

神戸市における路面下空洞発生箇所の 傾向分析および陥没危険性の評価

Trend analysis of subsurface cavities and evaluation of collapse risk in Kobe City

白 濟 民¹⁾
Satoru Shibuya
澁 谷 啓²⁾
Jemin Baek
丁 經 凡³⁾
Kyungbeom Jeong
許 晋 碩⁴⁾
Jinsuk Hur

概要：近年全国で道路陥没が多発している。本論文では、神戸市において実施した路面下空洞調査の調査結果をもとに空洞発生箇所の傾向を分析し、空洞の進行性について議論している。また、道路路面の性状調査の結果を用いて空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性を評価した。さらに、今後の空洞調査ならびに補修の合理的なアセットマネジメントに寄与することを目的として、道路陥没の危険度評価に関する基礎研究を実施した。

キーワード：路面下空洞調査, 道路路面性状調査, 道路陥没危険度評価

1. はじめに

近年全国で道路陥没が多発しており、大々的に報道された事象として、博多駅前の道路陥没事故¹⁾と大阪北部地震による水道管破裂事故²⁾の2つが挙げられる。2017年11月に発生した博多駅前の道路陥没事故は、市営地下鉄七隈線延伸工事の博多駅工区でのトンネル掘削工事中に発生した人為的な地盤災害³⁾であった。幸いに人的被害はなかったものの、崩落箇所に輻輳されていた上下水道、電気、ガス及び通信は全て途絶し、都市機能に大混乱が生じた。一方、大阪府北部で最大深度6弱を観測した地震では、高槻市、箕面市などで約9万戸が一時的な断水に追い込まれるなどの大規模なインフラ被害が特徴的であった⁴⁾。この地震では、40年の耐用年数を10年以上超える直径90cmの古い水道管が破断したことが引き金となって道路が陥没し、あふれた水で周辺は池のようになった。

これらの事故を契機として、道路陥没現象は広く世間に知られることとなり、福岡市、神戸市、横浜市、札幌市などの政令指定都市7市が一同に参加した対策会議⁵⁾が開催され、また全国の自治体において防災計画の中に地下の空洞化対策を盛り込む気運が高まってきた。一方、例えば大阪府では、設置後40年以上経った古い水道管が全体の約3割を占め、道路陥没事故の潜在的脅威であるにもかかわらず、財政難などを理由に更新が十分に進んでいないのが実状である。

このように、とりわけ人口が密集し、経済活動の活発な大都市においては、地中の高度利用化が進むにつれ、インフラ施設の老朽化が顕在化してきた。地下施設の老朽化が原因で発生した道路陥没は年間12,000件を超え、年々増加傾向にある⁶⁾。この内、下水道管など占有物件に起因する事故が全体の23%を占めている。そこで、2018年3月に成立した道路改正法では、道路管理者が占有事業者に対して維持管理を義務付けるとともに、当該義務違反者への措置命令の規定も盛り込まれた。このような社会的背景から、いまや路面下空洞対策は、従来の「施設の維持管理」から、「都市の危機管理」という新たな視点からの対応が強く求められている。

そこで本研究では、将来の路面下空洞のアセットマネジメント手法の確立を見据えて実施中の産官学協働研究のこれまでの成果をまとめている。神戸市において実施した路面下空洞調査の調査結果をもとに空洞発生箇所への傾向分析ならびに空洞の進行性について評価し、道路路面の性状調査の結果を用いて空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性評価した。さらに、今後の空洞調査の実施に寄与することを目的として道路陥没の危険度評価に関する基礎研究を実施した。

2. 空洞発生への傾向分析ならびに空洞の進行性の評価

(1) 用いた路面下空洞調査データ及び分析方法

神戸市において実施した路面下空洞調査の結果をもとに、過去に空洞が確認された箇所（平成8～29年度に行った一巡目調査において、空洞が確認された箇所）と、このたび、空洞が確認された箇所（平成30年度～令和元年に行った二巡目調査において、空洞が確認された箇所）との重ね合わせを行い、空洞発生への傾向分析や進行性などについて評価した。分析に用いた路面下空洞調査データは、神戸市建設局道路部から提供された「平成8年度から令和元年度（速報）の路面下空洞調査業務報告書（神戸市建設局道路部）」である。ここで、平成8年度から令和元年度まで路面下空洞調査を行った路線の重複有無及び実施時期等を考慮して、一巡目調査と二巡目調査に分けることとした。

表1 平成8～令和元年度における空洞調査結果

調査段階 年度	一次調査 (件)	補足調査 (件)	二次調査 中止(件)	二次調査 実施(件)	空洞判定 (件)	一次調査実施 測線長(km)
平成8年	70	51	24	27	27	576.97
平成9年	27	27	5	22	22	416.6
平成10年	資料無し				3	34.9
平成11年					4	39.2
平成12年					1	19.6
平成13年					6	25.5
平成14年	26	26	22	4	2	85.45
平成15年	12	12	4	8	7	33.96
平成16年	22	15	2	13	13	68.81
平成17年	37	35	7	28	24	34.64
平成18年	33	29	15	14	13	40.18
平成19年	23	21	7	14	10	38.26
平成20年	23	20	0	20	20	56.617
平成21年	38	27	0	27	20	44.9
平成22年	18	10	0	10	5	38
平成23年	15	15	3	12	11	37.7
平成24年	3	3	0	3	3	35.2
平成25年	34	34	22	12	10	66.78
平成26年	146	108	0	0	0	187.908
平成27年	184	184	176	8	5	216.831
平成28年	177	177	163	14	13	245.484
平成29年	225	166	51	115	110	264.401
平成30年	279	0	11	264	251	297.100
令和元年					200(速報値)	
総計	1392	960	512	615	780	2,904.991

空洞を探索する一般的な方法として車載型の地中レーダ探索装置が使用されており、道路の上を走行しながら路面下の空洞を非破壊かつ効率的に探索することができる。このレーダ探索による非破壊検査によって、空洞上部の大きさと深さがわかる。実際に計測し、三次元データ化した後、データ解析を行うことで概ねの空洞状態を判断する。以上の作業が一次探索である。つぎに、二次探索として一次探索で異常が検知された箇所に対して、スコープ調査を行うことによって空洞の有無と規模を確認する。最終的に一次、二次探索で得られた情報を基に総合的な判定を行う。

表1に平成8年度から令和元年にかけての空洞調査結果を示す。平成30年度の調査結果を例にとると、路面下空洞探索車及びハンディ型地中レーダにより一次調査が実施された結果、279箇所が「空洞の可能性あり」と判定され、二次調査（スコープ調査）対象とされた。なお、二次調査対象箇所のうち、4箇所は発生深度が浅く陥没の危険性が高いことから開削による確認・補修対応となり、4箇所が二次調査対象から除外された。また、二次調査中止（埋設物・構造物の近接）

となった 11 箇所を除いて二次調査実施予定 264 箇所について二次調査が実施された結果、251 箇所の空洞が確認された。さらに、年度ごとに調査された路線測線長、単位長さ当たり空洞件数が示されている。平成 8~9 年度は、阪神淡路大震災を経たのちの災害復旧調査、平成 25~29 年度は、笹子トンネルの崩落事故をうけての総点検型調査であるため、調査区間が長くなっている。また総点検型調査のうち、平成 26 年~28 年度については、そのほとんどが一次調査・補足調査のみの段階であるため、空洞判定は乏しい結果となっている。神戸市の空洞発生率（空洞(件)/測線長(km)）は、特異的な調査年度を除いて年平均 0.27 件/km であり、これは全国平均 0.20 件/km に比べてわずかに多い値である。都市部においては、空洞発見件数が顕著であることがうかがえる。図 1 に対象地域における空洞分布を示す。

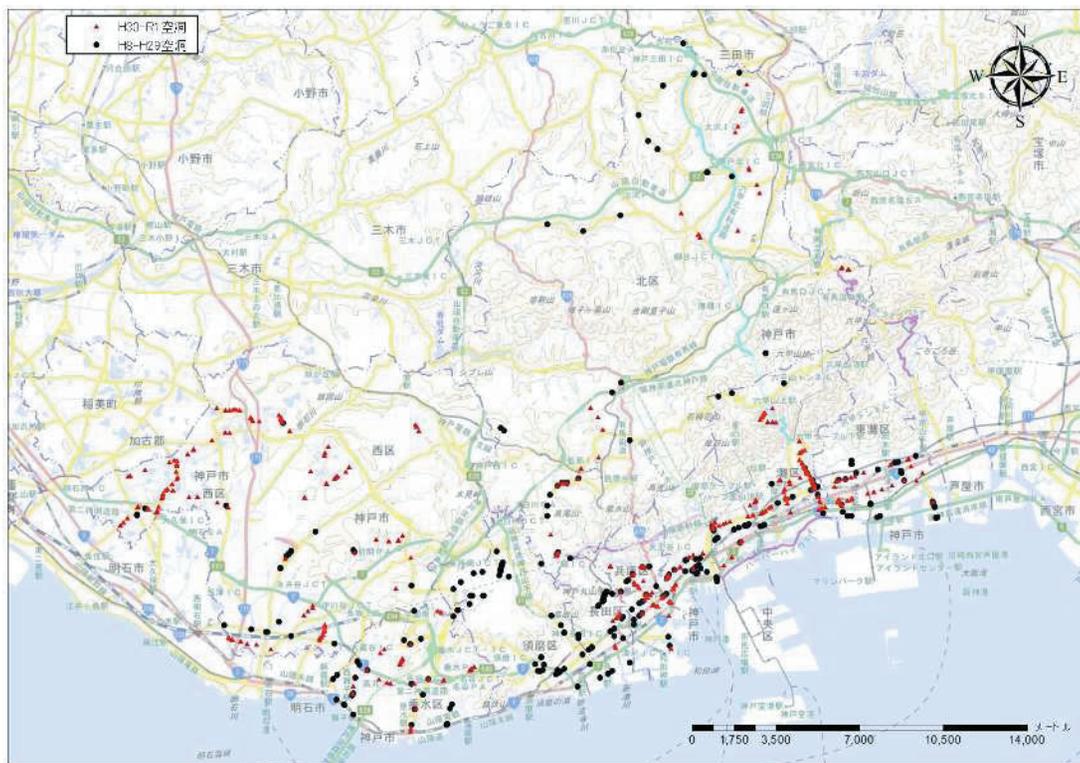


図 1 神戸市における空洞分布図（平成 8~令和元年度）

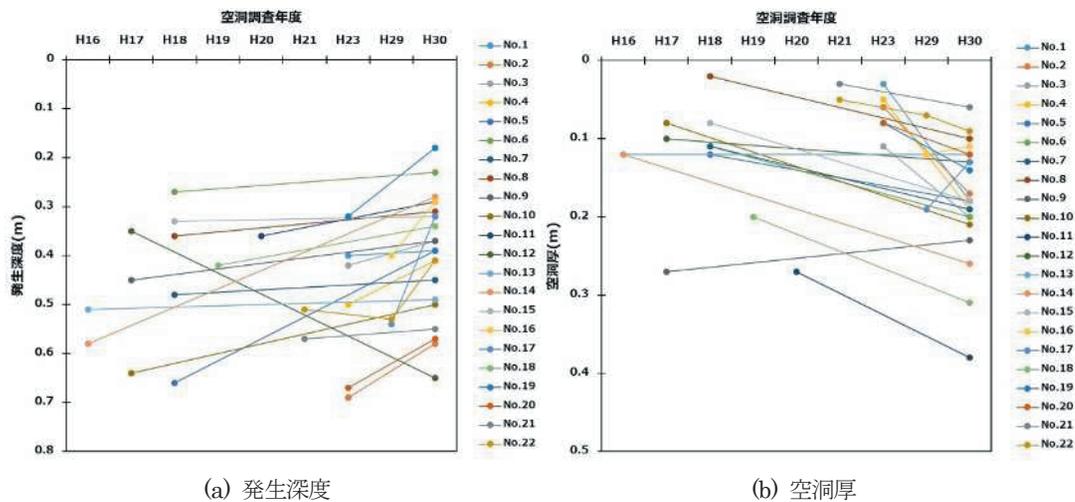
過去に空洞が確認された箇所（平成 8~29 年度に行った一巡目調査において、空洞が確認された箇所）と、このたび、空洞が確認された箇所（平成 30 年度から令和元年に行った二巡目調査において、空洞が確認された箇所）を ArcGIS 上にプロットして比較検討した後、計 22 空洞箇所（No.1~22）が重複して確認できた。

人工衛星によって地上の現在位置を決定する“衛星測位システム”をNSSと呼んでいる。その中で、地球すべてを測位可能なものがGNSS(GはGlobal)である。GPSはアメリカ合衆国が開発したシステムであり、GNSSの一つとなる。最近のGNSS測量では、GPSを含む複数のGNSSを併用して利用する事ができるようになり、より効率的で精度の高い測量が可能になった。最近、高精度GNSSを用いた空洞調査が殆どであるため精度がcm級程度であるが、平成8年度、当時のGNSS精度はm級程度である可能性が高い。そのため、神戸市内における平成8~令和元年度の空洞箇所データをArcGIS上にプロットする際、5m以内に重複されている空洞箇所を抽出した。

(2) 分析結果及び考察

前述したように平成 8~29 年度に空洞が確認された箇所と、平成 30 年度から令和元年に空洞が確認された箇所を ArcGIS 上にプロットして得られた計 22 空洞箇所（No.1~22）のデータを用いて、年数経過に伴う空洞の発生深度と空洞厚の傾向を検討した。その結果を図 2 に示す。図 2 から分かるように、過去（平成 16~29 年度）に発生した空洞の発生深度は、年数経過に伴い浅くなった箇所が殆どであり、空洞厚の場合、年数経過に伴い空洞が厚くなる傾向が確認できる。これは、過去に発生した空洞の上部が不安定化あるいは崩落することにより、空洞が上方に進行して行ったと考えられる。このような空洞発生パターンは桑野ら⁷⁾が実施した実験の結果からも確認できる。桑野ら⁷⁾は地盤陥没を未然に防止するための探査手法を高精度化するために、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似化する

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的として、非排水繰返し試験と定水位土砂流出試験を実施し、図3に示すように空洞とゆるみの拡大パターンを把握した。水平方向に発達した空洞は、天井部の不安定化あるいは崩落、崩落土の流出のサイクルを繰返しながらか空洞域が時間とともに拡大する様子を確認している。



(a) 発生深度 (b) 空洞厚

図2 年数経過に伴う発生深度と空洞厚との関係

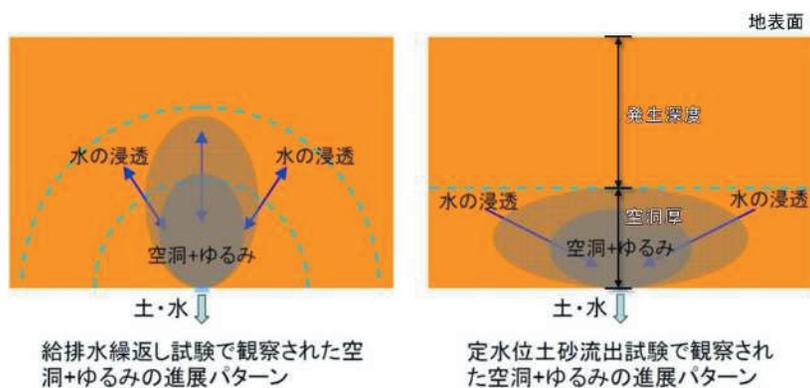


図3 水の浸透と空洞・ゆるみ形成パターンとの関係⁷⁾



図4 重複空洞箇所周辺の埋設管の種類 (数量の重複あり)

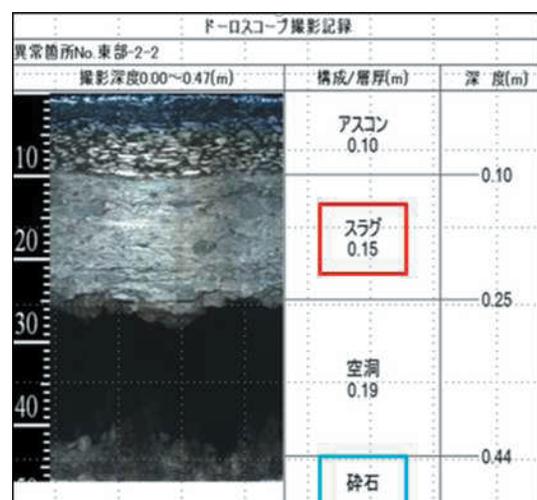


図5 空洞内部の状態の例

本研究では、路面下空洞に起因する地下埋設管に着目して重複空洞箇所における埋設管の種類について調査を行った。二次調査の結果、計22箇所 (No.1~22) の重複空洞箇所の内、3箇所 (No.16, 18, 19) 以外は空洞周辺に污水管や水道管

等の埋設管が0.5～2.0m程度近接していることが確認できた。

図4に重複空洞箇所周辺の埋設管の種類を示す。都市部で頻発している路面下空洞の多くは、埋設管の施工及び開削工事の時に転圧不足により地盤のゆるみが発生することと、老朽埋設管の破損部等から土砂が流出することに起因しているのが現状である。本研究で把握した重複空洞箇所（計22箇所）の内、19箇所もこれらのケースに分類されると考えられる。

一方、河川沿いに発生した空洞箇所として、4箇所（No.9, 10, 16, 17）程度があるものの、河川沿いの反対側の車線に空洞がある場合や河川から多少距離があることから、吸出しの影響で発生した空洞ではなく、転圧不足の可能性が高いと推察される。No.9, 10, 17の空洞箇所には地下埋設管が0.5m以内で近接されており、No.16の場合は地下埋設管がないが、開削跡と近接していることから開削工事後、埋戻しの時の転圧不足の可能性はある。

図5に二次調査から得られたスコープ撮影記録による空洞内部の状態を示す。図5を例にすると、空洞の上部に広がる路盤材料は製鋼スラグ（赤枠で図示）であり、下部には碎石（青枠で図示）が広がっている。これらを上部材料と下部材料とに分ける作業を行った。

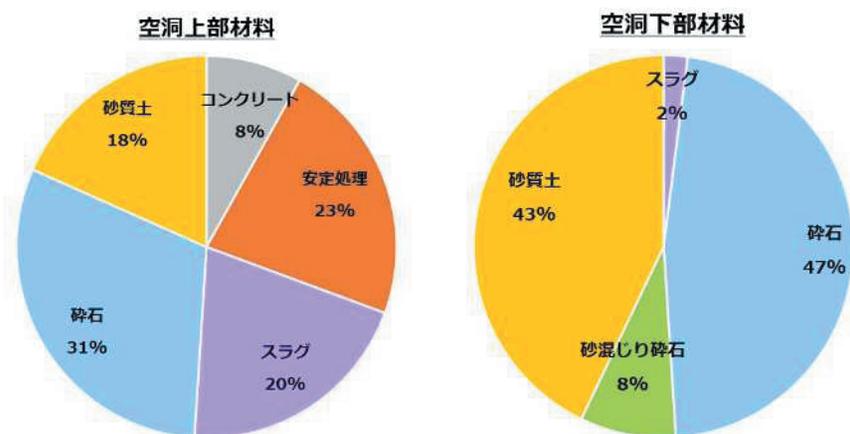


図6 空洞上下部での路盤層の構成割合

図6に空洞上下部それぞれの路盤材料構成の割合を示す。空洞上部の路盤材料は碎石、安定処理、スラグ、砂質土、コンクリートといった順に構成されており、土質分類上、石分が過半数を優に占めている。一方、空洞下部の路盤材料は碎石、砂質土、砂混じり碎石といった順番に並んでいる。上層が安定処理層やスラグ層のような堅固層、下層が砂質土や碎石のような軟弱層である層間に空洞が発生しやすい傾向が確認できる。

3. 空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性の評価

神戸市における空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性を評価することを目的として、これまで空洞が確認された箇所と、平成29～30年度の道路路面の性状調査の結果（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI）をArcGIS上にプロットして重ね合わせを行った。

(1) 分析方法

本研究で用いた路面性状調査結果（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRIの3要因）の算出及び評価方法は、以下の通りである⁸⁾。

- ・ひび割れ率：5m間隔で撮影された路面画像よりひび割れを目視確認し、ひび割れ率を算出したものである。
- ・わだち掘れ量：レーザースキャナにより測定された横断形状と路面画像によりわだち掘れを算出したものである。
- ・縦断凹凸(IRI)：測定した縦断プロファイルデータにて鉛直方向加速度の標準偏差と路面画像により、縦断凹凸(IRI)を評価したものである。

上述したように算出された路面性状調査結果（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRIの3要因）を舗装の損傷レベルに基づき9項目（Ⅰ～Ⅲ×3要因）に分けて空洞発生箇所データと一緒にArcGIS上にプロットした上、各項目における空洞発生箇所の数を調べた。

(2) 分析結果及び考察

表 2 と表 3 に路面性状調査結果と空洞箇所の集計結果を表としてまとめており、図 7 にその結果をグラフとしてそれぞれ示す。平成 29 年度空洞の計 110 箇所と平成 30～令和元年度空洞の計 451 箇所（平成 30 年度：251 箇所+令和元年度：200 箇所）の内、路面性状を調査した対象路線と重複されている空洞箇所は、それぞれ 97 箇所（平成 29 年度）と 232 箇所（平成 30～令和元年度）である。なお、I、II、III が重複されている区間に空洞がある場合、損傷レベルが高い方（III > II > I）の空洞箇所として分類した。

表 2 平成 29 年度路面性状調査結果と平成 29 年度空洞調査結果の集計表

区分	わだち掘れ量	ひび割れ率	IRI
I 健全	(わだち掘れ量<20mm) : 33 箇所	(ひび割れ率<20%) : 13 箇所	(IRI<3mm/m) : 4 箇所
II 表層機能保持状態	(20mm≦わだち掘れ量<40mm) : 20 箇所	(20%≦ひび割れ率<40%) : 57 箇所	(3mm/m≦IRI<8mm/m) : 56 箇所
III 修繕段階	(40mm≦わだち掘れ量) : 0 箇所	(40%≦ひび割れ率) : 1 箇所	(8mm/m≦IRI) : 37 箇所

表 3 平成 30 年度路面性状調査結果と平成 30～令和元年度空洞調査結果の集計表

区分	わだち掘れ量	ひび割れ率	IRI
I 健全	(わだち掘れ量<20mm) : 151 箇所	(ひび割れ率<20%) : 93 箇所	(IRI<3mm/m) : 52 箇所
II 表層機能保持状態	(20mm≦わだち掘れ量<40mm) : 25 箇所	(20%≦ひび割れ率<40%) : 83 箇所	(3mm/m≦IRI<8mm/m) : 216 箇所
III 修繕段階	(40mm≦わだち掘れ量) : 2 箇所	(40%≦ひび割れ率) : 56 箇所	(8mm/m≦IRI) : 12 箇所

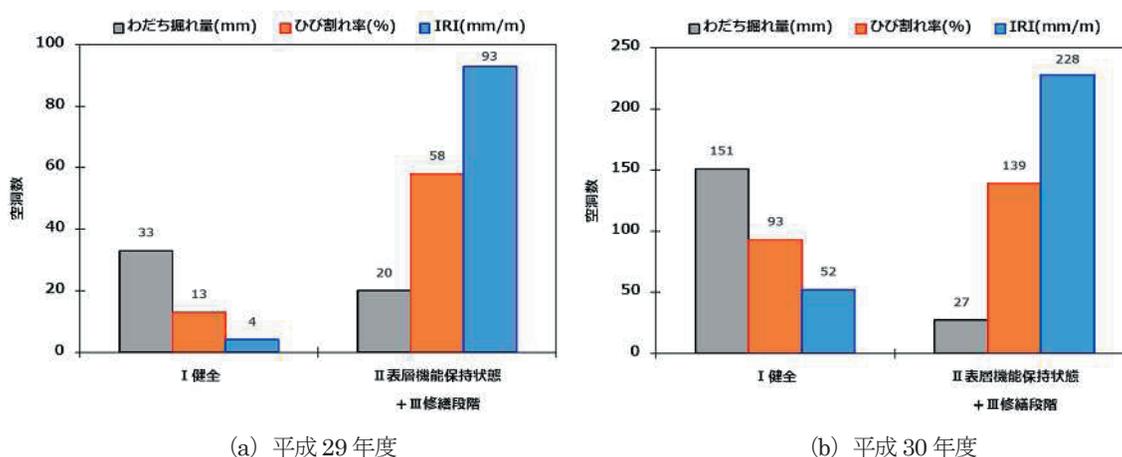


図 7 路面性状調査結果と空洞調査結果の集計グラフ

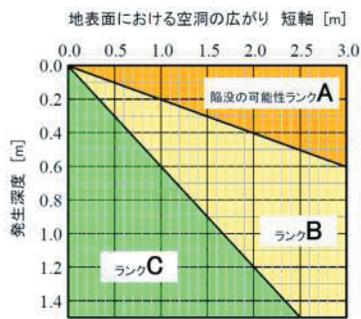
わだち掘れ量の場合、20mm 以上の「II 表層機能保持状態+III 修繕段階」の方が 20mm 未満の「I 健全」に比べて空洞箇所が少ないものの、ひび割れ率は 20%以上の「II 表層機能保持状態+III 修繕段階」の方が 20%未満の「I 健全」より空洞箇所が多く、IRI も 3mm/m 以上の「II 表層機能保持状態+III 修繕段階」の方が 3mm/m 未満の「I 健全」より空洞箇所が多いことが分かる。このような傾向から、路面下の地表近傍で空洞が存在する場合、路面に顕著に表れる可能性が高い路面損傷は、ひび割れ率と IRI であると考えられる。

一方、路面が健全であるから、空洞が無いという訳ではない。例えば、堅固な層と軟弱な層がある異層境での空洞の場合、床板状態になっており、一度、路面に損傷が発生すると、損傷（空洞）が進行され顕在化する可能性が高くなる。本研究では、路面性状調査結果として 20m ピッチの判定結果を用いて分析を実施したが、例えば、数メートルの局所的な路面に損傷が発生した場合も 20m ピッチとして平均化された値を適用して分析したので、今後、局所的な路面損傷に関しても検討する必要がある。

4. 陥没危険度評価のための基礎研究

各地方自治体主体で地中レーダ探査及びスコープ調査などにより、路面下空洞調査を実施して、補修対応をしている。補修作業は限られた予算の中で、危険度の高いものは緊急補修し、危険度の小さい空洞は経過観察等により管理する必要がある。一方、現状の空洞の危険度（路面陥没可能性）評価は、空洞の短辺方向の広がり及び発生深度から行うことが一般的である（例えば、図8）。この場合、空洞発生深度が浅くなるほど（地表面付近）、空洞の幅や厚さなどの形状が大きくなるほど、危険度が増加することし、空洞を分類している。しかし、下部に空洞のある路面の危険度は、空洞の幅及び発生深度のみならず、道路の表層及び路盤材の剛性や空洞化原因の推定状況（下水管等の破損）などにより変わると考えられる。

そこで、空洞の危険度をより合理的に評価した上で対策順位を決め、効果的かつ効率的な対策対応を実施するための研究が進んでいる。塚本ら⁹⁾は下部に空洞のある路面舗装（表4）において、道路舗装構造評価装置（Falling Weight Deflectometer, 以下「FWD」という）により、載荷時のたわみ量を測定して、空洞の危険度評価を試みた。ここで、評価は「空洞直上でのたわみ量 D_0 評価」、「残存等値換算厚 T_{A0} 評価」、「(空洞あり・なしの) たわみ差評価」の3つの方法により行い、空洞の形状による危険度評価結果と比較検討した。表5にFWD測定結果及び空洞形状（幅・発生深度）による評価結果をまとめている。



- ・陥没危険度 A: 危険度 高
- ・陥没危険度 B: 危険度 中
- ・陥没危険度 C: 危険度 低

図8 空洞形状からの評価方法^{10), 11)}

表4 空洞の形状及び危険度評価結果（加筆修正）⁹⁾

路線 No.	空洞 No.	空洞形状および発生深度				危険度 評価
		縦断幅 (m)	横断幅 (m)	発生深度 (m)	空洞厚 (m)	
6	6-1	1.0	0.9	0.65	0.13	C
	6-2	1.0	0.9	0.32	0.18	B
	6-3	-	-	-	-	-
11	11-20	0.8	0.5	0.35	0.13	C
	11-22	1.3	1.1	0.68	0.14	C
14	14-7	2.0	1.1	0.45	0.15	B
	14-8	1.0	1.0	0.51	0.19	B
	14-9	1.1	1.0	0.43	0.30	B
	14-14	1.0	1.0	0.48	0.20	B
	14-15	2.9	0.8	0.45	0.17	B
	14-17	5.8	0.8	0.44	0.27	B

表5 空洞の評価結果（加筆修正）⁹⁾

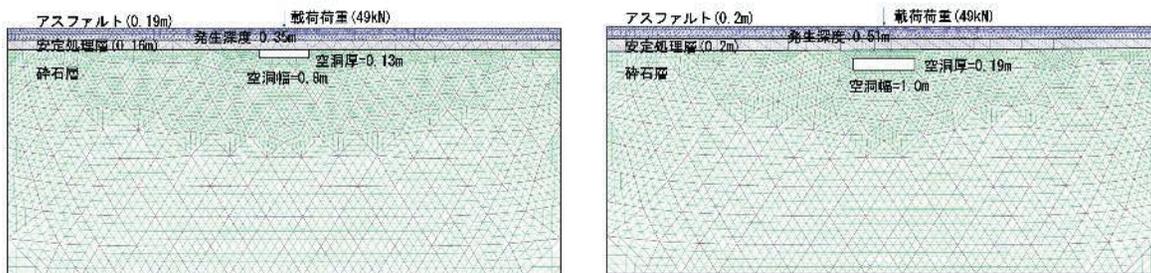
測点	D_0 (μm)	D_0 の目安	不足 T_A	たわみ差 (μm)	D_0 たわみ評価	T_{A0} 評価	たわみ差評価	総合評価	空洞形状評価
6-1	323	300	3.2	85	×	△	△	×	C
6-2	492	300	9.4	150	×	×	×	×	B
6-3	87	300	-19.9	-9	○	○	○	○	-
11-20	743	600	2.7	-9	×	△	○	×	C
11-22	514	600	-1.7	-51	○	○	○	○	C
14-7	254	900	-17.1	-33	○	○	○	○	B
14-8	252	900	-17.3	-14	○	○	○	○	B
14-9	277	900	-16.1	26	○	○	△	△	B
14-14	255	900	-16.7	108	○	○	×	△	B
14-15	177	900	-25.3	-134	○	○	○	○	B
14-17	133	900	-30.3	-70	○	○	○	○	B

※総合評価○:すべて「○」、総合評価△:1項目が「×」あるいは「△」、総合評価×:2項目以上が「×」あるいは「△」

FWD測定による総合評価結果と空洞形状に基づく評価結果評価に、明確な相関性は認められなかった。これらの結果から、空洞の危険度評価において、空洞の形状以外にも考慮すべき項目があると考えられる。そこで、本研究ではアスファルト及び安定処理層の剛性の影響を検討した。同じ発生深度及び幅の空洞であっても、舗装の剛性により、舗装の健全性が変わると考えられるため、FEM数値解析によりFWD試験を再現し、路面のたわみ量を評価した。

(1) 検討方法

表5の空洞の評価結果で、空洞の形状評価「C」であるが、FWD結果では、「×」の測点11-20と、空洞の形状評価「B」であるが、FWD結果では、「○」の測点14-8を対象に、FWD測定を再現した数値解析シミュレーションを行った。図9に解析断面のメッシュ図を示す。本解析では、舗装の剛性(ヤング率)によるたわみ量の変化を検討するために、アスファルト及び安定処理層のヤング率を変えながら(3×5=総15ケース)、解析を実施した(表6)。さらに、空洞の有無のケースについても検討を行った。解析は、①スコープ調査結果より把握した地層区分及び厚さを反映して解析モデルを作成し、初期応力条件を再現した後に、②当該解析断面における空洞の規模及び位置を反映して空洞を生成し、変位初期化を行った(空洞無の場合は省略)。③最後にFWD測定と同様に49kNの荷重を載荷して地表面の鉛直変位をプロットし、たわみ量を検討した。



(a) 空洞 11-20

(b) 空洞 14-8

図9 解析断面メッシュ図

表6 地盤物性値

区分	材料モデル	単位体積重量, γ_t (kN/m ³)	ヤング率, E (MN/m ²)	ポアソン比, ν
アスファルト	線形弾性モデル	23	600, 800, 1000 (3 ケース)	0.35
安定処理	弾性モデル	19	300, 350, 400, 450, 500 (5 ケース)	0.35
砕石	弾性モデル	19	100	0.35

(2) 検討結果

本解析では、空洞の中央の直上部に載荷して、空洞の中央の直上部の舗装のたわみ量 (D_0) をプロットして比較した。図10に両断面において、たわみ量(D_0)とアスファルト及び安定処理層の弾性係数の関係を示す。この結果から両断面ともに、空洞の有無にかかわらず、アスファルトの弾性係数が大きくなるほど、たわみ量が小さくなる傾向が確認された。また、アスファルトの弾性係数が同様の場合、下部安定処理層の弾性係数が大きいほど路面の沈下量は小さいことが分かった。一方、路面下部に空洞がある場合に、空洞のないケースに比べたわみ量が増加することが分かる。さらに、空洞がある場合には、アスファルト及び安定処理層の弾性係数の影響によるたわみ量の変化もより大きくなること分かる。

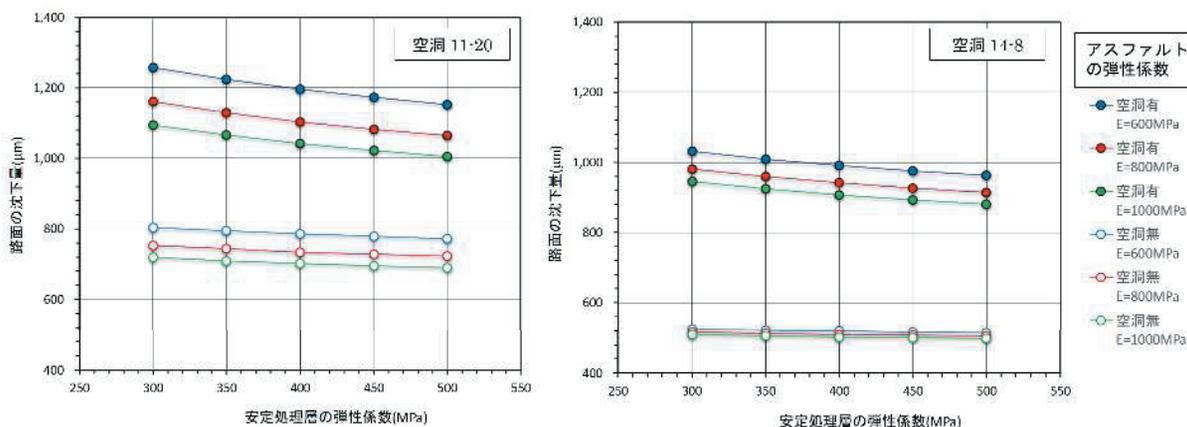


図10 たわみ量(D_0)とアスファルト及び安定処理層の弾性係数の関係

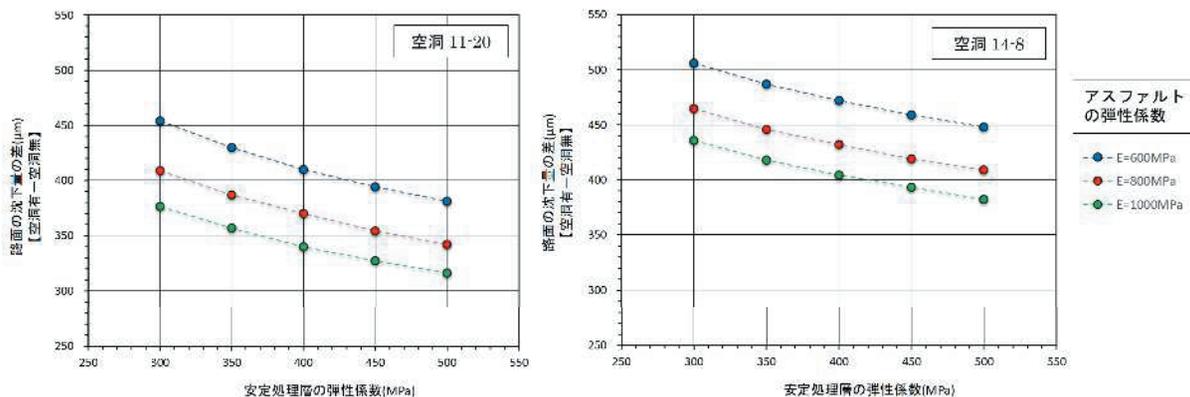


図 11 たわみ差 (Do 空洞なしー Do 空洞あり) とアスファルト及び安定処理層の弾性係数の関係

図 11 には、それぞれの断面において、空洞なしケースのたわみ量と空洞ありケースのたわみ量の差 (D_o 空洞なし - D_o 空洞あり) を示す。空洞有無のたわみ量の差も、アスファルト及び安定処理層の弾性係数が大きくなるほど小さくなる傾向が確認され、空洞ありの結果に似ていることが分かる。一方、舗装層の直下の空洞 (11-20: 発生深度 0.35m) と舗装層から多少離れている空洞 (14-8: 発生深度 0.51m) においては、舗装層の直下に空洞のあるケース(11-20)のたわみ量(D_o)がより大きいものの、たわみ差 (D_o 空洞なしー D_o 空洞あり) は、空洞厚が大きいケース(14-8)の方がより大きいことが分かる。

5. まとめ

空洞発生傾向分析や進行性について把握するため、神戸市において、過去に発生した空洞箇所 (平成 8～29 年度) と、近年、空洞が確認された箇所 (平成 30～令和元年) との比較検討を実施した。その結果を以下の通りまとめる。

- (1) 年数経過に伴い空洞の発生深度が浅くなっており、空洞厚は厚くなる傾向がある。これは、過去に発生した空洞の上部が不安定化及び崩落することにより、空洞が上方に進行した結果と考えられる。
- (2) 計 22 箇所の重複空洞箇所は、地下埋設管の施工及び開削工事後の転圧不足が原因である可能性が高い。
- (3) 空洞の上層が安定処理層やスラグ層のような堅固層で、下層は砂質土や砕石のような軟弱層の場合、層間に空洞が発生しやすい傾向がある。

一方、空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性を評価するため、平成 29～30 年度の空洞発生箇所と平成 29～30 年度の路面性状調査結果 (ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI) を ArcGIS 上にプロットして重ね合わせを行った。

その結果、路面下の地表近傍で空洞が存在する場合、路面に顕著に表れる可能性が高い路面損傷は、ひび割れ率と IRI であることが分かった。

また、空洞の危険度評価に関する基礎研究として、地中に発生している空洞を想定し、空洞の位置 (深度) と空洞のサイズが異なる 2 か所における FEM 解析を実施して、アスファルト及び安定処理層の舗装の剛性による地表面のたわみ発生傾向を検討した。その結果、路面下に空洞が発生することにより、路面のたわみ量が大きくなり、アスファルト及び安定処理層の弾性係数が大きいほど路面のたわみ量は小さくなることが確認できた。一方、舗装層の直下に空洞のあるケース (11-20: 発生深度 0.35m) のたわみ量(D_o)が大きい、空洞厚が大きいケース(14-8)のたわみ差 (D_o 空洞なしー D_o 空洞あり) の方が、より大きいことが分かった。以上の事柄より、空洞下の陥没危険度予測のためには、舗装層の剛性、空洞発生深度、空洞のサイズなどを勘案した総合的な評価が必要であると判断される。

謝辞：本調査における神戸市建設局道路部のご協力に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 朝日新聞社：博多駅前の道路陥没、大量の水流入 地下鉄工事中、2016.11.08.
- 2) 産経新聞社：大阪北部地震 都市直撃、機能マヒ 倒壊ブロック塀、ジャッキでも上がらず女児が犠牲に・・・、2018.06.18.
- 3) 篠智広太：博多陥没、道路が復旧 事故からたった 1 週間、「日本の底力だ」と喜んで良いのか、BuzzFeed News, 2016.
- 4) 著者不明：大阪北部地震の大規模断水、老朽水道管が引き金、日本経済新聞社、2018.
- 5) 都市の危機管理における路面下空洞対策戦略会議：都市の危機管理における路面下空洞対策に関する提言、一般社団

- 法人 レジリエンスジャパン推進協議会, 2018.
- 6) 国土交通省道路局：路面陥没発生状況, <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/ijikanri/pdf/h27-29kanbotu.pdf>, 2018.
 - 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) 平成 29～30 年度 路面性状調査業務報告書 (神戸市建設局道路部)
 - 9) 塚本真也, 澁谷啓, 梅田隼, 白濟民：道路表面のたわみ測定による陥没危険度評価方法の開発, 基礎工, Vol47, No.12, pp.40-43, 2019. 12.
 - 10) 国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所：空洞判定実施方針 (案), 2010. 3.
 - 11) 路面下空洞探査車の探査技術・解析の品質確保コンソーシアム：路面下空洞探査技術マニュアル (案), 2017. 9.

筆者：1) 白濟民, 神戸大学大学院工学研究科, 学術研究員；2) 澁谷啓, 神戸大学大学院工学研究科, 教授；3) 丁經凡, 神戸大学大学院工学研究科, 学術研究員；4) 許晋碩, 協和設計株式会社 事業開発本部, 次長

Trend analysis of subsurface cavities and evaluation of collapse risk in Kobe City

Jemin Baek
Satoru Shibuya
Kyungbeom Jeong
Jinsuk Hur

Abstract

In recent years, road collapses have occurred frequently throughout the country. In this study, based on the results of the subsurface cavity survey conducted in Kobe City, the tendency analysis and progress of the cavity occurrence location were evaluated. Furthermore, the correlation between the location of the cavity and the road surface properties was evaluated using the results of the road surface property survey. In addition, a basic study on the risk assessment of road collapse was conducted with the aim of contributing to the implementation of future cavity surveys.

©2021 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.