

【建設工学研究所論文報告集第 64 号〔論文〕 2022 年 11 月】

神戸市における路面下空洞発生箇所の傾向分析および 道路路面性状との相関性の評価

Analyzing the Occurrence of Subsurface Cavities and Evaluating the Correlation with Road Surface Properties in Kobe City

白 濟 民
Je-Min Baek

澁 谷 啓
Satoru Shibuya

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，大阪府北部で最大震度 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を評価した．

2. 空洞発生の傾向分析ならびに空洞の進行性の評価

2. 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。

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査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査することができる。このレーダ探査による非破壊検査によって、空洞上部の大きさと発生深度がわかる。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査である。つぎに、二次探査として一次探査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、二次探査で得られた情報を基に総合的な判定を行う。

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

表－2 路面下空洞の発生頻度⁷⁾

道路管理区分	空洞頻度 (個/km)
国・道・府・県	0.59
東京都・政令市	2.06
東京 23 区	2.09
その他自治体	1.37

※道路延長 10,091km（空洞数 9984 箇所）の調査データ（2014・2015 年度）

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、路面下空洞探査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）の対象とされた。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。この表には、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も示されている。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（車載型の地中レーダを使用できない箇所において、小型探査装置とハンディ型地中レーダを用いた調査）のみの段階であるため、空洞判定の件数は相対的に少な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、他都道府県に比べて少ない値である（表-2）。都市部においては、空洞発見件数が顕著であることが分かる。

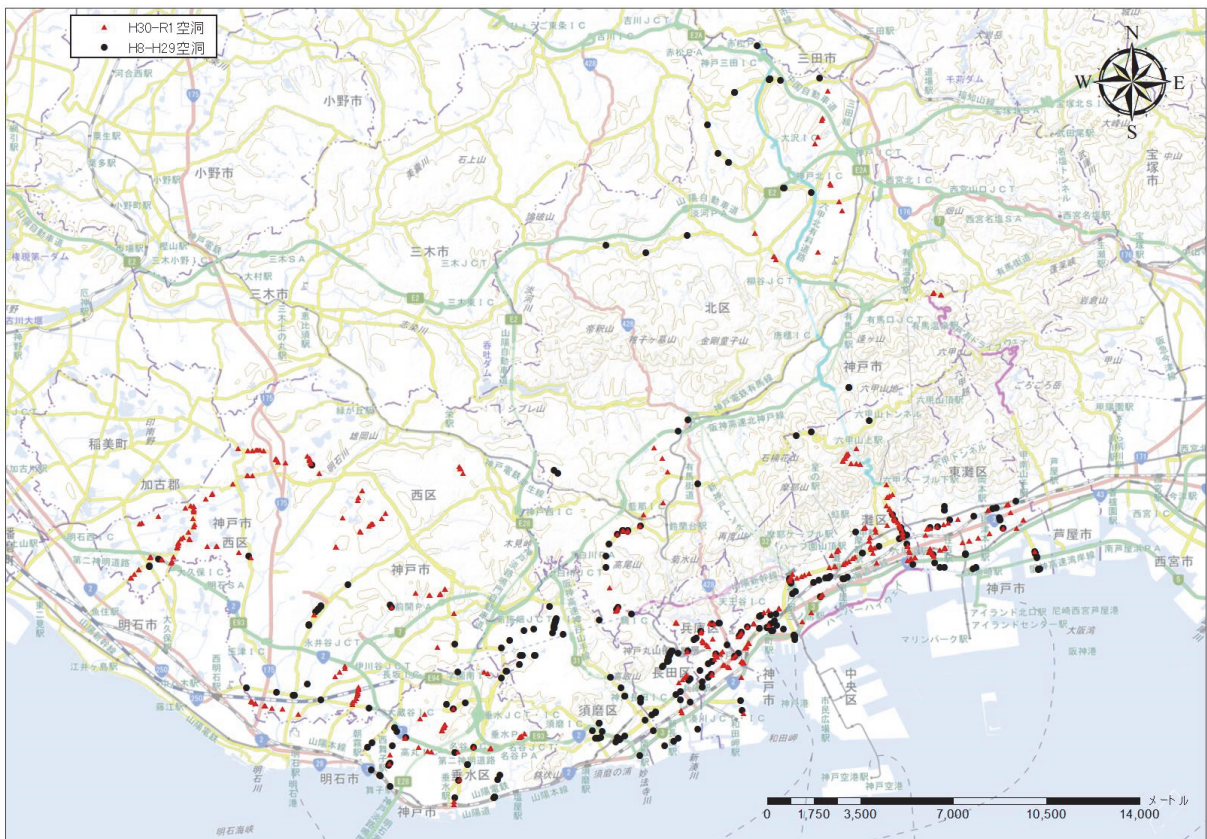


図-1 神戸市における空洞分布図（平成 8~令和元年度）

図-1 に対象地域における空洞分布を示す。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）が重複していることが確認できた。

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、その精度はcm程度であるが、平成8年度、当時のGNSS精度はm程度であった可能性が高い。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。

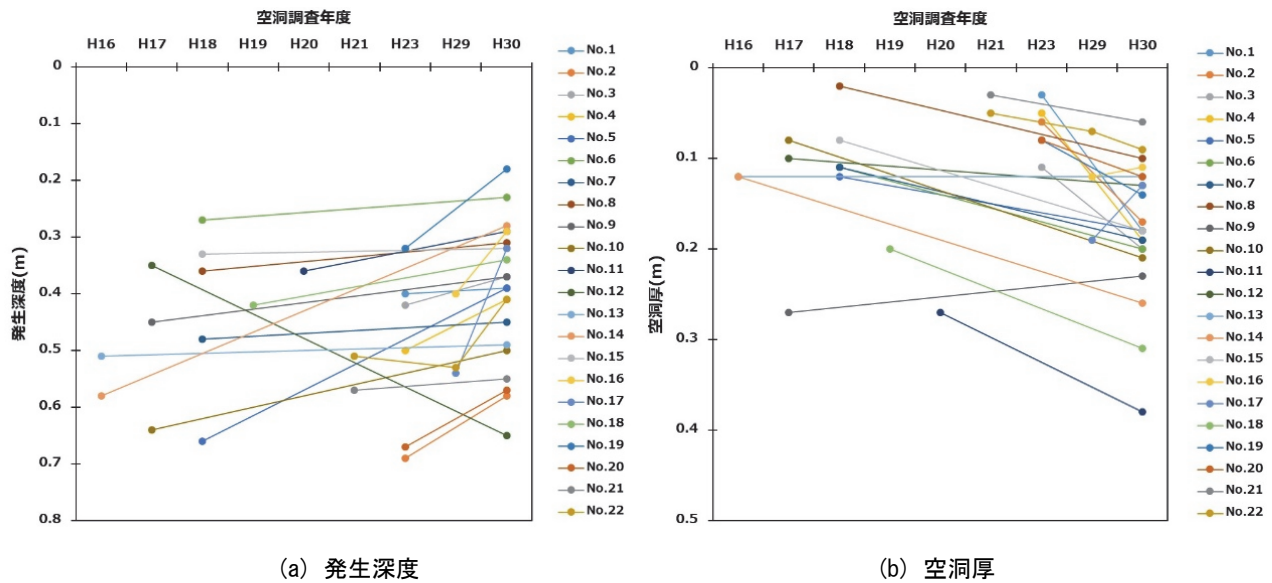
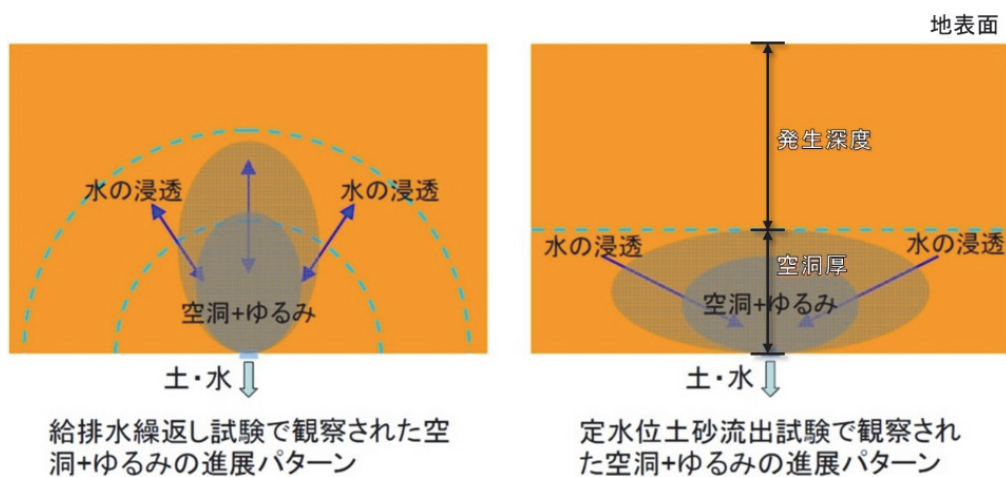


図-2 年数経過に伴う発生深度と空洞厚との関係

図-3 水の浸透と空洞・ゆるみ形成パターンとの関係⁸⁾

2. 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た結果と推測される。

このような空洞発生パターンは桑野ら⁸⁾が実施した実験の結果からも確認できる。桑野ら⁸⁾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空洞域が時間とともに拡大する様子を確認している。

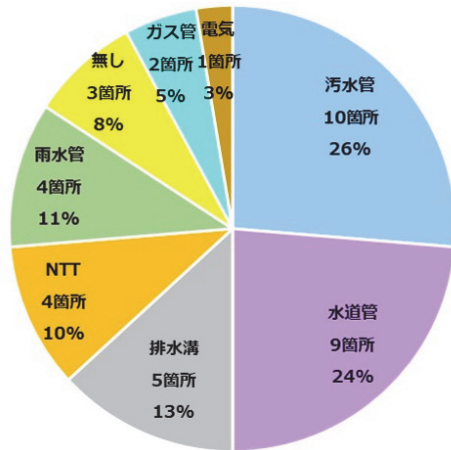


図-4 重複空洞箇所周辺の埋設管の種類（数量の重複あり）

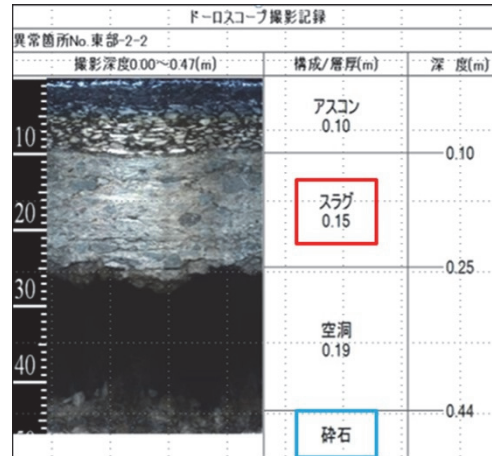


図-5 空洞内部の状態の例

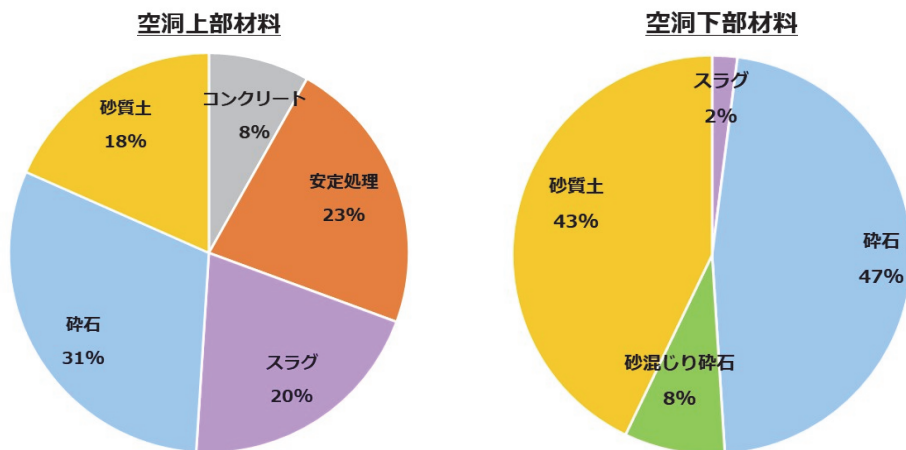


図-6 空洞上下部での路盤層の構成割合

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）以外は空洞周辺に汚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よって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がある。

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 を例に挙げると、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 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）⁹⁾を ArcGIS 上にプロットして重ね合わせを行った。また，大阪府舗装点検要領の路面陥没発生の可能性評価基準¹⁰⁾に基づき，抽出された空洞発生箇所を対象に，陥没発生の可能性を評価した。

3. 1 分析方法

3. 1. 1 空洞発生箇所と路面性状調査結果との重ね合わせ

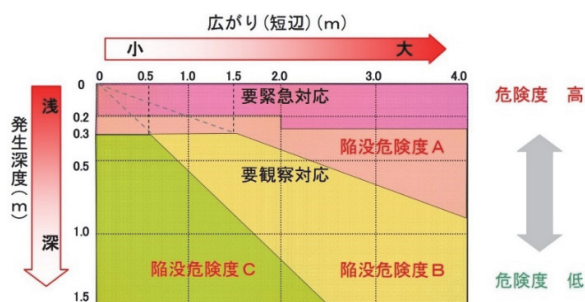
本研究で用いた路面性状調査結果（ひび割れ率，わだち掘れ量，IRI の 3 要因）の算出及び評価方法は，以下の通りである。

- ・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）を表－3 の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で，各項目の空洞発生箇所数をまとめた。

表－3 舗装の損傷レベル⁹⁾

区分	わだち掘れ量	ひび割れ率	IRI
Ⅰ 健全	20mm 未満程度	20%未満程度	3mm/m 未満程度
Ⅱ 表層機能保持状態	20mm 以上程度	20%以上程度	3mm/m 以上程度
Ⅲ 修繕段階	40mm 以上程度	40%以上程度	8mm/m 以上程度



図－7 路面陥没発生の可能性評価基準図¹⁰⁾

表－4 陥没危険度の判定基準

区分	判定基準
陥没危険度 A	異常信号の発生深度と広がりから，陥没が発生する可能性が高いため，早期に詳細調査を必要とするもの。
陥没危険度 B	異常信号の発生深度と広がりから，今後，陥没が発生する可能性が高いため，優先的に詳細調査を実施するもの。
陥没危険度 C	空洞を示す異常信号は認められるが，発生深度と広がりから経過観察とするもの。

3. 1. 2 舗装の損傷レベルに応じた路面陥没発生の可能性評価

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，発生深度および空洞の短辺方向の広がりから行うことが一般的である。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。

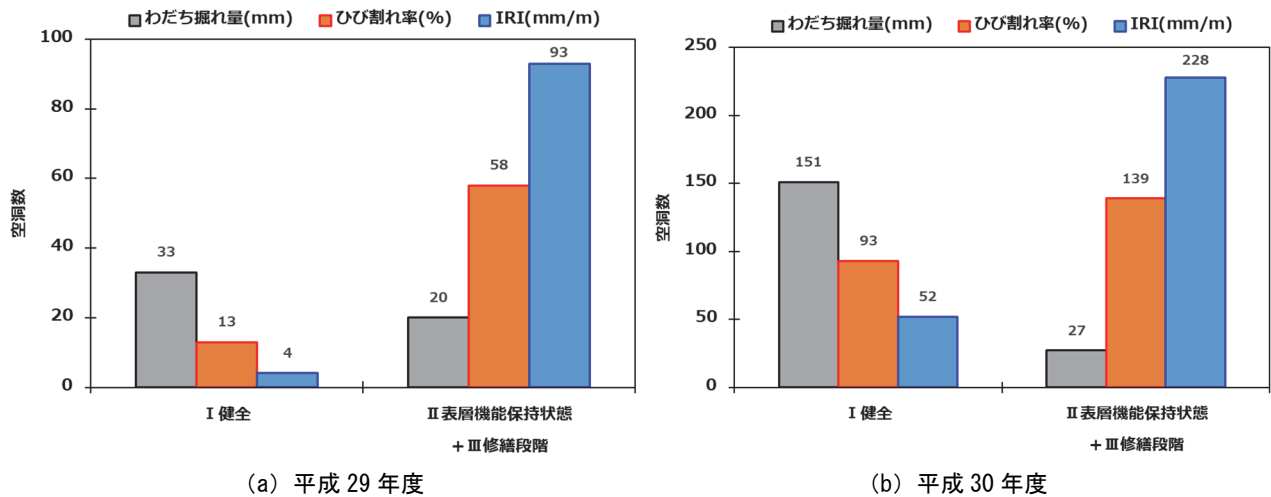
そこで，これまで空洞が確認された箇所と，平成 29～30 年度の道路路面性状調査結果との重ね合わせにおいて抽出した空洞発生箇所の，空洞の発生深度と横断方向を調査した。取り出した空洞データを平成 28 年の大阪府舗装点検要領の路面陥没可能性評価基準図（図－7）上にプロットすることにより，舗装の損傷レベルに応じた路面陥没発生の可能性評価を行った。表－4 に陥没危険度の判定基準を示す。

表－5 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－6 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



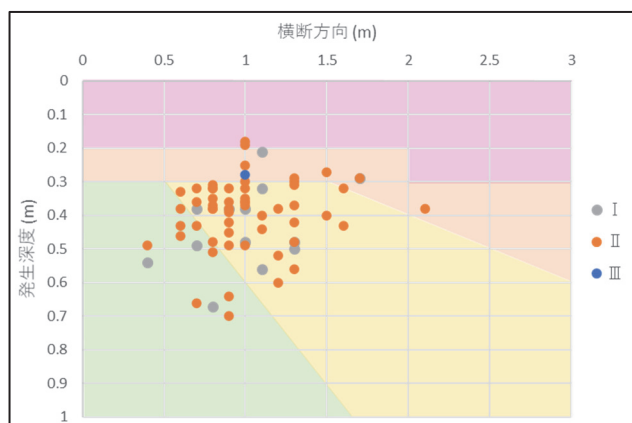
図－8 路面性状調査結果と空洞調査結果の集計グラフ

3. 2 分析結果及び考察

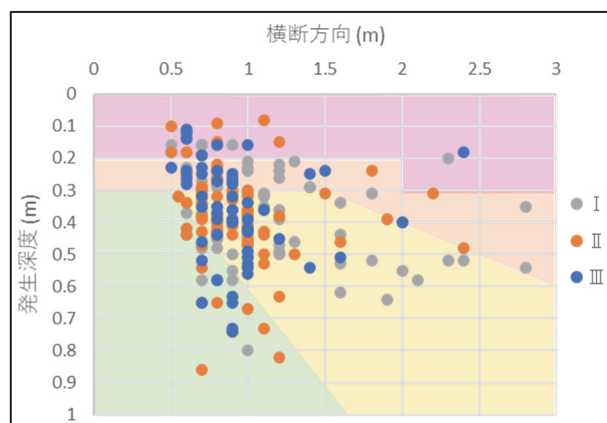
表－5 と表－6 に路面性状調査結果と空洞箇所の集計結果を表としてまとめており、図－8 にはその結果をグラフとしてそれぞれ示す。平成 29 年度空洞の計 110 箇所と平成 30～令和元年度空洞の計 451 箇所（平成 30 年度：251 箇所+令和元年度：200 箇所）の内、路面性状を調査した対象路線と重複されている空洞箇所は、それぞれ 97 箇所（平成 29 年度）と 232 箇所（平成 30～令和元年度）である。なお、以下の①、②、③の分類条件に従って分析を行った。

- ① 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ため、20m ピッチの各損傷項目（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI）の内、舗装の損傷レベルが高い方（Ⅲ＞Ⅱ＞Ⅰ）の損傷項目にある空洞として分類する。ただし、損傷レベルが同等の場合（例えば、ひび割れ率：Ⅱ、IRI：Ⅱのように損傷レベルが同じ場合）、両側の損傷項目にある空洞として分類する。
- ② 20m ピッチの境界部に空洞がある場合は、両側の空洞として計上したうえ、上記の①の条件を適用する。
- ③ 調査車線の上り線と下り線の境界部に空洞がある場合は、両側の空洞として計上したうえ、上記の①、②の条件を適用する。

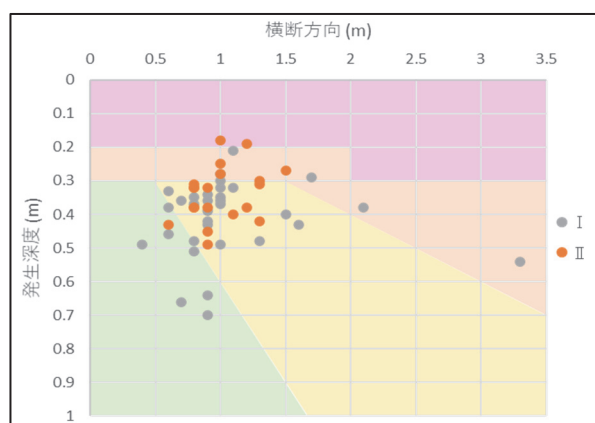
その結果、わだち掘れ量の場合、20mm 以上の「Ⅱ表層機能保持状態＋Ⅲ修繕段階」の方が 20mm 未満の「Ⅰ健全」に比べて空洞箇所が少ないものの、ひび割れ率は 20%以上の「Ⅱ表層機能保持状態＋Ⅲ修繕段階」の方が 20%未満の「Ⅰ健全」より空洞箇所が多く、IRI も 3mm/m 以上の「Ⅱ表層機能保持状態＋Ⅲ修繕段階」の方が 3mm/m 未満の「Ⅰ健全」より空洞箇所が多いことが分かる。このような傾向から、路面下の地表近傍で空洞が存在する場合、路面に顕著に表れる可能性が高い路面損傷は、ひび割れ率および IRI であることが分かった。



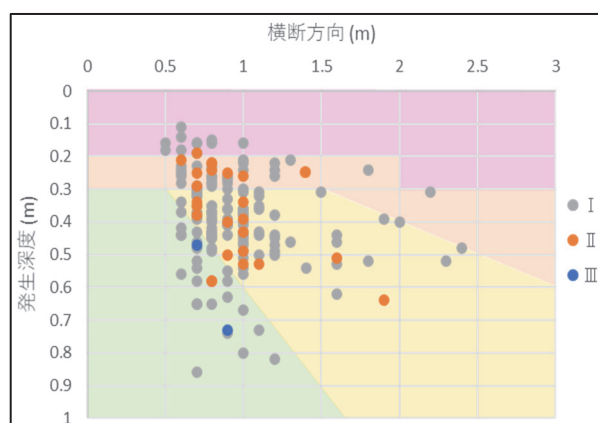
(a) ひび割れ率（平成 29 年度）



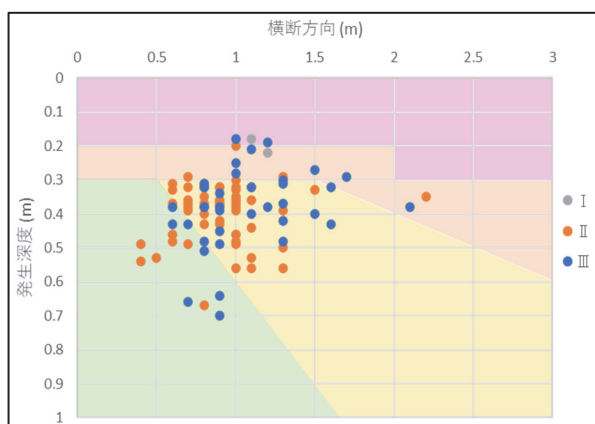
(b) ひび割れ率（平成 30 年度）



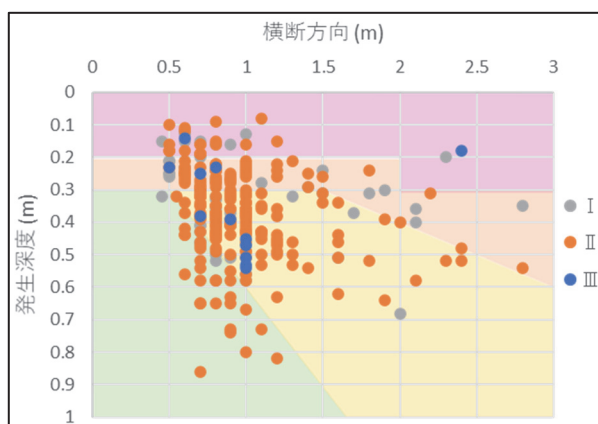
(c) わだち掘れ（平成 29 年度）



(d) わだち掘れ量（平成 30 年度）

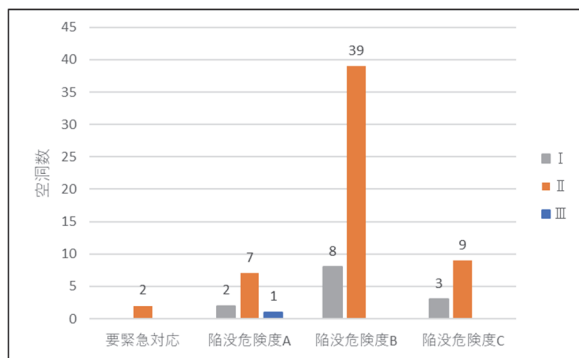


(e) IRI（平成 29 年度）

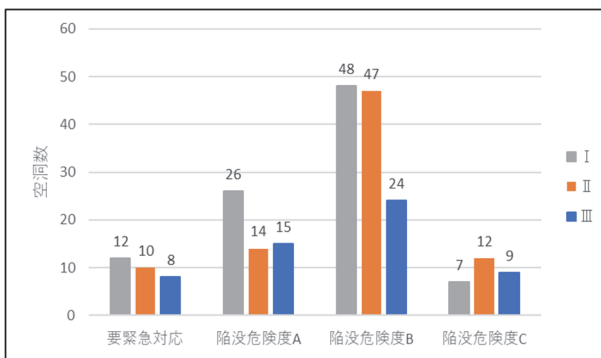


(f) IRI（平成 30 年度）

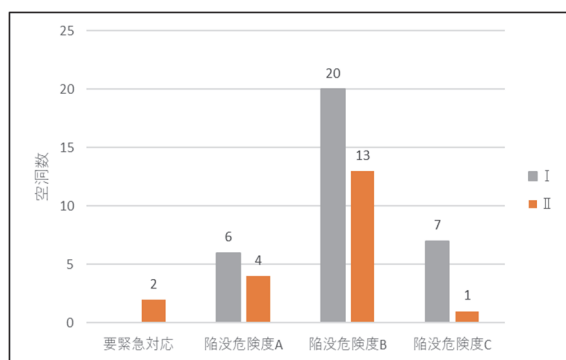
図－9 舗装の損傷レベルⅠ，Ⅱ，Ⅲにおける空洞発生個所の路面陥没発生可能性評価の結果



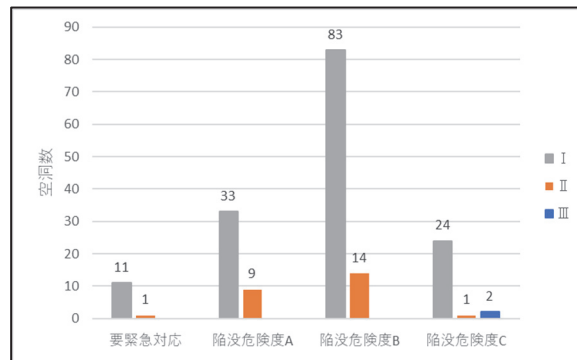
(a) ひび割れ率（平成 29 年度）



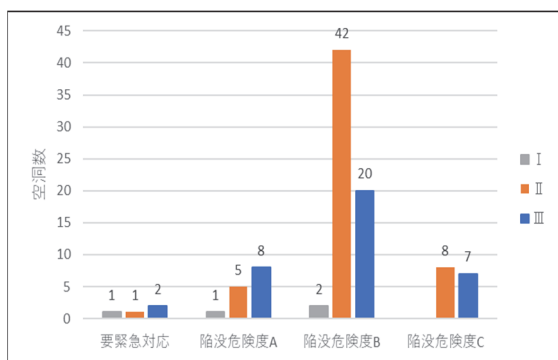
(b) ひび割れ率（平成 30 年度）



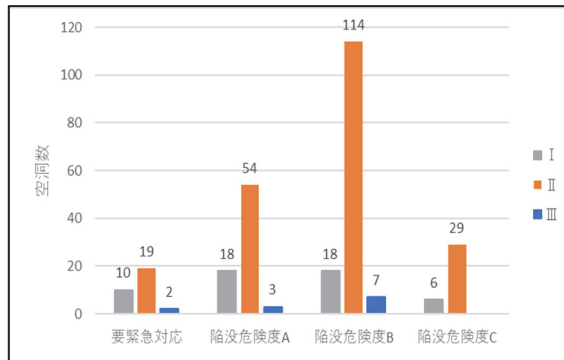
(c) わだち掘れ量（平成 29 年度）



(d) わだち掘れ量（平成 30 年度）



(e) IRI（平成 29 年度）



(f) IRI（平成 30 年度）

図－10 路面陥没危険度別の集計グラフ

次に、表－5 と表－6 に示した、舗装の損傷レベル（「Ⅰ健全」「Ⅱ表層機能保持段階」「Ⅲ修繕段階」）に基づき分類した空洞発生箇所の道路路面性状（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI の 3 要因）ごとの陥没可能性評価結果を図－9 に、陥没危険度別の集計グラフを図－10 にそれぞれ示す。

図－10 より、舗装の損傷レベル（「Ⅰ健全」「Ⅱ表層機能保持段階」「Ⅲ修繕段階」）に関わらず、すべての路面性状の区分において、陥没危険度 B に属する空洞が最も多くみられた。また、「H30 ひび割れ率」「H30 わだち掘れ量」「H29 IRI」「H30 IRI」では、道路路面性状調査で「Ⅰ健全」と分類された空洞発生箇所においても、陥没可能性評価では「要緊急対応」に属する空洞が確認されることから、道路の路面性状と空洞形状に基づく評価結果に明確な相関性は認められなかった。

これらの結果から、空洞の陥没可能性評価においては、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。現

在の評価方法は空洞の発生深度と横断方向で評価されているが、そのほかの空洞諸元や当該箇所の交通量、路盤層の構成割合、空洞化原因の推定状況（地盤のゆるみや下水管などの破損）などによって影響される可能性があるため、陥没危険度との因果関係をより深く調査し、幅広い要素を加味した総合的な評価基準を見直す必要がある。

4. まとめ

空洞発生の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。その結果を以下にまとめる。

(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あるいは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、地下埋設管の施工およ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、下層は砂質土や碎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。

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。

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。

空洞の陥没可能性危険度評価において、道路の路面性状と空洞形状に基づく評価結果に明確な相関性は認められなかったことから、空洞形状（発生深度・幅）による評価基準では不十分であると考えられる。そのほかの空洞諸元や当該箇所の交通量、路盤層の構成割合、空洞化原因の推定状況（地盤のゆるみや下水管などの破損）などによって陥没危険度が影響される可能性がある。

上記のようにさまざまな要因が考えられる中で、陥没を引き起こすような空洞であれば、舗装の支持力が低下している可能性が十分に考えられるため、その定量的評価には道路舗装構造評価装置 (Falling Weight Deflectometer, 以下「FWD」という) によるたわみ測定が有効とされている。そこで、たわみに着目したところ、塚本ら¹¹⁾によって実施された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によると空洞の形状からの空洞評価結果と路面のたわみに基づく評価結果には明確な関係性は認められないものの、交通量別に整理すると補正後のたわみ量と空洞形状勾配にはある程度の相関性が認められた。また、たわみ測定から空洞の陥没危険度を適切に評価するためには、FWD 調査を数年にわたり実施し、データの蓄積を行う必要があることが分かった。

これらの事柄から、現在の調査手法では空洞形状と空洞の陥没危険度との関係性や考えられる要素同士の関係性を見出すことが難しく、陥没可能性評価基準図の改善には十分な調査結果を得るためにかなり多くの時間を要すると考える。評価基準図の改善は、路面下空洞調査における将来的な最終目標として位置づけ、今後の課題としては、現状の調査手法の精度・効率性の向上と、路面下空洞調査を継続的に行い、まだ実施されていない地質条件（路盤層の構成割合）などとの関係性についても調査を実施し、基礎指標の作成を行う必要があると考える。

謝 辞

本調査における神戸市建設局道路工務課からのデータ提供に深く謝意を表します。神戸の「減災研究会」の研究活動の一環として実施した。また、データ分析にあたり、松本知香氏（元神戸大学工学部学士課程）の協力を得た。記して謝意を表します。

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兒が犠牲に・・・，2018.06.18.
- 3) 旗智広太：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，<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/ijikanri/pdf/h30-r2kanbotu.pdf>，2020.
- 7) 小池豊，濱也幸樹：路面下空洞の発生状況の分析と考察，第72回土木学会年次学術講演会，福岡，2017.
- 8) 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.
- 9) 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）
- 10) 大阪府都市整備部交通道路室：大阪府舗装点検要領，pp.29，平成28年4月
- 11) 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.

著 者

白 濟民	研究員，博士（工学），地盤工学
澁谷 啓	所員，博士（工学），Ph.D.，地盤工学