し、「陥没症候群」として社会問題となった。この道路陥没事故を受けて、当時の建設省関東地方整備局は「地下埋設物施工研究会」を設立し、道路占用工事に係わる施工管理や地下埋設物管理の実態と対応策を検討した。それまでに実施されていた道路パトロール、赤外線や埋設物探査用装置を用いた調査については、莫大

表 - 2.2.1 路面下空洞調査の展開の経緯

年月	主要事項
1988.6	東京都中央区での空洞陥没多発
1988.7	建設省(当時)関東地方整備局に「地下埋設物施工研究会」が発足
1990	路面下空洞探査車が完成、建設省関東技術事務所、近畿技術事務所に配備
1990	保全センターに「路面下空洞調査に関する調査検討委員会」が設立され、空洞発生メカニズムの解明と調査マニュアルの検討に着手
1991	関東、北陸、中部、近畿の各地整にて路面下空洞調査開始
1992	中国地整にて調査開始
1994	四国、九州各地整にて調査開始
1995	北海道開発局にて調査開始
1995	路面下空洞調査点検マニュアル(案)が完成
1999	沖縄総合事務所にて調査開始
2001	探査車のアンテナを2連から7連に変更
2002	国交省東北、関東、九州各地整にて歩道探査車の調査開始
2003	中部、中国、四国各地整にて歩道探査車の調査開始
2004	北陸地整にて歩道探査車の調査開始
2004	新潟県中越地震の被災地の調査に適用
2005	福岡県西方沖地震の被災地の調査に適用
2007	福井県能登半島地震、新潟県中越沖地震の被災地の調査に適用
2009.5	国交省「直轄国道の舗装(路面)に関する保全検討委員会」発足
2011.3	国交省「路面地下の適切な管理のあり方」報告書

な費用が必要で、交通規制を伴い、しかも空洞検知精度が低いことなどから、実用的な路面下空洞探査技術の開発が求められ、地中レーダー技術の開発に期待がかけられた。表-2.2.1に路面下空洞探査技術の実用化の経緯を示す。

地中レーダーの開発諸元の決定に当たり、空洞の原因となる埋設管破損箇所が特定できるように探査深度を5mとする意見も出されたが、空洞が泡のように深部から浅部に徐々に移動する空洞のメカニズムが分かってきたこと、陥没に直結する空洞は深度0.5～1.0mに存在することから、浅い空洞を見逃しなく探査できることを最優先にした。また、幅2mでの高速な探査を実現するために、車載型多連式のアンテナを採用するという先進的な発想があった。1990年に路面下空洞探査車を開発・完成させ、首都圏を中心に使用が開始された結果、1992年以降解析技術の進化とともに空洞の発見効率が向上し、同時に陥没発生数が激減して、本技術の有効性も確認され、以後全国に普及した。表-2.2.2に路面下空洞探査車の仕様を示す。

表 - 2.2.2 路面下空洞探査車の仕様

項目	仕様
レーダー種類	パルス波レーダー
	中心周波数:500MHz
アンテナ数・探査幅	1990年:2ch, 2m
	2001年:7ch, 2.45m
探査速度	1990年:時速20km
	2001年:時速45km
探査深度	最大1.5m
検知可能空洞規模	幅:50cm
	長さ:50cm
	厚さ:10cm以上

路面下空洞探査車の導入に伴い、1990年、財団法人道路保全技術センター（以下、「保全センター」と記す）に「路面下空洞探査に関する調査検討委員会」が設

置され、路面下空洞探査手法の確立とその運用基準の整備が始まった。調査結果の分析、既存資料の調査分析、路面下空洞の発生状況や原因の検討を経て、1995年に「路面下空洞調査点検マニュアル(案)」が作成された。図-2.2.1の調査フローに示すように、路面下空洞調査は、車載型地中レーダーを活用して空洞の可能性のある異常箇所を“非破壊”のレーダー探査で把握する一次調査と、実際の空洞の有無、空洞の規模を“微破壊”のスコープ調査で確認する二次調査の組合せ

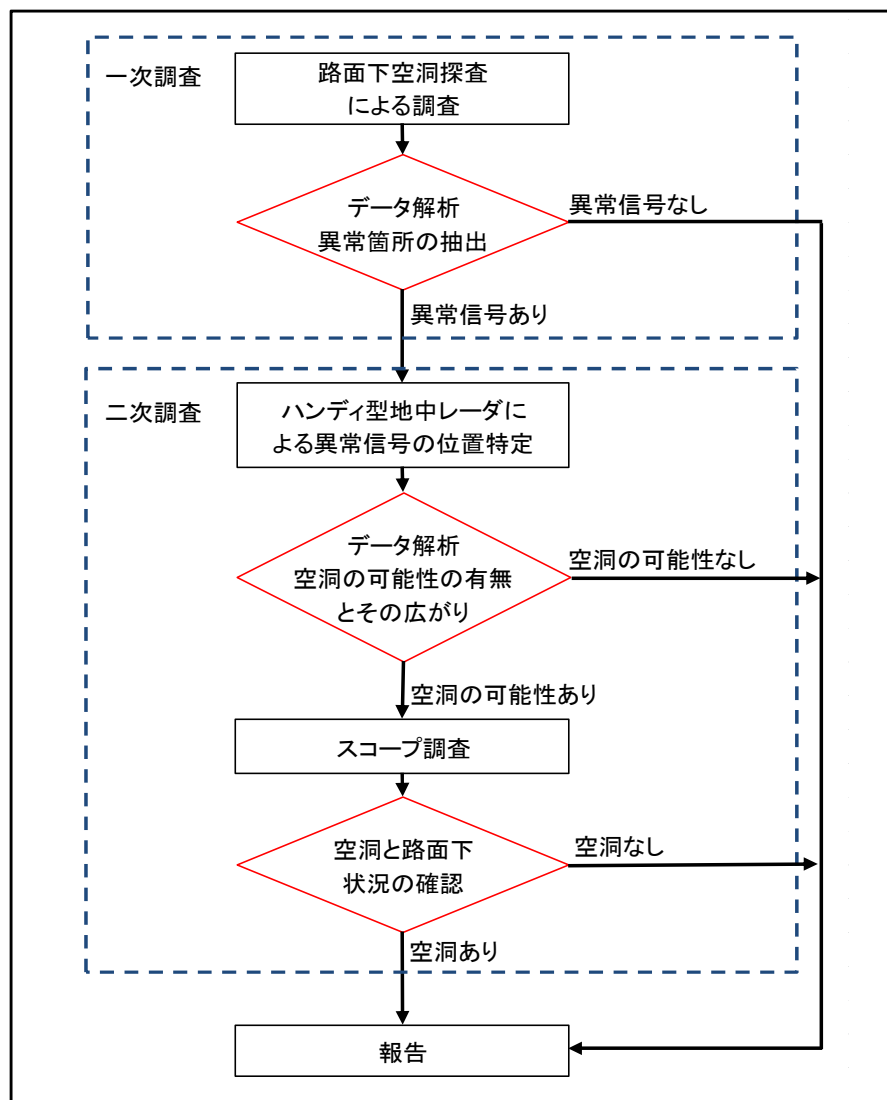


図 - 2.2.1 路面下空洞調査のフロー

となっており、「2.3.1 路面地下の管理の現状」で後述する現在の作業フローの原形となっている。

以上のような背景から開発された地中レーダーを活用した路面下空洞探査システムは、世界的にみても独特な調査方法として、全国の国道や主要自治体などで道路点検の主要項目として幅広く活用されていった。

2000年には、東京都内の歩道で大規模な陥没が発生し、通学中の高校生が大怪我をする事故が発生した。地下空間利用の高度化や既存埋設物の老朽化の進展によって、路面下の空洞発生要因は歩道部においても深刻な状況となり、老人や車椅子利用者などの交通弱者も安心して利用できる歩道空間の確保は道路管理者にとって重要な課題の一つとなった。そこで、2002年には歩道下に潜む空洞を効率的かつ経済的に探査すべく歩道探査車を開発し、順次全国展開されていった。

全国の国と自治体が管理する道路において、保全センターが実施した路面下空洞探査では、2005年3月末で調査延長は51,500 km、発見空洞は5,800個であった。それ以降も毎年、車道と歩道を合わせて約8,000 km延長の調査が実施された。

その後、国土交通省<sup>2)</sup>は、①直轄国道が担う交通機能が果たすための安全性・信頼性、②安全性・信頼性を実現するために要求される施設管理レベル、③施設管理レベルを保持する組織として必要な技術力・体制、④長期にわたる安全性・信頼性を確保するために最適な投資計画、を全体の着想の中で「舗装（路面）の保全」を個別テーマとした「直轄国道の管理の将来ビジョン」について策定した。同省は、大量の自動車交通を支える直轄国道に求められる安全性・信頼性を確保するため、日常パトロールから構造物点検保全、補修補強に至る「維持管理」を日々実施している。しかしながら、この直轄国道が担う交通機能を果たすためにどの程度の安全性・信頼性を確保すべきか、そしてその安全性・信頼性を実現す



るのにはどの程度の管理レベルとすべきか、ということがこれまで以上に重要となる。一方、本格的な維持・更新の時代を迎え、「今後、急速に老朽化していく構造物をどのように維持していくのか」などの課題に直面している。このため、有識者からなる「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」を2009年5月に立ち上げ、直轄国道の管理の将来ビジョンとして「路面地下の適切な管理のあり方」<sup>3)</sup>を策定した。

この検討委員会は、第1回委員会を2009年5月21日に、第2回を6月14日、第3回を7月3日に、そして現地調査を8月4日と8月9日に行い、最終第4回委員会を同年8月26日に開催して「中間とりまとめ」をし、2011年3月に「路面地下の適切な管理のあり方」報告書をまとめた。現在、直轄国道の路面下空洞調査は、この報告書に示された手法に従って実施されている。

## 2.3 路面下空洞調査に関する既往の技術

### 2.3.1 路面地下の管理の現状

2009年に設立された「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」が、2011年3月にまとめた「路面地下の適切な管理のあり方」<sup>3)</sup>報告書において、路面地下の管理の現状を

- 1) 道路パトロールにおいて、路面を巡視し、路面および舗装の異常を捉えて路面陥没の未然防止を図っている。
- 2) 発生する空洞に対して、概ね1年～数年程度に1回、路面空洞探査車を使用し、電磁波レーダーにより波形を捉え、異常信号の抽出、スコーピングによる路面下空洞探査を実施し、路面陥没の未然防止を図っている。

と認識している。

また、路面空洞探査車で使用する電磁波レーダーの適用限界・特性では、技術上の特性・課題として

- 1) 路面下の空洞探査は、一次調査として路面空洞探査車を使用して行っており、交通規制を伴わずに路面下の異質物を把握可能という利点から、現存する他の探査手法と比較して有効である。
- 2) 現状のレーダー探査では、空洞であるか否か、空洞の大小を一義的に判定することは困難である。具体的には、相対屈折率が同じなら境界面での反射率は同じなので第一反射波の大きさだけでは空洞であるかの判断はできない等の原理的な問題、濃淡で表示したレーダー画像からアスファルト路面下の空洞あるいは砂利を区別するのは困難であることや、占用工事で一部分のみの埋め戻しをすれば埋め戻した材料の屈折率の差がレーダー信号として検出さ

れる可能性がある等の技術的な課題・特性がある。

を挙げている。図-2.3.1に路面地下の管理作業フローを示すが、作業フローの一次判定で使用する道路の空洞情報データは、空洞探査車に搭載された電磁波レーダーによって得られる。

なお、図-2.3.1の右上には、FWD試験による舗装健全度の調査が含まれているが、空洞評価に反映するための手段として利用されていない。FWD試験は、「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」の中で実施された現地調査において、空洞の危険性を評価するための試験として用いられた。その結果、重交通路ではよほど成長した空洞であれば健全部とのたわみ差が生じるが、そうでない場合にはたわみ差が生じにくいと考えられた。ただし、「路面地下の適切な管理のあり方」報告書では、陥没を引き起こすような空洞について、FWD試験のたわみ量で判定するための一定の目安を検討すべきであるが、現場試験としてFWD試験による「たわみ量」の測定は、舗装の安全性、健全性を判定するための有効な手法であると位置づけている。

以下に、電磁波レーダー法（Ground Penetrating Radar：GPR、以下GPRと記す）による空洞評価手法および空洞を伴わない舗装のFWD試験による健全性評価手法について述べる。

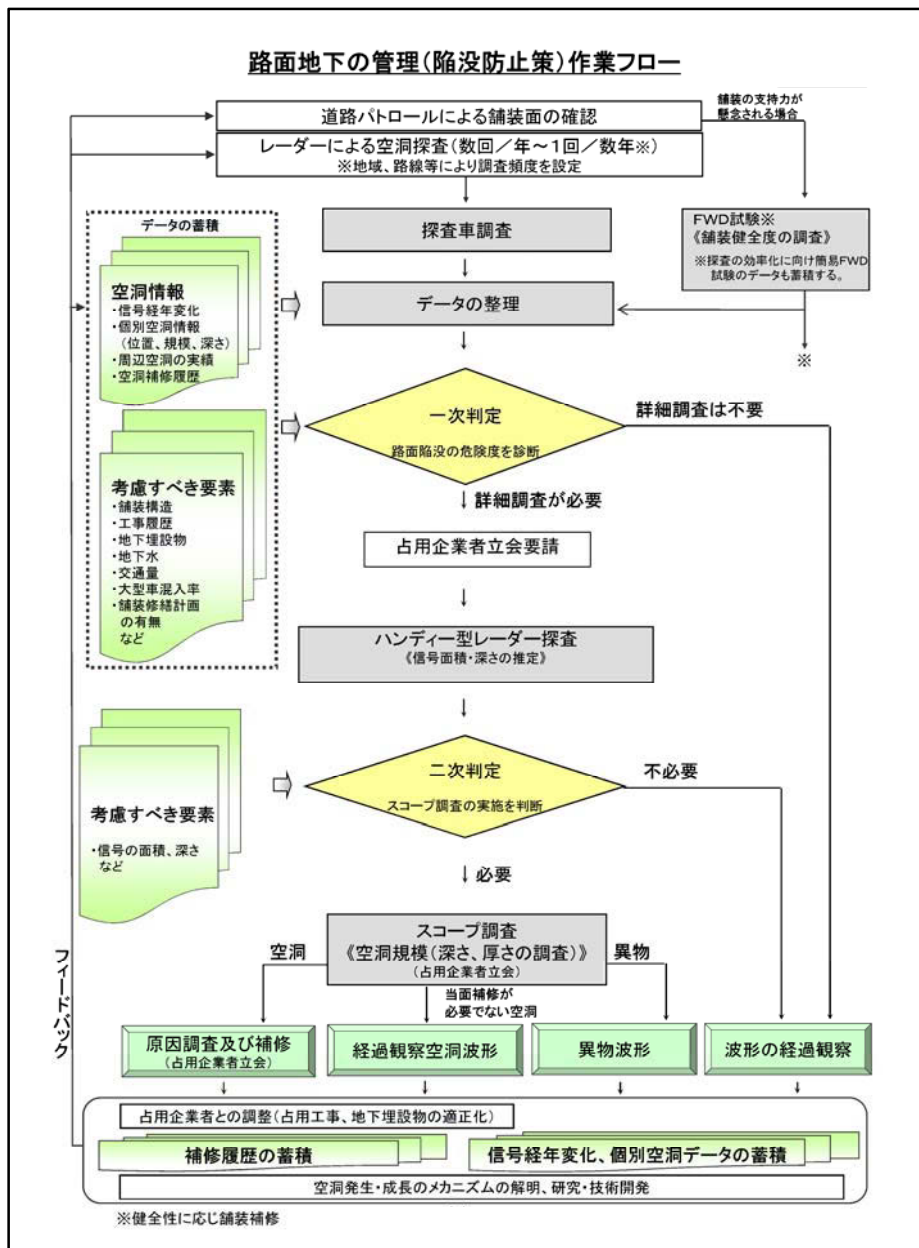


図-2.3.1 路面地下の管理（陥没防止策）作業フロー図<sup>3)</sup>

### 2.3.2 GPR による空洞評価手法

GPR は、路面下空洞，埋設管探査，トンネル背面空洞調査，コンクリート構造物内の鉄筋，埋設物およびコンクリートの部材厚，空洞等の調査方法の一つであ

り、特徴としては、取り扱いが簡単、短時間で広範囲の調査が可能、特別な資格・免許等を必要としない、短時間で結果が得られるなどが挙げられる。しかしながら、簡便な手法のため、作業者の技量や経験に依存することが多い手法ともいえる。

GPRによる空洞探査の基本原理は、電磁波による舗装材料と空洞の比誘電率の違いを利用した探査方法である。電磁波は、比誘電率の違う物質との境界層で反射・透過する性質を持ち「比誘電率が高い物質から低い物質」、「比誘電率が低い物質から高い物質」では反射波の位相が逆になる。空気は、舗装材料や埋設物に比べて比誘電率が低いため、層の境界などによる反射波と空気との反射波では位相に違いが出る。したがって、反射波を受信していくことで空洞の可能性が高い異常信号を抽出することができる。この探査における地中レーダーのデータは、反射波の受信を道路調査車の走行方向に連続的に実施し白黒の濃淡で可視化することで、目視により空洞と異物の可能性のある異常信号を抽出することができる。

#### (1) 原理<sup>7)</sup>

レーダー方式での(深さ)／(厚さ)測定については、図-2.3.2に示すように、電気的特性の一種である比誘電率が材質によって固有であるため、これを生かして境界面での電磁波の反射を利用する。深さ D は式(2.3.1)により与えられ、式から判断できるとおり、電磁波がコンクリート表面に放射され、境界面で反射して再び表面に戻ってくるための時間を利用する。

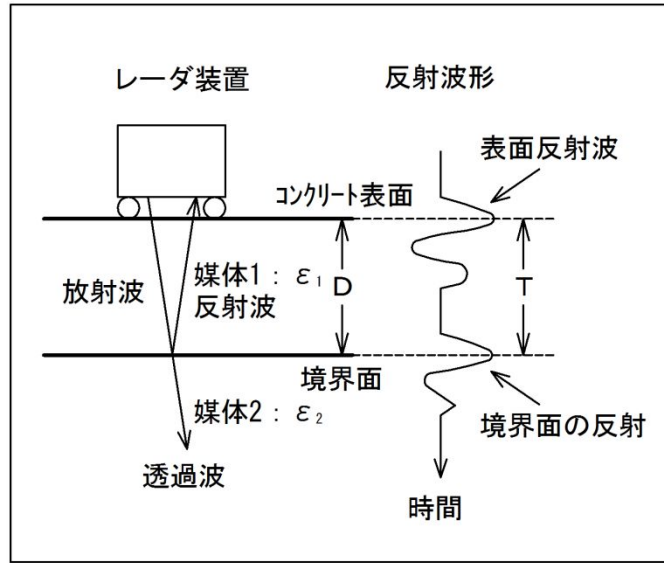


図-2.3.2 レーダー層との原理図<sup>7)</sup>

$$\begin{aligned}
 D &= (1/2) \times T \times V \\
 &= (1/2) \times T \times (3 \times 10^8 / \sqrt{\epsilon_1})
 \end{aligned}
 \tag{2.3.1}$$

$\epsilon_1$  : 媒体 1 の比誘電率

$D$  : 表面から境界面までの深さ

$V$  : 電磁波の速度 (m/s)

$T$  : 反射時間 (s)

(2) 材料の推定<sup>7)</sup>

反射の強さを示す反射率  $\gamma$  は、式(2.3.2)によって求められる。

$$\gamma = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})
 \tag{2.3.2}$$

$\epsilon_2$  : 媒体 2 の比誘電率

したがって、境界面での反射強度は、境界面を形成しているそれぞれの媒体の

有する固有の比誘電率の差によって、さらに反射波形の極性も比誘電率の大小関係によって決まる。たとえば、 $\epsilon_1 > \epsilon_2$  の場合には、図 - 2.3.3 に示すように反射波形の最初のピークは左側になる。一方、 $\epsilon_1 < \epsilon_2$  の場合には、図 - 2.3.4 に示すように反射の最初のピークが右側になる。前述したように、反射波形のこれらの特徴から地中の状況を非破壊で診断する。

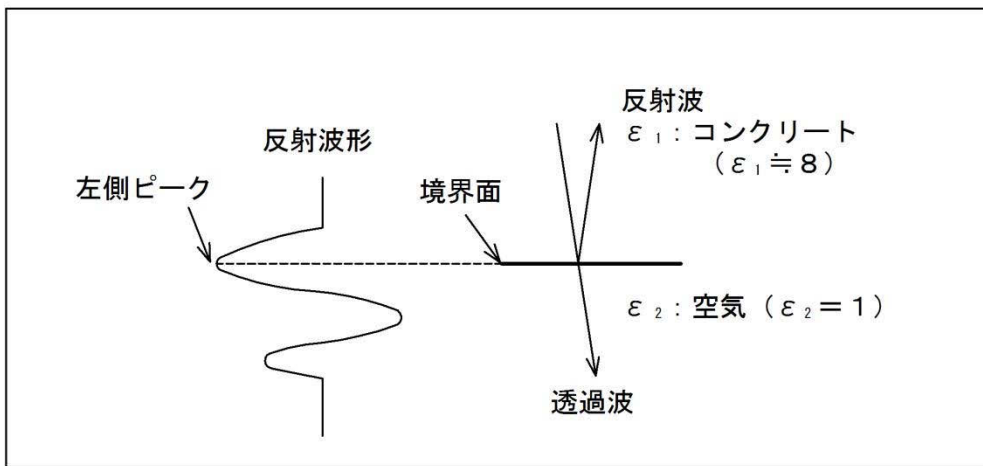


図-2.3.3 反射強度と反射波形 ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ )<sup>7)</sup>

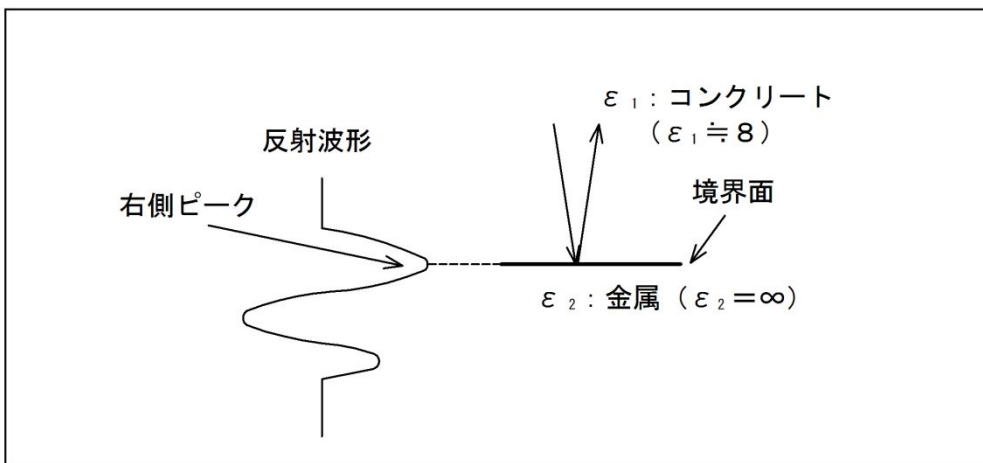


図-2.3.4 反射強度と反射波形 ( $\epsilon_1 < \epsilon_2$ )<sup>7)</sup>

### (3) 材質と比誘電率<sup>7)</sup>

主な材質の比誘電率を表-2.3.1に示す。表と式-2.3.2からわかるように、たとえばコンクリート裏が玄武岩や石灰岩のような場合には比誘電率が近似しているため、反射率 $\gamma$ が「0」になり、境界面からの反射波形が検出できなくなる。

表-2.3.1 代表的な材質と比誘電率

材質名	比誘電率	材質名	比誘電率	材質名	比誘電率
空気	1	粘土(乾燥)	2.4	石灰岩(湿潤)	8
淡水・海水	81	粘土(湿潤)	15	コンクリート	9
砂(乾燥)	2.6	玄武岩(湿潤)	8	アスファルト	5
砂(湿潤)	25	花崗岩(湿潤)	7	碎石路盤	9
ローム(乾燥)	2.5	頁岩(湿潤)	7	金属	$\infty$
ローム(湿潤)	19	砂岩(湿潤)	6		

### (4) 測定結果の画像例<sup>1)</sup>

一般に、画像中の異常信号について、空洞や埋設物等の判読は、走行方向の任意位置における深さ方向の反射波形の違いから行える。すなわち、空洞やゆるみ(写真-2.2.1(a)および(b))の場合であれば、空洞やゆるみ上面の材質(物質の比誘電率が高い)と空洞やゆるみ(物質の比誘電率が低い)の境界では反射波形の形状が深さ方向にプラス、マイナス、プラスの順(画像上では白色、黒色、白色の順)に変化する。一方、水分を多く含んでいる材質や埋設物(写真-2.2.1(c)および(d))は、これらの比誘電率が非常に高いので、前述した反射波形とは逆の形状となる。ただし、上記の判読において、反射波形の形状、すなわち、プラス・



マイナスの違いがはっきりしている場合とそうでない場合があり，はっきりしていない場合は判読が難しくなる．なお，異常波形の深さは，電磁波が比誘電率の異なる物質の境界面を反射して戻るまでの時間から計算している．また，写真画像における横は探査車の進行方向であり，縦は深さ方向を表している．

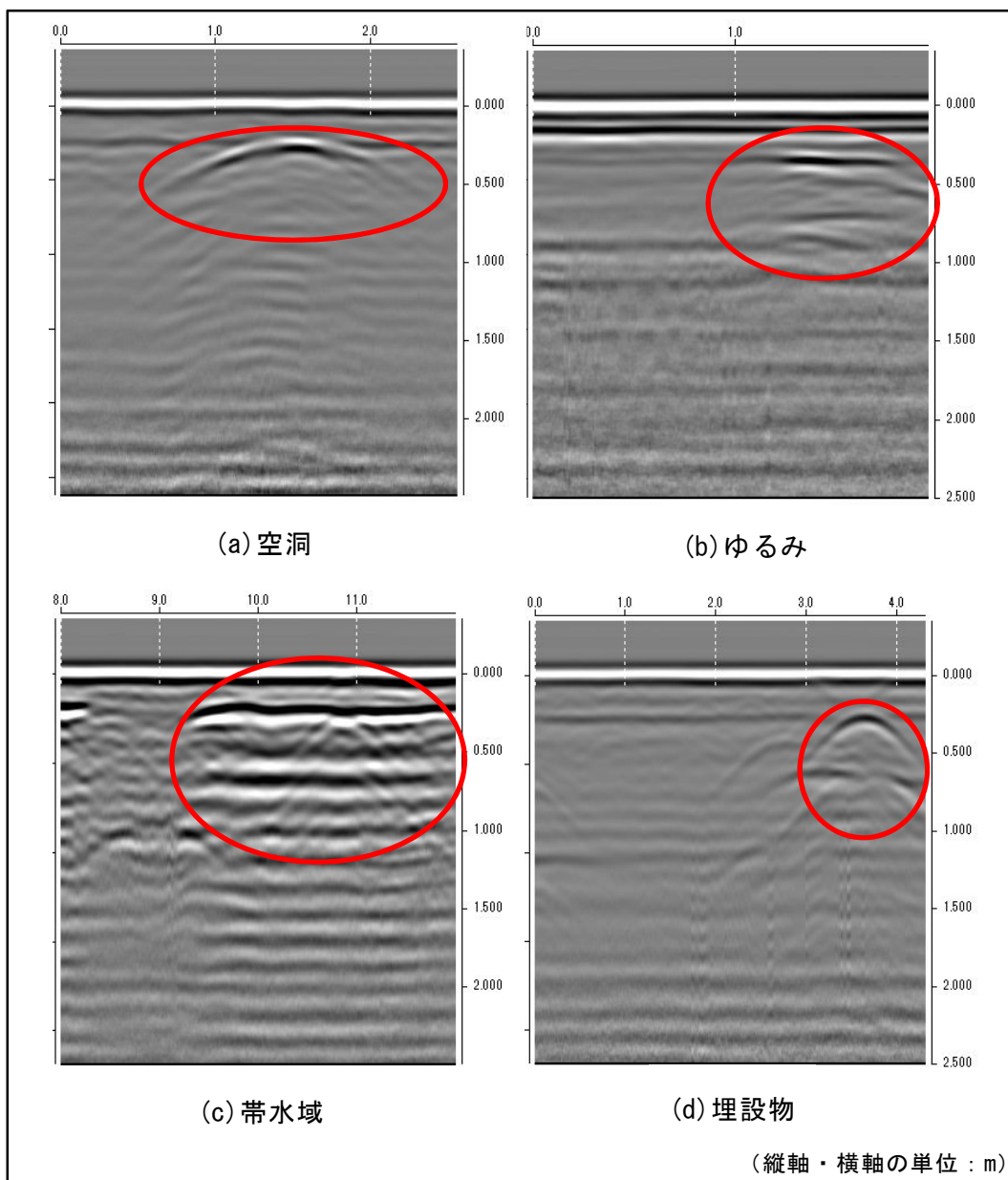


写真-2.3.1 地中レーダー画像の一例<sup>1)</sup>

なお、土中、もしくはコンクリート中の円形管や鉄筋が山形状の画像として表示されるのは、図 - 2.3.5 に示すようにレーダー装置が当該対象物に近づいてから遠ざかるまでの距離差( $D_1 \sim D_2$ )により、各位置で反射波形が発生する時間が異なり、結果として断面画像が山形画像となる。

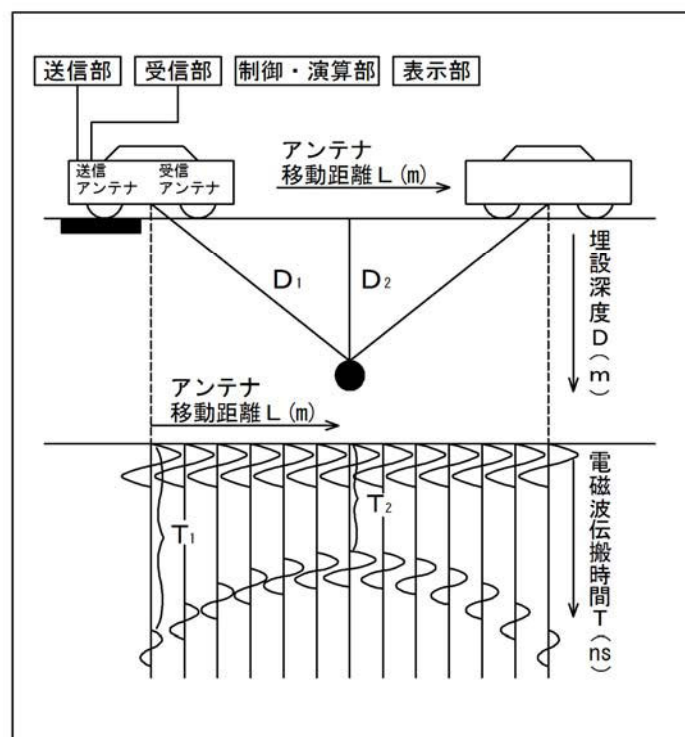


図 - 2.3.5 山形の断面画像<sup>7)</sup>

### 2.3.3 FWD 試験

#### (1) FWD

FWD (Falling Weight Deflectometer) とは、第 1 章「1.2 研究の目的」で記述したとおり、重錘落下式たわみ測定装置をいう。FWD は、重錘を落下させて路面

に衝撃を加え、そのときに発生する路面のたわみ量を複数のセンサーによって測定する装置である。図 - 2.3.6 に FWD 装置の仕組みとたわみ曲線図を示す。

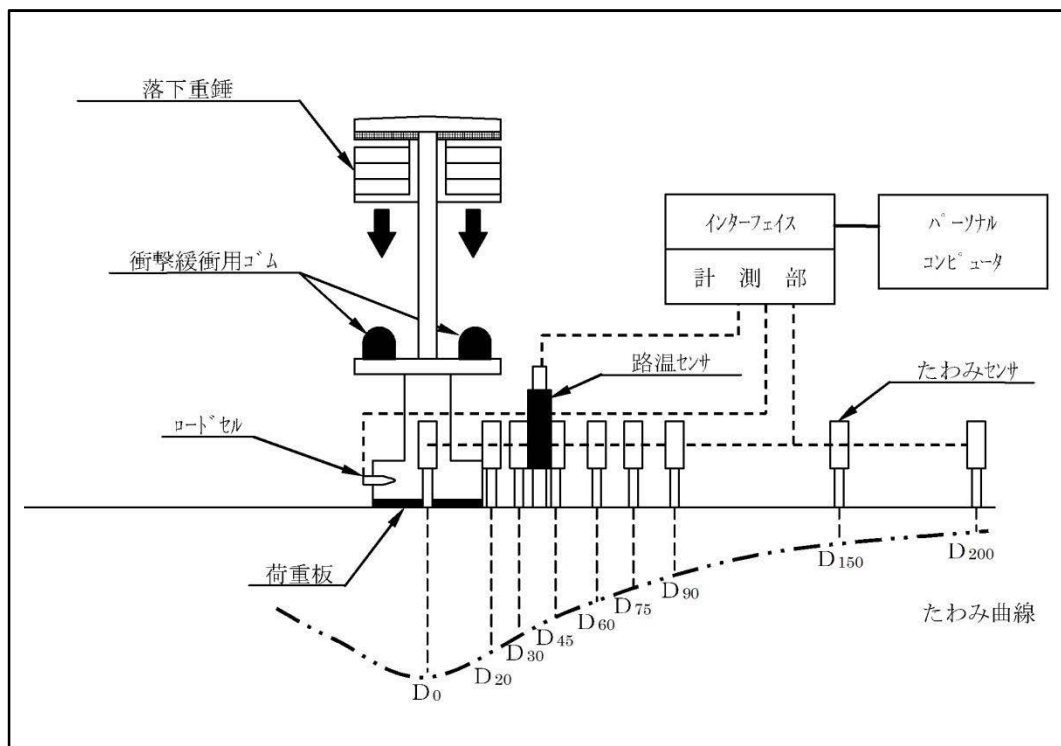


図 - 2.3.6 FWD 装置の仕組みとたわみ曲線図<sup>8)</sup>

複数点のたわみ量を同時に測定すると、落下点を中心に舗装がどのような形状にどれだけたわんだかがわかる。このたわみの形状やたわみ量は舗装内部の状態を反映しており、これらの値を解析することにより、舗装の健全度を判定できる。

図に示すとおり、FWD は主に以下の装置からなっており、車載あるいは牽引して、簡単に移動できるようになっている<sup>9)</sup>。

① 载荷装置

- 重錘を落下させて衝撃荷重を路面に载荷する。

- 落下させる高さを変えることによって 25, 49, 78, 90kN などの衝撃荷重を載荷させることができる。
- 通常は、標準的な輪荷重と同じ 49kN を載荷する。

② たわみ測定装置

- 舗装のたわみ量を複数のセンサによって計測する。

③ データ取り込み・記録装置

- 計測したデータ（荷重，たわみ，路面温度，気温など）を記録する。

写真-2.3.2 は、車載型の FWD であるが、1 台に載荷装置，たわみ測定装置，データ記録装置のすべてを搭載するタイプの測定車である。



写真-2.3.2 車載型 FWD による調査状況<sup>10)</sup>

FWD は、1 回の載荷で複数個の点のたわみ量を同時に測定することができるの

で、図-2.3.6 に示すようなたわみ曲線を簡単に作成することができる。図中の  $D_i$  ( $i=0, 20, 50\dots150, 200$ ) は、載荷点直下から  $i$  cm 離れた位置のたわみ量を示しており、これらのデータを基に路床を含めた舗装全体の支持力や舗装を構成する各層の強度を評価することが可能である<sup>11)</sup>。

## (2) 測定の作業性<sup>12)</sup>

路床の支持力を評価する場合、開削を伴う調査方法では、試料採取から原状復旧まで、1 測点あたり数時間を要する。また、ベンケルマンビームを用いて舗装全体の支持力を評価する場合、1 測点あたり 20～30 分程度を要する。これに対し、FWD を使った舗装の健全度調査では、現地での測定時間が 1 測点あたり 3～4 分という短時間で完了できるほか、非破壊調査であるため、調査後の復旧工事が不要であり、交通規制時間が大幅に短縮できる。

FWD の測定は、図-2.3.7 に示す作業が基本であり、それを繰り返し作業する。測定はほとんどすべてをコンピューター制御で行うため、迅速であり、人的には軽微でかつ車内で行う作業であるため、作業員にとっては安全な環境で調査が完了する。

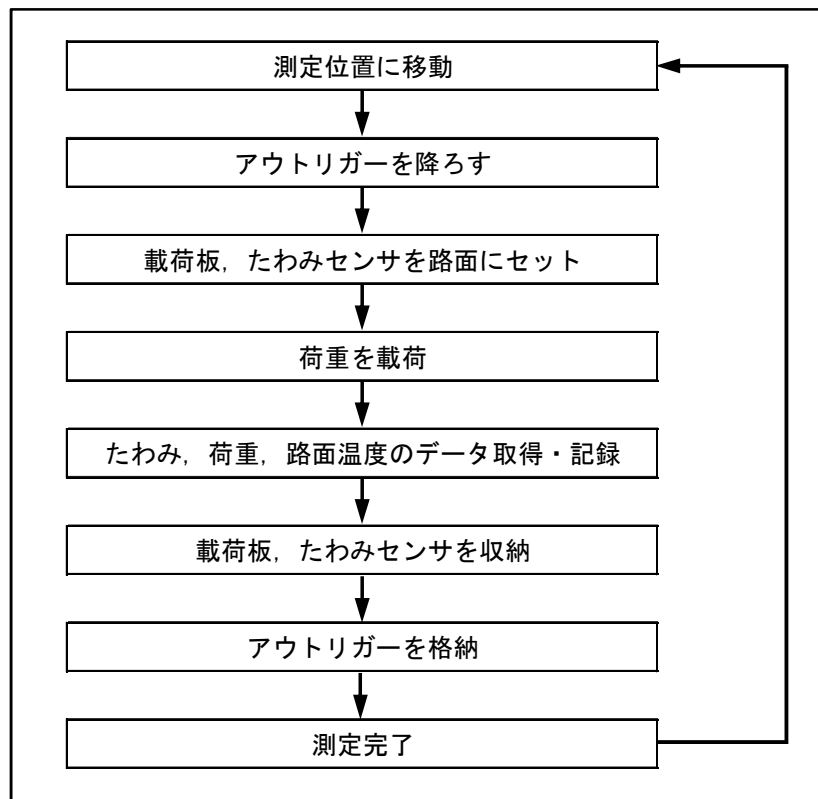


図 - 2.3.7 測定作業の流れ <sup>12)</sup>

## 2.4 下水道管理者の空洞発生防止に向けた取組の現状

### 2.4.1 下水道管が原因の空洞について

国土技術政策総合研究所は、下水道管路施設に起因する道路陥没の現状<sup>13)</sup>、<sup>14)</sup>をまとめた。これによると、下水道管路施設に起因する道路陥没の傾向として、

- 1) 下水道が原因の道路陥没は、年間 4000 件程度発生している。
- 2) 管きょ延長当たりの陥没件数は、約 1.0 件数/100km/年である。
- 3) 道路陥没発生時期は、夏期及びその前後に集中する傾向にある。
- 4) 管きょの経過年数が長いほど陥没件数は増加する傾向にある。
- 5) 原因施設では、取付管の陥没件数が多い傾向にある。
- 6) 管種では、陶管の陥没が多い傾向にある。
- 7) 陥没の規模は総じて小さい。

と結論付けている。

下水道管路施設が道路陥没の原因として多い理由は、

- 1) 老朽化などで破損した下水道管は直ちに不具合を表さないので、破損後、相当の時間経過とともにその破損孔から土砂が流入し続ける。
- 2) 下水から発生する硫化水素ガスがコンクリート管内部を腐食させ、その腐食孔から土砂が流入する。

などの理由がある。水道管やガス管などは、施設に不具合が生じた場合、ただちに水道水の地上への噴出やガス臭によって周囲が異常を確認することができ、道路陥没とは異なる災害に発生するため道路陥没の原因になることは少ないと推測される。

## 2.4.2 下水道管が原因の空洞成長メカニズムと調査技術

図 - 2.4.1 に一般的な下水道管の布設状況を示す。

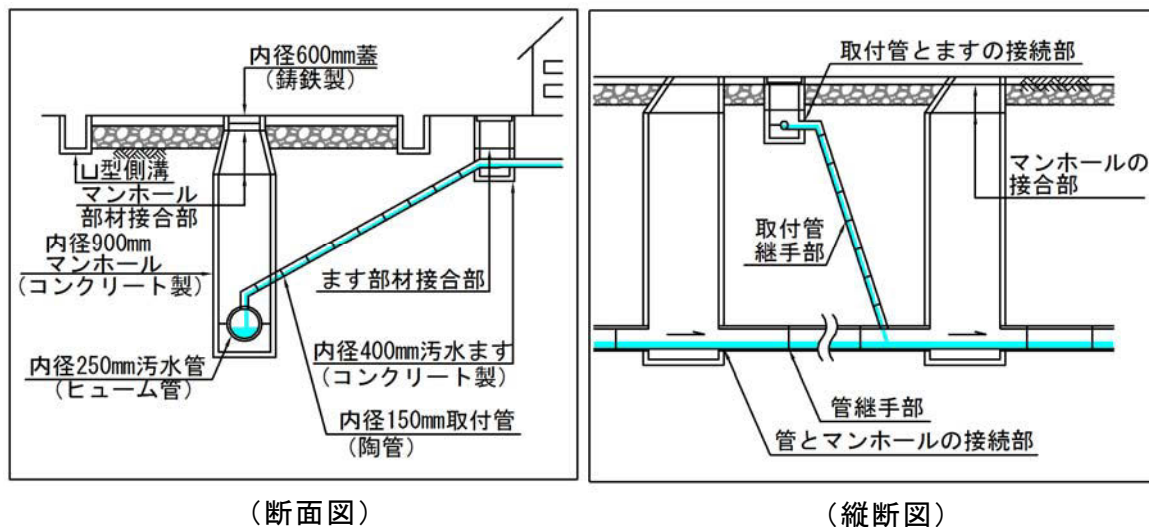


図-2.4.1 下水道（汚水）管布設状況

下水道施設は、下水が流下する管路とマンホールの管路施設と宅地内の汚水を管路施設へ接続する取付管と汚水ますからなる。近年の下水道施設は、水密性を高めるため、また耐腐食性能を高めるために塩化ビニル管を採用することが多いが、老朽化が顕在化している管路施設の多くは、陶管や鉄筋コンクリート（ヒューム）管である。前述したように、供用している下水道管は、原則として下水を自然に流下させている。このため、何らかの原因で管路施設が開孔してもその不具合を発見できずに時間経過する場合が多い。また、その破損孔などから土砂が流入しても、最下流の下水処理場でその異常を発見することは困難である。こうした状況のなか、管路施設の脆弱部分が老朽化によって破損した場合や硫化水素ガスによりコンクリート管が腐食破損し、破損箇所から周辺土砂が流入すると予



想される。特に、陶管や鉄筋コンクリート管（ヒューム管）などの材質は、それぞれの部材を接続して連続した一体の施設となっているが、接続部の強度や偏荷重などの原因や“抜け”や“屈曲”によって破損や破断しやすい。

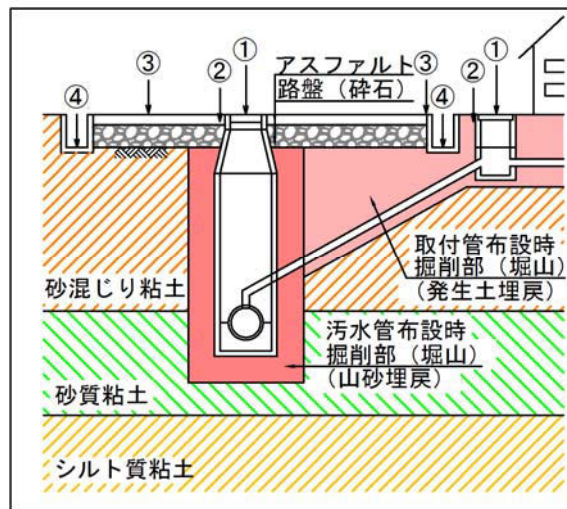


図 - 2.4.2 下水道管の埋設状況と雨水の浸入経路

一般的な下水道管の埋設状況を図 - 2.4.2 に示す。地盤の条件は埋設する環境によって異なるが、老朽化が懸念される 10 年以上経過した管路の埋戻し土には、山砂が使用されていた。このような状況で降雨時に雨水が浸透する経路は、

- ① マンホール・汚水ますの蓋穴から直接内部へ浸入。
- ② 蓋受枠の外側から掘山に浸透し、管継手部・管とマンホールの接続部、マンホール部材の接合部、汚水ます部材の接合部から浸入。
- ③ 道路側溝とアスファルトの間、もしくはアスファルトクラックなどから路盤、掘山へと浸透し、上記②と同様に浸入。
- ④ 側溝の継ぎ目から路盤、掘山へと浸透し、上記②と同様に浸入。

⑤ 宅内の誤接合，もしくは汚水ますや蓋の破損．

であると考えられる．なお，①～④は図 - 2.4.2 の番号に対応する（以降，経路①，②…と記す）．

降雨開始とともに，雨水はまず，道路側溝へ流入するとともに経路①～⑤へも流れ込む．このため，降雨開始直後は，経路①，⑤からの雨水で水温が低下し，一定時間経過後からは，経路②～④で浸透した雨水が掘山内に滞留し，徐々に管路内へ浸入すると推測する．

以上，述べたように降雨時に雨水が地中を浸透して破損した下水道管に流入する場合，下水道管周辺の土砂が雨水と一緒に下水道管に流れ込み，その結果，空洞が発生し，その空洞が徐々に大きく進行し，かつ段々と地表面へと上昇して道路陥没に至ると考えられる．したがって，何らかの原因で破損，あるいは開孔した下水道管路の周辺には，空洞が発生しているリスクが高い．換言すれば，道路陥没を未然防止するためには，下水道管路の不具合箇所を発見すること，さらには雨天時浸入水などの不明水が流入する箇所を特定することが重要であるといえる．

不明水の調査手法としては，大別して浸入水を目的とした流量調査，注水試験，水圧・圧気試験，また，誤接合をターゲットとした送煙調査，音響調査，染料調査，温度センサーによる調査技術などがある．さらに詳細は，管路内を TV カメラによって調査するのが一般的である．

例えば，温度センサーによる技術<sup>15)</sup>は，比較的広域な調査範囲から異常箇所を効率的に絞り込むスクリーニング技術の一手法として，主に雨天時浸入水が管路内水温に影響することに着目し，対象区域に対してマンホールごとに温度センサーを用いて水温を測定し，専用ソフトで解析することで，不明水の流入箇所，

すなわち管路の異常箇所を特定，絞り込むものである．

水温センサーによる不明水調査は，下水道管理者が維持管理で実施して，不明水が下水管路施設に浸入箇所を特定し，補修することによって，路面下空洞の発生を未然に防止するものの一例であるが，膨大な管路延長から効率的・効果的に施設の不具合箇所を絞り込むスクリーニング技術の開発が望まれるところであり，管理者による維持管理対策が進められている．

## 2.5 空洞評価に関する既往の研究

### 2.5.1 桑野らの研究<sup>16) ~22)</sup>

桑野らは、地盤機能保全工学の観点から路面下空洞の発生メカニズムや地盤陥没の未然防止に向けた研究を行っている。

桑野らの研究の着眼点は、「地中レーダー探査技術を用いて路面下空洞を定期的  
に探知することにより一定の成果があがっているものの、地盤内空洞・ゆるみの  
生成・進展要因や成長速度などの基本的メカニズムに不明な点が多いため、事後  
保全的な対策が中心となっている。」としたうえで、舗装路面下の地表近傍で顕著  
な空洞が存在するような陥没寸前の状態においては、現状のレーダー探査技術に  
より比較的高い確度で探知可能であるが、空洞が深層部にある場合、空洞・ゆる  
みの境界が不明瞭な場合、輻輳した地下埋設物と空洞・ゆるみ部が渾然としてい  
る場合などは、探知技術の限界により問題箇所の検出が困難となっていると現状  
の技術的課題を言及している。そこで、前述のような“大陥没に至る危険のある  
深層部空洞”の探知手法を提案するため、地盤内空洞・ゆるみの形成過程を明ら  
かにし空洞・ゆるみのパターンを類型化すること、さらに陥没に至る“危険な”  
空洞・ゆるみを抽出することを目指している。なお、ここでいう“深層部”とは、  
道路下空洞探査のために使用される地中レーダーの適用範囲を超える深度を称し  
ており、路面下空洞探査に使用されるパルス波レーダーでは対応が困難と言われ  
ている路面下 1.5~2m を超える深さを対象としている。

研究では、空洞・ゆるみのパターンと定量評価、小型土槽による給排水繰返し  
土砂流出実験、および中型土槽による定水位土砂流出実験をしたうえで、以下の  
主な知見と展望を述べている。

- 1) 土砂流出実験により，地盤内に形成される空洞および空洞周辺のゆるみの定量的評価が可能である．
- 2) 地盤の種類や条件により，土砂流出・空洞拡大の速度，空洞周りのゆるみ領域の特性が異なる．また，地盤内の水の浸透方向によって，空洞・ゆるみの形成パターンが異なる．土砂流出源（空洞）付近で水が上下方向に浸透する場合は，空洞は鉛直上方に進展する傾向があり，水が水平方向に浸透する場合は空洞成長も水平方向に卓越する．
- 3) 地盤内空洞・ゆるみの拡大の主要因は，大別すると，①飽和度上昇に伴うサクシヨンの低下および有効応力の低下，②浸透破壊，③細粒分の流出，④空洞拡大に伴う地盤の不安定化等と考えられる．土砂の流出はゆるみ領域内の水みちの形成と不可分であり，特に細粒分の流出は空洞やゆるみの形成が顕著でない段階から始まっている．
- 4) 地中レーダー探査においてゆるみ形成前後の信号の差分を解析することによって，ゆるみを検知出来る可能性がある．

次に，桑野らは，老朽下水管の破損が原因となる道路陥没等の地盤工学的問題を解決する一助となるよう，地盤内空洞とその周辺のゆるみ領域の形成・拡大・進展メカニズムとその評価方法について実験的に検討し，土砂流出による空洞形成の支配的要因や空洞の拡大過程について明らかにした他，空洞周辺の“ゆるみ”領域を定量的に評価し，地盤材料の土砂流出特性を整理している．そして，道路陥没に至るような地盤のゆるみ・乱れと下水管渠の状況の関連について基礎データを得るための実態調査と，老朽下水管の破損部から土砂が流出することによって発生する埋設地盤内の空洞とその周辺のゆるみ領域の形成・拡大・進展メカニズムを明らかにするために，小型土槽を用いて，ゆるみや空洞の発生を模擬した

シミュレーション実験を行っている。実態調査からは、

- 1) 道路陥没を引き起こす下水管渠の損傷は破損に至るような大きな損傷の他、ズレや隙間などの軽微なものも多い。
- 2) 損傷原因は老朽化、施工不良、他工事破損等があげられる。
- 3) 埋設後 25 年以上経過した管渠に損傷が多い。
- 4) 道路陥没と関連が深いのは、取付管、小口径管、管種としては陶管、ヒューム管である。
- 5) 道路陥没には降雨が強く影響している。

の知見が、そして空洞形成のシミュレーション実験からは、

- 1) 開口部からの給排水の繰返しに伴い、開口部から土砂が流出し空洞・ゆるみが進展する。特に、開口部や空洞周辺が飽和している時に土砂流出が起こりやすい。
- 2) 空洞およびゆるみ範囲（地盤変位が目視により確認できる範囲）の大きさ、及び排土量の測定から、ゆるみ領域の地盤のゆるみの程度（密度以下）の評価が可能である。
- 3) 地盤材料によって、ゆるみや空洞の進展速度、およびゆるみ領域の形成やゆるみ程度が異なる。細粒分が少なく粒度の悪い砂では、土砂流出及びゆるみは急速に進展し全体崩壊に至る。また、ゆるみ領域内のゆるみ程度は 15～20%程度であるが、ゆるみ領域は空洞の上部に大きく広がる。軽微なゆるみが鉛直方向に急速に進展して地盤崩壊に至りやすい。また、ゆるみ程度が小さいため、地中レーダー等で地盤のゆるみ調査を行った場合、空洞・ゆるみが発見されにくい可能性がある。細粒分を含み粒度の良い地盤材料では、土砂流出及びゆるみ進展速度は比較的遅く、空洞周辺のゆるみ

領域は比較的小さいが、ゆるみ程度は 50%程度で、ゆるみ領域内では初期地盤の半分程度しか土が残留していない。

- 4) 給排水サイクルの初期段階から最終段階に至るまで、ゆるみ領域の空洞領域に対する大きさの割合、及びゆるみ程度はほぼ一定である。すなわち、空洞の規模にかかわらず、周辺のゆるみ程度はほぼ一定で推移する。

といった結論を得ている。

しかしながら、桑名らの研究は、ゆるみや空洞の進展速度やゆるみ領域の形成についてのメカニズムの解明がなされているが、空洞の成長や陥没に至るまでには多様な要素（アスファルト混合物層厚、交通荷重、気温、降雨、地下水、土質条件など）が複雑に関係しあっているため、どのようなタイミングで陥没が生じるかについて十分な解明には至っていない。

### 2.5.2 城本らの研究<sup>23)</sup>

城本らは、小型 FWD と地中レーダを併用した路面下空洞調査方法を研究している。路面下空洞を GPR と小型 FWD の測定方法の弱点を補い、精度よく路面下空洞を検知するために、これらを併用した路面下空洞調査法について検討している。また、路面下空洞を再現した実験における測定データから、GPR と小型 FWD を併用した路面下空洞の有効性と空洞の検出精度についても検討している。その結果、

- 1) 舗装構成がわかっていない路線であっても、異常が認められない同一舗装区間の平均たわみ量、標準偏差を用いることで、空洞を判定するたわみ量の上限值を算出する方法を示した。また、この判定式を用いることで、空洞箇所の判定を用いることができ、空洞箇所を特定することを明らかにし

た。

2) GPR では探知できないようなゆるみが生じている箇所や、空洞の周囲でも、支持力が低下していれば、たわみ量を測定することでゆるみや空洞を検知可能できることを明らかにした。

3) 3D-FEM 解析により、空洞の周囲に与える影響は、直上にある層の弾性係数を 50%以下にするような大きなものであることを示した。

などの知見を得ている。

以上のように、城本らは模擬空洞による測定結果と 3D-FEM との比較を行っているが、空洞の危険性を評価できる成果は得られていない。

### 2.5.3 東京都の研究

住吉らは、実地で空洞が発見された場合は、原因者（主に埋設企業者）が試掘を行い、空洞の形状、規模及び発生要因などを調査しているが、それらを自局道路管理部が策定した「道路陥没発生防止技術マニュアル(案)」に基づき、分類・整理し、空洞の発生要因などについて調査を行っている。また、住吉らは、屋外試験ヤードに実験用の路面下空洞を人為的に作製し、地上から繰返し载荷を施し、空洞の進展や周辺地盤の変化を観察している。

住吉らが行った空洞状況調査<sup>24)</sup>では、路面下空洞調査の二次調査（小口径ボアスコープによるドロースコープ調査）で発見された空洞部をその原因者である埋設企業者が復旧し、その際に作成する開削調書（実際に開削して確認された空洞の形状、発生深さや面積、発生要因等が示された図や写真）について、平成 13 年度から平成 21 年度までの 1,018 件について、道路陥没発生防止技術マニュアル（案）に準じて調査・整理している。その結果、



- 1) 空洞の発生要因は、1位が「埋戻し不足または埋戻し材の不良」で32%、2位が地下埋設物の老朽化による腐食、損傷、管のずれ等の「直接原因及び直接的要因」で28%、3位が「埋設物の輻輳」で14%、4位が「H鋼、矢板、木杭等の出現」で11%、5位が「ガラ（コンクリート、アスコン等）の出現」で8%、などと続いている。上位2要因が全体の60%を占め、これは平成13年度から13年度の開削調書をまとめた前回調査と同じ項目であり、前回はこの2要因で全体の76%を占めていた。また、直接原因の1位は「下水道」で59%、2位は「その他」で36%であり、そのうちの48%が「雨水取付管」であった。
- 2) 空洞の発生深さは、0.5m未満の空洞が全体の69%を占めている。東京都の主要幹線道路のアスファルト混合物層の厚さが35cm前後であることを考慮すると、相当の割合の空洞がアスファルト混合物層直下に発生しているものと推測される。
- 3) 空洞の厚さは、0.5m未満が全体の86%を占めている。

といった知見が得られた。

次に、屋外試験<sup>25)</sup>では、①空気空洞作製→②繰返し載荷→③観測→④充填実験のフローで行っている。①空気空洞作製では、あらかじめ土中に埋設した発泡スチロールブロックを柑橘類から抽出されるD-リモネンを使って溶解させ、人為的の空気空洞を作成している。②繰返し載荷は、空洞直上の路面でFWDによって繰返し載荷を行っている。これはFWDが空洞を進展させるための荷重源とする一方で、観測の一環としてのたわみ測定も実施することである。③観測では、繰返し載荷の過程で1)FWDたわみ測定、2)地表面変位測定、3)物理探査、4)ボアホールカメラ調査によって地表面と土中の観測を行っている。そして、④充填実験

は、充填材の注入・固化実験と充填材の形状から空洞形状の確認を行っている。  
その結果、

- 1) 空洞は全壊や上方移動には至らず、天井部の地盤が崩落してドーム状となり、崩落土砂が底部に堆積した状態で安定した。
- 2) 空洞の直上の地盤にはゆるみ区間が生じた。さらにその上方には、繰返し載荷に伴うアーチ効果によるものと想定される締まった区間が生じた。
- 3) 地表面変位はほとんど生じなかった。
- 4) FWD たわみ計測値、地中レーダ探査結果には、空洞や周辺地盤の変化が反映されていた。
- 5) サウンディング装置により、繰返し載荷終了後の空洞や周辺地盤の状況を概略的に把握できた。

といった知見が得られている。

以上のように、屋外試験ヤードにおいて路面下空洞を模擬的に作製し、繰返し載荷試験による空洞の成長過程や FWD によるたわみの変化を調べているが、空洞の成長と路面の陥没の関係までは把握されていない。

#### 2.5.4 久保による検討<sup>26)</sup>

国土交通省の検討委員会である直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会における第3回委員会（2009年7月3日）で各委員から「空洞探査のあり方」について意見が出された。その中で、土木研究所の久保は、空洞探査のあり方のなかで空洞によるアスファルト混合物層の破壊について以下のように検討<sup>26)</sup>している。

仮設①：交通荷重による曲げによって、中央付近にクラックが発生し、破断す

る.

仮設②：交通荷重によって押し抜きせん断される（アスファルト混合物層が薄い場合）

仮設③：その他（アスファルト混合物層の劣化等）

直轄国道の場合、アスファルト混合物層の厚さが 35 cm程度と厚く、比較的補修サイクルが短いため、仮設①の破壊パターンが多いと考え、以下の検討をしている。さらに、路面の陥没に与える影響要因として、

要因① 陥没の可能性：空洞の面積と深さ（空洞天端までの深さ）

要因② 陥没の重大性：空洞の厚さ

要因③ 陥没までの期間：空洞の深さと空洞の成長速度

と挙げている。そして、久保は、図-2.5.1のような単純梁モデルにより、陥没の

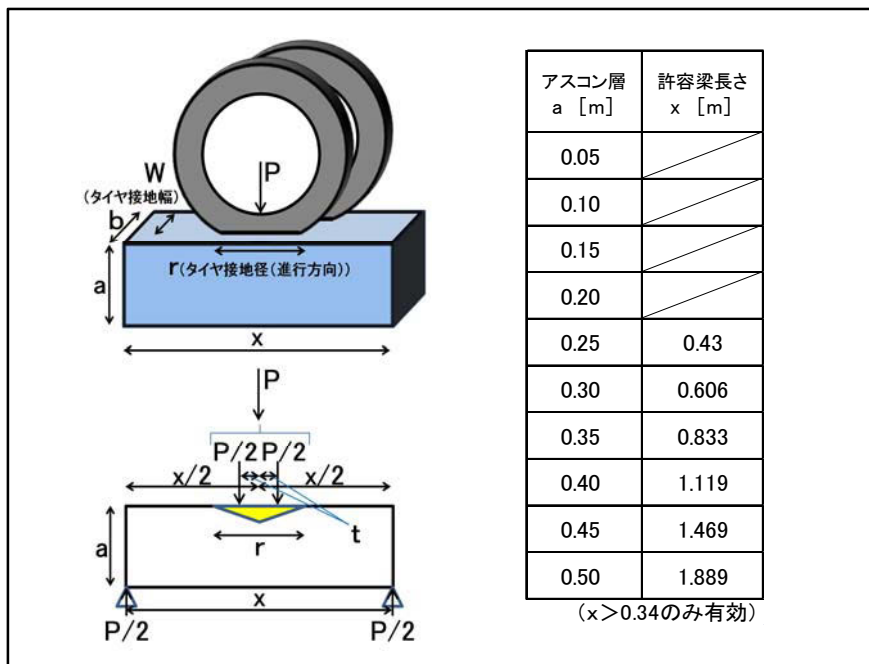


図 - 2.5.1 単純梁モデルによる解析<sup>25)</sup>

危険性のある空洞幅を試算し報告している。なお、入力値については舗装設計便覧<sup>27)</sup>を参考に設定している。すなわち、まず、アスファルト混合物層の平均温度を過去10年の東京の月間平均気温の最高値29℃として推定している。なお、月間平均気温の最高値の適用は、下水道管の老朽化に起因する道路陥没において、7～8月の発生件数が最も多い<sup>23)</sup>ことからも妥当な設定といえる。この平均温度からアスファルト混合物層の弾性係数を800～1,000MPaと設定している。つぎに、輪荷重はスパン方向に走行するものとし、輪荷重接地圧の直径を0.34m、はりの幅はダブルタイヤを考慮した設定としている。さらに、単純梁モデルにおける支間中央の下面引張りひずみは、比較的少ない通過輪数で疲労破壊が生じる300 $\mu$ として設定して算出しており、「直轄国道における一般的な舗装厚を考慮すると、諸条件の与え方より安全側の算出と考えられるが、直径が80cm程度のアスファルト混合物層直下の空洞が危険領域となり始める。」と結論している。

このような簡易なモデルによる空洞評価は、二次調査で行うボーリングデータを必要としない非破壊での調査が十分可能で、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。ただし、久保のモデルを用いた場合、入力値によってはスパンに対して幅が大きくなってしまいうケースがあり、アスファルト混合物層の薄い場合に適用ができない。実際の試算では一般的なアスファルト混合物層厚において、スパンよりも幅の方が大きい結果となっているなど、実態の十分に合致していない結論になっている。

#### 2.5.5 その他の研究

西方ら<sup>28)</sup>は、3D-FEMによって空洞を有する舗装の構造解析を行い、空洞が舗装の支持力や寿命に及ぼす影響を研究している。その結果、

- 1) 空洞の発生深度が浅いほど舗装の寿命は大きく低下し、空洞が路盤上部にある場合は、空洞の厚さに関わらず構造的に危険な状態になる。
- 2) 空洞の発生深度に関わらずたわみ増加率(DI)は載荷板中心部のたわみ(D<sub>0</sub>)が最も大きい。

太田ら<sup>29), 30)</sup>は、空洞周辺の地盤を粒状体でモデル化して個別要素法(DEM)にて数値シミュレーションを行っている。そして、空洞の進展によってアスファルト混合物層が失われる過程の再現を試みている。また、車両が通過した場合の路面の沈下による影響を検討している。その結果、

- 1) 荷重の繰返し載荷により、空洞周辺の地盤の沈下などの変形が徐々に生じる。
- 2) 載荷により空洞に達した地盤は失われ、その結果、地盤の変形はさらに進行する。
- 3) 上記2)により、路盤と地盤の間に隙間が生じ、空洞の直上付近の地盤の支持が失われ、路面の沈下が増加する。

といった知見を得ている。

以上のように、解析による陥没のシミュレーションは行われているが、様々な空洞形状、舗装構成、舗装の健全性を考慮するまでにいたっておらず、特に実現象との比較評価や危険性評価が行われていない。

## 2.6 まとめ

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。

本章で得られた知見を以下に述べる。

- (1) 路面下空洞調査の既往の技術について、国土交通省における「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」での「路面地下の適切な管理のあり方」においては、直轄国道の管理の将来ビジョンを明らかにする重要な施策が盛り込まれている。ただし、GPRを用いた空洞探査は他の手法と比較して有利な探査手法として位置づけているものの、空洞であるか否か、あるいは空洞の大小を一義的に判定することが困難という課題が存在しているも示した。
- (2) 下水道管渠の老朽化に関する空洞防止に対する取り組みの現状について、空洞発生メカニズムについては雨水が地中を浸透して破損した下水道管に流入する場合、下水道管周辺の土砂が雨水と一緒に下水道管に流れ込み、その結果、空洞が発生し、その空洞が徐々に進行して道路陥没に至ると考えられる。したがって、道路陥没を未然防止するためには、下水道管路の不具合箇所を発見すること、さらには雨天時浸入水などの不明水が流入する箇所を特定することが重要であるといえる。そのためには、膨大な管路延長から効率的・効果的に施設の不具合箇所を絞り込むスクリーニング技術の開発が必要不可欠であることを示した。
- (3) 空洞評価に関する既往の研究について、空洞の発生・成長に関するメカニ

ズムについての実験的研究や 3D-FEM 等を用いた解析的な研究があるが、いずれも空洞の危険性を評価できる成果は得られていない。特に、路面下空洞や陥没のメカニズムは、様々な見地からのアプローチがされているが、空洞の成長や陥没に至るまでには多様な要素（アスファルト混合物層厚、交通荷重、気温、降雨、地下水、土質条件など）が複雑に関係しあっているため、正確で十分な解明には至っていないのが現状である。また、空洞が存在している場合、その空洞が陥没に至るか否かといった危険度の判定、もしくは空洞の成長速度について課題が残されている。しかしながら、陥没の危険性のある空洞幅について久保が単純梁モデルを用いた検討は、入力値によってはスパンに対して幅が大きくなってしまいうケースがあり、アスファルト混合物層の薄い場合に適用ができないなどの課題があるものの、空洞をできるだけ危険なものとして評価する手法であれば、二次調査で行うボーリングデータを必要としない非破壊での調査が十分可能で、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り得ることを示した。

以上の既往の技術・研究から、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、路面下空洞の簡易評価手法の提案を目的とした。本研究では、重交通路線に存在する路面下空洞を対象として、まず、この路線の調査で得られたデータを分析・整理した上で、舗装の健全性を考慮した空洞の評価を実施した。つぎに、この結果から空洞による路面の陥没の危険性について、その危険性の高低を判断可能な簡易評価手法を検討するとともに、補修優先順位の評価手法について提案した。

## 第 2 章の参考文献

- 1) 秋葉正一・城本政一・加納陽輔・島崎勝・佐藤克己：地中レーダーと FWD 試験を併用した舗装診断に関する一考察 ―市街地道路に対する簡易評価手法の検討―，地盤工学ジャーナル，Vol.10，No.2，2015.6.
- 2) 国土交通省関東地方整備局 web サイト（直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会，2015 年 9 月 20 日確認）  
[www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010897.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010897.pdf)
- 3) 国土交通省関東地方整備局 web サイト（路面地下の適切な管理のあり方について，2015 年 9 月 20 日確認）  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000037915.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000037915.pdf)
- 4) 国土交通省 web サイト（総点検実施要領（案）【舗装編】，2015 年 9 月 20 日確認）  
[www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/roadstock05.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/roadstock05.pdf)
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 web サイト（計画的な改築・維持管理，2015 年 10 月 5 日確認）  
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd\\_sewerage\\_tk\\_000135.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html)
- 6) 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)物理探査学会創立 60 周年シンポジウム講演論文集，(社)物理探査学会，pp.153-161，2008 年
- 7) 株式会社計測技術サービス web サイト（電磁波レーダの原理，2015 年 10 月 2 日確認）  
<http://www.kgs-inc.co.jp/download>



- 8) 一般社団法人日本道路建設業協会 web サイト (FWD (舗装構造評価装置)),  
2015 年 9 月 25 日確認)  
<http://www.dohkenkyo.net/pavement/kikai/fwd.html>
- 9) 財団法人道路保全技術センター：活用しよう！FWD, p.1, 平成 17 年 3 月
- 10) 株式会社鹿島道路技術研究所 提供写真
- 11) 財団法人道路保全技術センター：活用しよう！FWD, p.4, 平成 17 年 3 月
- 12) 財団法人道路保全技術センター：活用しよう！FWD, pp.14-15, 平成 17 年 3 月
- 13) 国総研資料第 668 号：下水道管路施設に起因する道路陥没の現状 (2006-2009 年度), 平成 24 年 2 月
- 14) 横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚：下水道管路施設に起因する道路陥没の現状 (2006-2009 年度), 国土技術政策総合研究所資料, No.668, 2012.
- 15) 佐藤克己・佐藤俊樹・長谷川孝・早矢仕芳昭：温度差計測による汚水管路施設の不明水調査技術, 第 14 回下水道管路技術発表会, 公益社団法人日本下水道管路管理業協会, 平成 24 年 11 月
- 16) 東京大学生産技術研究所桑野研究室 web サイト (桑野玲子プロフィール,  
2015 年 9 月 20 日確認)  
<http://geo.iis.u-tokyo.ac.jp/member/kuwano.html>
- 17) 桑野玲子, 佐藤真理, 瀬良良子：地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.219-229, 2010
- 18) 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊：老朽下水管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, pp.349-361, 2010

- 19) 桑野玲子, 宮下剛幸: 密度の異なる砂地盤に埋設されたたわみ性管の繰返し  
  載荷に伴う作用応力と変形, 東京大学生産研究, Vol.60, No.3, 通巻 662 号,  
  pp.48-52, 2008
- 20) 小橋秀俊, 桑野玲子, 堀井俊孝, 恒岡伸幸, 山内慶太: 管渠埋設地盤内の空  
  洞・ゆるみ形成メカニズムに関する研究, 土木研究所資料第 4011 号, 2006
- 21) 桑野玲子: 技術手帳: 地盤の陥没－陥没のメカニズム－, 地盤工学会誌, Vol,  
  62, No.1, 通巻 672, pp.44-45, 2014
- 22) 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, Vol.41,  
  No.9, 2013 年 9 月, pp.51-53, 2013
- 23) 城本政一・青木政樹・竹内康: 小型 FWD と地中レーダを併用した路面下空洞  
  調査方法に関する検討路, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3,  
  pp.I\_167-I\_173, 2013.
- 24) 内山博文・大石雅登: 路面下空洞の開削状況調査結果, 東京都土木技術支援・  
  人材育成センター年報, pp.227-232, 2012
- 25) 住吉卓・橋原正周・大石雅登: 路面下空洞上での繰返し載荷実験, 東京都土  
  木技術支援・人材育成センター年報, pp.115-130, 2011
- 26) 国土交通省関東地方整備局 web サイト (直轄国道の舗装 (路面) に関する保  
  全検討委員会, 第 4 回【配布資料】, 2015 年 9 月 20 日確認)  
  
  [www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010897.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010897.pdf)
- 27) 公益社団法人日本道路協会: 舗装設計便覧, 平成 18 年 2 月.
- 28) 西方雄祐・亀山修一・上田宣人・西澤辰男: 路面下空洞を有するアスファル  
  ト舗装の構造解析に関する研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.893-894,

平成 25 年 9 月

- 29) 太田敬一・スレン-ソッキアン：道路下の空洞の進展に伴う路盤の挙動に関する検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，pp.957-958，平成 25 年 9 月
- 30) 太田敬一：道路下の空洞を有した場合に車輛が通行した際の影響，土木学会第 69 回年次学術講演会，pp.1093-1094，平成 26 年 9 月

## 第3章 重交通路線の空洞データおよび分析

### 3.1 概説

路面下空洞による道路陥没を防止するための路面地下の管理は、道路管理者にとってきわめて重要である。道路管理者は、道路パトロールによる舗装面の確認といった日々の維持管理に加え、空洞探査車による空洞探査を地域や路線によって1年あるいは数年に1回の割合で調査頻度を設定して実施している。空洞探査車によって得られる空洞情報は、①信号の経年変化、②個別空洞情報（位置、規模、深さ）、③周辺空洞の実績、④空洞補修履歴がある。一次判定では、それらデータのほかに考慮すべき要素として①舗装構造、②工事履歴、③地下埋設物、④地下水、⑤交通量、⑥大型車混入率、⑦舗裝修繕計画の有無、などを加味して検討する。さらにスコープ調査の実施の有無を判断する二次判定では、信号の面積・深さなどを考慮して判定を行う。

本章では、まず本研究のテーマである“舗装の健全性”に関して、第2章「2.3.1 路面地下の管理の現状」の路面地下の管理（陥没防止策）作業でFWD試験が十分に利活用されていない現状のなか、FWD試験による舗装の健全性評価方法について整理した。そして、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（以下、重交通路線データ）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2D-FEM解析を行い、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。

なお、本論文の空洞についての表記は、「空洞の規模」は面的な広がりと厚さ、「厚さ」は空洞の最大厚み、「深さ」および「深度」は地表面から空洞上端部までの距離（土被り）、「信号幅」は空洞の縦方向と横方向の長さの平均、「面積」は空洞の縦方向長さと横方向長さの積を表すものとする。

## 3.2 舗装の健全性

FWD 試験を行うことによって、第2章「2.3.3 FWD 試験」で述べたとおり、舗装を破壊せずに種々の健全度評価を行うことができる<sup>1)</sup>。具体的には、

- (1) 路床を含めた舗装全体の健全度。
- (2) 路床の支持力。
- (3) 舗装体の健全度。
- (4) アスファルト層の強度。

などである。

### (1) 路床を含めた舗装全体の健全度

路床を含めた舗装全体の健全度については、FWDにより得られるたわみ量のうち、載荷点直下のたわみ量  $D_0$  は、路床を含めた舗装全体の支持力を表している。このたわみ量  $D_0$  と舗装計画交通量別の許容たわみ量の目安(表-3.2.1)を比較することで、路床を含む舗装全体の支持力を評価することができる。

表-3.2.1 許容たわみ量の目安<sup>1)</sup>

舗装計画交通量 (台/日・方向)	100 未満	100 以上 250 未満	250 以上 1,000 未満	1,000 以上 3,000 未満	3,000 以上
旧設計交通量の区分	L	A	B	C	D
許容たわみ量の基準値	800	600	400	300	200

たわみ量単位：μm

### (2) 路床の支持力

路床の支持力である現状の CBR の評価は、載荷点から 150cm の位置の  $D_{150}$  たわみ量は、舗装体以下の支持力、つまり路床の支持力を表している。このことから式(3.2.1)を使って路床の支持力を推定することができる。

$$\text{現状のCBR(\%)} = \frac{1,000}{D_{150}} \quad (3.2.1)$$

$D_{150}$  : 載荷中心から 150 cm位置のたわみ量 (μm)

### (3) 舗装体の健全度

舗装体の健全度としては、残存等値換算厚  $T_{A0}$  を推定することによって評価する。センサ位置のたわみ量差 ( $D_0 - D_{150}$ ) より、式(3.2.2)を使って現況の等値換算厚  $T_A$  ( $T_{A0}$ ) を求めることができる。また、新設時の  $T_A$  から  $T_{A0}$  を引くことにより不足  $T_A$  を推定できる。

$$T_{A0} = -25.8 \log \times \left( \frac{D_0 - D_{150}}{10^3} \right) + 11.1 \quad (3.2.2)$$

$T_{A0}$ : 残存等値換算厚 (cm)

$D_0$ : 載荷中心直下のたわみ量 ( $\mu\text{m}$ )

#### (4) アスファルト層の強度

アスファルト混合物層の強度，すなわち弾性係数は，センサ位置のたわみ量差 ( $D_0 - D_{10}$ ) を，式(3.2.3)に代入してアスファルト混合物層の弾性係数  $E_1$  を推定し，強度を評価することができる。

$$E_1 = \frac{2,352 \times \left( \frac{D_0 - D_{20}}{10^3} \right)^{-1.25}}{h_1} \quad (3.2.3)$$

$E_1$ : アスファルト安定処理層を含めたアスファルト混合物層の弾性係数 (MPa)

$D_{20}$ : 載荷中心から 20 cm 位置のたわみ量 ( $\mu\text{m}$ )

$h_1$ : アスファルト安定処理層を含めたアスファルト混合物層の厚さ (cm)



### 3.3 調査概要および結果

#### 3.3.1 調査概要

調査は直轄国道の舗装（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管理する国道で実施（2009年5月～2011年2月）した

#### (1) 調査地点および測定内容

表-3.3.1 異常信号の箇所数

管理事務所	路線名	場所	調査箇所
東京国道	15	中央区	6
		品川区	5
		港区	36
		世田谷区	1
		渋谷区	1
	R1	千代田区	23
		港区	7
		品川区	2
		大田区	1
	R15	中央区	11
		港区	1
	R20	千代田区	5
	R17	文京区	2
		豊島区	2
		板橋区	1
R254	文京区	2	
	豊島区	1	
	板橋区	4	
大宮国道	R17	戸田市	2
		蕨市	2
相武国道	R20	調布市	2
		日野市	1
宇都宮国道	R4	栃木県那須町	2
総 計			120
※空洞および隙間の存在が確認された箇所数			78

データ（以下、重交通路線データ）を用いた。

空洞探査車によって異常信号が検出された箇所数を表-3.3.1に示す。空洞探査車によって異常信号が検出された地点について、ハンディ型レーダーおよびスコープ調査実施によって得られる空洞情報および空洞直上を含む FWD 試験の測定位置を表-3.3.2に示す。

表-3.3.2 調査・測定内容

	調査・測定項目
測点記録	管理事務所・路線名・KP・車線・地先名・舗装構成
レーダー探査	深さ・厚さ・縦断方向広がり・横断方向広がり・面積
FWD試験	空洞直上からの距離：0、0.4、2.0、4.0m

## (2) 検出された空洞数

調査を実施した 120 箇所の内、スコープ調査により検出された空洞および隙間は 78 箇所あり、それ以外の 42 箇所は、スコープ調査を実施しても明らかな空洞や隙間が検出されなかった箇所であった。なお、隙間とは、空洞の厚さが 5cm 以下のものを国土交通省において呼んでいるもので、この隙間は 78 箇所中 13 箇所であった。本研究では、この隙間も舗装の健全性に影響を与えると考え、空洞として評価することとした。また、表-3.3.3 は調査地点の舗装厚と箇所数の関係であり、このうち、箇所数の最も多い舗装厚の舗装構成を表-3.3.4 に示す。

表-3.3.3 舗装厚と調査箇所数の関係

舗装厚 (cm)	調査箇所数
50~59	4
60~69	3
70~79	11
80~89	10
90~99	15
100~109	31
110~119	1
不明	3
合計	78

表-3.3.4 舗装厚と調査箇所数の関係

各層の名称	各層の厚さ (cm)
アスファルト混合物層	20~22
上層路盤	18~20
下層路盤	45
遮断層	15

### 3.3.2 地中レーダーおよびスコープ調査結果

図-3.3.1~3.3.3は、表-3.3.3に示す舗装構成を有する舗装に存在する空洞の深さに対する空洞の情報（厚さ，面積，体積(=厚さ×面積)）との関係を調べたものである。ここで，厚さは，レーダーにおける反射波形が最も強く現れている箇所での空洞の厚さである。また，面積はハンディ型レーダー探査によって得られた縦断方向の広がりと横断方向の広がりを掛けたものである。したがって，測定された厚さや広がりには最大の値と捉えることができるが，空洞の形状は様々であるので，面積や体積は正確な値を表しているとはいえないが，現行の調査方法ではこのような空洞に関する情報しか得られない。

このような空洞情報であるが、図より、空洞の深さに対する空洞の情報の中に相関関係は存在せず、同一の深さでも空洞の厚さ、面積あるいは体積が異なっており、地中レーダーによる空洞探査だけでは、例えば、浅い位置にある空洞ほど規模が大きいなど、そ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。

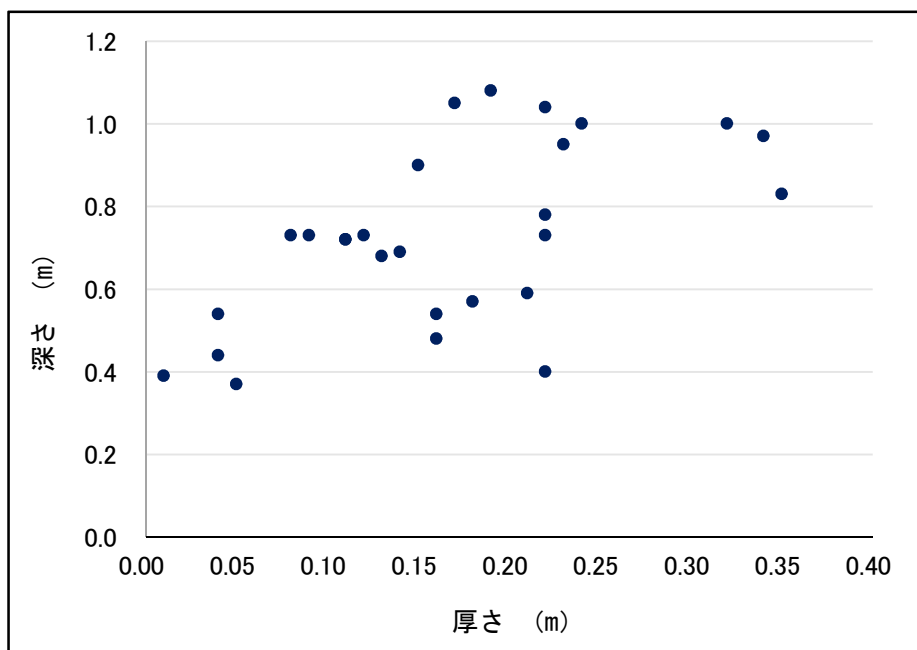


図-3.3.1 空洞の深さと厚さの関係

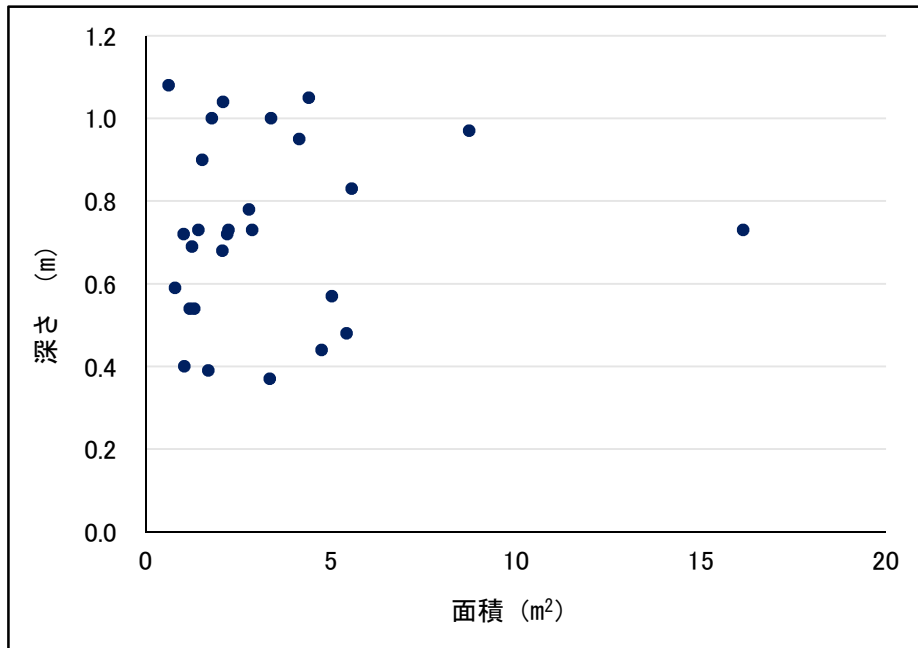


図-3.3.2 空洞の深さと面積の関係

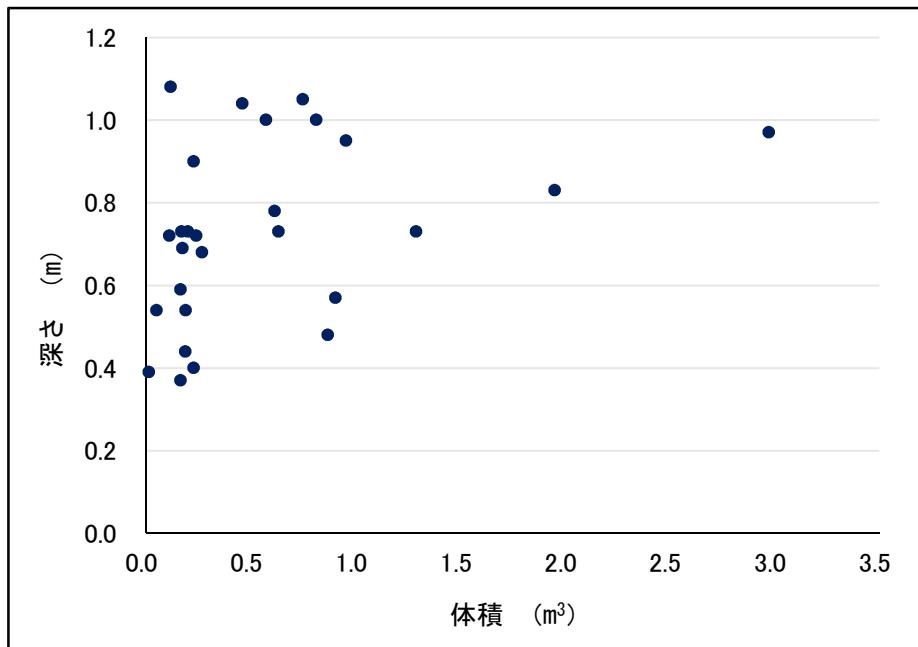


図-3.3.3 空洞の深さと体積の関係

図-3.3.4 は空洞の検出位置について、舗装断面に対する分布状況と空洞面積を調べた結果である。なお、縦軸は舗装厚に対する空洞検出位置の比を示しており、横軸は空洞の面積を示している。これより、空洞は舗装の層境界面（境界Ⅰ：上層・下層路盤の境、境界Ⅱ：下層路盤・遮断層の境、境界Ⅲ：遮断層・路床の境）付近に分布していることがわかる。

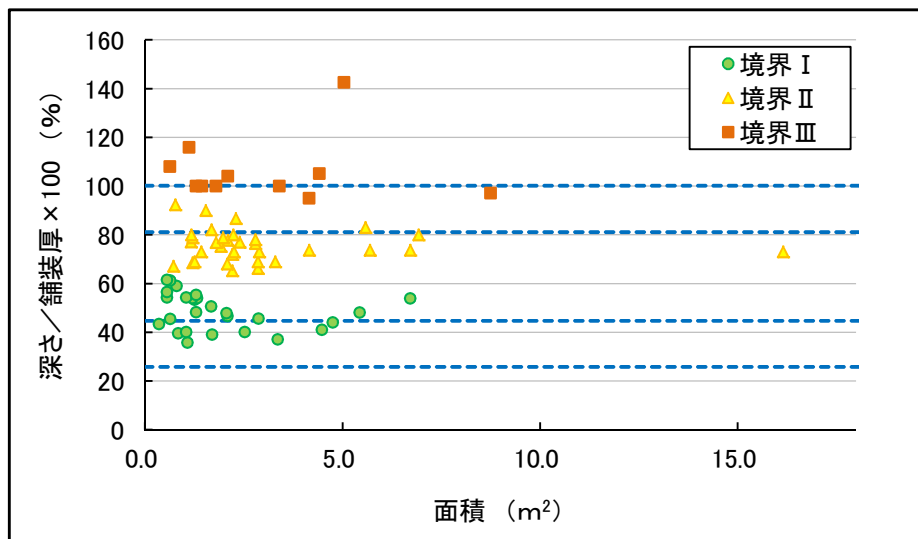


図-3.3.4 舗装内部の空洞の分布

### 3.3.3 FWD 試験結果

図-3.3.5 および 3.3.6 は、異常信号箇所から 2~4m 離れた周辺部で FWD 試験を実施した際の  $D_0$  (以下、 $d_0$  と表記する) と、異常信号検出箇所直上で FWD 試験を実施した際の  $D_0$  との関係を調べたものである。なお、FWD たわみはバラツキの少ない 3 回の測定結果の平均値で、荷重補正および温度補正を行った結果を用いている。ここで、図-3.3.5 はスコープ調査によって空洞が確認された箇所での比較であり、図-3.3.6 はレーダー調査によって異常信号が検出されたが、スコ

ープ調査によって空洞が確認されなかった箇所での比較を示したものである。また、図中には 1:1 のライン線を挿入しており、ラインの上部に位置するものは周辺部より異常信号箇所のたわみが小さく、ラインの下部に位置するものは周辺部より異常信号箇所のたわみが大きいことを表している。

まず、図-3.3.5 について、空洞直上の  $D_0$  が周辺部の  $d_0$  より大きいもの（1:1 のラインの下部）は空洞の影響を受けた結果と判断できる。しかしながら、空洞直上の  $D_0$  が周辺部の  $d_0$  より小さい結果（1:1 のラインより上部）もあり、78 箇所中 24 箇所と約 30%ある。これは、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ということを示唆した結果であり、このような傾向となる原因は不明である。しかしながら、このような結果は、小型 FWD を用いた路面下空洞調査<sup>2)</sup>でも同様の結果が得られている。また、空洞の発生・成長過程において、その周辺部にゆるみ（密度の低下している領域）が形成されることが、他の研究機関で実施された研究によりわかっている<sup>3)</sup>。したがって、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と考えられる。

つぎに、図-3.3.6 について、 $D_0$  と  $d_0$  の関係は図-3.3.5 の関係と類似している。すなわち、異常信号箇所直上の  $D_0$  が周辺部の  $d_0$  より大きいものや、異常信号直上の  $D_0$  が周辺部の  $d_0$  より小さい結果（42 箇所中 14 箇所と約 33%）となっている。レーダーにおいて異常信号が検出される原因は、路面下に空洞や埋設物が存在する他に、ゆるみや帯水域が存在する場合である<sup>4)</sup>。本調査箇所は、埋設物による異常信号箇所を対象としていないので、空洞以外の異常信号は、ゆるみあるいは帯水域によるものと考えられる。秋葉ら<sup>5)</sup>によれば、ゆるみも FWD 試験結果に影響を与えることがわかっている。したがって、これらの箇所ではゆるみや

帯水域の存在によって、舗装の健全性が失われている可能性があると考えられるが、ゆるみや帯水域の大きさに関するデータは得られていないので、これらの評価については本研究の対象外とする。

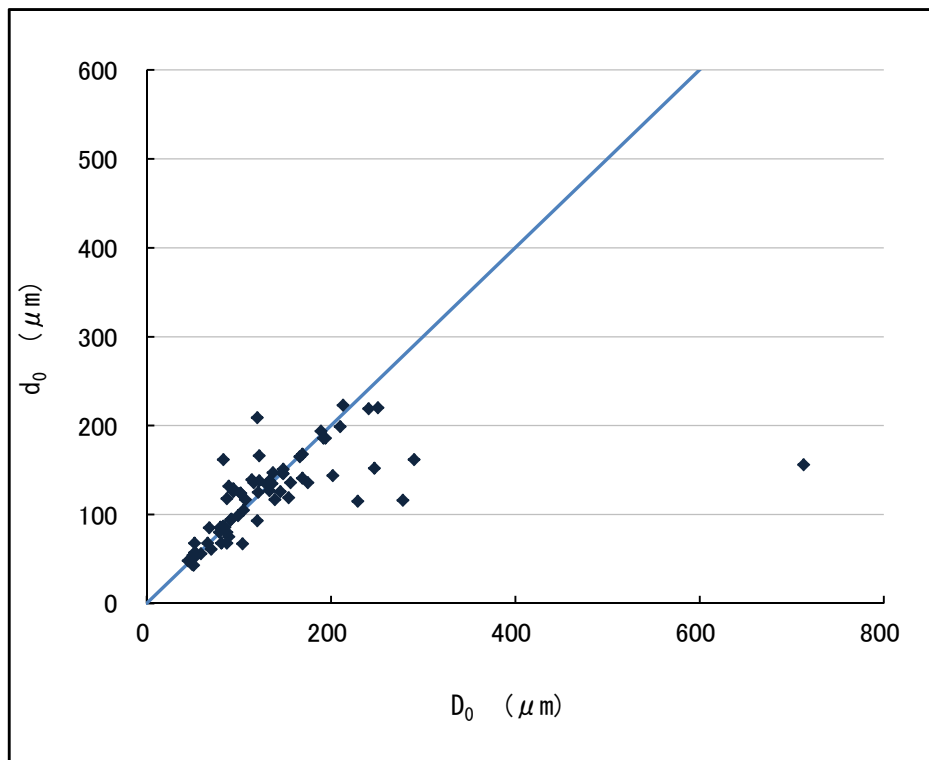


図-3.3.5 異常信号検出箇所の  $d_0$  と  $D_0$  の関係（空洞確認箇所）



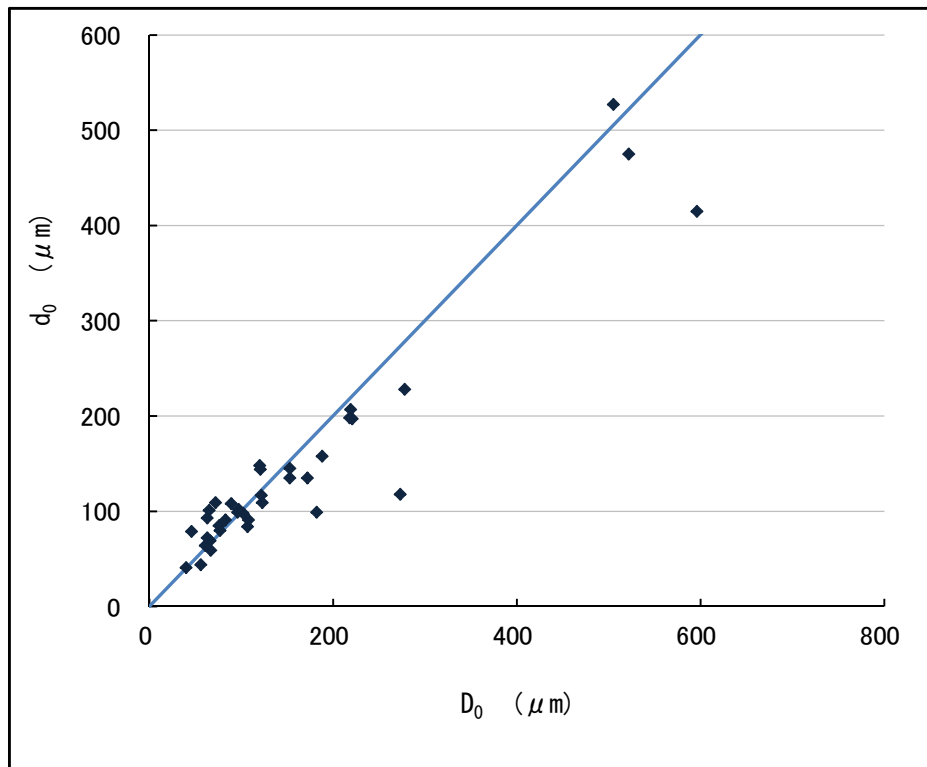


図-3.3.6 異常信号検出箇所の  $d_0$  と  $D_0$  の関係（空洞未確認箇所）

### 3.4 FEM 解析による空洞とたわみの関係

本節では、空洞の規模や位置が載荷による表面たわみに与える影響を、市販のソフト「2D-σ」を用いた 2D-FEM 解析によって調べた結果について述べる。解析結果は 3次元解析結果と比較して厳密とはいえないが、ここではあくまでも空洞探査情報が表面たわみに与える影響を把握することが目的であり、解析結果を空洞評価に利用することを目的としていない。したがって、2次元解析でもその特性を知ることが可能と考え実施した。

#### 3.4.1 解析モデル

図-3.4.1 に 2次元解析モデルを示す。解析プログラムは、2D-σver.98.10（株式会社地層科学研究所）を用い、材料モデルは線形弾性モデルによる平面ひずみ問題とし

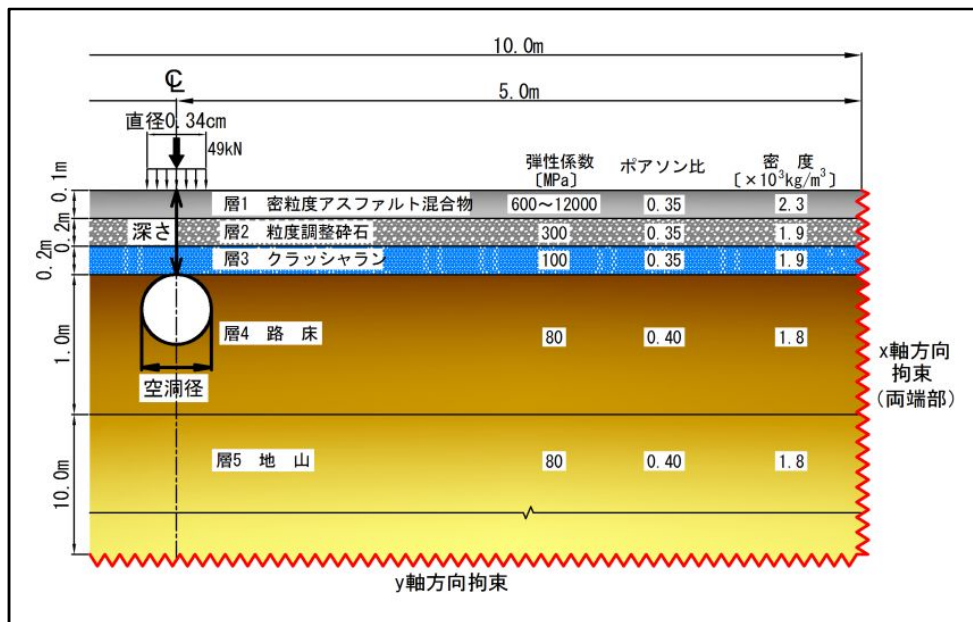


図-3.4.1 2次元 FEM 解析モデル

て捉え解析した。なお、図は道路横断方向の断面であり、縦断方向（走行方向）に連続しているものとしている。

空洞直上に載荷する荷重はダブルタイヤの後輪荷重の 49kN とし、載荷幅はダブルタイヤの幅である 0.34m である。表層（第 1 層）のアスファルト混合物層の弾性係数を除き、舗装構成や材料定数などの設定は、文献<sup>6)</sup>の例題に示されているものを参考に設定した。アスファルト混合物層の弾性係数は、通年を通した気温に対応するため 600~12,000MPa を採用<sup>6)</sup>する。空洞は路床以下に存在するものとし、空洞径は 0.3~1.0m、深さは 0.5~1.2m の範囲で変化させた。解析領域は水平方向に 10m、鉛直方向に 11.5m とした。要素分割は、鉛直方向に 1 層目を分割せず、2 層目は 2 分割、3 層目は 2 分割、4 層目は空洞径を設定するため 8~16 分割、5 層目は 40 分割とし、水平方向の分割数は 32~36 と空洞径により分割数を適宜変化させた。なお、層境界でのすべり抵抗は考慮していない。表面たわみ量は、空洞直上に等分布荷重を作用させたときの空洞直上のたわみ量を指す（図-3.4.2 参照）。

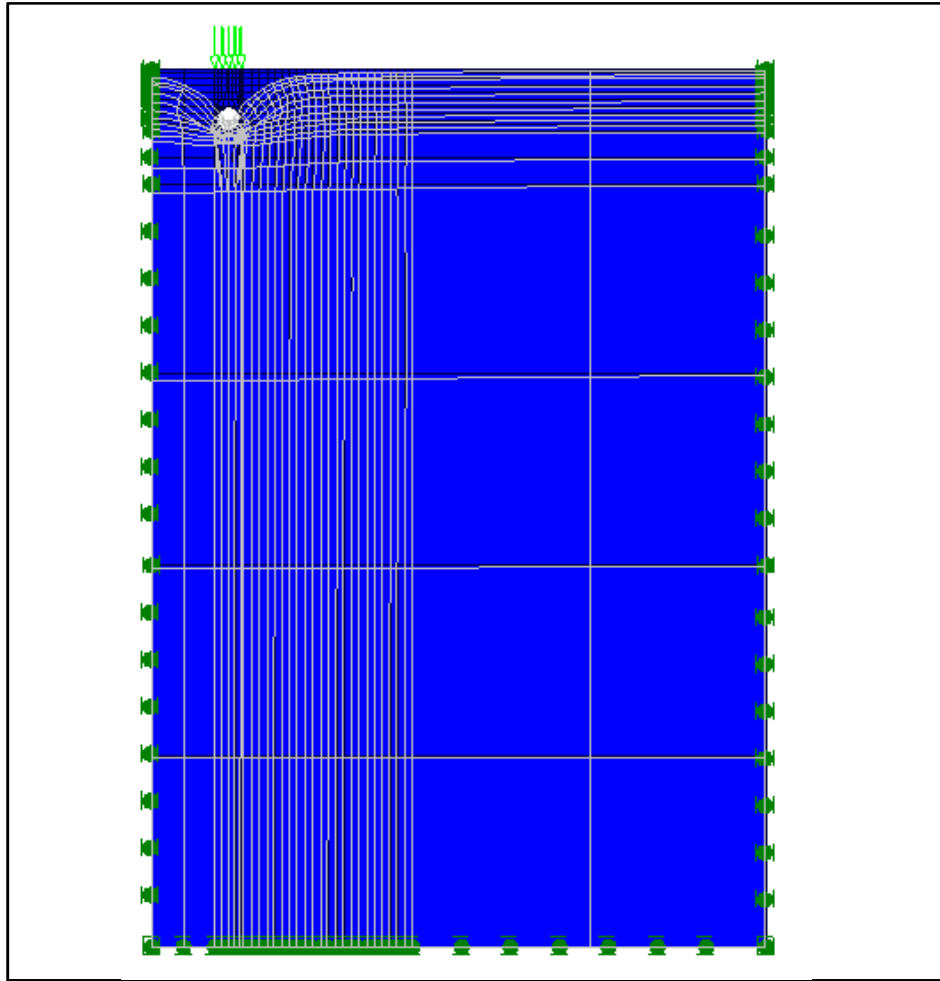


図-3.4.2 メッシュ図と解析結果例(空洞径:0.3m, 空洞深度:0.5m)

### 3.4.2 解析結果の妥当性の検討

2D-FEM 解析による解析結果の妥当性を検証するため、多層弾性構造解析プログラム (GAMES) による計算結果<sup>7)</sup>との比較を行った。

比較計算では、図-3.4.1 と同様の載荷条件において空洞が存在しない場合で検証した。結果を図-3.4.3 に示す。なお、図の横軸は道路横断方向 (0~1.8m) の表面たわみ量である。これより、今回使用した「2D-σ」の解析結果は、「GAMES」の解析結果と比較して、たわみの大きさや形状に極めて大きな差異がないことを

示している。したがって、空洞情報に対するたわみの特性を知る上で、この程度の解析でも大きな影響はないと考えられる。また、前節でも示したとおり、本論文では平面ひずみの結果を示しているが、以下の計算結果も含めて、平面応力で計算しても傾向に差異がないことを確認している。

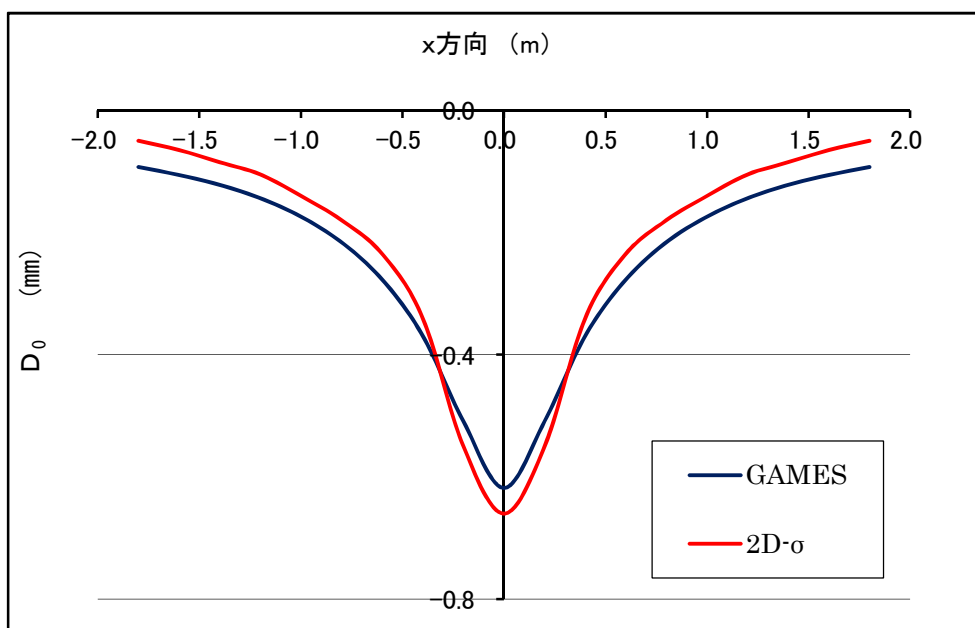


図-3.4.3 キャリブレーション

### 3.4.3 空洞深さ一定における空洞径と表面たわみ量の関係

空洞深さを一定 (0.5m) にしたときの空洞径と載荷板中心の表面たわみ量  $D_0$  の関係を図-3.3.4 に示す。これより、空洞径が大きくなると  $D_0$  も増大する傾向にある。また、表層強度の増大とともに  $D_0$  は減少する。

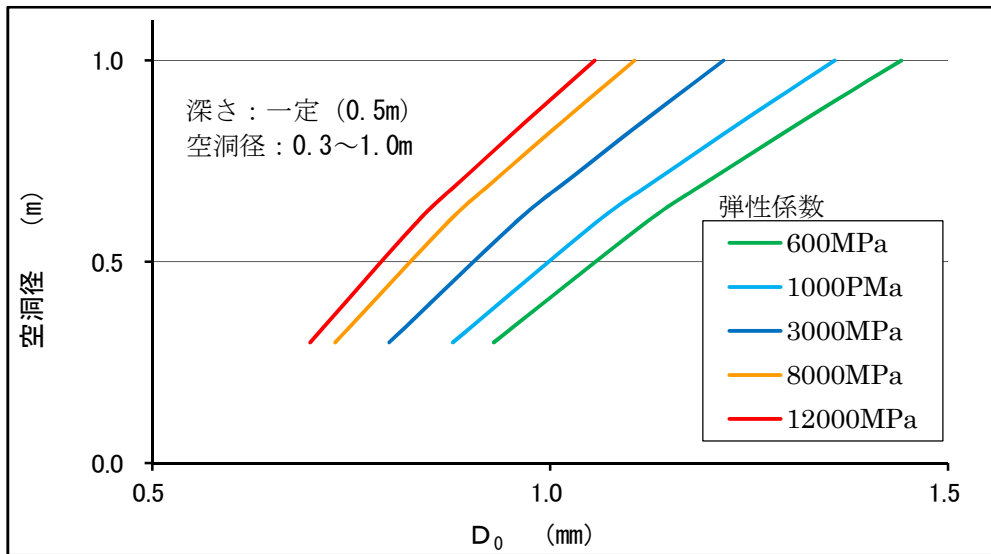


図-3.4.4 空洞径と  $D_0$  の関係

#### 3.4.4 空洞径一定における空洞深さと表面たわみ量の関係

空洞径を一定 (0.3m) にしたときの空洞深さと載荷板中心の表面たわみ量  $D_0$  の関係を図-3.4.5 に示す. これより, 空洞深さが浅くなると  $D_0$  が増大する.

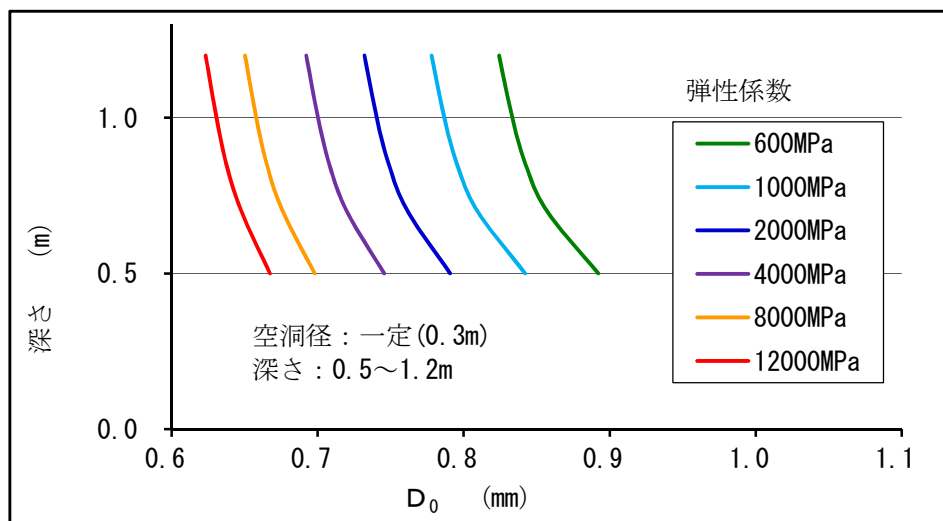
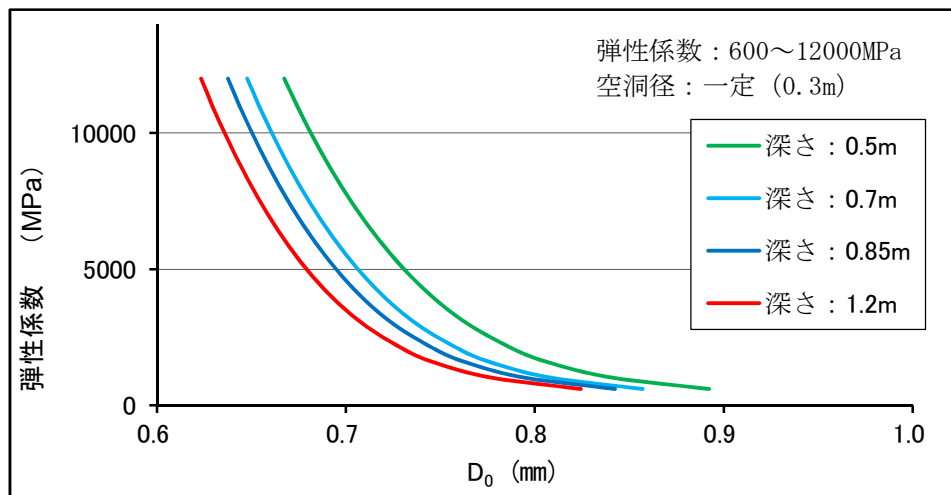


図-3.4.5 空洞の深さと  $D_0$  の関係

このような傾向は 3D-FEM で解析した結果<sup>8)</sup>と同様の傾向である。また、**図-3.4.4**と同様に表層強度の増大とともに  $D_0$  は減少する。

### 3.4.5 空洞径・深さ一定における舗装体強度と表面たわみ量の関係

空洞径・深さを一定にしたときの舗装体強度（弾性係数）と載荷板中心の表面たわみ量  $D_0$  の関係を **図-3.4.6** に示す。これより、表層強度の増加を舗装の支持力増加と見なせば、舗装の支持力が増大すると  $D_0$  は減少する。



**図-3.4.6** 舗装体強度と  $D_0$  の関係

### 3.5 空洞情報と FWD たわみの関係

前節において実施した 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がわかった。すなわち、空洞深さを一定とした場合、空洞径が大きくなると  $D_0$  も増大する傾向にある。また、空洞径を一定とした場合、空洞深さが浅くなると  $D_0$  が増大する。さらに、空洞径・深さ一定における舗装体強度と表面たわみ量の関係は、表層強度の増加を舗装の支持力増加と見なせば、舗装の支持力が増大すると  $D_0$  は減少する。そこで、本節では実測された空洞情報（空洞深さ・空洞信号幅）と FWD たわみとの関係に、前述のような関係が存在するか否かを調べた。

図-3.5.1~3.5.3 は、表-3.3.4 に示す舗装構成を有する舗装に存在する空洞に関する情報（信号幅、深さ、厚さ）と  $D_0$  の関係を示したものである。ここで、信号幅とは空洞探査で面的な広がり の測定において得られる縦方向と横方向の長さの平均値である。

図-3.5.1 は、信号幅と  $D_0$  の関係を示したものである。FEM 解析では、空洞径が大きくなると  $D_0$  も増大する傾向にあったが、そのような傾向は見受けられない。

図-3.5.2 は、空洞の深さと  $D_0$  の関係を示したものである。FEM 解析では、空洞深さが浅くなると  $D_0$  が増大する傾向にあったが、若干そのような傾向が見受けられるものの、明確な相関関係は存在しない。

図-3.5.3 は、空洞の厚さと  $D_0$  の関係を示したものである。FEM 解析において、空洞厚さは空洞径に相当するが、空洞厚が大きくなると  $D_0$  が増大する傾向にない。



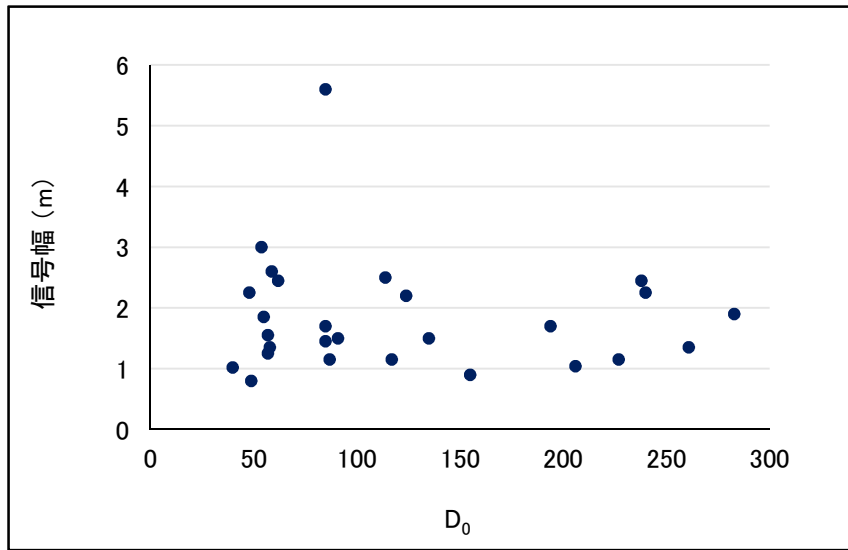


図-3.5.1 空洞信号幅と空洞直上の  $D_0$  の関係

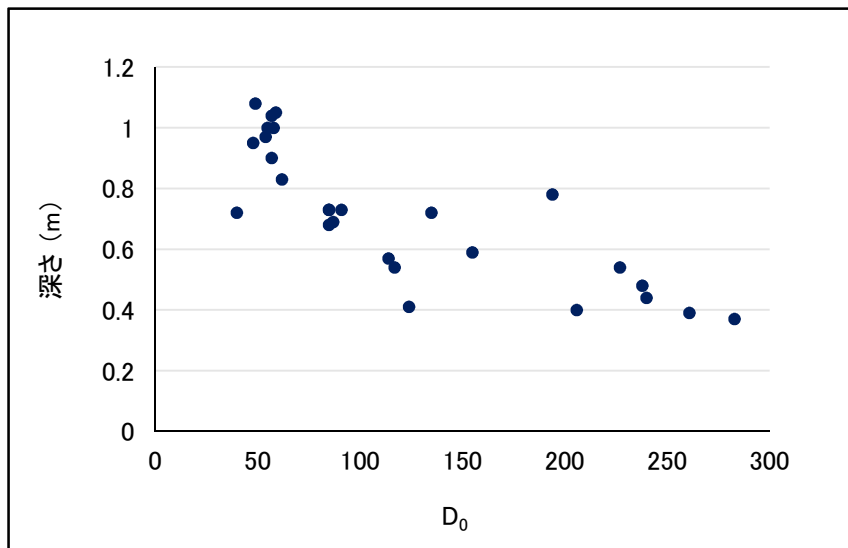


図-3.5.2 空洞深さと空洞直上の  $D_0$  の関係

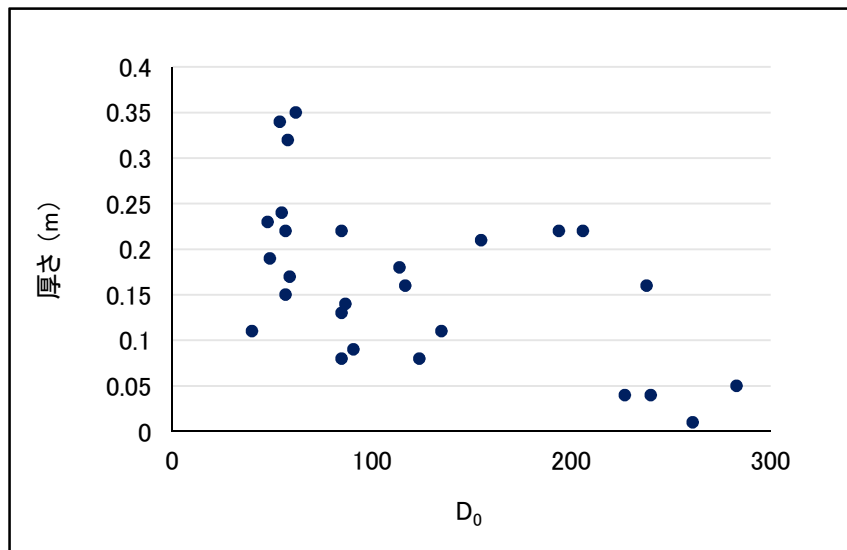


図-3.5.3 空洞厚さと空洞直上の  $D_0$  の関係

図-3.5.4 は、深さおよび面積がおおよそ同じ空洞を抽出し、その厚さと  $D_0$  の関係を調べた例である。この図からも、空洞の規模や位置がおよそ同じでも  $D_0$  が同程度にならず差異が生じていることがわかる。一般に、異常信号が存在しない同一路線でも、道路の維持管理に伴う補修などによって、舗装の構造や健全性が部分的に異なる。この場合、FWD 試験結果に差異が生じることは明らかであることから、このようなことも相関性を見いだせない要因と考えられる。

以上より、空洞の存在が  $D_0$  に影響を与えるとしても空洞の規模や位置と  $D_0$  に相関性は存在しないといえる。

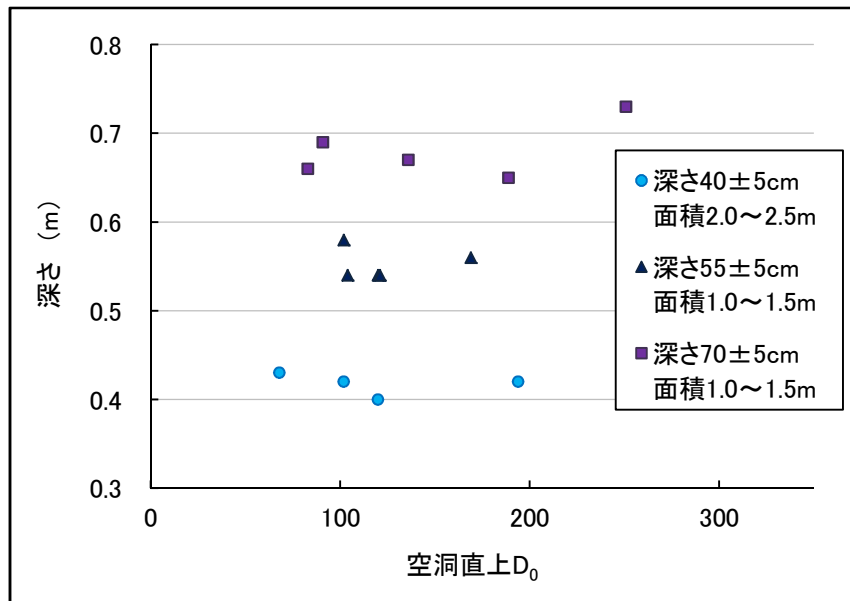


図-3.5.3 空洞深さと空洞直上の  $D_0$  の関係

(深さ・面積がほぼ同じ空洞を抽出)

### 3.6 まとめ

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、国土交通省関東整備局が実施した同整備局管内の国道調査データ（以下、重交通路線データ）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2D-FEM解析を行い、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。

本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 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、例えば、浅い位置にある空洞ほど規模が大きいなど、そ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。
- (2) 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と考察した。
- (3) 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。すなわち、空洞深さを一定とした場合、空洞径が大きくなると  $D_0$  も増大する傾向にあることを示した。また、空洞径を一定とした場合、空洞深さが浅くなると  $D_0$  が増大する傾向にあることを示した。さらに、空洞径・深さ一定における舗装体強度と表面たわみ量の関係は、表層強度の増加を舗

装の支持力増加と見なせば，舗装の支持力が増大すると  $D_0$  は減少する傾向にあることを示した．

- (4) 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がわかったが，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  $D_0$  に相関性は存在しないことを示した．

### 第 3 章の参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター：活用しよう！FWD，pp.18-19，平成 17 年 3 月
- 2) 城本政一・青木政樹・竹内康：小型 FWD と地中レーダーを併用した路面下空洞調査方法に関する検討路，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.69，No.3，pp.I\_167-I\_173，2013.
- 3) 桑野玲子，佐藤真理，瀬良良子：地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No.2，pp.219-229，2010
- 4) 国土交通省関東地方整備局 web サイト（直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会，第 1 回委員会配布資料，2015 年 10 月 1 日確認）  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010896.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010896.pdf)
- 5) 秋葉正一・城本政一・加納陽輔・島崎勝・佐藤克己：地中レーダーと FWD 試験を併用した舗装診断に関する一考察 —市街地道路に対する簡易評価手法の検討—，地盤工学ジャーナル，Vol.10，No.2，2015.6.
- 6) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧，p.118，平成 18 年 2 月
- 7) 土木学会 舗装工学委員会：多層弾性理論による舗装構造解析入門 — GAMES（General Analysis of Mufti-layered Elastic Systems）を利用して—，pp.122-126，2005.
- 8) 西方雄佑・亀山修一・上田宣人・西澤辰男：路面下空洞を有するアスファルト舗装の構造解析に関する研究，土木学会第 68 回年次学術講演会，V-447，pp.893-894，2013.9.



## 第4章 路面下空洞の危険性に関する評価手法

### 4.1 概説

第3章で述べた調査結果において、異常信号箇所は舗装の健全性に影響を与えていることが確認された。しかしながら、異常信号情報と FWD たわみとの関係には相関性は存在しない。相関関係が存在すれば、例えば構造解析や土槽実験などとの検証により路面の沈下や陥没の危険性に関する定量的な評価手法を提案することが可能と考えられるが、本調査結果からそのような検討を行うことは難しいと推察される。

一方、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。しかしながら、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ことから、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<sup>1)</sup>。特に、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。路面陥没が起こるか否かは空洞の規模と空洞直上にある舗装の健全性に影響されると考えられる。例えば、舗装構成が同じ道路に存在する空洞に関して、空洞の規模および深さが同一の場合、空洞直上にある舗装の健全性（例えば疲労度合い）の違いによって陥没の時期や程度が異なることは明らかである。したがって、このように舗装の健全性を考慮した判定手法が確立されれば、現時点での空洞による道路陥没の危険性と補修の必要性を定量的に判断することが容易になる。

そこで、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．

## 4.2 路面下空洞の危険性に対する本研究の考え方

空洞直上の路面の陥没のメカニズムについては、桑野ら<sup>2),3)</sup>による空洞の成長過程に関する研究や、東京都による屋外試験ヤードにおいて路面下空洞を模擬的に作製し、繰り返し載荷試験による空洞の成長過程や FWD によるたわみの変化を調べている研究<sup>5)</sup>はあるものの、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。

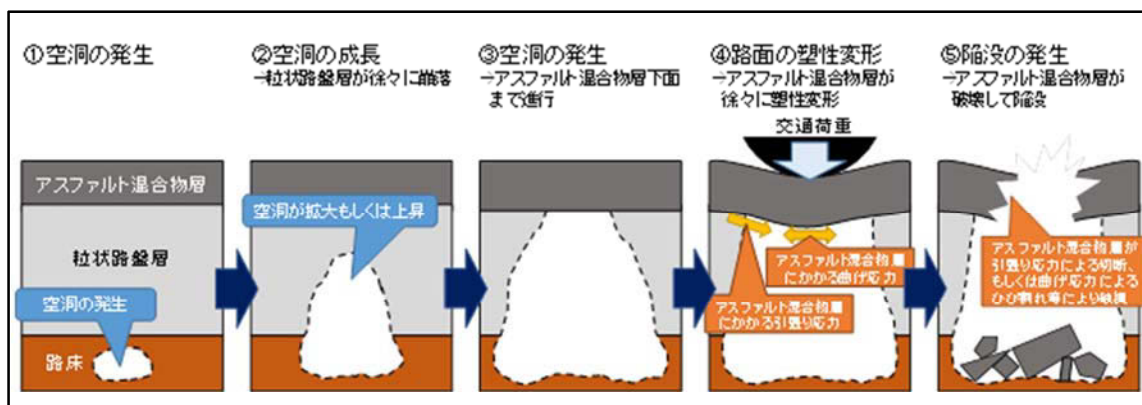


図-4.2.1 路面下空洞による陥没のメカニズム (仮説)<sup>1)</sup>

路面陥没のメカニズムについて、「直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会」では、「路面下空洞による陥没のメカニズム（仮説）」を図-4.2.1として示している。これによると、陥没メカニズムは図-4.2.1①に示すように路床に空洞が発生する。次に、空洞が粒状路盤層へと上昇しながら拡大していくため、粒状路盤層が崩落する（図-4.2.1③）。路面陥没の危険性については、図-4.2.1①～③の進行状況の過程での発見が重要であると考えられる。その後、空洞がさらに成長するとアスファルト混合物層は徐々に路面を走行する車両の活荷重により塑性

変形，すなわち空洞上面のアスファルト混合物層が曲げ変形し，アスファルト混合物層下面に引張応力が発生することになる（図-4.2.1⑤）。

以上が，保全検討委員会で推察している路面下空洞の陥没メカニズムであるが，これらの陥没メカニズムについての検証および陥没に至る研究はあまり行われていないのが現状である。

沈下の進行や陥没は舗装構成（特にアスファルト混合物層の厚さ），舗装の健全性（舗装の疲労度合い），空洞の大きさや形状などに影響されると推察され，どのタイミングで生じるかは判断が難しいと思われる。しかしながら，どのタイミングでもアスファルト混合物の破断ひずみを越えたときに陥没が起こると予想できる。上島ら<sup>4)</sup>によれば，高温時で長時間外力を受けるアスファルト混合物の破断ひずみは 10,000 $\mu$  レベルとされているが，調査時点でどの程度の残留ひずみが生じているかを把握することは難しい。

沈下の進行や陥没のメカニズムがわかれば空洞の危険性を予測あるいは合理的に評価できると考えられる。しかしながら，第3章で示した FWD 測定結果と異常信号情報に相関性はないこと，一方，城本ら<sup>5)</sup>による模擬空洞による測定結果と 3D-FEM との比較を行った研究において，測定たわみと解析たわみとの間に一致性あるいは相関性は得られていないことなどから，このメカニズムの解明は現時点では難しいと考えられる。ただし，今後，沈下が進行している異常信号箇所や陥没が生じた箇所における空洞・ゆるみの深さや大きさの情報と，路床を含む舗装の構造および健全性の情報を蓄積できれば，力学解析結果と併せて信頼性の高い陥没に至るメカニズムの解明と沈下や陥没の予測が行えると推察される。

前述したように，空洞直上の路面が沈下する状態（図中④）は直ちに陥没が生じる可能性があり，非常に危険といえる。また，空洞の場合のみならず，ゆるみ

の場合でも空洞ほど規模が大きくないと思われるが、沈下や陥没が生じることが想像できる。この場合は、空洞やゆるみのアスファルト混合物層下面まで拡大していれば沈下する可能性が極めて高いが、路盤が存在していても沈下することが考えられ、どのタイミングで沈下が生じるかは不明である。したがって、空洞やゆるみはアスファルト混合物層のひび割れ状態などや舗装の健全性により、いつ陥没するかが不明なので、より安全側となる判断基準を設定することが望ましい。

以上の考察から、本研究では路盤も含め、沈下が生じるまでに至っていない状態（図中①～③）において、空洞やゆるみ直上のアスファルト混合物層が早期に比較的少ない交通輪数で疲労によるひび割れが生じるとし、この時点での空洞やゆるみを含めた構造状態を危険性大と仮定する。これは、この時点における空洞直上の舗装部分の曲げ抵抗は失われ、クラックが存在していない場合よりも早く、また、沈下が生じていなくても陥没が起こる可能性が高いと考えたことによる。このような場合のアスファルト混合物層のひび割れについて、アスファルト混合物層の健全性と空洞・ゆるみの深さや大きさを考慮した厳密な解析(3D-FEM等)結果を利用するなどの手法が考えられる。しかしながら、前述したとおり、より高度な解析手法を用いても、例えば現場のたわみデータと解析値を整合させることが難しい現状と、予防保全的に安全性を考慮して補修すべき異常信号箇所を抽出する必要があるという観点であれば、簡便なモデルでの解析で問題ないと考えられる。

簡便なモデルとして、第2章の「2.5.4 久保による検討」で述べたとおり、久保は、空洞直上のアスファルト混合物層を単純梁モデルにより、陥没の危険性のある空洞幅を試算し報告している<sup>6)</sup>。すなわち、この手法は、図-4.2.2に示す単純梁モデルにおいて、支間中央の下面引張りひずみを、比較的少ない通過輪数

で疲労破壊が生じる  $300\mu\text{m}$  と設定し、このひずみとなるスパンを逆計算することで、このスパン以上となる空洞幅が危険とするものである。このように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。

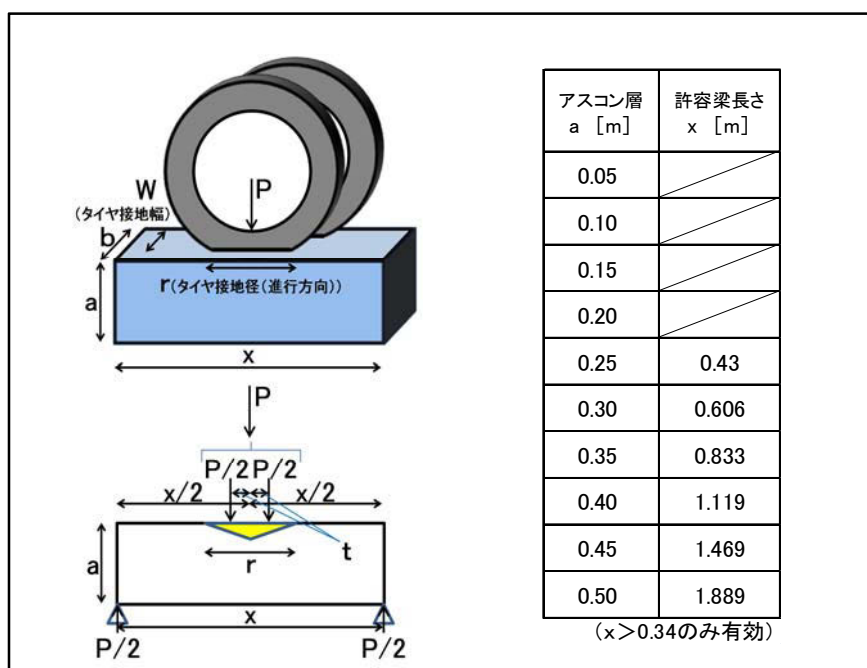


図 - 4.2.2 単純梁モデルによる解析<sup>6)</sup>

ただし、このような手法は舗装の修繕を含めた応急処置を講じる上での判断材料として有効と考えられるが、図 - 4.2.2 のモデルを用いた場合、入力値によってはスパン  $x$  に対して幅が大きくなってしまいうケースがある。

久保による実際の試算では、図 - 4.2.3 に示すような载荷形態を仮定し、タイ

ヤをダブルタイヤとした場合、これがスパン方向に移動するものとしている。なお、輪荷重  $P$  をダブルタイヤの後輪荷重である  $49\text{kN}$ 、タイヤの接地圧半径  $r$  を  $0.34\text{m}^7$ 、タイヤ幅  $w'$  を  $0.3\text{m}$ 、ダブルタイヤのタイヤ間隔  $t$  を  $0.1\text{m}$  としている。

図 - 4.2.2 に示すはりの幅  $b$  は、図 - 4.2.3 に示すように、ダブルタイヤ荷重を等分布に変化した荷重が  $45^\circ$  に分散するものとして求めている。この場合の  $w$  は、

図 - 4.2.4 から  $0.74\text{m}$  となる。したがって、図 - 4.2.2 に示すスパン  $x$  の試算結果において、はり高さ  $a$  が  $0.5\text{m}$  の場合を除き、スパン  $x$  よりも幅  $b$  の方が大きい結果となっている。このような場合は、はり理論の適用は合理的でなく板理論の適用が望ましい。

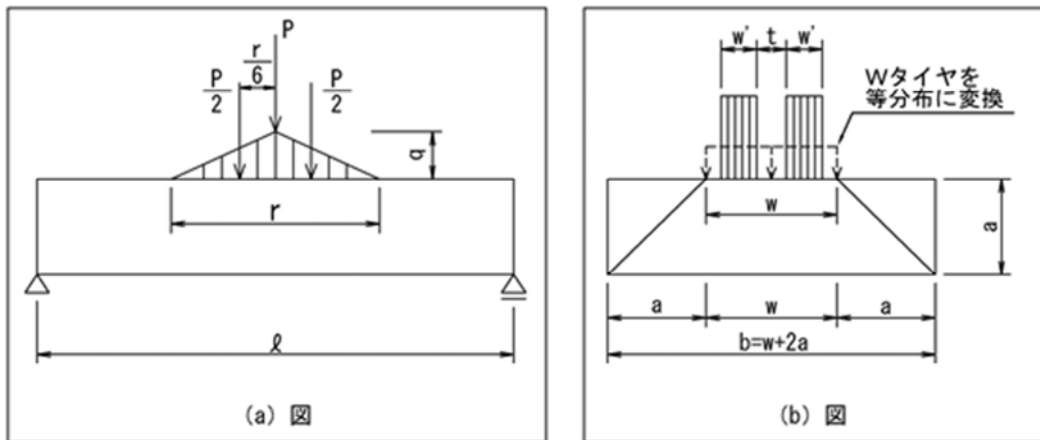


図-4.2.3 载荷形態

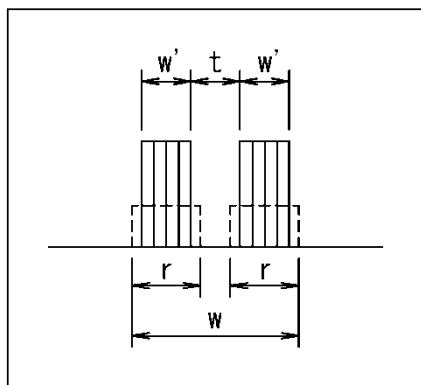


図-4.2.4 ダブルタイヤの荷重分布幅  $w$

陥没がアスファルト混合物層の曲げ破壊あるいはアスファルト混合物層の空洞端部での引張り応力による破断などが主たる要因と考えられているが、本研究では、直轄国道のような重交通路線の道路ではアスファルト混合物層厚が厚いため、陥没の主要因が曲げ破壊によること、前述した久保氏の単純梁モデルによる解析と整合させるため、せん断破壊を考慮せずに曲げ破壊による評価とした。路面下の空洞やゆるみ部分を本論文で用いている信号幅を直径とする円柱形状とし、その直上の舗装部分を円板と仮定した。その舗装部分の円板を等方性円板とし、その円板上に円形の輪荷重（等分布）が作用しているものとして危険性のある空洞直径を同定することを試みた。

### 4.3 等方性円板モデルによる解析

#### 4.3.1 等方性円板モデルによる空洞幅の解析

##### (1) モデル

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の概略を図-4.3.1に示す．等方性円板の支持条件は周辺単純支持と周辺固定の2種類とした．この2種類の支持条件としたのは，空洞直上の舗装が横方向に連続しており，円板の周囲を支えている場合が周辺固定，空洞が路肩や歩道部分あるいは舗装が横方向に連続していても舗装の健全性が悪く円板の周囲を支える効果が薄い場合を単純支持と想定し設定した．また，輪荷重直径は一般に用いられている輪荷重接地圧の直径0.34mを採用とすると，これより円板（空洞）の直径が小さくなる場合 ( $R > l$ ) は，等分布荷重が円板全面に載荷するとした．

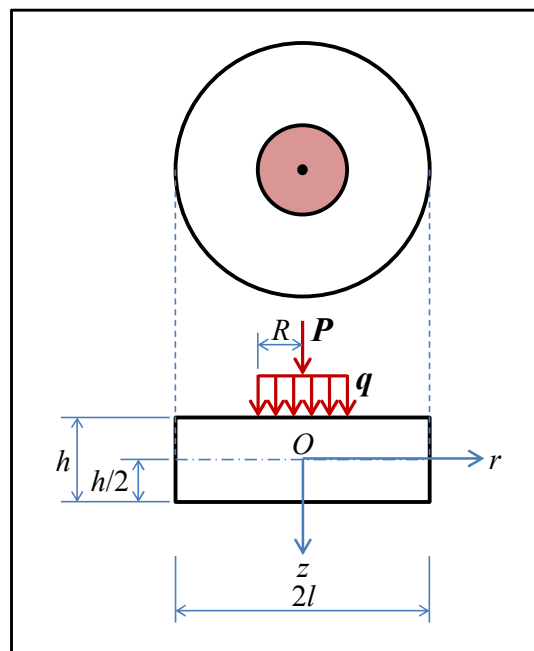


図-4.3.1 等方性円板モデル



(2) 解析解

まず、等方性円板のたわみ式は構造力学公式集<sup>8)</sup>によれば、以下のように表される。

1) 周辺単純支持の場合

①  $l > R$

$$y = \frac{ql^2 R b^2}{64D(1+\nu)} \left[ 4(3+\nu) - (7+3\nu)\beta^2 + 4(1+\nu)\beta^2 \log \beta - 2\{4 - (1-\nu)\beta^2 - 4(1+\nu)\log \beta\} \left(\frac{r}{l}\right)^2 + \frac{1+\nu}{\beta} \left(\frac{r}{l}\right)^4 \right] \quad (4.3.1)$$

②  $l < R$

$$y = \frac{ql^4}{64(1+\nu)D} \left[ (5+\nu) - 2(3+\nu) \left(\frac{r}{l}\right)^2 + (1+\nu) \left(\frac{r}{l}\right)^4 \right] \quad (4.3.2)$$

2) 周辺固定支持の場合

①  $l > R$

$$y = \frac{ql^2 R b^2}{64D} \left[ 4 - 3\beta^2 + 4\beta^2 \log \beta - 2(\beta^2 - 4 \log \beta) \left(\frac{r}{l}\right)^2 + \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{r}{l}\right)^4 \right] \quad (4.3.3)$$

②  $l < R$

$$y = \frac{ql^4}{64D} \left[ 1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \right]^2 \quad (4.3.4)$$

なお、上式中

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \left. \vphantom{D} \right\} \quad (4.3.5)$$
$$\beta = \frac{R}{l} \quad (l > R)$$

$E$ : 弾性係数

$\nu$ : ポアソン比

$$q = P/\pi R^2$$

(3) 等方性円板中央のたわみ

等方性円板中央のたわみ  $y_{max}$  は, 式(4.3.1)～(4.3.4)において,  $r=0$  とすること  
とで得られる. 結果を以下に示す.

1) 周辺単純支持の場合

①  $l > R$

$$y_{max} = \frac{ql^2 R b^2}{64D} \left\{ 4 \frac{3 + \nu}{1 + \nu} - \frac{7 + 3\nu}{1 + \nu} \beta^2 + 4\beta^2 \log \beta \right\} \quad (4.3.6)$$

②  $l < R$

$$y_{max} = \frac{ql^4}{64D} \frac{5 + \nu}{1 + \nu} \quad (4.3.7)$$

2) 周辺固定支持の場合

①  $l > R$

$$y_{max} = \frac{ql^2 R^2}{64D} \{ 4 - 3\beta^2 + 4\beta^2 \log \beta \} \quad (4.3.8)$$

②  $l < R$

$$y_{max} = \frac{ql^4}{64D} \quad (4.3.9)$$

#### (4) 等方性円板中央の下面ひずみ

等方性円板中央のひずみ  $\varepsilon_{\max}$  は、次式に示す式(4.3.10)で表される。この場合の下面ひずみは、式(4.3.10)において、 $z = h/2$  である。

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_r = \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=0} = -z \left. \frac{d^2 y}{dr^2} \right)_{r=0} \quad (4.3.10)$$

周辺単純支持および周辺固定条件における等方性円板中央の下面ひずみ  $\varepsilon_{\max}$  は、式(4.3.1)～(4.3.4)を式(4.3.10)に代入することで得られる。結果を以下に示す。

##### 1) 周辺単純支持の場合

###### ① $l > R$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= +\frac{h}{2} \cdot \frac{qR^2}{16D(1+\nu)} \{4 - (1-\nu)\beta^2 - 4(1+\nu)\log\beta\} \\ &= \frac{qR^2 h}{32D} \left\{ \frac{4}{1+\nu} - \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)}\beta^2 - 4\log\beta \right\} \end{aligned} \quad (4.3.11)$$

###### ② $l < R$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= +\frac{h}{2} \cdot \frac{ql^4}{64(1+\nu)D} \frac{4(3+\nu)}{l^2} \\ &= \frac{ql^2 h}{32D} \frac{3+\nu}{1+\nu} \end{aligned} \quad (4.3.12)$$

##### 2) 周辺固定支持の場合

###### ① $l > R$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= -\frac{h}{2} \left\{ -\frac{qR^2}{16D} (\beta^2 - 4\log\beta) \right\} \\ &= \frac{qR^2 h}{32D} (\beta^2 - 4\log\beta) \end{aligned} \quad (4.3.13)$$

②  $l < R$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{max} &= +\frac{h}{2} \cdot \frac{ql^4}{64D} \cdot \frac{4}{l^2} \\ &= \frac{ql^2h}{32D}\end{aligned}$$

(4.3.14)

#### 4.3.2 等方性円板直径の同定

式(4.3.11)～(4.3.14)を用いることで、等方性円板中央の下面ひずみに対する円板直径を同定することができる。なお、式(4.3.11)および(4.3.13)は非線形方程式であるので、この場合における $l$ の同定はニュートンラフソン法を用いた。

式(4.3.11)～(4.3.14)において、久保の試算で用いられたアスファルト混合物層下面の引張りひずみ  $300\mu$  を等方性円板中央の下面ひずみ  $\varepsilon_{\max}$  とし、荷重  $P=49\text{KN}$ 、弾性係数  $E=800\text{MPa}$  および  $1,000\text{MPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.35$  とした場合の円板厚さに対する円板直径 ( $2l$ ) を同定した結果を図-4.3.2に示す。

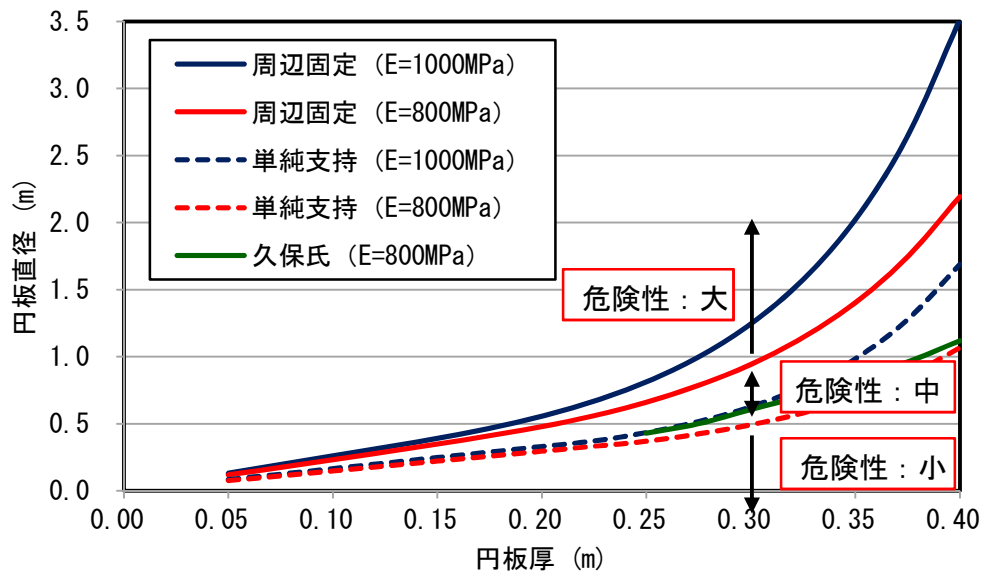





図-4.3.2 円板直径と厚さの関係

これより、弾性係数が同じ場合、同一の円板厚さに対する円板直径は単純支持より周辺固定の方が大きくなる。これは力学的に当然の結果であるが、仮に図の結果を基準値として用いる場合、円板厚さがアスファルト混合物層厚に相当するの

で、この層の下面にある空洞やゆるみの径は基準値よりも大きい場合に危険となる。特に、この場合の基準値は、同一の厚さおよびEに対して、直径の小さくなる単純支持の結果を用いる方が、同一の異常信号に対する危険性を高く評価することとなる。なお、円板周辺条件が同じ場合、同一の円板厚に対する円板直径は弾性係数が高い場合に大きくなる。本計算例では、弾性係数として800MPaおよび1,000MPaを入力値としているが、同定した円板直径の範囲は、-4.3.2に示すとおり配付資料<sup>6)</sup>の計算結果（中凡例の「久保氏 (E=800MPa)」)を含んでいる。

また、より、たとえば、E=800MPaでみると、周辺固定のラインより信号幅が大きい空洞は陥没危険性が大きく、周辺固定と単純支持の間の信号幅の空洞は陥没危険性が中程度、単純支持を下回る信号幅の空洞は陥没危険性が小さいといえる。

## 4.4 評価手法

### 4.4.1 入力条件

(1) 等方性円板の弾性定数 ( $E$ ,  $\nu$ ), 下面中央の引張りひずみ  $\varepsilon$  および等分布荷重

本章の「4.2 路面下空洞の危険性に対する本研究の考え方」で示した久保による陥没の危険性のある空洞幅の試算において、弾性係数は、アスファルト混合物層の剛性の低くなる夏期の状態を想定し 800~1,000MPa, 円板下面中央の引張りひずみは、比較的少ない通過輪数で疲労破壊が生じる  $300\mu$  とし、いずれも舗装設計便覧<sup>9)</sup>を参考に設定している。

すなわち、まず、過去 10 年の東京の月間平均気温の最高値  $29^{\circ}\text{C}$  として、舗装設計便覧からアスファルト混合物層の平均温度を表-4.4.1 のように推定している。なお、月間平均気温の最高値の適用は、下水道管の老朽化に起因する道路陥没において、7~8月の発生件数が最も多い<sup>10)</sup>ことから妥当な設定といえる。

表-4.4.1 アスファルト混合物層と舗装平均温度

アスコン層 (a)	舗装平均温度
0.05m	$38.5^{\circ}\text{C}$
0.10m	$37^{\circ}\text{C}$
0.15m 以上	$35^{\circ}\text{C}$

つぎに、アスファルト混合物層の弾性係数は、図-4.4.1 に示す舗装設計便覧より、表-4.4.1 に示したアスファルト混合物層の舗装平均温度から弾性係数を読み

取る．結果は表-4.4.2 のようになる．

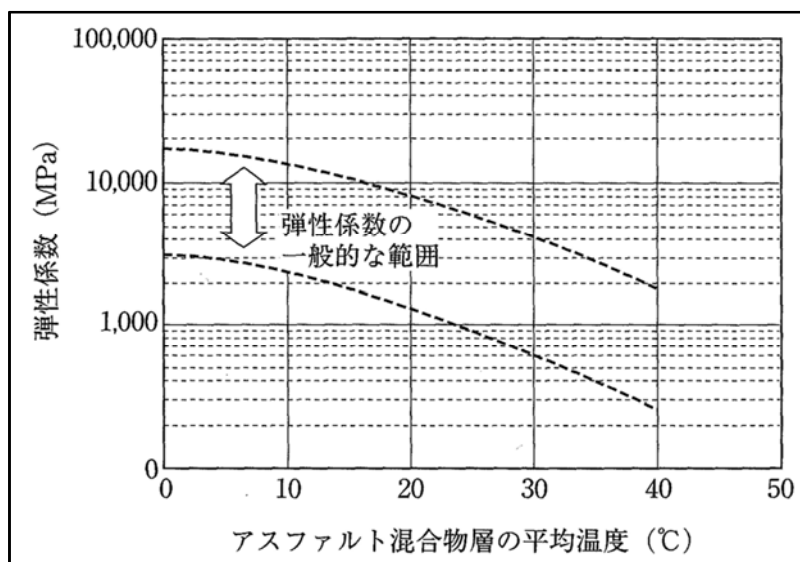


図-4.4.1 アスファルト混合物層の弾性係数<sup>10)</sup>

表-4.4.2 アスコン層と弾性係数

アスコン層 (a)	舗装平均温度	弾性係数 E (MPa)
0.05m	38.5℃	300～2100 (1200)
0.10m	37℃	350～2200 (1275)
0.15m 以上	35℃	400～3000 (1700)

※弾性係数の ( ) 内は平均値

表-4.4.2 の結果より，弾性係数の平均値より低めの 800～1,000MPa と設定している．空洞による陥没は，空洞直上の舗装がどのようなタイミングでいつ発生するかは不明で，陥没はアスファルト混合物の剛性の低下する夏期に多く発生している<sup>11)</sup> ことが明らかであることから，このような弾性係数の設定は概ね妥当と考えられる．



つぎに、アスファルト混合物層下面の引張りひずみは、図-4.4.2に示す舗装設計便覧より、最も少ない疲労破壊輪数でひずみの高い300 $\mu$ と設定している。

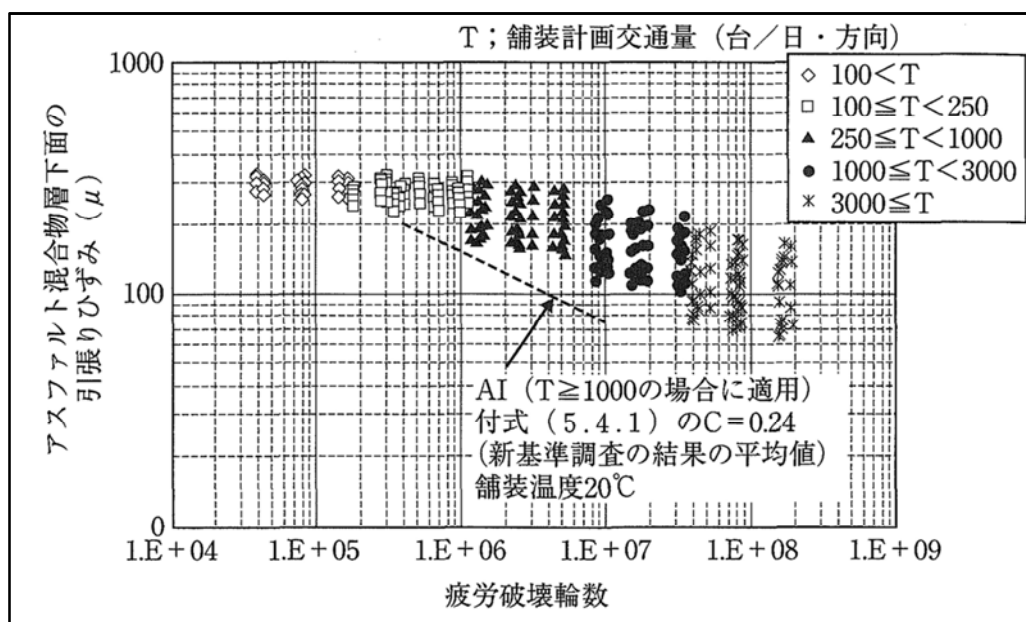


図-4.4.2 アスファルト層下面の引張りひずみと疲労破壊輪数<sup>12)</sup>

アスファルト混合物層にひび割れが発生すれば陥没しやすくなることは容易に想像できる。そこで、調査時に発見された空洞が、近いうちに陥没する危険性を評価するためには、アスファルト混合物層の剛性を低く、ひび割れする確率を高く設定しておくことが必要であるので、このようなアスファルト混合物層下面の引張りひずみの設定は概ね妥当と考えられる。

以上より、本解析を用いた空洞評価において、等方性円板の弾性係数  $E$  および下面中央の引張りひずみ  $\varepsilon$  の入力値は、久保の試算で用いられた入力値を適用することとした。ここで、前節で示した「4.3.2 等方性円板直径の同定」において、円板周辺条件が同じ場合、同一の円板厚に対する円板直径は弾性係数が高い場合

に大きくなるので、円板厚が厚い場合には円板直径が数十メートルの計算結果となる。これは舗装が健全な場合に輪荷重による陥没の危険性が低いということの意味するものであるが、このような弾性係数の高い条件で最終的な危険性の評価を本研究では行うことを想定していない。したがって、空洞の危険性評価においては、基本的に夏期の舗装状態を危険とするので、弾性係数は 800MPa を採用する。

なお、ポアソン比および等分布荷重については、舗装の構造解析で一般に用いられている  $\nu=0.35$ 、直径が輪荷重接地圧である 0.34m、荷重が 49KN を用いることとする。

## (2) 等方性円板の厚さ

等方性円板は、円板厚をアスファルト混合物層厚（表層・基層厚）としているので、仮に下層路盤にある空洞の場合、上層路盤を無視して計算することも可能である。しかしながら、表層・基層厚は、補修履歴により道路台帳にある舗装構成と必ずしも一致していない可能性があり、ある程度正確な表層・基層厚を把握するためにはボーリングデータが必要となる。また、第 3 章の「3.2.2 地中レーダーおよびスコープ調査結果」で示したように空洞は舗装構成層の境界面に存在しているものが多く、この場合に路盤自体が自立していることから、路盤にもある程度の曲げ剛性が存在していると考えられる。このように、簡易に空洞の危険性を評価する、空洞の直上あるいはその周辺の舗装が輪荷重を支えているという観点からすれば、前節で示した図-4.3.2 の横軸の円板厚さを表層・基層厚とするのではなく、阿部らが提案している次式<sup>13)</sup>に示す、現状の舗装の健全性を等値換算厚 ( $T_A$ ) で評価可能な残存  $T_A$  に置き換えて重交通路線での空洞データを評価

することの方が適当と考えられる。T<sub>A</sub>とは、異なる舗装構成材料をアスファルト混合物として換算した厚さであり、輪荷重支持能力を厚さとして表現したものである。その上で、残存 T<sub>A</sub>は、経年変化により支持能力が低下した舗装の新設舗装に対する相対的な支持能力を表し、舗装の維持修繕に用いられている<sup>9)</sup>。

$$T_A = -25.8 \log(D_0 - D_{150}) + 11.1 \quad (4.4.1)$$

式(4.4.1)は新設から供用開始後1年未満の新設舗装のFWDデータから導き出されているので、経年変化した舗装のD<sub>0</sub>-D<sub>150</sub>を用いて算出されたT<sub>A</sub>は、新設舗装に対する相対的な支持能力となる。

#### 4.4.2 評価手法

評価手法について、具体には、前節で示した図-4.3.2において、E=800MPaのラインを基準として、任意の空洞についてFWDたわみ結果から算出された残存T<sub>A</sub>(図-4.3.2横軸)に対応する信号幅(図-4.3.2縦軸)を図から読み取り、実際の信号幅のデータ(「表-3.2.1 異常信号の箇所数」にある空洞および隙間の存在が確認された箇所数：78箇所)が図より算出した信号幅を上回るものを危険性が高いとする。この場合、周辺固定条件のラインを上回る場合が危険性大、周辺固定と単純支持条件のラインの間を危険性中、単純支持条件のラインを下回るものを危険性小とする。また、D<sub>0</sub>-D<sub>150</sub>について、第3章の「3.2.3 FWD試験結果」でも示したように、空洞直上のたわみが周辺部のたわみより小さい場合も存在する。したがって、この場合は、周辺部のたわみが大きいのは空洞による影響と捉え、周辺部のD<sub>0</sub>-D<sub>150</sub>を採用することとする。

以上より，本手法は円板直径より大きい信号幅を有する空洞が危険性の高いという考え方なので，空洞直上の舗装において，高温時（夏期）の下面引張りひずみが  $300\mu$  以上の大きな値となり，輪荷重の繰り返し载荷の比較的少ない段階で疲労破壊を生ずるとして危険性を評価するものである．次節では，このような手法を重交通路線での空洞データの評価に適用した場合の適用の可否について検討を実施した．

## 4.5 評価結果

図-4.5.1 は、信号幅と残存  $T_A$  の関係を示したものである。

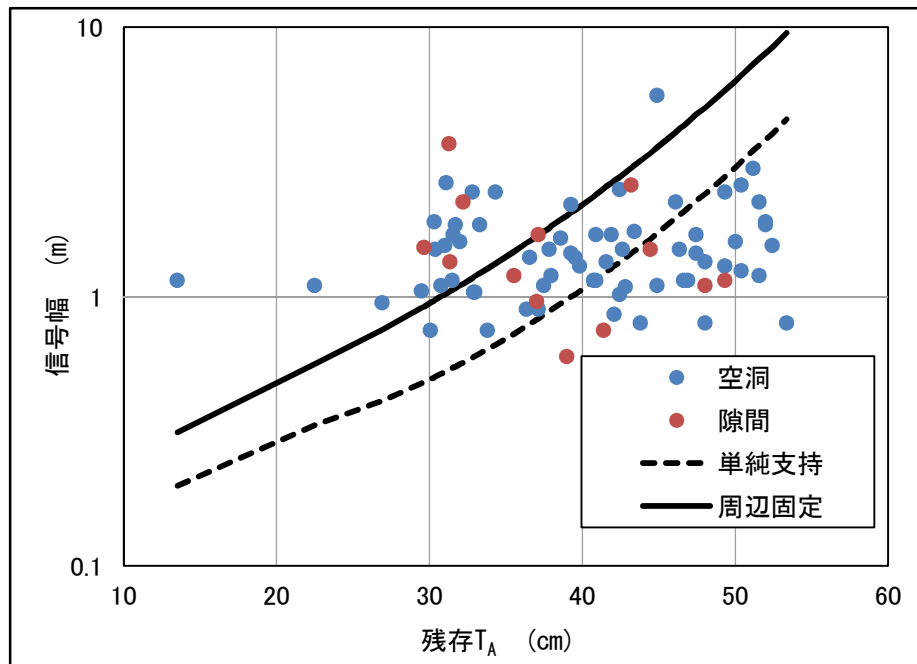


図-4.5.1 信号幅と残存  $T_A$  の関係

図中には等方性円板における周辺固定および単純支持条件による残存  $T_A$  を円板厚さとした場合の円板直径 (=信号幅) の計算結果を示している。これより、前節の評価手法によれば、周辺固定のラインを上回るものは危険性大、周辺固定と単純支持のラインの間に存在するものは危険性中、単純支持のラインを下回るものは危険性小ということになる。なお、図中において、空洞は厚さ 5cm 以下の隙間の空洞とそれより厚い空洞を区別しており、隙間の空洞でも危険性の高いものから低いものに分類されている。これは、等方性円板下面の下は空洞を想定し

ているので、例え空洞厚が 1cm であっても上部の舗装は破壊するという評価手法となっているためである。このような評価手法によって分類された空洞の危険性評価の妥当性について、以下に考察する。

図-4.5.2 は危険性の大小を分類した空洞について信号幅と  $D_0-D_{150}$  の関係を調べたものである。

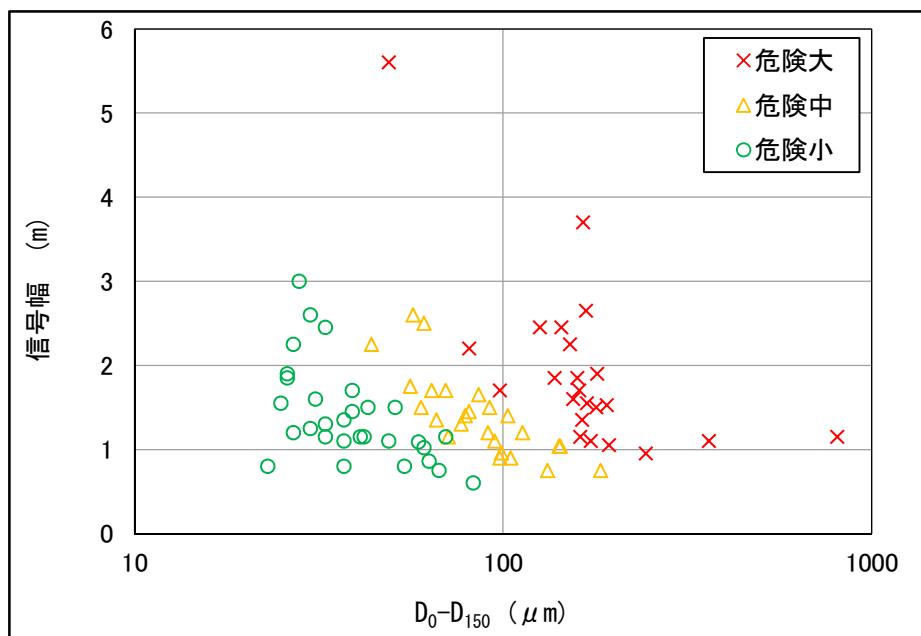


図-4.5.2 信号幅と  $D_0-D_{150}$  の関係

これより、ほぼ同じ信号幅の空洞は FWD たわみの大きいものほど危険性が高く、同一の FWD たわみでも信号幅が大きいものほど危険性の高い空洞の分布となっている。

図-4.5.3 は危険性の大小を分類した空洞について空洞深さと  $D_0-D_{150}$  の関係を調べたものである。

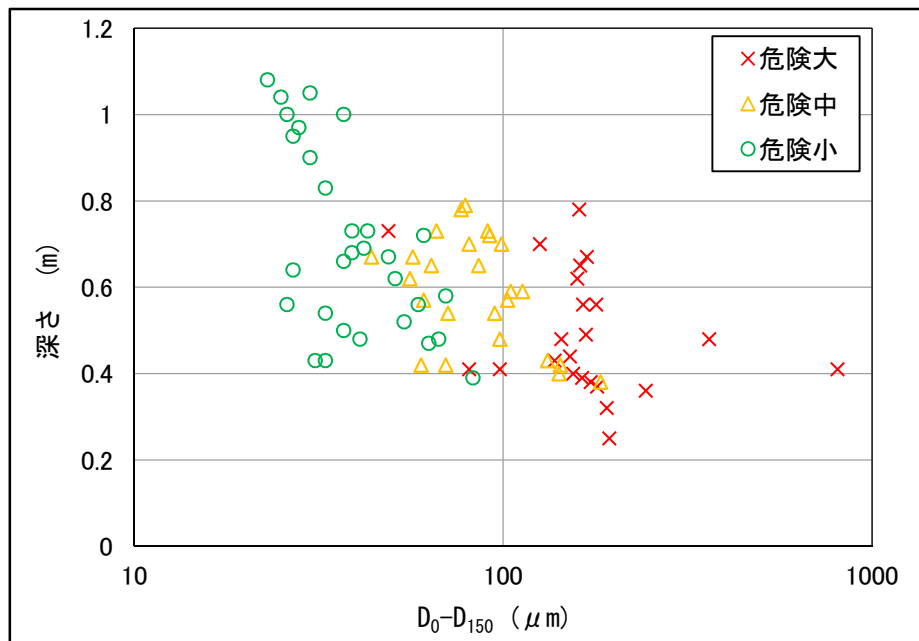


図-4.5.3 空洞深さと  $D_0-D_{150}$  の関係

これより、図-4.5.2 ほどでないが、ほぼ同じ空洞深さの空洞は FWD たわみの大きいものほど危険性が高く、同一の FWD たわみでも空洞深さの浅いものほど危険性の高い空洞の分布とほぼ近似している。

表-4.5.1 は、危険性が分類された空洞の性状および空洞存在箇所の舗装のたわみの平均値を示したものである。

表-4.5.1 分類された空洞の性状

評価	深さ (m)	信号幅 (m)	信号幅 /深さ	厚さ (m)	$D_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_0-D_{150}$ ( $\mu\text{m}$ )
危険大	0.491	1.927	3.971	0.166	268	192
危険中	0.590	1.402	2.421	0.173	154	91
危険小	0.697	1.399	2.052	0.198	87	41

これより、まず、空洞の性状について、危険性の高いものほど深さは浅く、信号幅は大きい傾向にある。ただし、空洞の厚さについては大きな差異が認められていない。つぎに、たわみについて、危険性の高いものほど  $D_0$  および  $D_0 - D_{150}$  は大きく、空洞が舗装の健全性に与える影響が大きい傾向にある。

図-4.5.4 および図-4.5.5 は、等方性円板において、円板直径を信号幅、円板厚さを残存  $T_A$  として、円板中央のたわみを周辺固定および単純支持のそれぞれの条件で計算し、それと残存  $T_A$  の関係を調べたものである。なお、弾性係数などその他の入力値は前節で示したものと同一である。

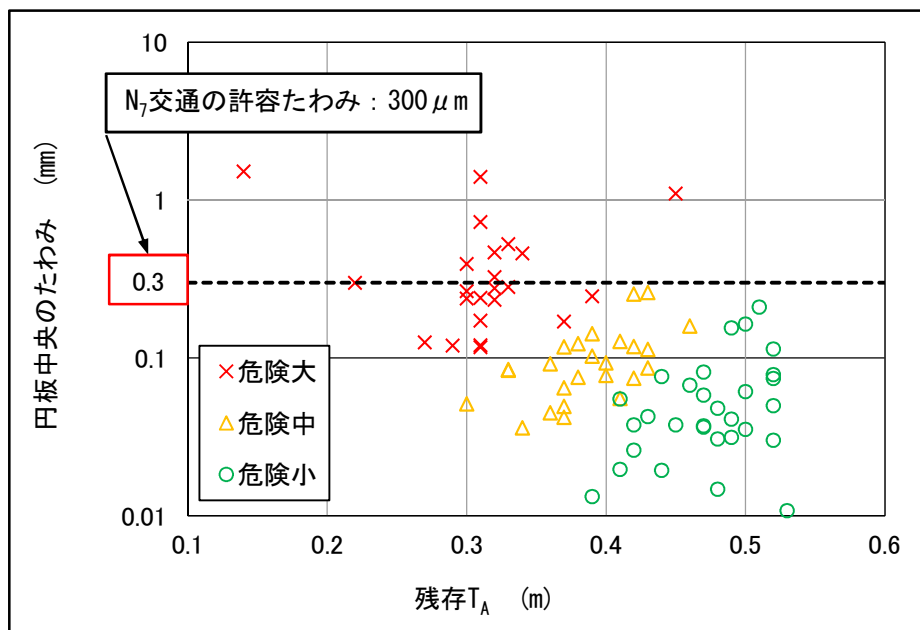


図-4.5.4 円板中央のたわみと残存  $T_A$  の関係（周辺固定）



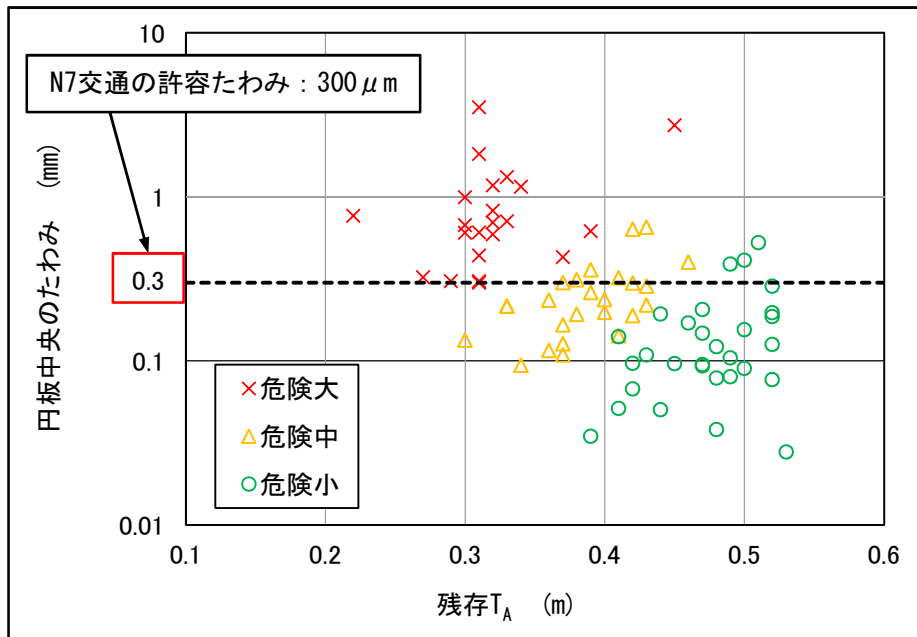


図-4.5.5 円板中央のたわみと残存  $T_A$  の関係（単純支持）

これより，危険性が高い空洞ほど残存  $T_A$  は小さくたわみが大きく，危険性の低いものほど残存  $T_A$  は大きくたわみが小さい傾向にある．なお，危険性が高い空洞の内，比較的残存  $T_A$  が高くても危険性が高いと分類されているものがあるが，これは信号幅が数メートルと比較的大きい空洞である．また，図中には， $N_7$ 交通の許容たわみ<sup>14)</sup>である  $300\mu\text{m}$  のラインを示している． $N_7$ 交通とは， $N_1$  から  $N_7$  まである交通量区分の中で最も重交通で，舗装計画交通量が  $3,000$  台/日×方向以上，疲労破壊輪数が  $35,000,000$  回/10年であり，旧区分の D 交通である．これより，危険性大の空洞のたわみは，単純支持条件の計算結果で  $300\mu\text{m}$  以上となり，危険性中および小の空洞のたわみは，単純支持条件の計算結果で  $300\mu\text{m}$  以上でも，周辺固定の計算結果では  $300\mu\text{m}$  のラインを超えていない．

したがって，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，このような分類は概ね妥当と考えられ，前節で示した評価手法は，

重交通路線に存在する空洞の危険性の大小を分類することが可能な手法と考えられる。

## 4.6 まとめ

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．

本章で得られた知見を以下にまとめる．

- (1) 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．
- (2) 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，等方性円板の支持条件を周辺単純支持と周辺固定の2種類とした場合の円板直径の同定手法を示した．
- (3) 等方性円板の円板直径の同定手法を用いて空洞評価を実施する場合，等方性円板の弾性係数  $E$  および下面中央の引張りひずみ  $\varepsilon$  の入力値は，久保の試算で用いられた入力値を適用し，円板厚さは残存  $T_A$  に置き換えて重交通路線での空洞データを評価する空洞評価手法を示した．
- (4) 前述の空洞評価手法を用いて重交通路線の空洞データを分類した結果，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分類することが可能な手法と

考えられた.

## 第4章の参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局 web サイト（直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会，第1回委員会配付資料，2015年9月14日確認）  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010896.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010896.pdf)
- 2) 桑野玲子，佐藤真理・瀬良良子：地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No.2，pp.219-229，2010.
- 3) 桑野玲子，堀井俊孝・山内慶太・小橋秀俊：老朽化下水管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，pp.349-361，2010.
- 4) 上島壮・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊時ひずみに関する研究，土木学会論文報告集，第221号，pp.73-80，1974.
- 5) 城本政一・青木政樹・竹内康：小型FWDと地中レーダーを併用した路面下空洞調査方法に関する検討，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.69，No.3，pp.I\_167-I\_173，2013.
- 6) 国土交通省関東地方整備局 web サイト（直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会，第4回委員会配付資料，2015年9月14日確認）  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000010883.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000010883.pdf)
- 7) 池田拓哉・伊藤正秀：大型車のタイヤ接地圧評価式の検討，第40回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.465-466，1985.10
- 8) 土木学会 構造工学委員会：構造力学公式集，pp.324-325，1996.
- 9) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧，平成18年2月.

- 10) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧， p.118， 平成 18 年 2 月
- 11) 横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚：下水道管路施設に起因する道路陥没の現状  
(2006-2009 年度)， 国土技術政策総合研究所資料， No.668， 2012.
- 12) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧， p.290， 平成 18 年 2 月
- 13) 阿部長門・丸山暉彦・姫野賢治・林正則：たわみ性指標に基づく舗装の構造  
評価， 土木学会論文集， No.460， V-18， pp.41-48， 1993.
- 14) 舗装診断研究会：FWD による舗装診断， p.18， 2014.



## 第5章 路面下空洞の補修優先順位評価手法

### 5.1 概説

政府は、平成25年10月「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」を設置し、国民生活やあらゆる社会経済活動を支える各種施設をインフラとして幅広く対象とし、戦略的な維持管理・更新などの方向性を示す基本的な行動として、「インフラ長寿命化基本計画」をとりまとめている。さらに、この基本計画に基づき国土交通省が管理・所管するあらゆるインフラの維持管理・更新などを着実に推進するための中長期的な取組の方向性を明らかにする計画としてインフラ長寿命化計画（行動計画）を策定<sup>1)</sup>した。厳しい財政状況下において、維持管理・更新などに係る計画的な投資を行うためには、あらゆる角度から維持管理・更新などに係るトータルコストの縮減を図るとともに、維持管理・更新には優先順位付けをし、効率的で計画的な予算配分に努めることが重要である。

本章では、前章において、空洞やゆるみ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する。



## 5.2 路面下空洞と舗装の健全性との関係

$D_0$  は、路床の支持力を含む舗装の強度、 $D_0 - D_{150}$  は舗装の強度を表すとされている<sup>2)</sup>。換言すれば、両者の大きさは舗装の健全性を表しており、これらの値が小さいものほど健全といえる。ここで、空洞はある深さで発生し、時間の経過とともに成長しながら上方へと拡大していくケースが多い<sup>3)</sup>。このような現象に基づけば、例えば、長年の供用により舗装が疲労している、あるいは転圧不足などの施工不良により舗装の支持力が不足しているなど、健全性の悪い舗装では、舗装内部へ進入する空洞の進行速度や成長速度が速くなると予想できる。このため、空洞発見時は発生時に比べ、空洞の深さは浅く、面積が大きくなっていると想像できる。

そこで、 $D_0 - D_{150}$  が健全性を表す係数と仮定し、健全性を考慮した空洞の深さや信号幅について、深さは  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  で除し、信号幅は  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  を乗じたものについて考える。まず、深さを  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  で除したものについて、同じ深さにある空洞の場合、舗装の健全性が良好 ( $D_0 - D_{150}$  が小さい) であれば、健全性の不良 ( $D_0 - D_{150}$  が大きい) のものに比べ、この値は大きくなる。すなわち、この値の大きい空洞ほど危険性の低い空洞といえる。この考えを「仮想深度」と称する。図-5.2.1 に仮想深度の概念を示す。

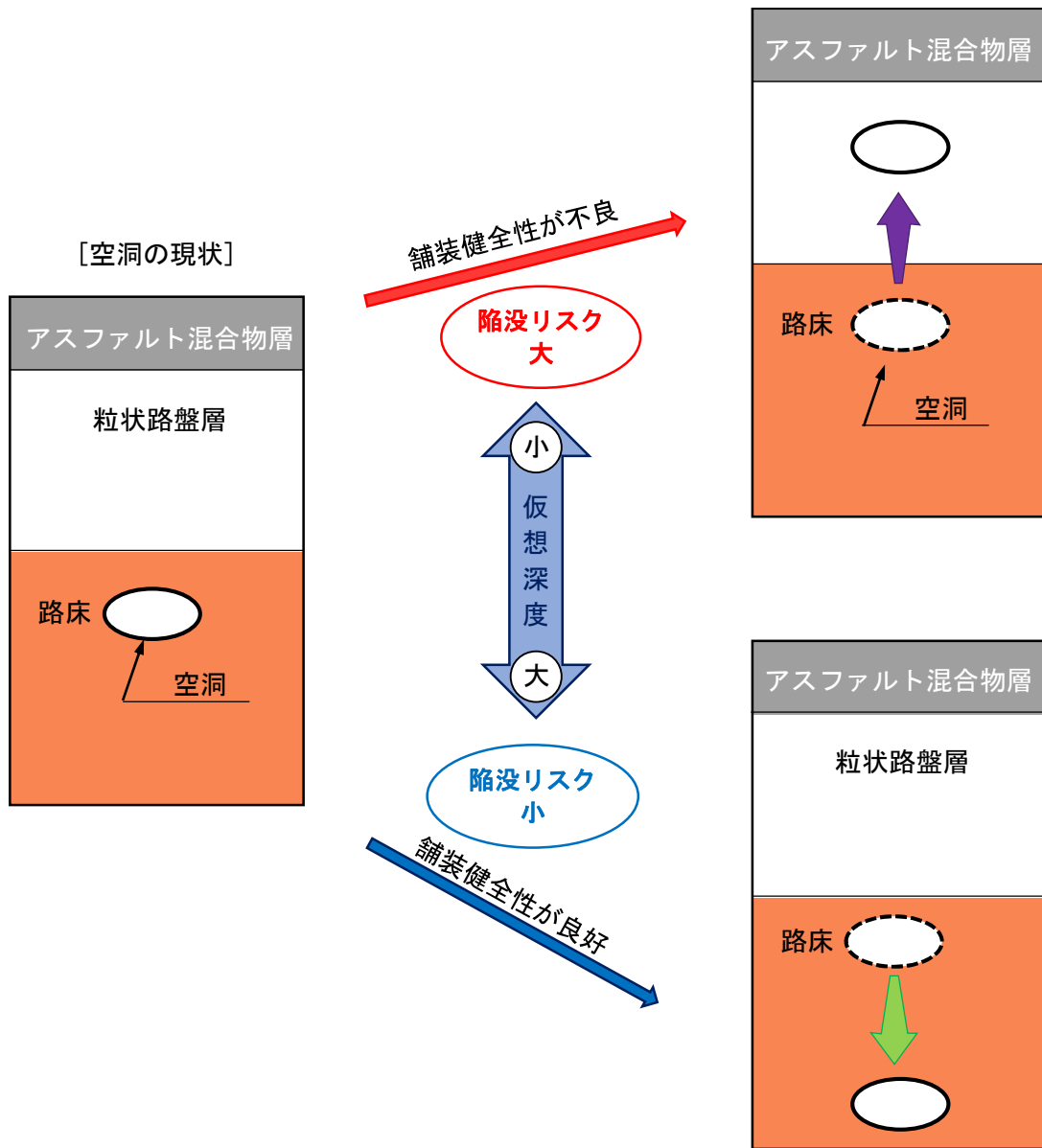


図-5.2.1 仮想深度のイメージ図

つぎに、信号幅に  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  を乗じたものについて、同じ信号幅の空洞の場合、舗装の健全性が良好 ( $D_0 - D_{150}$  が小さい) であれば、健全性の不良 ( $D_0 - D_{150}$  が大きい) のものに比べ、この値は小さくなる。すなわち、この値の小さい空洞ほど危険性の低い空洞といえる。この考えを「仮想信号幅」と称する。図-5.2.2 に仮想信号幅の概念を示す。

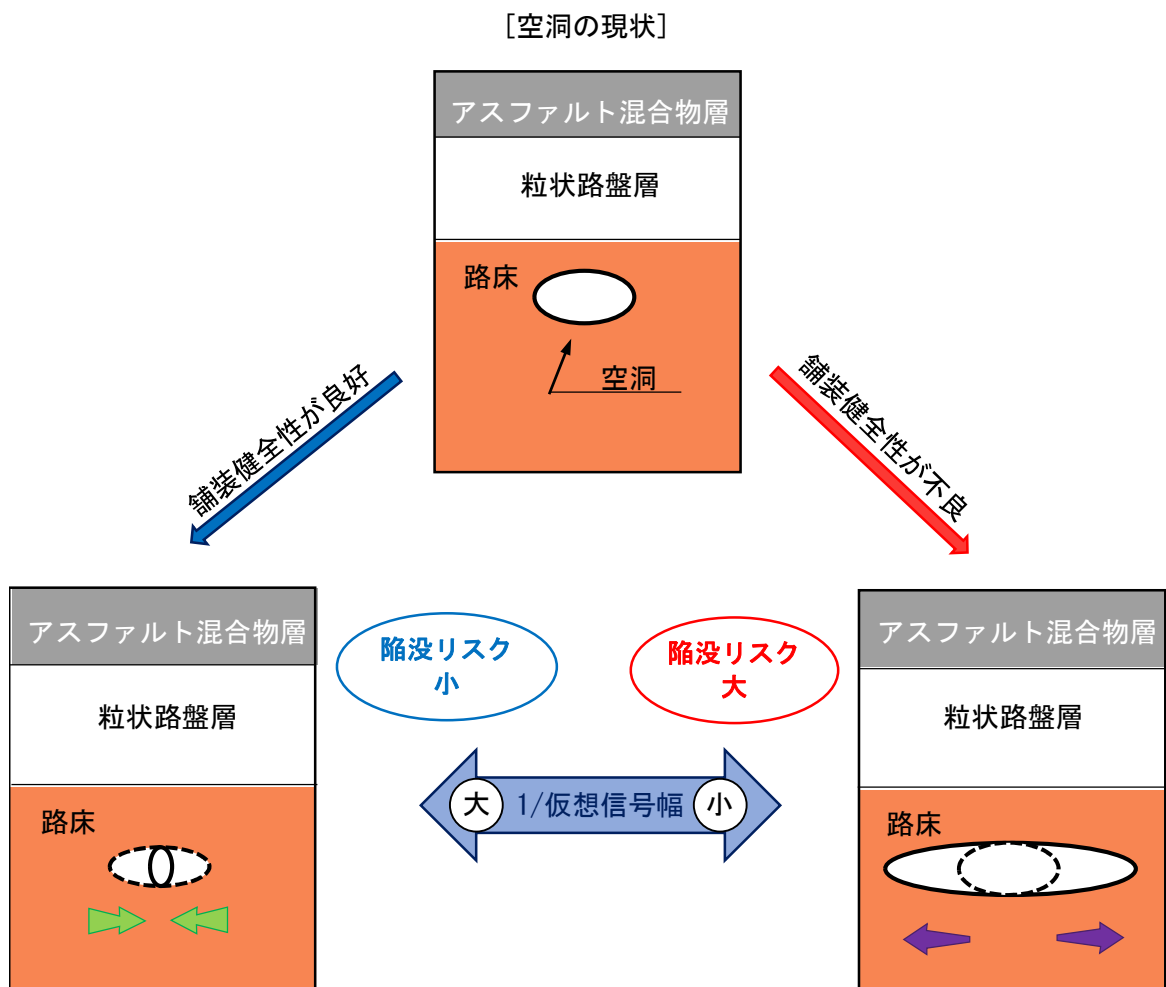


図-5.2.2 仮想信号幅のイメージ図

本論文において、深さを  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  で除したものを仮想深度、信号幅に  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  を乗じたものを仮想信号幅と称することとし、両者の関係の概念図を図-5.2.3 に示す。

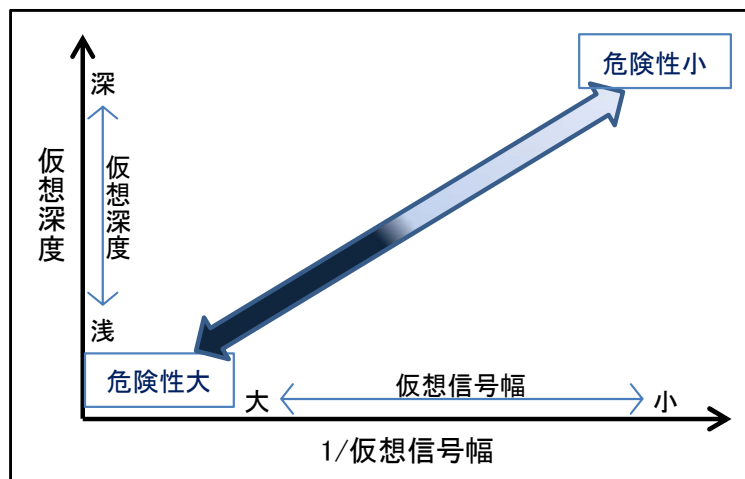


図-5.2.3 仮想深度と仮想信号幅の逆数の概念図

これより、縦軸に仮想深度、横軸に仮想信号幅の逆数をとることで、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考えられる。

ここで、空洞情報として空洞深さと信号幅を採用した理由は、空洞の規模を表す情報には信号幅以外にも空洞厚さがあるが、空洞直上の舗装支持力を考えた場合、例え空洞厚が  $1\text{cm}$  であろうと空洞以下の支持層は舗装全体の支持層として機能していないこと、空洞厚はスコープ調査を実施しなければ知ることができず、地中レーダー探査結果と FWD 試験結果のみから空洞の評価が実施できる方が簡易な手法となることなどを考慮したためである。

### 5.3 評価手法の適用例

図-5.3.1および図-5.3.2は、実測データを用いた仮想深度と仮想信号幅の逆数の関係を示したもので、図-5.3.1は全データ、図-5.3.2は図-5.3.1における原点付近（仮想深度および仮想信号幅の逆数ともに20）を拡大したものである。また、データは、第4章において危険性を分類した結果で図示しており、それぞれのおよその境界を双曲線で示している。これより、第4章で分類した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がわかる。

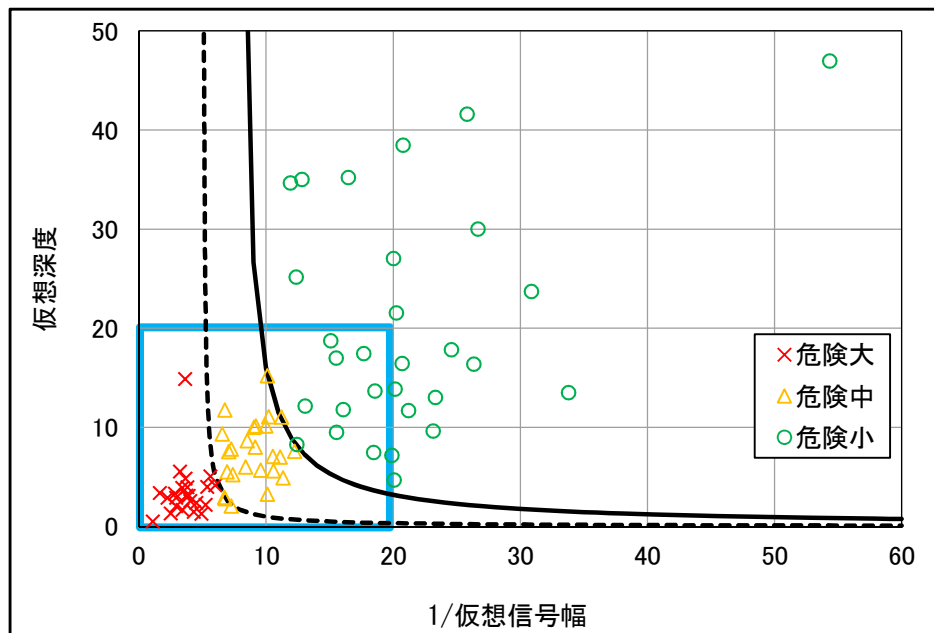


図-5.3.1 実測データを用いた仮想深度と仮想信号幅の逆数の関係

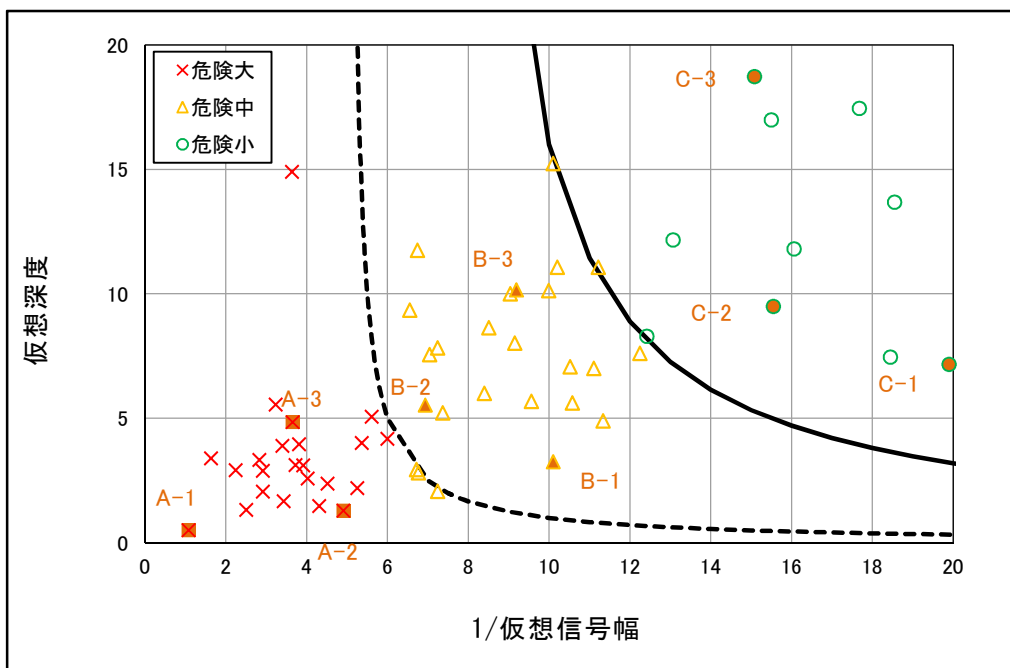


図-5.3.2 実測データを用いた仮想深度と仮想信号幅の逆数の関係

(図-5.3.1における原点付近拡大)

表-5.3.1 は、図-5.3.2 において、危険性大から小に至る空洞データをランダムに抽出し、それぞれの空洞データを示した例である。

表-5.3.1 空洞データ抽出結果

評価	記号	深さ (m)	信号幅 (m)	信号幅 /深さ	厚さ (m)	D <sub>0</sub> (μm)	D <sub>0</sub> -D <sub>150</sub> (μm)
危険大	A-1	0.41	1.15	2.805	0.43	950	806
	A-2	0.25	1.05	4.200	0.82	218	194
	A-3	0.78	1.70	2.179	0.22	220	161
危険中	B-1	0.43	0.75	1.744	0.15	191	132
	B-2	0.57	1.40	2.456	0.23	167	103
	B-3	0.79	1.40	1.772	0.07	131	79
危険小	C-1	0.48	0.75	1.563	0.12	125	67
	C-2	0.56	1.09	1.946	0.25	130	59
	C-3	0.73	1.70	2.329	0.22	85	39

これより、例えば、A-1 と A-2 を比較した場合、A-1 に比べ A-2 の方が空洞深さは浅く、空洞厚さは大きいので、空洞の規模は A-2 の方が大きいといえる。しかしながら、A-1 のたわみは B-1 の 4 倍以上と大きく、舗装の健全性が損なわれていることから、危険性の最も高い空洞として原点に最も近い空洞として位置づけられる。また、A-3 と C-3 を比較した場合、両者の空洞深さ、信号幅および空洞厚さは同程度であるが、C-3 に比べ A-3 の方が、たわみ D<sub>0</sub> がおよそ 2.5 倍と大きいことから危険大となっている。同様に、B-1 と C-1 を比較した場合、両者の空洞深さ、信号幅および空洞厚さは同程度であるが、C-1 に比べ B-1 の方が、たわみ D<sub>0</sub> が大きいため危険中となっている。

以上より、仮想深度と仮想信号幅の逆数の関係を用いて、空洞の危険性の大小を評価できることがわかった。したがって、危険大と評価された空洞の内、補修

の優先順位は原点に近いものから設定すれば良いことになる。ただし、例えば、**表-5-3-1**中の A-2 と A-3 の空洞は原点から同程度の距離にある空洞であるが、現状の空洞情報を考慮すれば、A-2 は浅い位置に存在しており、空洞成長速度の速い可能性があることから、A-2 を優先すべきと考える。なお、前述の優先順位決定手法は、空洞データと FWD データより決まるものであるので、ライフラインの埋設状況や路面性状なども優先順位決定の際に考慮する必要がある。



## 5.4 まとめ

本章では、前章において、空洞やゆるみ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。

本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 深さを  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  で除したものを仮想深度、信号幅に  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  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をとることで、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。
- (2) 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示した。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 5 章の参考文献

- 1) 国土交通省総合政策 web サイト（国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）、2015 年 11 月 11 日確認）  
[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei\\_point\\_mn\\_000011.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000011.html)
- 2) 丸山暉彦・阿部長門・雑賀義夫・姫野賢治：FWD による舗装の構造評価および補修設計システムの開発，土木学会論文集，No.484，V-22，pp.61-68，1994.
- 3) 桑野玲子，堀井俊孝・山内慶太・小橋秀俊：老朽化下水管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，pp.349-361，2010.



## 第6章 総括

### 6.1 結論

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。道路管理者ならびに占用管理者は、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、路面下に発生した空洞を未然に発見し、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迫られる。道路陥没が発生した際の道路管理者の対応は、現状では対処療法的で事後保全型の対応が主流と言わざるを得ない状況であり、いかに予防保全型の維持管理を図るかが課題である。

一方で、道路陥没に至る原因、すなわち路面下空洞の発生から空洞が成長し陥没に至るまでの要因は、種々の要素が複雑に関係しあっており、明確なメカニズムが解明されていない状況にあることは既に述べた。このような状況のなか、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、その確立が望まれており、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。

「第3章 重交通路線の空洞データおよび分析」で得られた知見は、以下のとおりである。

(1) 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、例えば、浅い位置にある空洞ほど規模が大きいなど、そ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。

(2) 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と考察した。

(3) 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。すなわち、空洞深さを一定とした場合、空洞径が大きくなると  $D_0$  も増大する傾向にあることを示した。また、空洞径を一定とした場合、空洞深さが浅くなると  $D_0$  が増大する傾向にあることを示した。さらに、空洞径・深さ一定における舗装体強度と表面たわみ量の関係は、表層強度の増加を舗装の支持力増加と見なせば、舗装の支持力が増大すると  $D_0$  は減少する傾向にあることを示した。

(4) 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がわかったが、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  $D_0$  に相関性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関する評価手法」で得られた知見は、以下のとおりである。

(1) 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。

- (2) 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、等方性円板の支持条件を周辺単純支持と周辺固定の2種類とした場合の円板直径の同定手法を示した。
- (3) 等方性円板の円板直径の同定手法を用いて空洞評価を実施する場合、等方性円板の弾性係数  $E$  および下面中央の引張りひずみ  $\varepsilon$  の入力値は、久保の試算で用いられた入力値を適用し、円板厚さは残存  $T_A$  に置き換えて重交通路線での空洞データを評価する空洞評価手法を示した。
- (4) 前述の空洞評価手法を用いて重交通路線の空洞データを分類した結果、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分類することが可能な手法と考えられた。

「第5章 路面下空洞の補修優先順位評価手法」で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 深さを  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  で除したものを仮想深度、信号幅に  $(D_0 - D_{150})\text{mm}$  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をとることで、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。

- (2) **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示した。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。

## 6.2 今後の課題と展望

本研究では地中レーダーによる空洞探査結果と FWD 試験結果を併用した評価手法を用いることで、ボーリングデータを必要としない非破壊での空洞評価を行う手法を重交通路線の測定結果を用いて提案した。ただし、重交通路線の危険性判定においては、経過観察の間に空洞が成長し陥没に至る可能性もあるので、経過観察空洞として分類されても、空洞周辺の地下埋設物の有無やその状態、過去の工事履歴などを参考として経過観察の可否を判断することが必要であり、それらを考慮した空洞評価システムの構築が必要である。また、本提案手法を市街地道路や地方道にも適用できるようにするためにはさらなる調査・研究が必要である。

一方で、本論文で示した等方性円板を用いた危険性の評価手法は一例であり、陥没に至るメカニズムを解明することで、より実現象を考慮した危険性の判定が可能と考えられる。すなわち、現道において、沈下が進行している異常信号箇所や陥没が生じた箇所における空洞の深さや大きさの情報と、路床を含む舗装の構造および健全性の情報を蓄積できれば、力学解析結果と併せて信頼性の高い陥没に至るメカニズムの解明と沈下や陥没の予測が行えると推察される。

以上より、舗装構成の異なる舗装での空洞情報と FWD データの蓄積により、より信頼度の高い手法に改善することと併せて今後の検討課題とする。





## 謝 辞

本研究を遂行するにあたりましては、日本大学大学院生産工学研究科博士後期課程土木工学専攻におきまして、ご指導賜りました土木工学専攻主任教授であり本博士論文の審査委員主査である秋葉正一博士に深く感謝申し上げる次第です。また、本論文の副査であり、多数の貴重な御教授と御指導をいただきました日本大学生産工学部土木工学科教授 阿部忠博士，同教授 澤野利章博士に謹んで感謝の意を表します。そして、同専任講師 加納陽輔博士には、各種計算の御教示をいただくなど、様々な支援いただきましたこと、心より感謝申し上げます。

本論文で使用した重交通路線のデータは、国土交通省関東地方整備局より御提供いただきました。また、本論文をまとめるにあたり、国立研究開発法人土木研究所の久保和幸博士には有益なる御助言をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

さらに、御協力を頂きました秋葉研究室ならびに論文執筆に当たり多大な御支援と御理解をいただきました中日本建設コンサルタント株式会社の谷淳貴様、金子千代子様はじめ社員各位には、ここに深甚なる感謝の意を表します。

最後に、日本大学名誉教授 工藤勝輝博士ならびに日本大学生産工学部長 落合実博士には、いつも暖かい御指導、御鞭撻をいただき、本当にありがとうございました。あらためて深く御礼申し上げます。

平成 28 年 3 月 吉日

佐藤 克己