

目次案

はじめに

1. 神戸市の路面下空洞発生傾向の分析に関する検討
 - 1.1 神戸市内の路面下空洞データの抽出および評価
 - 1.2 評価空洞発生メカニズムの分類
 - 1.3 汚水管による空洞発生箇所の傾向分析
 - 1.4 本研究に向けた課題

2. 路面のたわみに着目した陥没危険度評価に関する検討
 - 2.1 神戸市における路面下空洞調査
 - 2.2 FWD法を用いた路面たわみによる陥没危険度評価

3. 路面たわみ量と路面下空洞陥没危険度（FEM解析）
 - 3.1 目的
 - 3.2 解析ケース
 - 3.3 解析方法
 - 3.4 解析結果
 - 3.5 考察

4. 路面たわみ計測へのOCMの適用
 - 4.1 目的
 - 4.2 OCM法
 - 4.3 FWDとOCMによる路面たわみの計測
 - 4.4 走行車両輪荷重による路面たわみのOCMによる計測
 - 4.5 今後の展望

おわりに

はじめに

ワーキング1では、過年度のワーキング1で議論された「神戸市の路面下空洞発生傾向の分析に関する検討」をさらに発展させる形で、「道路路面下空洞の発生傾向の分析に関する研究」に取り組みました。

本研究は、「路面のたわみに着目した陥没危険度評価に関する検討」として、神戸市域をフィールドに、路面下の空洞調査を行って、これらの調査手法の適性を調べるとともに、調査結果をもとに陥没危険度を評価する方法について研究したものです。

神戸市では、阪神・淡路大震災発生翌年である平成8年から継続的に空洞調査を行っており、これまでの調査測線長は約3,300kmにのぼります。

これら豊富なデータに加え、新たな手法として、道路舗装構造評価装置（Falling Weight Deflectometer, 以下「FWD」という）によるたわみ測定を行って、路面下の空洞状況を調べました。このFWD法を用いた路面たわみによる陥没危険度評価は、急増する空洞探査に対する社会的ニーズに対応する新たな手法であると言えます。

研究では、FWDにより路面空洞陥没危険度評価への適用性の検討として、空洞形状による陥没危険度とFWDによるたわみ量の関係を考察するなど、FWDを用いて空洞対策の優先度を評価するなどの具体的な利用方法について考察を加えています。また、路面のたわみ量と路面下の空洞の陥没危険度を数値解析（FEM解析）によって検討しました。

近年、我が国では各地域で道路の路面陥没事故が発生しており、これらを防止するために主に道路管理者による調査が行われていますが、その手法はレーダー探査によるものが主力であると言えます。一方、我々は上記したFWD法による新たな手法の他、より簡易な計測手法として、安価なCCDカメラを用いて変位を高精度に検出可能なOCM(Orientation Code Matching)に着目し、OCMによる路面のたわみを計測する方法を検討しました。すなわち、走行車両の輪荷重をOCMで計測する動的路面変位計測の手法が、空洞陥没危険度の評価へ適用できる可能性について調べています。さらに、FWD法を併用して、両者の組み合わせによる評価についても研究の対象としています。

社会インフラに関わるメンテナンス・維持管理の重要性がますます高まる中で、安全で安心してそれらを利用できることが我が国の経済の発展に大きく寄与することは自明であり、そのために我々が次世代に向けて新たな手法を提示して行くことの重要性は非常に高く、たゆみない努力が求められていると言えます。ここに微力ながら、我々の研究の一端をお示しさせていただきます。

なお、このワーキング1は、右のメンバーにより構成されることを申し述べておきます。

団体名	委員
株式会社カナン・ジオリサーチ	中前 茂之
協和設計株式会社	田中 正吾
協和設計株式会社	西岡 孝尚
株式会社 建設技術研究所	高橋 円
ジオ・サーチ株式会社	久間 慎之
神鋼スラグ製品株式会社	山田 節也
地球観測株式会社	福田 芳雄
中央開発株式会社	前田 直也
中央開発株式会社	松崎 陽介
東洋建設株式会社	鶴ヶ崎 和博
東亜道路工業株式会社	塚本 真也
株式会社 ニュージェック	山本 龍
近畿大学	河井 克之

1. 神戸市の路面空洞発生傾向の分析に関する検討（過年度研究の概要）

1.1 神戸市内の路面下空洞データの抽出および評価

1.1.1 空洞調査の概要

神戸市が H8～H28 で空洞調査を実施した件数は 816 件であり，H8～H24 の 17 年間で 275 件（約 16 件/年），H25～H28 の 4 年間で 541 件（約 135 件/年）と近年，空洞調査の実施数が急増していることが確認できる。

その背景として，近年，全国で道路陥没が多発している．平成 18～20 年度で約 4,400 件であった道路陥没発生平均件数が，平成 27～29 年度では約 12,000 件発生しており，深刻な問題といえる。これを受けて 2018 年 3 月に道路改正法が改定され，道路管理者が占有事業者に対して違反措置命令規定付きで維持管理を義務付けることとなった。路陥没対策はまさに急務であり，空洞調査の重要性が高まってきている。

実際のデータより，空洞調査の空洞ごとの最終評価で「空洞」と判断されたものが 219 件，「空洞の可能性有」と判断されたものが 547 件，「その他」と判断されたものが 50 件であった。「空洞」と判断された 217 件（219 件のうち 2 件はスコープ調査結果が存在しなかった）は一次調査のレーダ探査の後，スコープ調査を実施しており，詳細なデータが存在するため，後述の傾向分析で用いている。

傾向分析では，空洞箇所の傾向分析として道路種別，空洞発生個所の深度，空洞上下部の地層構成を確認した上で，空洞発生メカニズムの分類，空洞発生箇所と地下水位，交通量および人口数と空洞発生箇所，污水管の異常と空洞発生箇所について分析を行った。なお，後述では明確な傾向が見られなかった地下水位，交通量および人口数と空洞発生箇所については省略する。

<空洞発生の傾向分析手法>

神戸市が有する空洞調査データおよび空洞発生の原因となるデータを組み合わせる（図-1.1.1 参照）ことにより，空洞発生の分類，傾向などの分析を行った。

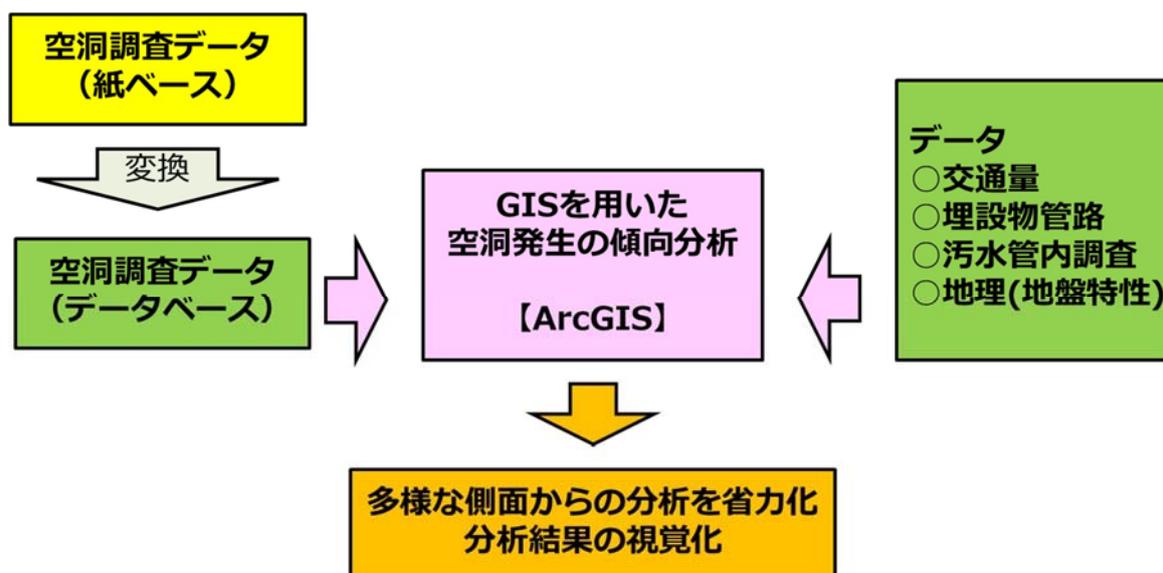


図-1.1.1 空洞発生の傾向分析手法

1.1.2 空洞箇所の傾向分析

(1) 道路種別

道路種別の路面下空洞を図-1.1.2 に示す。図より空洞発生箇所の大半が車道であることがわかる。このことから車道上の交通荷重が空洞発生要因の一つではないかと推測できる。

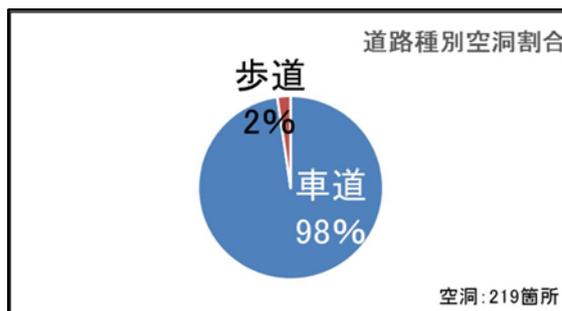


図-1.1.2 道路種別の路面下空洞割合

(2) 路面下空洞の深度分布

路面下空洞の深度分布を図-1.1.3 に示す。地中レーダ探査の適用限度は、浅層範囲 1.5m である。対象地域における空洞の深度は、概ね 1.0m 以内に収まっており、路面下空洞の発生件数は、深度 0.3~0.4m にかけて急激に増加し、0.5m を凸に 0.6m 以降から減少している。さらに、深度 0.4~0.6m で発生した路面下空洞が全体に占める割合は約 70%を占めており、浅層埋設で敷設されているものは、0.6m 付近にかけて管渠が埋設されていることを鑑みて、この付近の管渠、具体的に雨水排水管が起因していると推測できる。

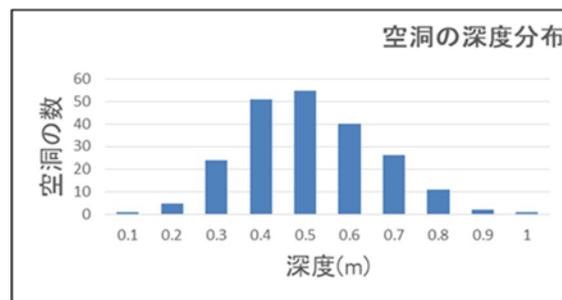


図-1.1.3 路面下空洞の深度分布

(3) 路面下空洞下部の路盤材料の構成割合および地盤層の崩壊割合

空洞調査データの空洞と判断された 217 件のうち、空洞上下部に広がる路盤材料を特定した調査データ 185 件を利用し、路面下空洞下部の路盤材料の構成割合を図-1.1.4 に示す。碎石，砂，真砂土が 60%を占める結果となった。

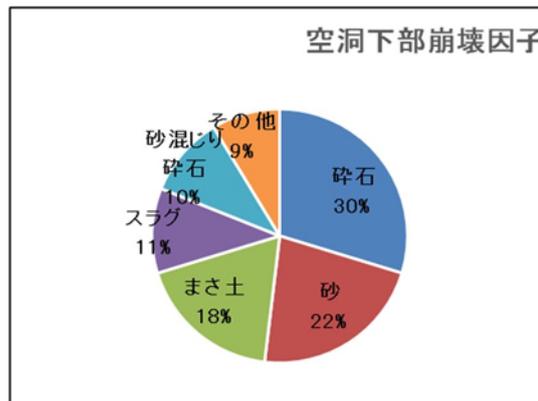


図-1.1.4 路盤材料の構成割合

次に、路盤材料の構成割合のうち、路面下空洞上下部の路盤材料を同一層と異層とに分けた結果を図-1.1.5 に示す。これらより、この地域の路面下空洞は 66.5% (123 件) が異層間で発生しており、交通活荷重による振動によって、異なる路盤材料の境界面で空洞が発生したと推測できる。このように推測できる理由として、同一の地盤特性で振動に対する挙動が基本的に同じとすると、同一層では振動に対して同じ挙動をするためひずみは生じにくい。異層の境界面では振動に対して異なる挙動をするためひずみが生じやすく、空洞発生の原因となり得るからである。

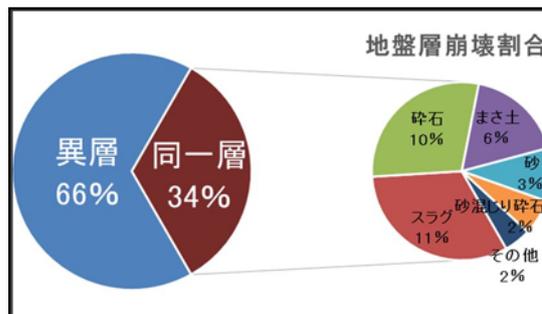


図-1.1.5 地盤層の崩壊パターン

また、異層間で生じた空洞 123 件のほとんどに関して、空洞上部がコンクリート・スラグ系の堅固な層、空洞下部が砂・まさ土・礫系の軟弱な層で構成されており、空洞下部の軟弱層が空洞上部の堅固層と比較して振動に対して挙動しやすい傾向にあることも一つの空洞発生の原因である。

一方、同一層においては、スラグによる路面下空洞の件数が増加しており、地下埋設物の破損等による土砂流出が空洞生成の起因であると推測できる。また図-1.1.6 は空洞下部の路盤材ごとに空洞の厚みをプロットした図である。図-1.1.6 より砂混じり碎石、スラグのように細粒分と粗粒分が適切に混合される路盤材の場合、砂・まさ土・碎石と比較して締固めやすく、浸食されにくいため、空洞の厚みがより小さくなる傾向が見られた。

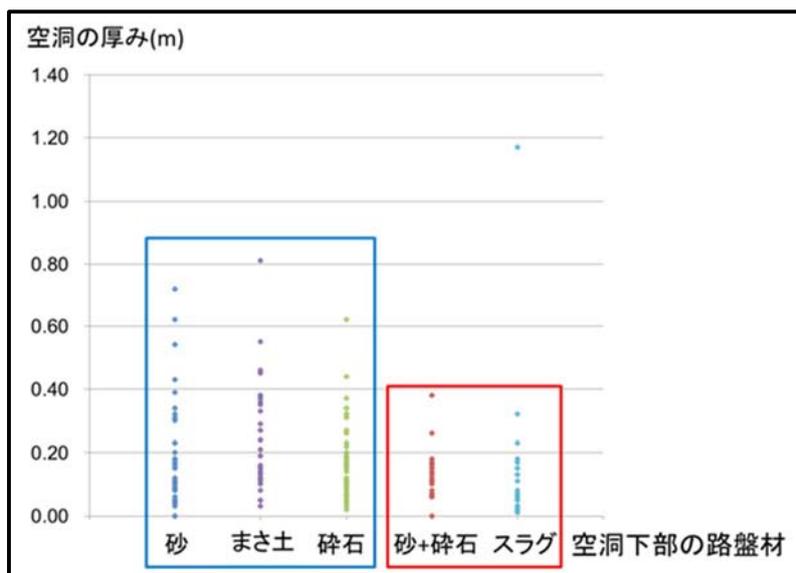


図-1.1.6 空洞下部の路盤材ごとの空洞厚み

1.2 評価空洞発生メカニズムの分類

1.2.1 空洞の発生メカニズムの分類

空洞の発生メカニズムは非常に複雑であり、周辺環境や地下埋設物状況に非常に影響を受ける。空洞の発生メカニズムは「吸出し系」と「沈下系」の2種に大きく分類できる。

「吸出し系」の空洞は主に護岸際や水系埋設物(下水道等)の近辺で発生し、台風・豪雨の影響を大きく受け、急速に拡大する傾向にある。

「沈下系」の空洞はゆるみや空隙が時間をかけて拡大することで生じる。空洞が拡大する速度は吸出し系の空洞と比較して遅い。また「吸出し系」・「沈下系」の中でもそれぞれ2種、6種に分類できる。

1.2.2 空洞発生メカニズム

以下では、「吸出し系」・「沈下系」の空洞発生メカニズムの分類を示す。分析に用いる代表的な事例は、H24～H28の空洞データ31件より抽出した。「吸出し系」2種・「沈下系」6種のうち今回の31件に含まれなかったものも存在する。具体的には、①構造物背面土砂の吸出し・③地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響・④地下埋設物・構造物埋戻し土の転圧不足・⑧コンクリート版やスラグ路盤材下の不等沈下の4種は見られたが、その他4種は見られなかった。

(1) 吸出し系

1) 構造物背面土砂の吸出し

発生箇所は護岸擁壁や橋台の背面であり、地盤内へ水が流入・流出を繰り返して、徐々に土砂が浸食されることが原因である。

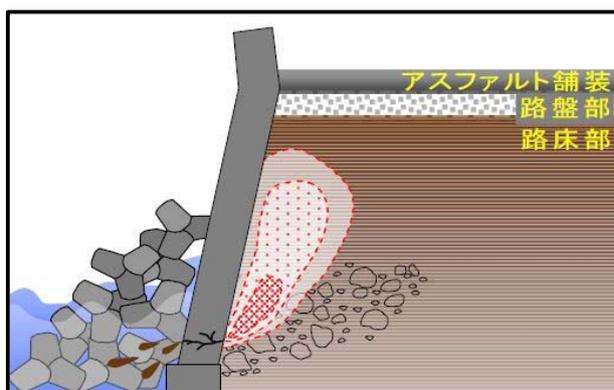


図-1.2.1 構造物背面土砂の吸出し

2) 構造物背面土砂の吸出し地下埋設物破損箇所等からの吸出し

発生箇所は地下埋設物や構造物の周辺であり、管渠等の継手部のズレ、破損箇所からの水の流入・流出の繰り返して浸食されることが原因である。

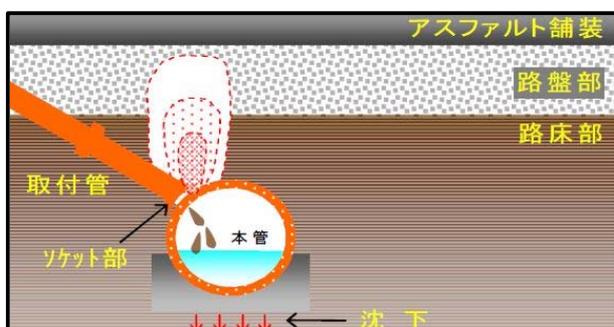


図-1.2.2 地下埋設物破損箇所等からの吸出し

(2) 沈下系

1) 地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響

発生箇所は地下埋設物や地下鉄等の構造物周辺であり、地下水の変動等により構造物周辺の埋戻し土が圧密することが原因である。

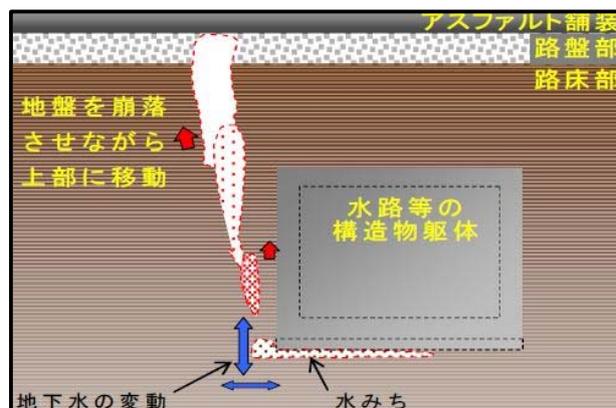


図-1.2.3 地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響

2) 地下埋設物の埋戻し転圧不足による影響

発生箇所は地下埋設物や構造物の周辺であり、埋設管敷設時の転圧不足で生じたゆるみが拡大するのが原因である。

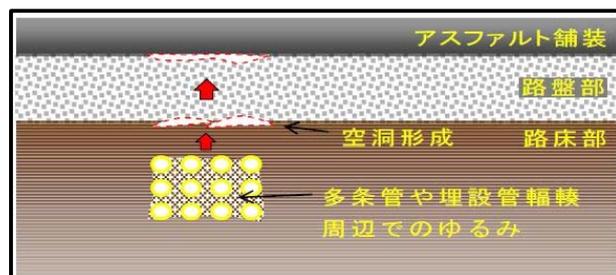


図-1.2.4 地下埋設物の埋戻し転圧不足による影響

3) 埋戻し材に混入した異物(ガラ・木片など)の影響

発生箇所は埋戻し材不良箇所であり、埋戻し時に残存していた空隙や、異物の腐食で生じた空隙が拡大することが原因である。

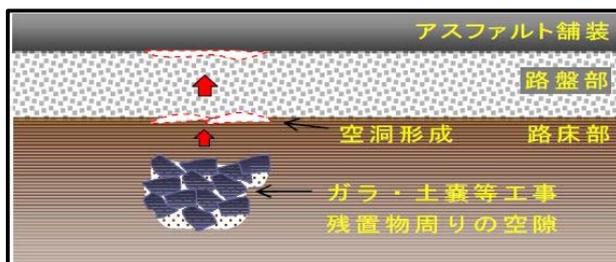


図-1.2.5 混入した異物(ガラ・木片など)の影響

4) シールドや推進工事による影響

発生箇所はシールドや推進工法で敷設の埋設管周辺であり，掘進で生じたゆるみが一方方向に集中し，空洞を形成することが原因である。

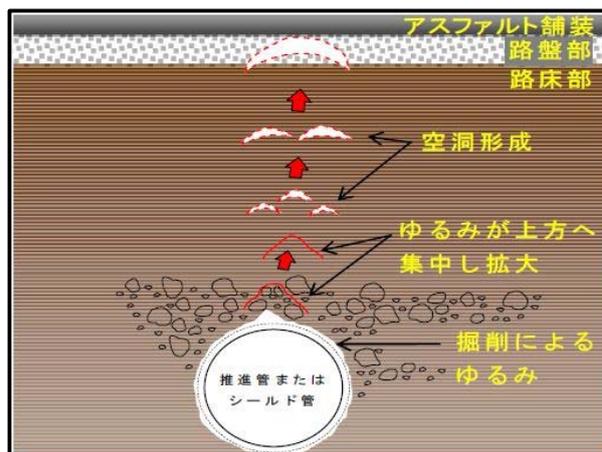


図-1.2.6 シールドや推進工事による影響

5) 残置物(矢板, 死管等)の影響

発生箇所は地下埋設物・構造物周辺であり，残置物の処理不良によって周辺のゆるみが拡大することが原因である。

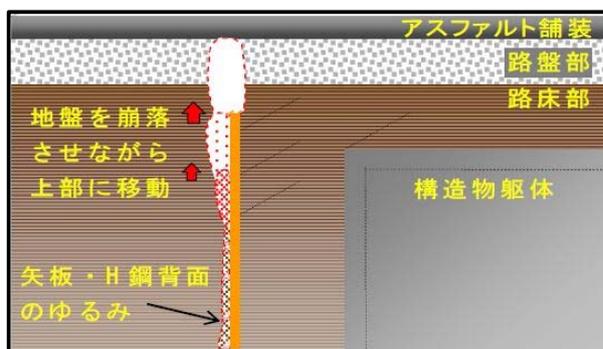


図-1.2.7 残置物(矢板, 死管等)の影響

6) コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下

発生箇所は地下埋設物・構造物周辺であり，残置物の処理不良によって周辺のゆるみが拡大することが原因である。

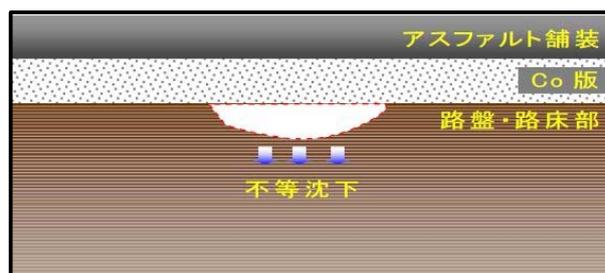


図-1.2.8 コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下

(3) 空洞発生メカニズムごとの分析

前節(2)で空洞発生メカニズムを列挙したが、空洞発生メカニズムは非常に複雑で、様々な要因が組み合わせられて空洞発生することが多いため、概に一つの発生メカニズムに分類することは困難である。そこで空洞発生メカニズムごとの傾向を分析するために図-1.2.9 のフローチャートにて個々の空洞発生メカニズムの分類を一つに推測する。

※1 丸番号は以下の分類を示す。

- ① 構造物背面土砂の吸出し
- ② 地下埋設物破損箇所等からの吸出し
- ③ 地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響
- ④ 転圧不足
- ⑤ 埋戻し材に混入異物(ガラ・木片など)の影響
- ⑥ シールドや推進工事による影響
- ⑦ 残置物(矢板, 死管等)の影響
- ⑧ コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下

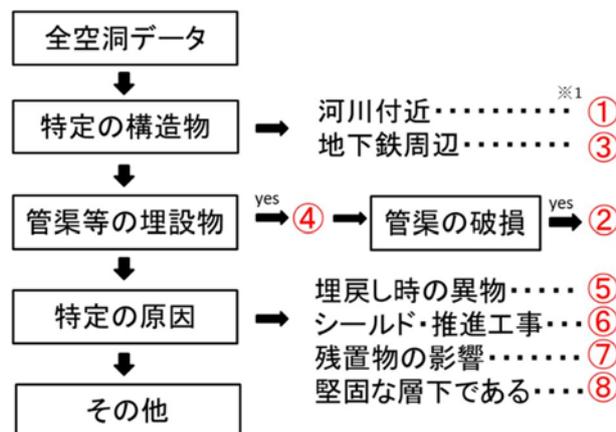
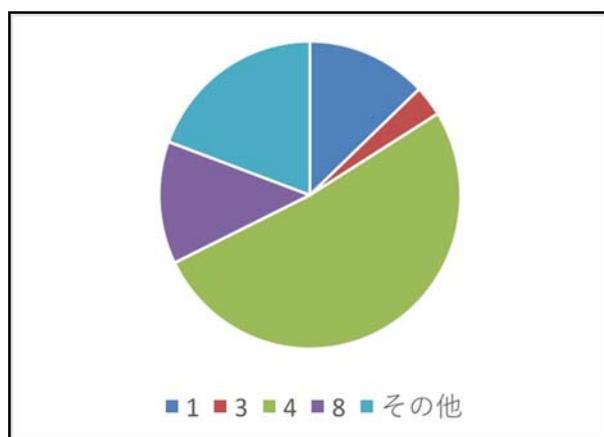


図-1.2.9 空洞発生メカニズムの分類フロー

1) 分析

H24～H28 の空洞データ 31 件を図-1.2.9 のフローに従って分類した結果を図-1.2.10 に示す。



① 構造物背面土砂の吸出し	4
② 地下埋設物破損箇所等からの吸出し	0
③ 地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響	1
④ 転圧不足	16
⑤ 埋戻し材に混入した異物(ガラ・木片など)の影響	0
⑥ シールドや推進工事による影響	0
⑦ 残置物(矢板, 死管等)の影響	0
⑧ コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下	4
その他	6
全件	31

図-1.2.10 空洞発生メカニズムの分類ごとの件数

図-1.2.10 からわかるように①構造物背面土砂の吸出しが 4 件,③地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響が 1 件, ④転圧不足が 16 件, ⑧コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下が 4 件, その他が 6 件であり, ②地下埋設物破損箇所等からの吸出し・⑤埋戻し材に混入した異物(ガラ・木片など)の影響・⑥シールドや推進工事による影響・⑦残置物(矢板, 死管等)の影響は 0 件であった。以下では, その他を含め空洞発生メカニズムの異なる 4 種の分析を行う。③地下埋設物・構造物周辺での水みちによる影響は空洞データが 1 件と少ないため省略する表-1.2.1 は空洞発生メカニズムごとに深度, 空洞厚さ, 縦断長さ, 横断長さ, 体積を平均したものがある。

表-1.2.1 空洞発生メカニズムの分類ごとの件数

※2

① 構造物背面土砂の吸出し

④ 転圧不足

⑧ コンクリート版やスラグ路盤下の不当沈下

	深度(m)	空洞厚さ(m)	縦断長さ(m)	横断長さ(m)	体積(m ³)
※2 ①	0.28	0.35	2.7	0.7	0.47
④	0.40	0.11	5.8	1.2	0.50
⑧	0.56	0.16	1.2	1.0	0.65
その他	0.49	0.37	1.4	1.2	0.62
全平均	0.43	0.20	4.8	1.1	0.59

以下に表-6.2.1 のデータより推測・考察できたことを示す。

<① 構造物背面土砂の吸出し>

空洞厚さ平均が 0.35m と全平均 0.20m と比較して大きい傾向が見られた。吸出し系の空洞は急速に拡大する等、成長性が高い傾向があり、整合性を確認できたといえる。

<② 転圧不足>

空洞厚さ平均が 0.11m と全平均 0.20m と比較して小さい傾向が見られた。吸出し系より沈下系の空洞は、成長性が低い傾向があり、整合性を確認できたといえる。また、① 構造物背面土砂の吸出し・⑧ コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下・その他と比較して縦断方向の長さが大きい傾向が見られた。これは特に道路端での転圧不足による空洞が影響しており、4 件のうち 3 件が 10m を超えており、最大のものは 51.7m であった。

また、空洞発生メカニズムの分類フローに従って② 地下埋設物破損箇所等からの吸出しに分類されるかを判断するため、管渠の破損箇所を確認した。④ 転圧不足のうち地下に埋設されていた管渠は具体的にガス管、上水道、下水道、集落排水であった。このうち下水道管渠以外の破損箇所データを有していなかったため、下水道管渠の破損箇所データと空洞データを照合したが、空洞発生箇所周辺では損傷が見られなかった。この理由として、下水道は一般的に 1.2m 付近に埋設されているが、今回調査した空洞は 0.4m 付近と浅層部であったため、直接的な要因にはならなかったのではないかと推測できる。以上のように管渠等の破損状況データが不足していたこともあり、② 地下埋設物破損箇所等からの吸出しが発生原因となる空洞を確認できなかった。

<⑧ コンクリート版やスラグ路盤下の不等沈下>

④ 転圧不足と同様に沈下系の空洞であるため、空洞厚さは小さい傾向が見られ、整合性を確認できたといえる。

2) まとめ

分析の結果、推測的ではあるが H24～H28 の空洞データ 31 件を発生メカニズムごとに分類できた。吸出し系は沈下系と比較しやや空洞が深刻化しやすい傾向が見られた。また、地下埋設物破損箇所のデータが不足しており、特に 0.5m 付近に一般的に埋設されている雨水排水管の破損箇所データを確認していく必要がある。そして、埋立地等の地質的要因も影響しているのではないかと推測でき、各地域の地質特性も考慮すべきであると考えられる。

1.3 汚水管による空洞発生箇所の傾向分析

1.3.1 抽出手法

神戸市においては、公共下水道管路施設の台帳システムがあり、管路施設の諸元及び管内調査結果等を蓄積している。台帳システムデータの内、特に汚水管路施設については、管内調査結果が多く蓄積されているため、汚水管渠の異常による空洞発生箇所の傾向を把握する必要がある。

そこで、神戸市に所在する3つの区（長田区、兵庫区、中央区）におけるスコープ調査により空洞と判明された空洞箇所（84箇所）及び地中レーダ探査から空洞の可能性ありと判断された箇所（96箇所）の全180箇所の空洞位置を対象とし、神戸市公共下水道管路施設台帳システムのデータを用いて、空洞位置と下水道管路（汚水管渠）をArcGIS上に重ね合わせることで傾向分析を実施した。

ここで、下水道管路（汚水管渠）が起因する可能性のある空洞位置は、図-1.3.1に示すように汚水管渠法線を中心に幅1.5mの範囲（全幅3.0m）に存在する空洞位置を抽出した。

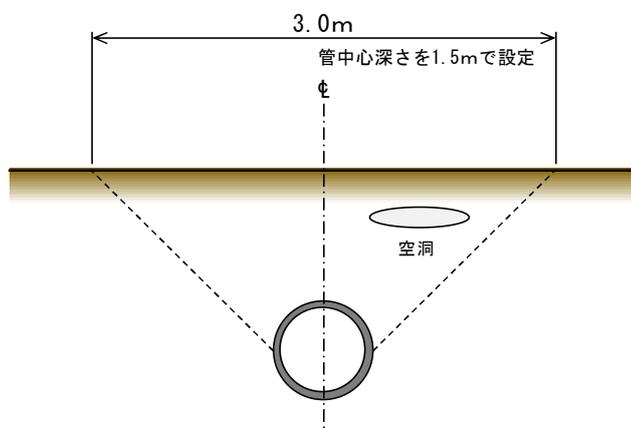


図-1.3.1 汚水管渠が起因する可能性のある空洞位置抽出イメージ図

1.3.2 抽出結果

抽出された空洞位置は、次頁の図-1.3.2に示すとおりであり、空洞箇所数を整理すると表-1.3.1のようになり、空洞箇所は17%（14箇所/全84箇所）、空洞の可能性ある箇所は28%（27箇所/全96箇所）、トータルで22%（41箇所/全180箇所）である。概ね、空洞及び空洞の可能性ある箇所の1/4は、下水道管路（汚水管渠）が起因する可能性がある。

表-1.3.1 汚水管渠が起因する可能性のある空洞箇所抽出結果一覧表

空洞深度 (m)		0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	計
空洞調査結果	空洞	47	37	0	84
	空洞の可能性あり	42	52	2	96
	計 (Σ a)	89	89	2	180
汚水管渠抽出結果	空洞	9	5	0	14
	空洞の可能性あり	11	15	1	27
	計 (Σ b)	20	20	1	41
割合 Σ b / Σ a	空洞	0.19	0.14	—	0.17
	空洞の可能性あり	0.26	0.29	0.50	0.28
	計	0.22	0.22	0.50	0.23

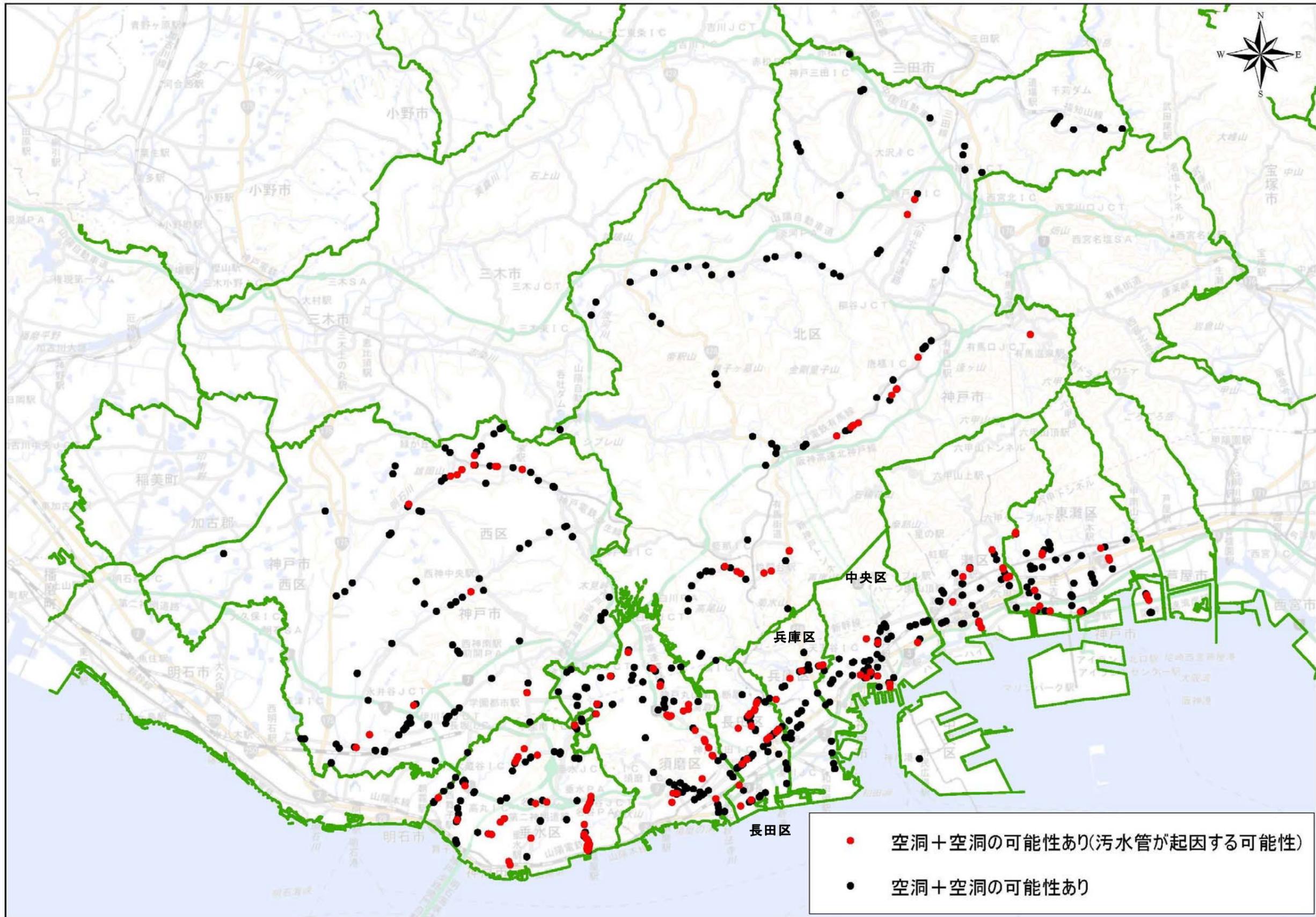


図-1.3.2 污水管渠が起因する可能性のある空洞箇所抽出図

1.3.3 分析

次に、空洞の発生に起因する可能性がある下水道管路（汚水管渠）の異常に着目して分析を行う。

公共下水道管路施設の台帳システムデータは、管渠番号（人孔から人孔＝スパン）で管理されているため、空洞の発生に起因する可能性がある汚水管渠は、スパン単位で抽出される。

表-1.3.1 に示す空洞及び空洞の可能性がある41箇所に対し、汚水管渠は39スパン抽出された。この汚水管渠を管種別に整理すると表-1.3.2 のようになり、鉄筋コンクリート管が90%（35スパン/全39スパン）、硬質塩化ビニール管が10%（4スパン/全39スパン）である。

表-1.3.2 汚水管渠の管種別抽出スパン整理表

管種	スパン数	割合
鉄筋コンクリート管	35	0.90
硬質塩化ビニール管	4	0.10
計	39	

抽出された39スパンの汚水管渠で管内カメラ調査を実施しているスパンは、28スパンあり約7割が管渠内の異常を確認している。神戸市における管内カメラ調査判定基準を表-1.3.3に示す。

表-1.3.3 神戸市における管内カメラ調査判定基準

事項	ランク		A	B	C
		記号			
管内カメラ調査	破損	E	管材の破壊有り 管きよ更生不適(要閉削)	管材の欠損有り 管きよ更生可能	マンホール内より補修可能な管口補修
	継手部鉛直ズレ	G	3cm以上	1cm～3cm未満	1cm未満
	継手部目地開き	B	3cm以上	1cm～3cm未満	1cm未満
	クラック(鉛直)	V	半円周以上	半円周以下	ヘアクラック
	クラック(水平)	II	管長の1/2以上	管長の1/2未満	ヘアクラック
	たるみ	L	管径の1/2以上	管径の1/2以下	管径の1/5未満
	蛇行	M	管径の1/2以上	管径の1/2以下	管径の1/5未満
	腐食	F	全体に骨材の露出 (鉄筋が30cm以上露出している)	一部に骨材の露出 (一部のみ鉄筋・骨材が露出している)	変色している (1スパン全体で変色していればFBで計上)
	木根侵入	R	侵入根が流下を阻害しているもの	侵入根有り	――
	浸入水	D	吹き出ている	流れている	にじんでいる
	バックン異常	P	露出したゴム輪が流下を阻害するもの	ゴム輪の露出有り	――
	モルタル堆積	Q	管径の20%以上	管径の20%以下	――
	取付管突出	SK	本管内に3cm以上	本管内に3cm以下	――
	取付管破損	SE	管材断面に変形有り	管材断面に欠損有り	――
取付管ズレ	SG	3cm以上	1cm～3cm未満	1cm未満	
取付管バックン異常	SP	露出したゴム輪が流下を阻害するもの	ゴム輪の露出有り	――	
取付管内木根侵入	SR	侵入根が流下を阻害しているもの	侵入根有り	――	
取付管内浸入水	SD	吹き出ている	流れている	にじんでいる	
取付管内その他の異常	SS	緊急対応が必要	計画的対応が必要	――	

空洞発生に起因すると考えられる異常は、管内に管周辺の土砂を引き込む可能性のある異常と考えると、表-1.3.3の赤枠で囲んでいる以下の異常である。

- 破損 A
- 継手部鉛直ズレ A・B
- 継手部目地開き A・B
- クラック（鉛直） A・B
- クラック（水平） A・B
- 木根侵入 A・B
- 浸入水 A・B
- 取付管異常：破損A，ズレA・B，木根侵入A・B，浸入水A・B

上記の異常箇所数を管種別・異常種別に整理したものを表-1.3.4に示し、各異常の割合を図-6.3.3に示す。その結果、空洞発生に起因すると考えられる異常は、継手部目地開きが54%（54箇所/全100箇所）を占めている。

表-1.3.4 異常箇所数の管種別・異常種別集計表

管種	破損		鉛直ズレ		鉛直クラック		水平クラック		目地開き		浸入水		木根侵入		取付管異常		計
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
鉄筋コンクリート管	5	0	3	17	8	0	2	1	53	2	2	1	6	0	0	100	
硬質塩化ビニール管	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
計	5	0	3	17	8	0	2	1	53	2	2	1	6	0	0	100	
全異常に対する割合	0.05	0.00	0.03	0.17	0.08	0.00	0.02	0.01	0.53	0.02	0.02	0.01	0.06	0.00	0.00		

※取付管異常：破損，ズレ，木根侵入，浸入水

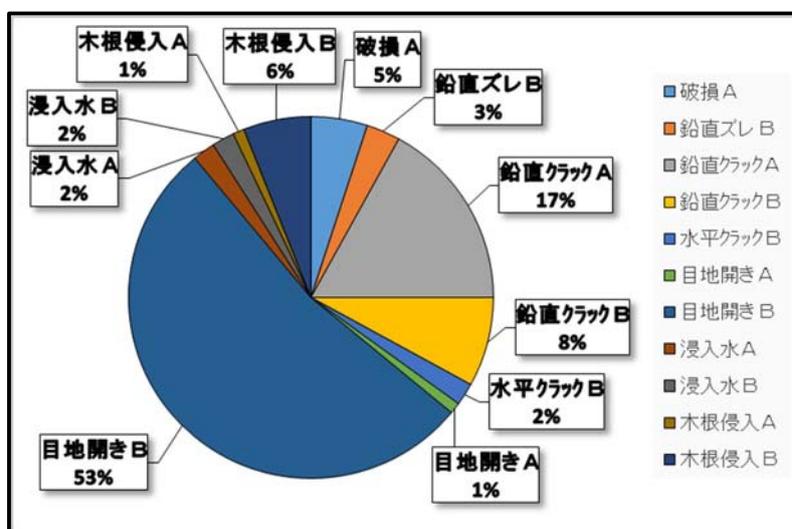


図-6.5.3 各異常の割合

以上より、空洞及び空洞の可能性のある箇所は、概ね 1/4 で下水道管路（汚水管渠）が起因している可能性がある。さらに空洞発生は、下水道管路（汚水管渠）の管種が鉄筋コンクリート管で、継手部目地開きの異常が関係していると考えられる。しかし、前回の検討は、下水管路1スパン（約30m）と空洞箇所との重ね合わせ図であり、具体的な異常箇所との確認はデータが不足しているため実施できていない。今後、具体的な異常箇所位置データを ArcGIS に加えて精査することでより詳細に分析することが可能である。

1.4 本研究に向けた課題

前述した“神戸市の路面空洞発生傾向の分析に関する検討”においては、空洞調査結果と交通量、埋設物管路、汚水管内調査、地理（地盤特性）等の膨大なデータをGISで統合することで、多様な側面からの分析を省力し、分析結果を視覚的に表現した。そして、空洞発生メカニズムを分類することで、空洞発生原因別に分類し、分析が可能なデータを保有している汚水管の異常との関連性を分析した。

データを蓄積するためには、調査を継続し結果を整理していくことが重要である。そして、定期的に分析し空洞発生原因を特定し、対応策の優先度及び標準化を示していくことも重要である。一方で、調査を継続し発見された空洞箇所に対策を講じることは、継続的に調査費を確保することが必要である。

今回の本研究は、過年度の研究成果と空洞調査費用を抑制し継続するために、以下の事項について研究を行うこととした。

- ①路面のたわみに着目した陥没危険度評価に関する検討【簡易な危険度評価の可能性検討】
- ②路面たわみ量と路面下空洞陥没危険度（FEM解析）【陥没リスクの評価法検討】
- ③路面たわみ計測へのOCMの適用【簡易な調査及び危険度評価の可能性簡易検討】

2. 路面のたわみに着目した陥没危険度評価に関する検討

2.1 神戸市における路面下空洞調査

2.1.1 空洞調査法

(1) 一次調査

車道部では、路面下空洞探査車（車載型地中レーダ）を用いて、一般交通に支障のないように路上を走行移動し、データを取得する。ただし、交通規制は不要である。

歩道部では、小型探査装置を用いて、歩道上を移動し、データを取得する。

データ取得後、複数の解析技術者が異常信号を漏れなく抽出したうえで、空洞の可能性のある異常箇所を決定する。

なお、探査性能は、深度が1.5m程度まで検知可能であるもの、広がりか:縦0.5m×横0.5m×厚さ0.1m以上の空洞が検知可能であるもの、異常箇所の概略位置を特定できるものとする。

(2) 二次調査

一次調査で抽出された異常箇所について、ボーリング削孔を行い、空洞の有無、厚さおよび舗装状況等を確認する。調査にあたり、各種協議と交通規制が必要となる。

2.1.2 陥没危険度評価法

現在、多くの空洞調査では、抽出した異常信号に対して路面陥没発生の危険度評価を行っている（図-2.1）。路面陥没が発生する可能性は、異常信号の発生深度および広がり（短辺）から評価し、危険度が高い順に「A」「B」「C」の3段階に分ける。この判定は、抽出された異常信号に対して、その後の対応方針（二次調査実施等）を決定する指標のひとつとなるものである。

また、異常信号が空洞であった場合、発生深度が浅く広がりが大きいほど、車両通過による輪荷重や舗装そのものの自重の影響を受けて陥没が発生しやすくなり、対応の優先度は高くなる。

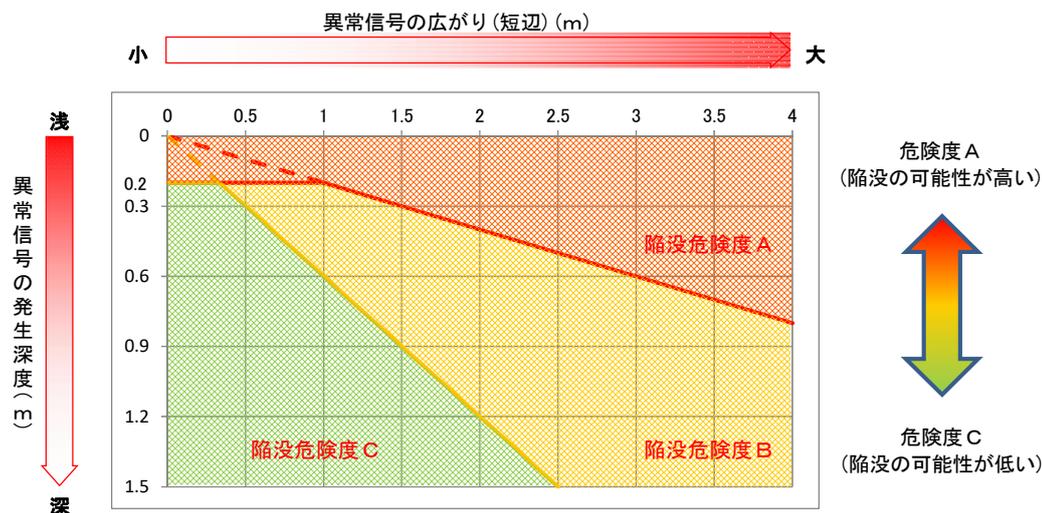


図-2.1.1 路面陥没発生の危険度評価

しきい値の設定

路面下に空洞が存在する場合に路面陥没が発生する可能性は、様々な要素の影響を受けるため、明確な評価基準は確立されていないのが現状である。今後、路面変状箇所等の実績を蓄積することにより、しきい値の見直しを行い、妥当性を向上させていくものである。

A-Bの境界線は、国道での一般的な舗装厚 0.3m に対して、空洞の広がりが 1.5m 以上となった場合に危険度が高くなるとの報告「路面下空洞調査マニュアル（平成 8 年 3 月 関東技術事務所）」を参考に設定した。またB-Cの境界線は、A-Bの境界線に対して、3 倍程度の安全率を見込むこととしたものである。

広がりの短辺を用いる理由

空洞の形状は主に楕円形であるが、空洞上部の舗装体は自重および通行車両の荷重を短辺で支持している。そのため、評価には広がりの短辺を用いる（図-2.2）。

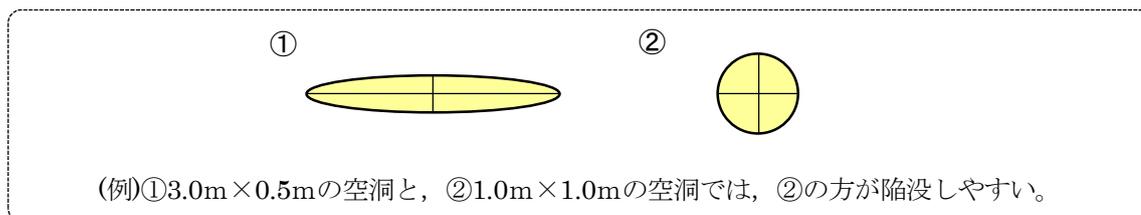


図-2.1.2 広がりの短辺を用いる理由

2.1.3 神戸市における空洞調査

神戸市では、阪神・淡路大震災発生の翌年である平成8年から継続的に空洞調査を行っており、これまでの調査測線長は約3,300kmにのぼる。主に緊急輸送道路・幹線道路および2級河川沿い道路を対象として調査を行ってきた。

2.1.4 神戸市路面下空洞調査結果（令和3年度調査）

(1) 調査路線

調査計画に準じた計画路線（緊急輸送道路・幹線道路および2級河川沿い道路）および要望路線（各建設事務所からの空洞発生懸念箇所や路面陥没周辺箇所）について、空洞調査を実施した。

(2) 調査結果

測線長約260kmの調査を実施し、約370箇所の異常箇所を抽出した。約370箇所の異常箇所を路面陥没発生の危険度評価に当てはめると、各危険度の割合は、危険度Aが約5%、危険度Bが約30%、危険度Cが約65%であった（図-2.3）。

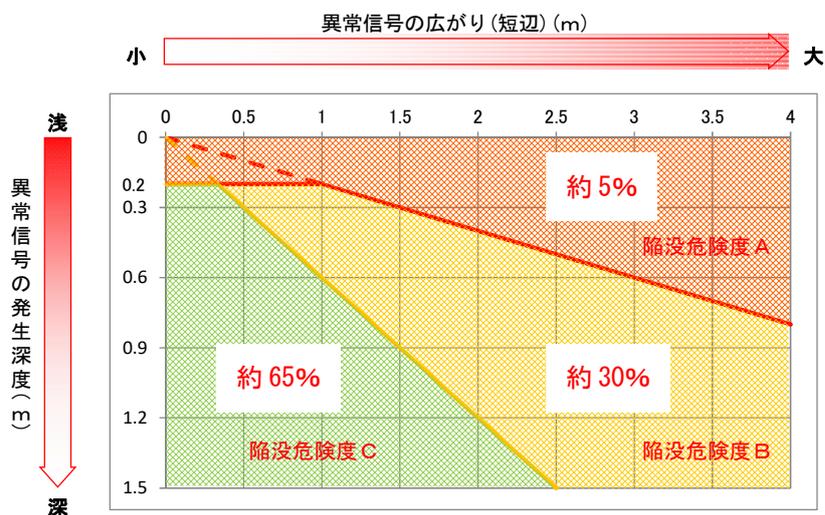


図-2.1.3 陥没危険度評価グラフ

(3) 考察

抽出した異常箇所について、道路区分別に異常箇所発生率（測線長 1km あたりの異常箇所数）を算出すると、表-2.1 の通りとなった。

表-2.1.1 異常箇所発生率(道路区分別)

道路区分		調査測線長 (km)	異常箇所数 (箇所)	異常箇所発生率 (箇所/km)
計画路線	緊急輸送道路・幹線道路	約 240	約 230	0.96
	2 級河川沿い道路	約 9.5	約 60	5.79
要望路線	その他	約 8.5	約 80	9.13

「路面下に発生する空洞の発生状況の分析と考察」（小池ら，土木学会第 72 回年次学術講演会，平成 29 年 9 月）によると，異常箇所発生率は，国・道・府・県で 0.27 箇所/km，東京 23 区で 0.98 箇所/km，その他自治体で 0.59 箇所/km となっている。

神戸市における緊急輸送道路・幹線道路の異常箇所発生率は 0.96 箇所/km であり，東京 23 区（0.98 箇所/km）とほぼ同じである。異常箇所発生率は，緊急輸送道路・幹線道路と比較すると，2 級河川沿い道路では約 6 倍であり，要望路線では約 9 倍であった。これは，2 級河川沿い道路では護岸沿いの土砂吸出しの影響で空洞が成長しやすく，要望路線では陥没箇所周辺等で空洞が発生しやすい環境であるため，高い発生率となっている。引き続き，今後もの確かかつ高度な視点での調査が必要である。

2.1.5 神戸市における空洞調査，陥没危険度評価の留意点，注意点

一次調査後の陥没危険度評価の場合，異常信号の発生深度と短辺の広がり情報のみで評価しており，空洞の有無や厚み，空洞下端のゆるみ，舗装構成，舗装材の種類等の情報が不足している。一方，路面陥没が発生した場合，空洞が厚いほど陥没の規模が大きくなるとともに，大規模な交通渋滞等に繋がり，社会的な影響度は大きくなる。そのため，二次調査を実施し，陥没リスク指標（短軸長・深度比と空洞の厚さによる指標）による評価を行うことで，補修優先度を検討する必要がある。

2.1.6 神戸市における空洞形状による陥没危険度評価法の課題

(1) 成長性を加味した危険度評価

空洞は，発生要因や周辺環境によっては，急激に成長し，路面陥没に至ることもある。そのため，確認した異常箇所については，個別に周辺環境（河川沿い，地下埋設物近傍等）を把握する等，成長性を加味した危険度評価が求められる。

(2) より精度の高い最適な補修優先順位

危険度 A は優先的に対応し，危険度 B・C は空洞発生要因が土砂流出環境にある箇所から順次対応することが望ましい。また，道路パトロールで路面変状等を確認した場合や自然災害発生後は，危険度に関わらず，適時対応する必要がある。ただし，補修には様々な制約が生じる他，空洞の成長性には不確実性があるため，より精度の高い補修優先順位が求められる。

2.2 FWD法を用いた路面たわみによる陥没危険度評価

2.2.1 概要

突然発生する道路の陥没は人命に関わる重大事故につながる危険性があるため、路面下の空洞を適切に管理することが重要である。そのためには地中レーダ探査等により空洞を早期発見し、その陥没の危険性を適切に評価して、危険性の高いものは緊急補修し、危険性の小さい空洞は経過観察等により空洞の成長速度等を勘案しつつ、路面保全のマネジメントを行っていくことが必要と考えられる。

最近の空洞調査においては、3次元的にデータを取得できる探査車が活用されており、空洞の位置や大きさについて調査されるようになってきているが、発見された空洞が危険な状態にあるかどうかを即座に判定することは難しい状況にある¹⁾。一方、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考えられ、その評価には道路舗装構造評価装置（Falling Weight Deflectometer, 以下「FWD」という）によるたわみ測定は有効であると考えられる²⁾。周辺の健全な箇所との比較によっても陥没の危険性を評価できるとも考えられる。

これに対し、現道で地中レーダ探査およびスコープ調査により空洞の大きさや深さが特定された地点でFWD測定を行い、路面のたわみに着目した路面下空洞の陥没危険度の評価方法について検討した。

2.2.2 道路舗装構造評価装置（「FWD」）

FWD装置の模式図を図-2.2.1に示す。FWD装置は路面上に接地した直径30cmの載荷板におもりを落下させることにより舗装体に衝撃荷重を与え、その応答として舗装表面に生じるたわみ形状を複数のセンサーで計測する装置である。FWDの載荷装置は、おもりを所定の高さから落下させ、そのとき発生する衝撃荷重を、円形載荷板を介して舗装体に伝達する。衝撃荷重の大きさはおもりの落下高さを調整することにより変えられるが、本調査においては、一般的な大型貨物自動車の輪荷重と同等の49kNを目標として落下高さを設定した。載荷開始からピーク荷重発生までの時間は30ms程度である。円形載荷板は直径30cmゴムマット付きの金属製であり、荷重を等分布に路面へ伝えることを意図して4分割されているものを用いた。

FWDのたわみセンサーは、ジオフォン（速度計）である。本調査では、10個のセンサーを、載荷板中心位置を0として、0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000mmの位置に直線状に配置し測定を行った。

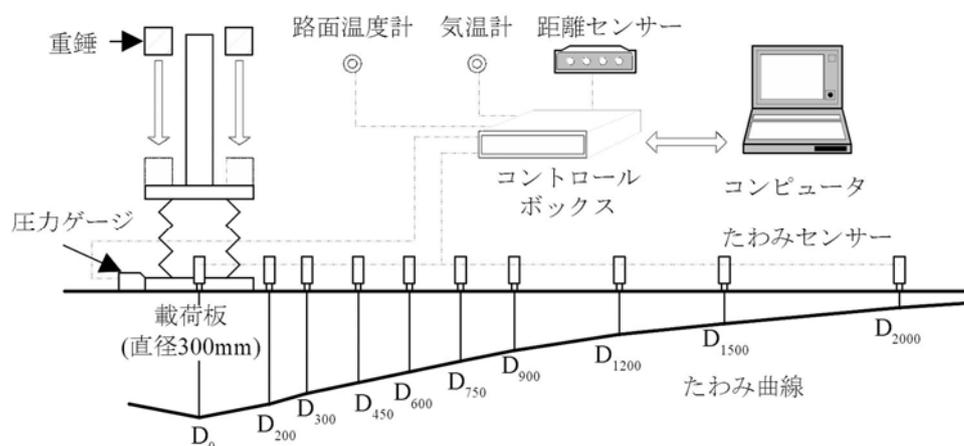


図-2.2.1 FWDの模式図

調査には、一般的に写真-1に示すFWD装置を車載したFWD調査車を用いるが、河川護岸直近などのFWD調査車での調査が困難な箇所については、小型FWD（図-2.1.2、写真-2.2.2）を適用する。



写真-2.2.1 FWD 調査車

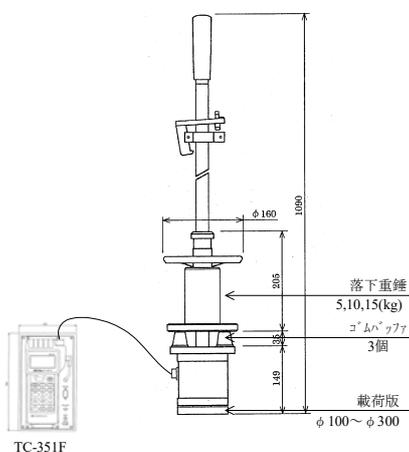


図-2.2.2 小型FWD



写真-2.2.2 小型FWD 計測状況

2.2.3 FWDの路面空洞陥没危険度評価への適用性検討

2.2.3.1 測定概要

路面下空洞箇所に対するFWD（Falling Weight Deflectometer）を用いた路面変位計測による空洞陥没危険度評価の適用性の検証と優先度評価への適用性についての基礎資料を得ることを目的として、実際の空洞および空洞周辺でFWDを用いた路面たわみ量計測を実施した。

【計測箇所】

- ① 山田川沿い道路（神戸市垂水区本多聞2丁目）
- ② 神戸市道神戸加古川姫路線（兵庫県神戸市垂水区名谷町）

【実施内容】

- ① 山田川沿い道路（神戸市垂水区本多聞2丁目外） ～ FWD 調査 3箇所
- ② 神戸市道神戸加古川姫路線（兵庫県神戸市垂水区名谷町） ～ FWD 調査 1箇所

2.2.3.2 計測箇所

測定箇所は、本年度の空洞二次調査に空洞の形状が確認されている空洞のうち、山田川沿いの3か所と、一般車両による変位状況を計測することを目的とする神戸加古川姫路線の1か所を選定した。

表-2.2.1 測定箇所一覧

路線：山田川

箇所番号	地先	方向	車線	陥没危険度 (一次)	陥没危険度 (二次)	備考
17-005	兵庫県神戸市垂水区本多聞2丁目11-1	南行	第一車線	A	A	
17-009	兵庫県神戸市垂水区多聞台2丁目1-32	南行	路肩	A	緊急	
17-010	兵庫県神戸市垂水区本多聞2丁目24-15	南行	第一車線	B	B	

路線：神戸加古川姫路線

箇所番号	地先	方向	車線	空洞の可能性	陥没危険度	備考
20-002	兵庫県神戸市垂水区名谷町3430-3	南行	第二車線	B	B	

次ページに二次調査速報を示す。

表-2.2.2 調査結果一覧

路線No. 業営番号	所管 事務所	整理 番号	路線名	調査日	地先	管轄署	緯度	経度	方向	車線	空洞規模				空洞の 可能性	陥没 危険度 (一次 調査)	陥没 危険度 (二次 調査)	陥没 リスク	判定	備考
											縦断 方向 (m)	横断 方向 (m)	発生 深度 (m)	空洞厚 (m)						
17-001	垂水	39	山田川		兵庫県神戸市垂水区西舞子3丁目19-9	垂水	34.0428263	135.0275802	北行	第一車線				小	緊急					
17-002	垂水	39	山田川	-	兵庫県神戸市垂水区本多町1丁目20-20	垂水	34.6562752	135.0403971	西行	第一車線	-	-	-	中	C	-	-	-	-	地下埋設物企業者(大阪ガス(株))との協議により二次調査対象外
17-003	垂水	39	山田川	-	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目17-17	垂水	34.6561149	135.0423593	北行	第一車線	-	-	-	小	B	-	-	-	-	地下埋設物企業者(大阪ガス(株))との協議により二次調査対象外
17-004	垂水	39	山田川	-	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目17-17	垂水	34.6561490	135.0423799	北行	第一車線	-	-	-	小	B	-	-	-	-	地下埋設物企業者(大阪ガス(株))との協議により二次調査対象外
17-005	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目11-1	垂水	34.6562511	135.0428253	南行	第一車線	1.45	1.00	0.21	小	A	A	II	空溜		
17-006	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目12-10	垂水	34.6565121	135.0433220	西行	第一車線	4.10	0.40	0.19	小	A	緊急	III	空溜		
17-007	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目12-13	垂水	34.6565564	135.0434331	西行	第一車線	1.10	0.50	0.18	小	A	緊急	III	空溜		
17-008	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目12-13	垂水	34.6563817	135.0435009	西行	第一車線	15.50	0.55	0.15	小	緊急	緊急	III	空溜		
17-009	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目1-32	垂水	34.6596019	135.0449739	南行	路肩	6.40	0.80	0.18	小	A	緊急	II	空溜		
17-010	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目4-15	垂水	34.6594217	135.0452154	南行	第一車線	4.80	1.70	0.55	小	B	B	III	空溜		
17-011	垂水	39	山田川	2020年12月18日	兵庫県神戸市垂水区本多町台2丁目23-6	垂水	34.6601014	135.0460435	北行	第二車線	1.30	1.00	0.48	中	B	B	I	空溜		

路線No. 業営番号	所管 事務所	整理 番号	路線名	調査日	地先	管轄署	緯度	経度	方向	車線	空洞規模				空洞の 可能性	陥没 危険度 (一次 調査)	陥没 危険度 (二次 調査)	陥没 リスク	判定	備考
											縦断 方向 (m)	横断 方向 (m)	発生 深度 (m)	空洞厚 (m)						
20-001	垂水	20-3	神戸加古川陸路線	2020年10月20日	兵庫県神戸市垂水区谷町3425	垂水	34.6714633	135.0772574	南行	第一車線	1.55	0.90	0.23	小	A	-	-	-	-	空溜無、風置管を確認
20-002	垂水	20-3	神戸加古川陸路線	2020年10月19日	兵庫県神戸市垂水区谷町3430-3	垂水	34.6720787	135.0775324	南行	第二車線	1.60	4.60	0.35	小	B	B	II	空溜		

計測箇所的位置図を示す。

①山田川沿い

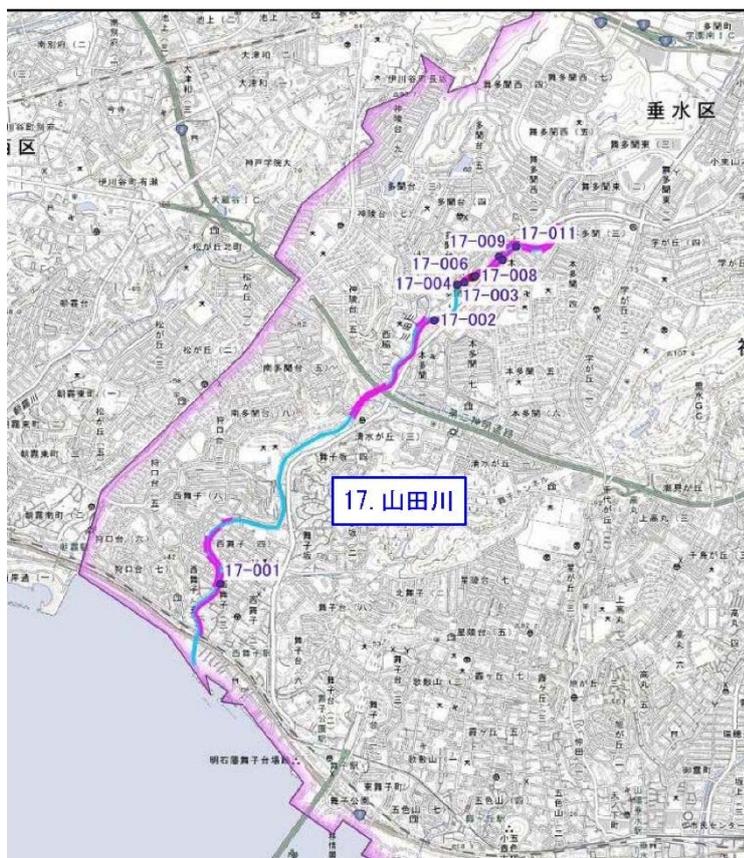


図-2.2.3 山田川沿い道路計測箇所位置図(全体図)



図-2.2.4 山田川沿い道路計測箇所位置図(詳細図)

計測箇所状況写真



図-2.2.5 山田川沿い道路計測箇所



写真-2.2.3 計測箇所 17-003



写真-2.2.4 計測箇所 17-009



写真-2.2.5 計測箇所 17-010

②神戸加古川姫路線

本調査位置では、小型FWDを用いた計測と、一般通行車両による路面変位の計測を実施する。



図-2.2.6 神戸加古川姫路線計測箇所位置図（全体図）



図-2.2.7 神戸加古川姫路線計測箇所位置図（詳細図）

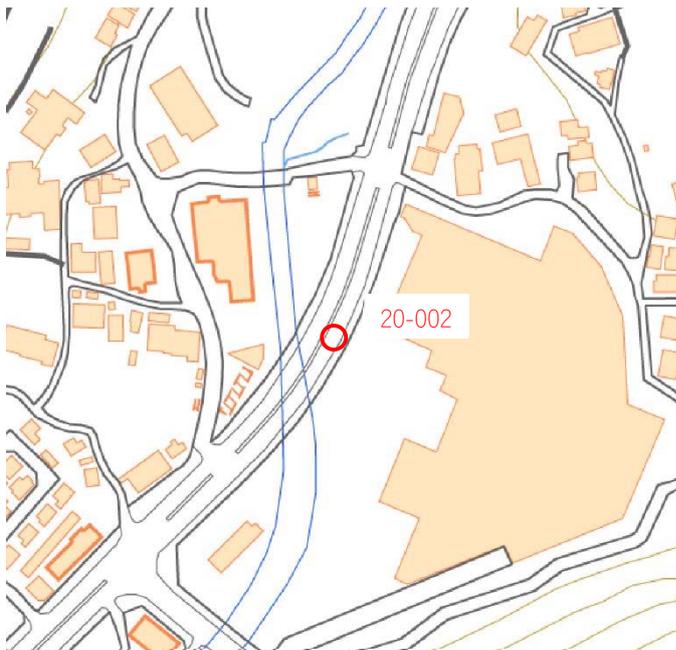


図-2.2.8 神戸加古川姫路線計測箇所



写真-2.2.6 計測箇所 20-002

2.2.4 空洞形状による陥没危険度とFWDによるたわみ量の関係

2.2.4.1 調査対象空洞の陥没リスク

「令和2年度路面下空洞調査業務」で実施された一次調査および二次調査結果を下表に示す。

表-2.2.3 空洞調査結果

路線 No.- 異常番号	車線	空洞規模				陥没 危険度 (一次)	陥没 危険度 (二次)	陥没 リスク	摘要
		縦断 方向 (m)	横断 方向 (m)	発生 深度 (m)	空洞厚 (m)				
17-005	1車線	1.45	1.00	0.21	0.10	A	A	II	
17-009	1車線	0.40	0.80	0.18	0.10	A	緊急	II	
17-010	2車線	4.80	1.70	0.55	0.05	B	B	III	
20-002	2車線	1.60	4.80	0.35	0.10	B	B	II	

2.2.4.2 FWDによる路面たわみ計測結果

1) 17-005

空洞直上、健全部それぞれで3回の計測を行った。グラフは1例を示す。

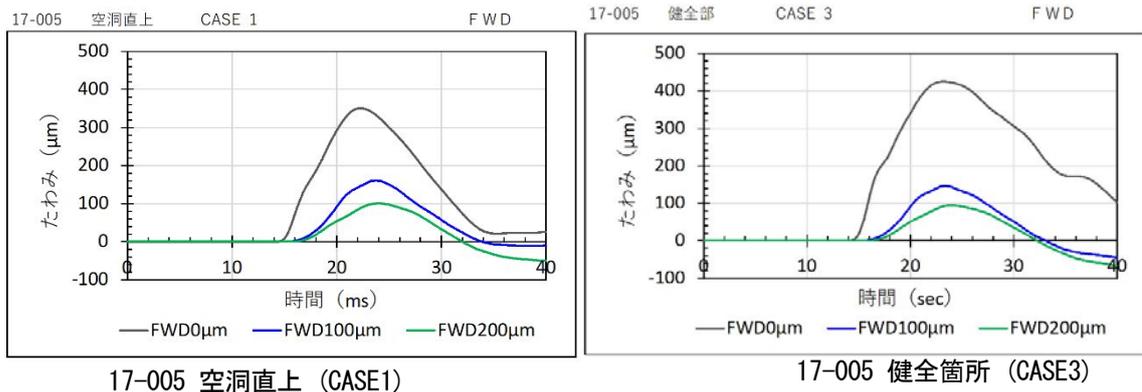


図-2.2.9 路面変位計測波形(17-005)

2) 17-009

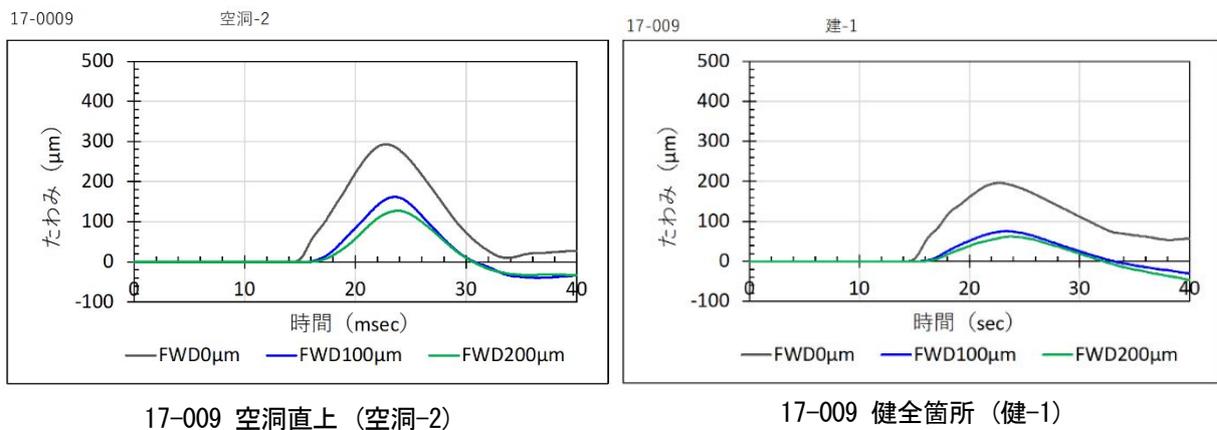


図-2.2.10 路面変位計測波形(17-009)

3) 17-010

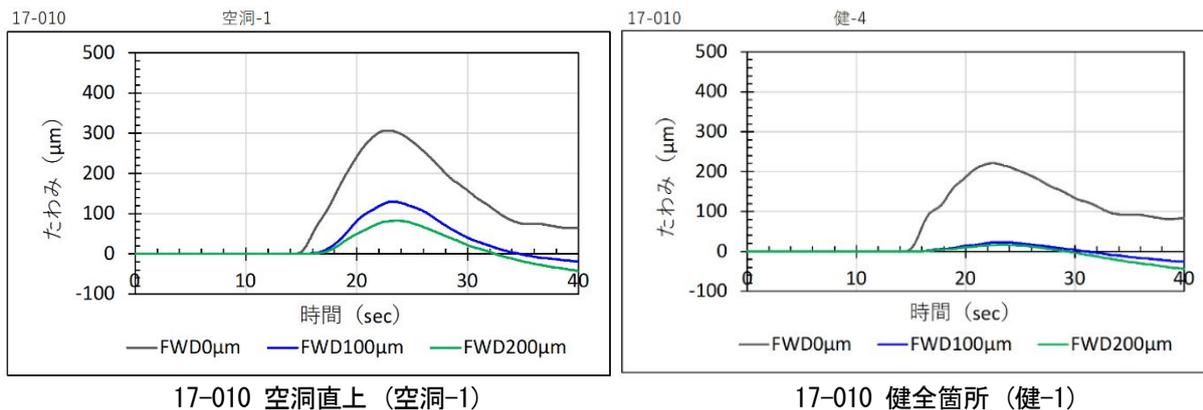


図-2.2.11 路面変位計測波形(17-010)

4) 20-002

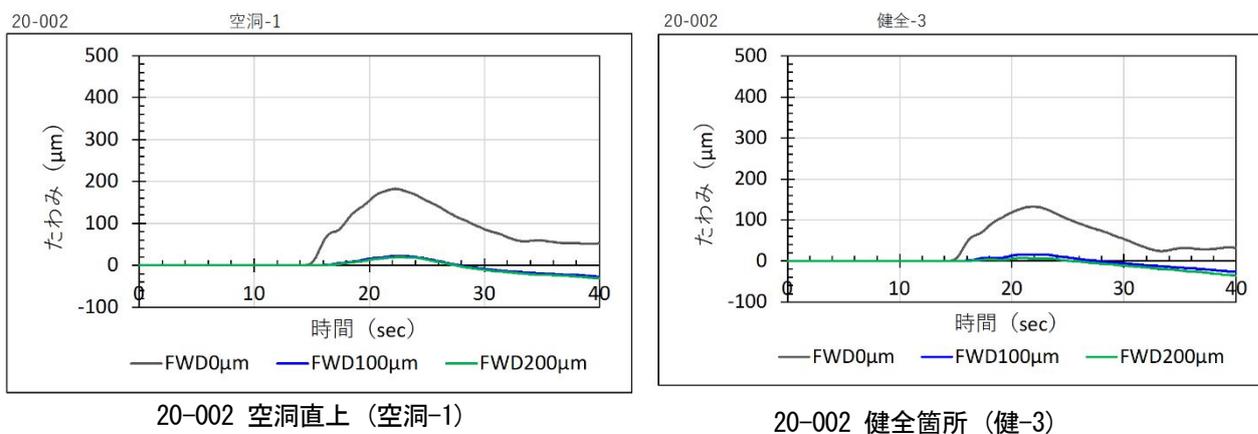


図-2.2.12 路面変位計測波形(20-002)

2.2.4.3 空洞位置及び健全箇所計測結果の比較

1) 17-005

载荷位置中心と中心からの距離 100mm, 200mm における最大変位を整理した。

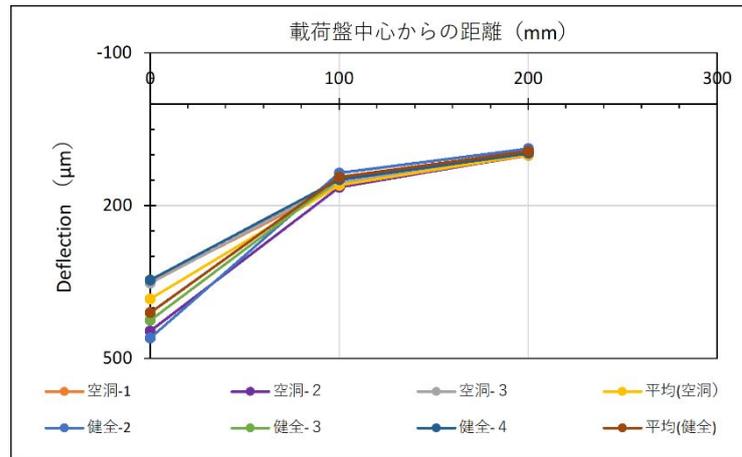


図-2.2.13 载荷中心からの距離と変位量

表-2.2.4 载荷中心からの距離と変位量一覧

種別	CASE番号	载荷点からの距離(mm)		
		0	100	200
空洞直上	空洞-1	350	161	101
	空洞-2	446	164	100
	空洞-3	352	155	100
	平均(空洞)	383	160	100
健全部	健全-2	460	136	88
	健全-3	425	147	94
	健全-4	346	149	97
	平均(健全)	410	144	93

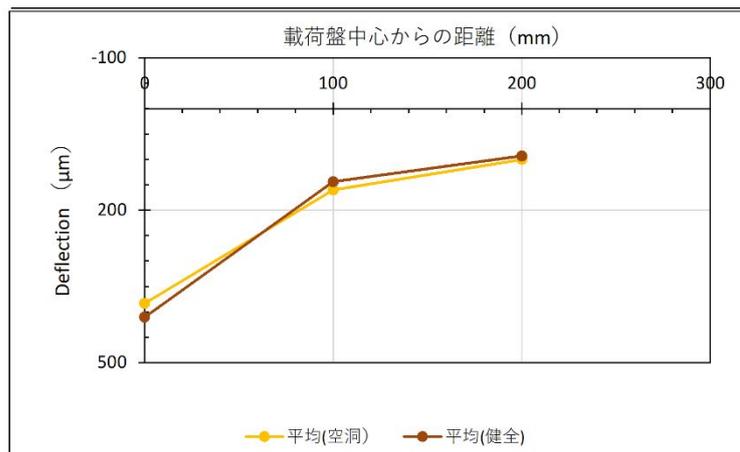


図-2.2.14 空洞直上と健全箇所における平均最大変位量の比較

空洞箇所と健全箇所では明確な違いは見られなかった。

2) 17-009

載荷位置中心と中心からの距離 100mm, 200mm における最大変位を整理した。

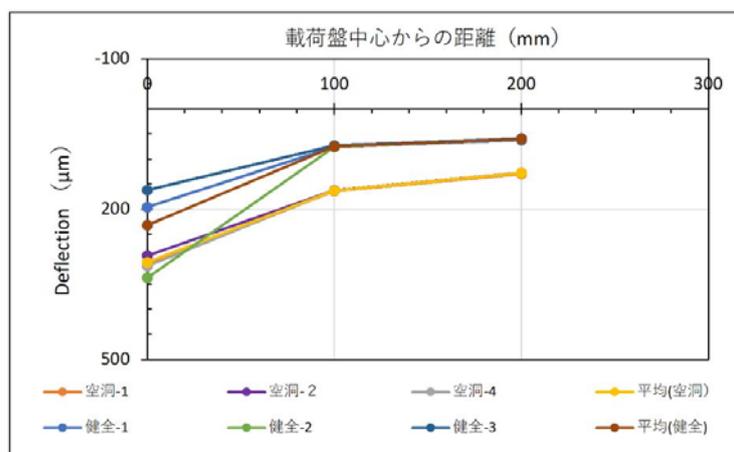


図-2.2.15 載荷中心からの距離と変位量

表-2.2.5 載荷中心からの距離と変位量一覧

FWD

種別	CASE番号	載荷点からの距離(mm)		
		0	100	200
空洞直上	空洞-1	310	164	130
	空洞-2	293	162	127
	空洞-4	314	163	127
	平均(空洞)	306	163	128
健全部	健全-1	196	76	62
	健全-2	337	76	60
	健全-3	162	73	59
	平均(健全)	232	75	60

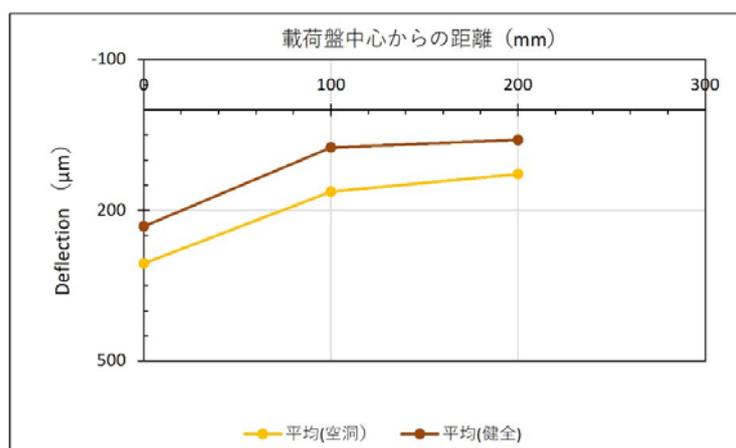


図-2.2.16 空洞直上と健全箇所における平均最大変位量の比較

空洞箇所の変位量は、健全箇所よりも大きな値を示している。

3) 17-010

载荷位置中心と中心からの距離 100mm, 200mm における最大変位を整理した。

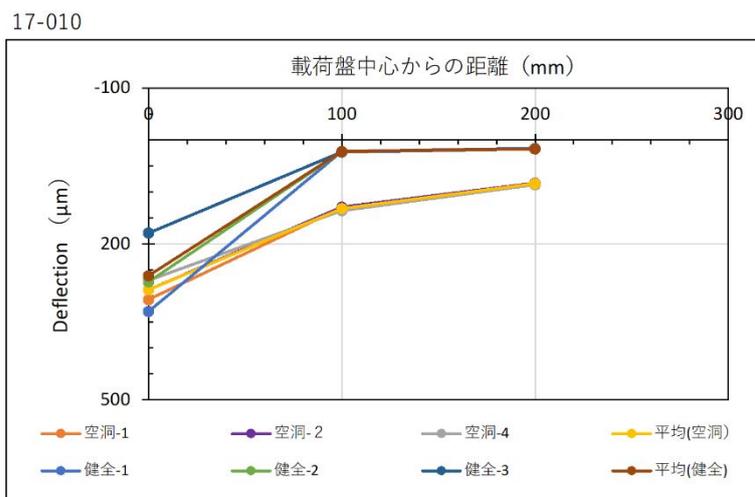


図-2.2.17 载荷中心からの距離と変位量

表-2.2.6 载荷中心からの距離と変位量一覧

FWD

種別	CASE番号	载荷点からの距離(mm)		
		0	100	200
空洞直上	空洞-1	307	130	83
	空洞-2	288	129	83
	空洞-4	270	136	86
	平均(空洞)	288	132	84
健全部	健全-1	330	22	16
	健全-2	273	22	17
	健全-3	179	23	17
	平均(健全)	261	22	17

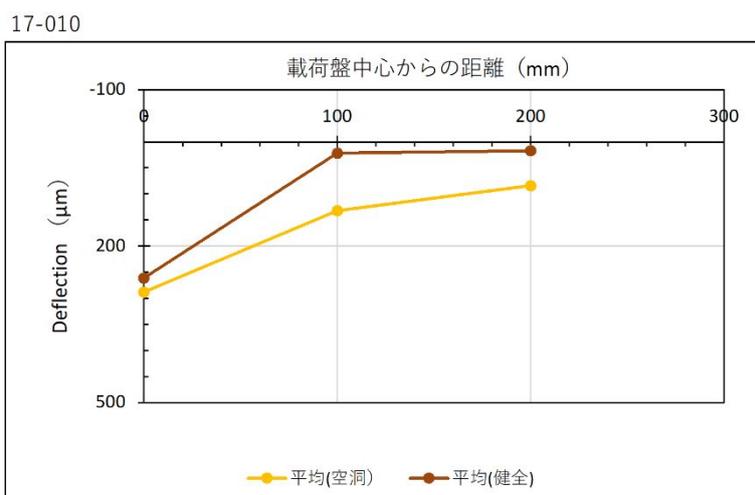


図-2.2.18 空洞直上と健全箇所における平均最大変位量の比較

空洞箇所と健全箇所では明確な違いが見られた。

4) 20-002

載荷位置中心と中心からの距離 100mm, 200mm における最大変位を整理した。

20-002

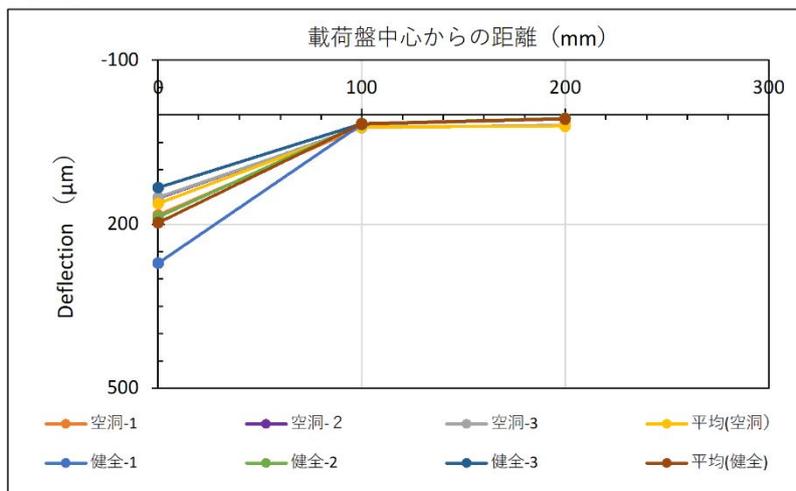


図-2.2.19 載荷中心からの距離と変位量

表-2.2.7 載荷中心からの距離と変位量一覧

FWD

種別	CASE番号	載荷点からの距離(mm)		
		0	100	200
空洞直上	空洞-1	183	22	20
	空洞-2	152	22	20
	空洞-3	151	23	19
	平均(空洞)	162	22	20
健全部	健全-1	271	17	7
	健全-2	187	16	6
	健全-3	133	16	7
	平均(健全)	197	16	7

20-002

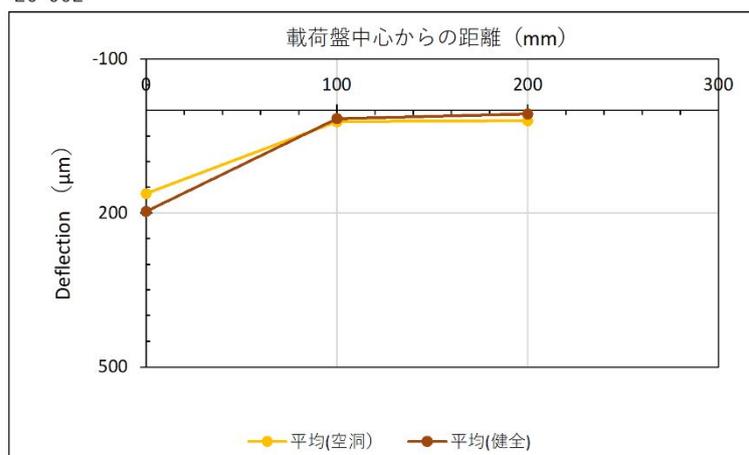


図-2.2.20 空洞直上と健全箇所における平均最大変位量の比較

空洞箇所と健全箇所では明確な違いが見られなかった。

2.2.5 路面下空洞陥没危険度評価への路面たわみ計測の適用性について

各計測地点の空洞部および健全部の路面変位を表-6.3.1に整理する。

表-2.2.8 路面変位量と陥没危険度

路線No- 異常番号	路線状況	陥没危険度			陥没 リスク	平均変位量(μm)						路面変位増加率		
		一次	二次			空洞部			健全部			空洞部/健全部		
						載荷中心	100mm	200mm	載荷中心	100mm	200mm	載荷中心	100mm	200mm
17-005	河川沿い	A	A		II	383	160	100	410	144	93	0.934	1.111	1.075
17-009	河川沿い	A	緊急		II	306	163	128	232	75	60	1.319	2.173	2.133
17-010	幹線道路	B	B		III	288	132	84	261	22	17	1.103	6.000	4.941
20-002	緊急輸送路	B	B		II	162	22	20	197	16	7	0.822	1.375	2.857

路面変位増加率 R は空洞部の変位量 δ_v を健全部の変位量 δ_s で割ったもので空洞部と健全部の路面変位の増加割合を示すものである。

$$R = \delta_v / \delta_s$$

この路面変位増加率は、増加率と空洞部の強度は逆比例の関係にあると考えられることから、この値の大きいものは、陥没リスクが大きいと考えられる。

計測件数が4件と少ないが、二次調査で緊急と評価された17-009の空洞の増加率が最も大きく、陥没危険度を評価する指標となると考える。

一方、17-005、20-002は、 $R=0.934$ と1を下回っており、空洞部の強度低下が小さいと考えられる。

また、17-010は陥没リスクがIIIと評価されているが、空洞部の強度低下がみられ、評価よりも、陥没リスクが高くなっている可能性がある。

以上のように、FWDを使って、空洞部と健全部の路面動変位を比較することで、空洞の陥没危険度を路面変位増加率 R でランク付けし、対策優先度を決定する際の参考となる可能性もあると考える。

さらに、今回は計測できなかった通行車両による路面変位を計測する手法を確立することができれば、より簡易に空洞の危険度評価が可能となると考える。

3. 路面たわみ量と路面下空洞陥没危険度（FEM解析）

3.1 目的

空洞規模や空洞断面形状の違いによる、路面下空洞箇所の陥没危険度と荷重載荷時の路面たわみ量の関係を解析的に求める。

3.2 解析ケース

(1) 空洞断面形状

本解析では、図-3.2.1に示すように半円形の空洞および四角形の空洞を対象に解析を行った。

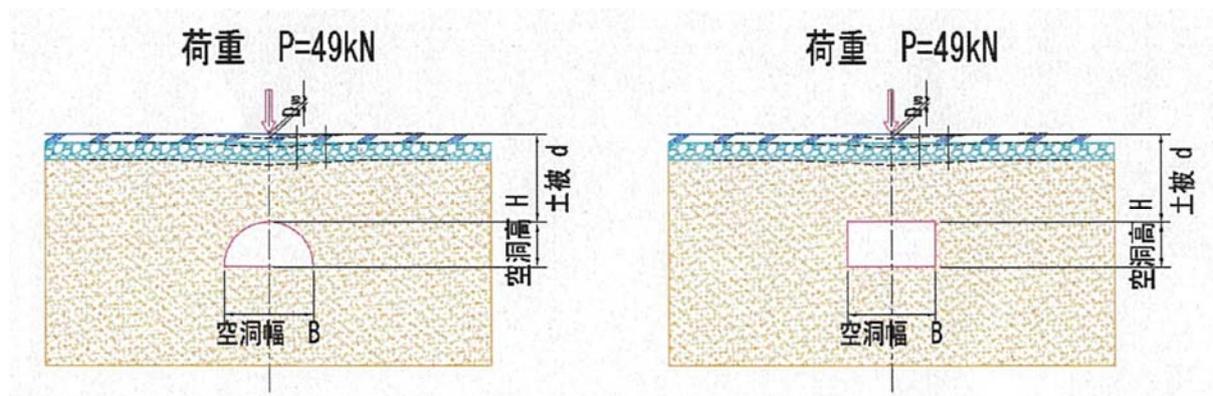


図-3.2.1 空洞形状

(2) 形状規模

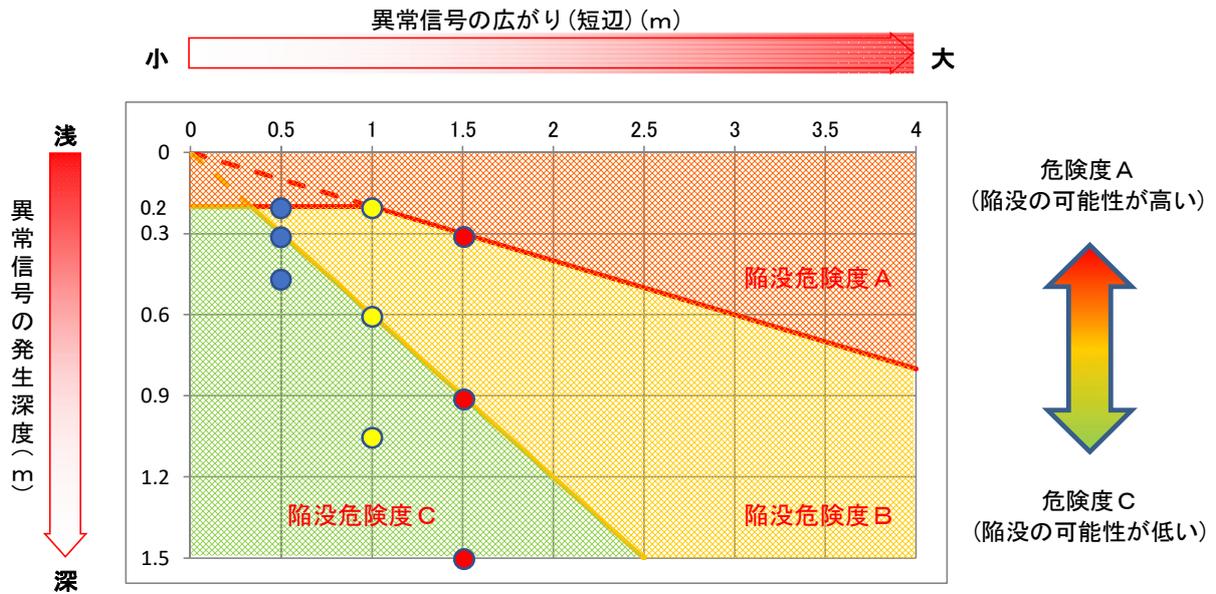
上記の2つ空洞形状に対して、空洞の短辺方向幅と空洞深度を変えながら解析を実施した。空洞の形状および規模の組合せは表-3.2.1とした。

表-3.2.1 形状規模組合せ

組合せ 番号	空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)	発生深度 d(m)		
			1	2	3
① (○)	0.50	0.25	0.20	0.30	0.50
② (□)	1.00	0.50	0.20	0.60	1.00
③ (□)	1.50	0.75	0.30	0.90	1.50

※ ①, ②, ③: 半円形, □, □, □: 四角形

半円形空洞および四角形空洞それぞれにおいての各9ケースの解析に空洞のない1ケースを加え、総19ケースの解析を行った。各解析ケースを表-3.2.2にまとめた。また、それぞれの空洞を一般社団法人全国地質調査業協会連合会の「路面下空洞探査技術マニュアル(案),平成29年9月」の危険度評価(図-3.2.2)に基づいて評価した結果も示している。



※ ○: 本解析の対象空洞の幅と発生深度

図-3.2.2 路面陥没発生危険度評価 (一般社団法人全国地質調査業協会連合会)

表-3.2.2 解析ケース

解析ケース		空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)	発生深度 d(m)	危険度評価 (図-2 参照)
空洞なし	N	-	-	-	-
半円形 空洞	①-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A
	①-2	0.50	0.25	0.30	陥没危険度 B
	①-3	0.50	0.25	0.50	陥没危険度 C
	②-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A
	②-2	1.00	0.50	0.60	陥没危険度 B
	②-3	1.00	0.50	1.00	陥没危険度 C
	③-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A
	③-2	1.50	0.75	0.90	陥没危険度 B
	③-3	1.50	0.75	1.50	陥没危険度 C
四角形 空洞	□-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A
	□-2	0.50	0.25	0.30	陥没危険度 B
	□-3	0.50	0.25	0.50	陥没危険度 C
	□-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A
	□-2	1.00	0.50	0.60	陥没危険度 B
	□-3	1.00	0.50	1.00	陥没危険度 C
	□-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A
	□-2	1.50	0.75	0.90	陥没危険度 B
	□-3	1.50	0.75	1.50	陥没危険度 C

3.3 解析方法

(1) 解析概要

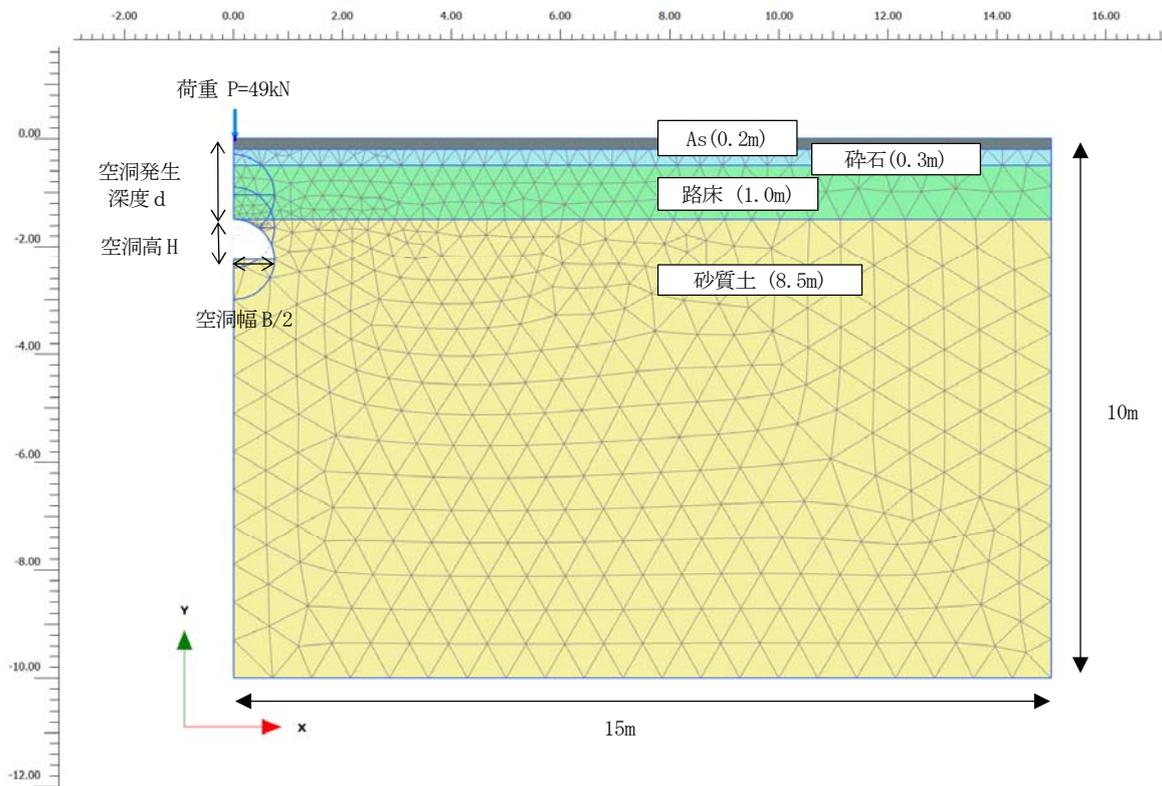
本解析では、汎用性が高い有限要素解析(FEM)プログラムである PLAXIS2D を用いて 2 次元地盤変形解析を実施した。FEM 数値解析により FWD 試験を再現し、路面のたわみ量を評価した。

(2) 解析モデル

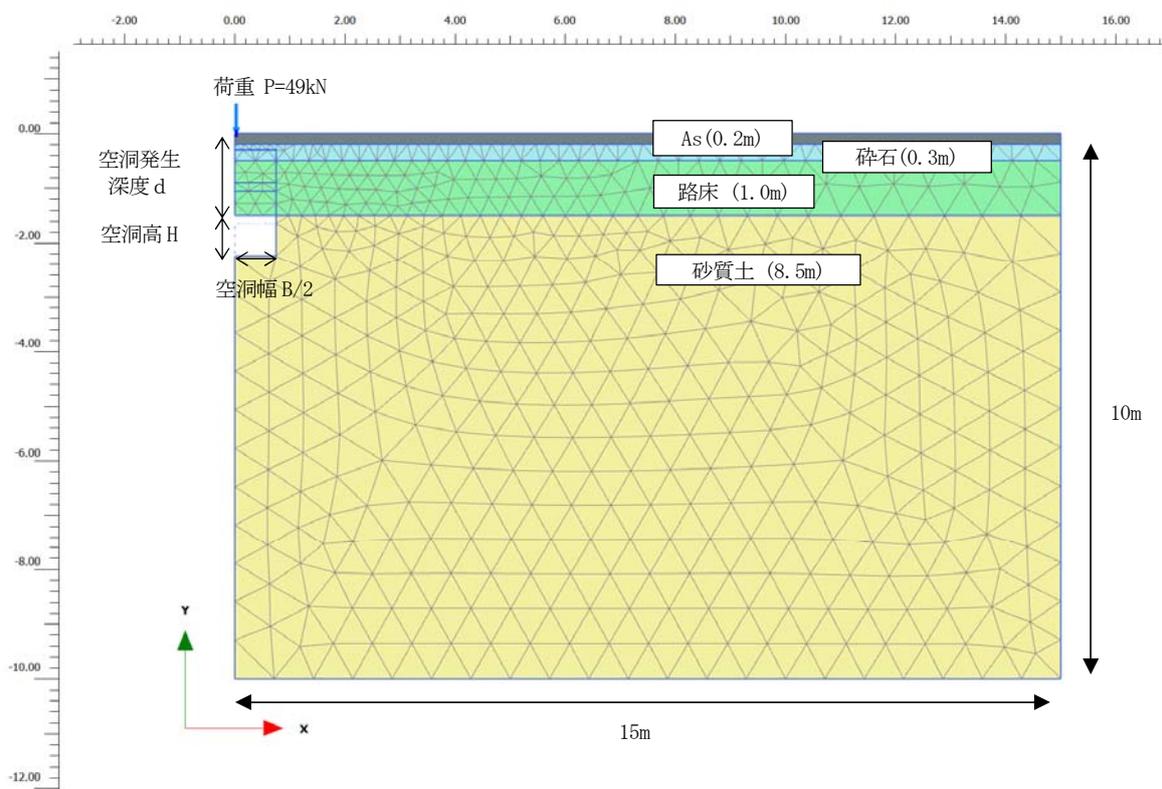
FEM 解析では、アスファルト(As)、砕石、路床、砂質土の地層を区別して解析モデルを作成した。各地層をソリッドエレメントでモデリングし、材料の構成モデルとしては、線形弾性-完全塑性モデルの Mohr-Coulomb モデルを採用した。一方、本検討での対象断面は、対称断面であるため判断面のみモデル化して解析を行った。また、全解析モデルの範囲は、境界部の影響のないように十分大きくした(幅=15m, 厚さ=10m)。図-3.3.1 に半円形空洞および四角形空洞の解析モデル例を示す。

(3) 境界条件

FEM 数値解析では、解析時間および精度のため、ある範囲の解析領域を作成し、解析モデルの側面および下部境界に適正な境界条件を設定する。本解析では、側面境界部に鉛直自由および水平拘束の境界条件を設定し、下部境界部には、水平変位と鉛直変位を固定する境界条件を設定した。



(a) 半円形空洞の解析モデルの例



(b) 四角形空洞の解析モデルの例

図-3.3.1 路解析モデル

(4) 地盤物性値

本解析で採用した地盤物性値を表-3.3.1 にまとめた。ちなみに、碎石、路床、砂質土層は、空洞が形成されるようにするため、ある程度の粘着力 (35kN/m²) を考慮した。

表-3.3.1 地盤物性値

区分	層厚 (m)	想定 N 値	単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	弾性係数 E(kN/m ²)	ポアソン比 ν	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 c(kN/m ²)
As	0.20	50	22.5	6,000,000	0.35	42	200
碎石	0.30	40	19.0	112,000	0.35	39	35
路床	1.00	35	19.0	100,000	0.35	38	35
砂質土	8.50	10	18.0	28,000	0.35	27	35

(5) 解析手順

本解析では、まず、地層をモデリングして初期応力条件を再現した。その後に当該解析ケースにおける空洞の規模および位置を反映して空洞を生成し、変位初期化を行った。最後に FWD 測定と同様に空洞の直上部に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。一方、空洞の無い条件に関しては、「Step ini」の初期応力条件を再現した後に変位初期化をして (Step 1 省略)、荷重を載荷して解析を行った。

Step ini : 地層および地盤条件モデリング

Step 1 : 空洞の生成 → 変位初期化

Step 2 : 荷重載荷

3.4 解析結果

(1) 最大たわみ量

表-3.4.1に全解析ケースにおける最大たわみ量をまとめた。また、空洞のないケース(N)に対するたわみ量の比(各ケースのたわみ量/空洞のないケースのたわみ量)を示す。この結果から、半円形の空洞より四角形空洞の場合、たわみ量が大きいことが分かる。また、同じ形状(幅と高さ)の空洞である場合、発生深度が浅いほど、たわみ量が大きくなることが確認できた。

ちなみに、四角形空洞において【㊶-1】および【㊷-1】ケースは、荷重載荷段階で、収束ができなかった。この結果から、【㊶-1】および【㊷-1】空洞は、陥没の危険度が比較的高い可能性があると考えられる。

表-3.4.1 最大たわみ量のまとめ

解析 ケース	空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)	発生深度 d(m)	危険度評価 (図-2 参照)	最大たわみ量 (mm)	たわみ比
N	-	-	-	-	-1.96	1
①-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A	-2.28	1.16
①-2	0.50	0.25	0.30	陥没危険度 B	-2.24	1.14
①-3	0.50	0.25	0.50	陥没危険度 C	-2.17	1.11
②-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A	-3.11	1.58
②-2	1.00	0.50	0.60	陥没危険度 B	-2.52	1.28
②-3	1.00	0.50	1.00	陥没危険度 C	-2.40	1.23
③-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A	-3.62	1.85
③-2	1.50	0.75	0.90	陥没危険度 B	-2.78	1.42
③-3	1.50	0.75	1.50	陥没危険度 C	-2.59	1.32
㊶-1	0.50	0.25	0.20	陥没危険度 A	-2.46	1.26
㊶-2	0.50	0.25	0.30	陥没危険度 B	-2.39	1.22
㊶-3	0.50	0.25	0.50	陥没危険度 C	-2.19	1.12
㊷-1	1.00	0.50	0.20	陥没危険度 A	×	×
㊷-2	1.00	0.50	0.60	陥没危険度 B	-2.87	1.46
㊷-3	1.00	0.50	1.00	陥没危険度 C	-2.51	1.28
㊸-1	1.50	0.75	0.30	陥没危険度 A	×	×
㊸-2	1.50	0.75	0.90	陥没危険度 B	-3.48	1.78
㊸-3	1.50	0.75	1.50	陥没危険度 C	-2.90	1.48

(2) たわみ量

図-3.4.1 と図-3.4.2 それぞれに半円形空洞および四角形空洞における載荷時の地表面のたわみを示す。

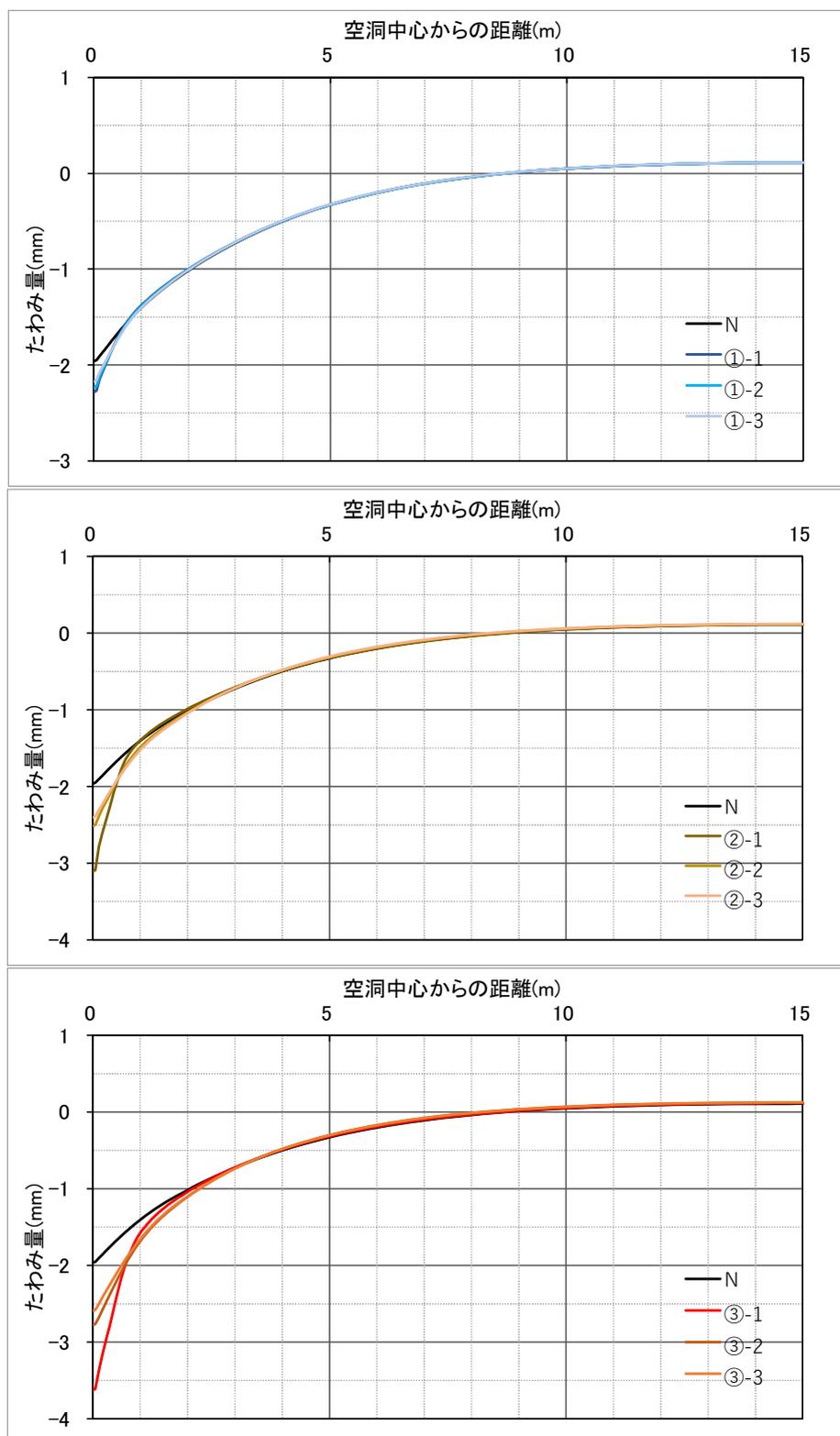


図-3.4.1 半円形空洞における載荷時のたわみ

(上 : B=0.50m, H=0.25m, 中 : B=1.00m, H=50m, 下 : B=1.50m, H=75m)

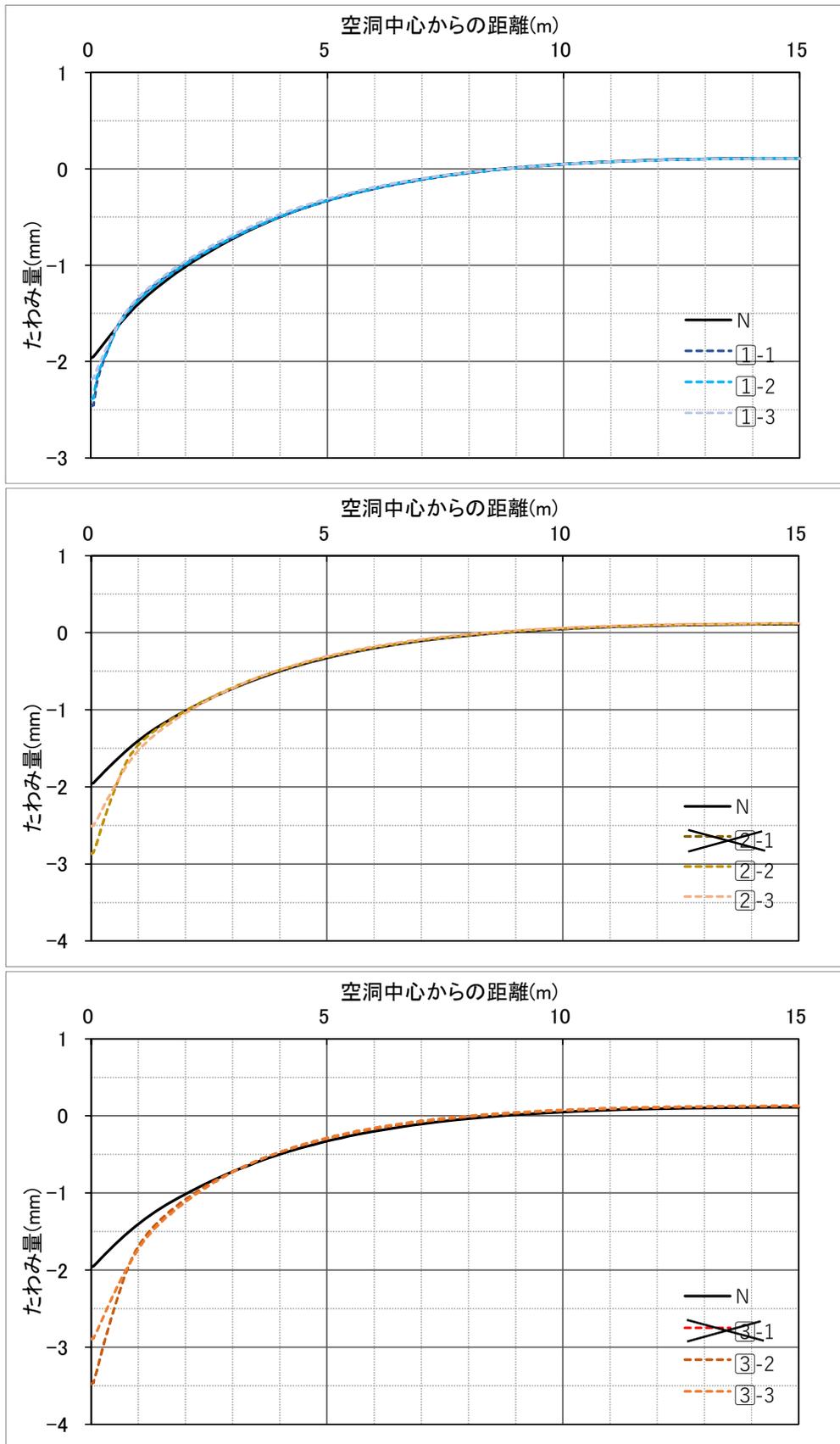


図-3.4.2 四角形空洞における載荷時のたわみ

(上 : B=0.50m, H=0.25m, 中 : B=1.00m, H=50m, 下 : B=1.50m, H=75m)

3.5 考察

半円形断面と四角形断面たわみ量を比較するため、各土被りでの空洞部の路面たわみ量を空洞周辺の健全部路面たわみ量で割った値である「路面たわみ量増加率」を計算した。

路面たわみ増加率 R は空洞部の変位量 D_{v0} を健全部の変位量 D_{s0} で割ったもの(図-3.5.1)で空洞部と健全部の路面変位の増加割合を示すものである。

$$R = D_{s0} / D_{v0}$$

この路面変位増加率は、増加率と空洞部の強度は逆比例の関係にあると考えられることから、この値の大きいものは、陥没リスクが大きいと考えられる。

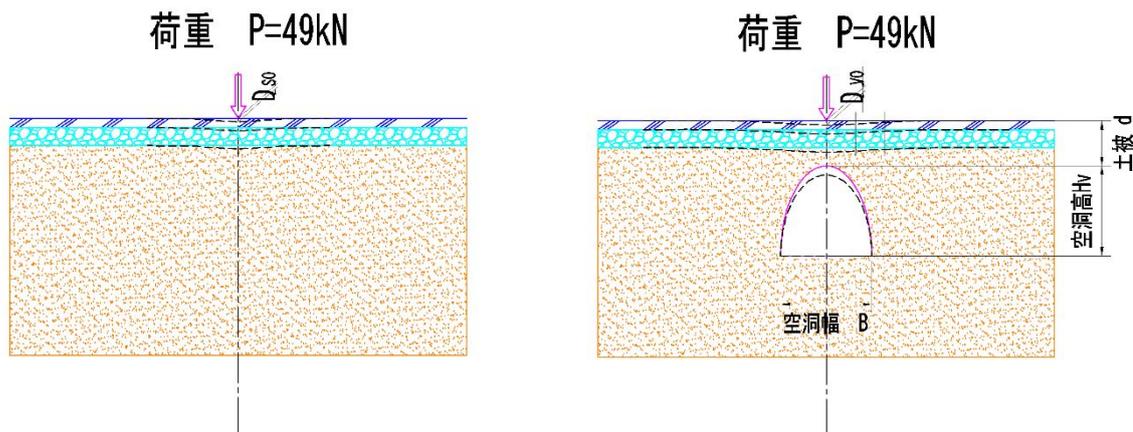


図-3.5.1 路面たわみ量増加率

たわみ量増加率を表-3.5.1に整理した。

陥没危険度評価の際の指標である空洞幅(空洞短辺長)、発生深度が同じである同一の陥没危険度において、空洞形状によって「たわみ量増加量 R 」は1割程度異なっており、例えばBランクと評価された空洞がAランク相当の陥没危険度である可能性を示すものであると考えられる。

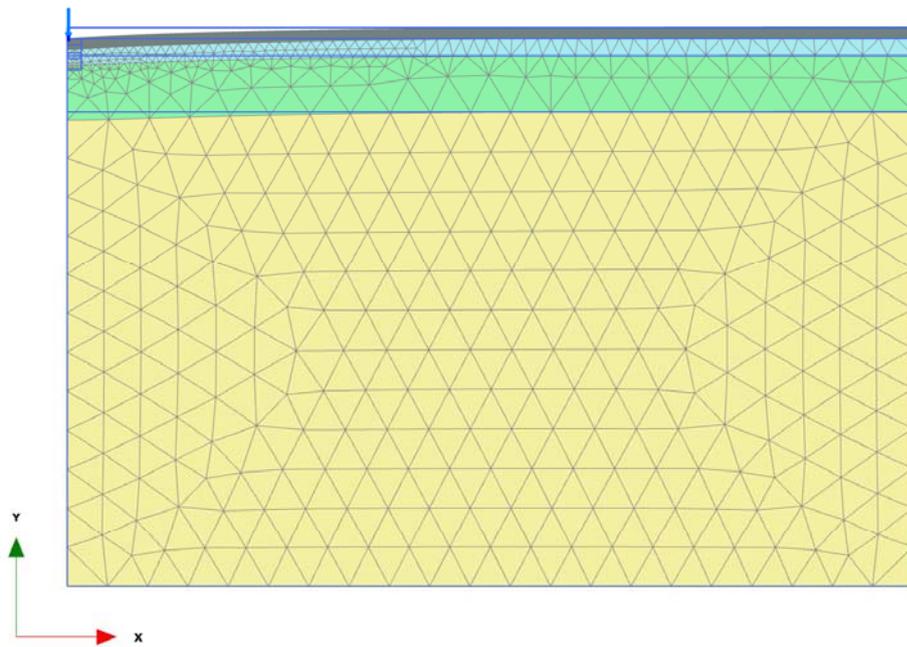
したがって、現在の空洞調査については、路面たわみ量の計測手で空洞の実際の耐力を評価することによって、陥没危険度を合理的に評価することが必要であると考えられる。

表-3.5.1 空洞形状によるたわみ量増加率の違い

解析 ケース	空洞幅 B(m)	空洞高 H(m)	発生深度 d(m)	危険度評価 (図-2参照)	半円空洞		矩形空洞	
					最大たわみ量 (mm)	たわみ比	最大たわみ量 (mm)	たわみ比
健全部	-	-	-	-	-1.96	1.00	-1.96	1.00
①-1	0.5	0.25	0.2	陥没危険度A	-2.28	1.16	-2.46	1.26
①-2			0.3	陥没危険度B	-2.24	1.14	-2.39	1.22
①-3			0.5	陥没危険度C	-2.17	1.11	-2.19	1.12
②-1	1.0	0.5	0.2	陥没危険度A	-3.11	1.59	×	×
②-2			0.6	陥没危険度B	-2.52	1.29	-2.87	1.46
②-3			1	陥没危険度C	-2.4	1.22	-2.51	1.28
③-1	1.5	0.75	0.3	陥没危険度A	-3.62	1.85	×	×
③-2			0.9	陥没危険度B	-2.78	1.42	-3.48	1.78
③-3			1.5	陥没危険度C	-2.59	1.32	-2.90	1.48

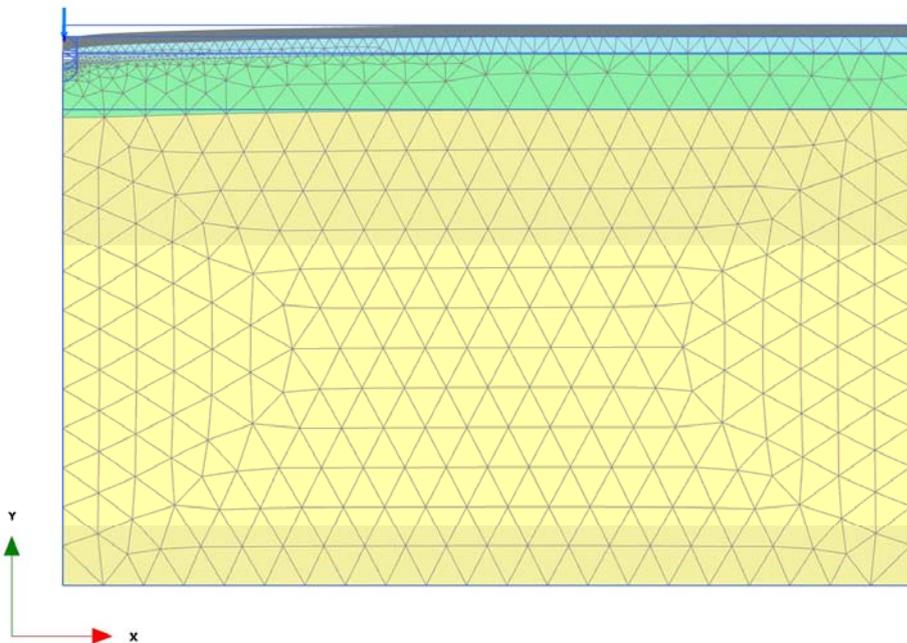
解析結果

(1) 変形図 (スケール : 100 倍)



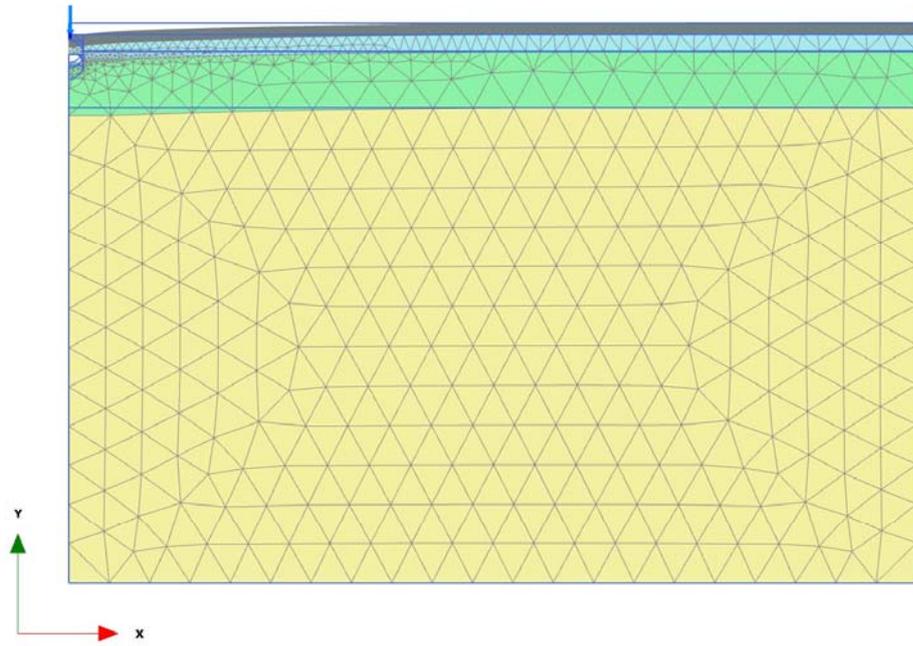
変形図 $|u|$ (縮尺 100 倍)
最大値 = 1.960×10^{-3} m (要素 195 at 節点 4)

図-3.5.2 空洞のないケース N



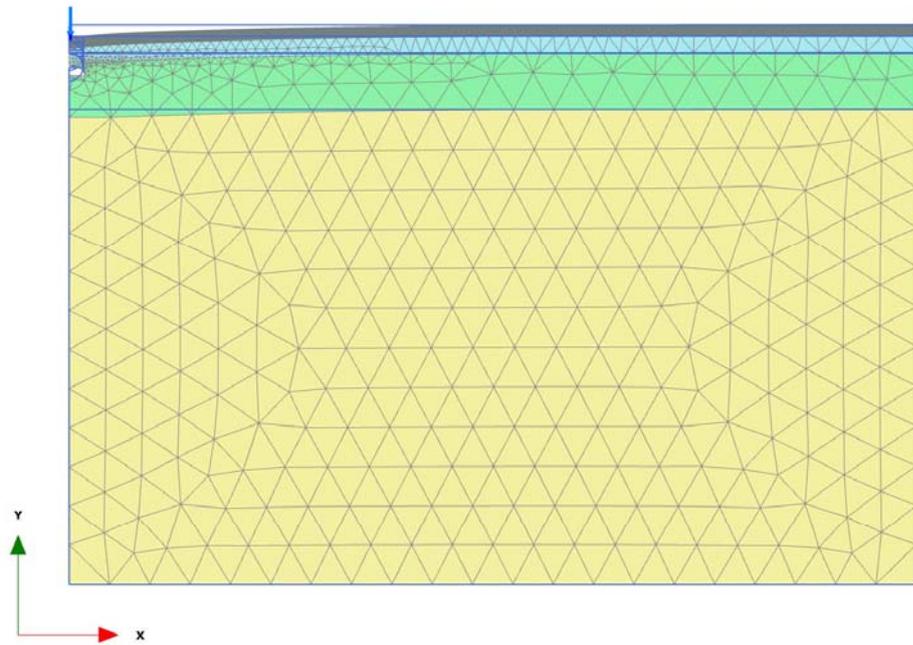
変形図 $|u|$ (縮尺 100 倍)
最大値 = 2.290×10^{-3} m (要素 186 at 節点 49)

図-3.5.3 半円形空洞①-1 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.20$)



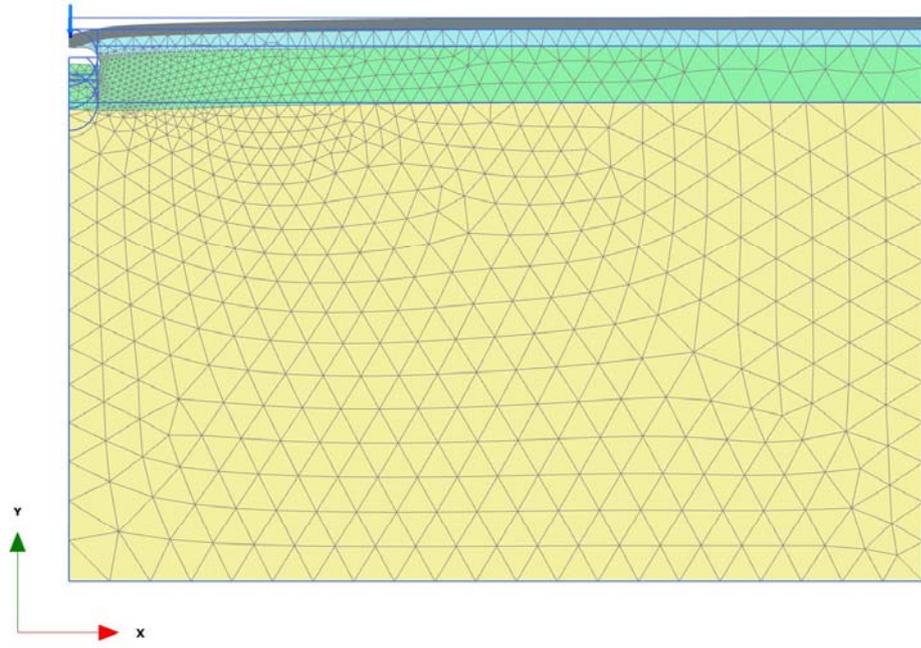
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 2.409×10^{-3} m (要素 510 at 節点 198)

图-3.5.4 半円形空洞①-2 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.30$)



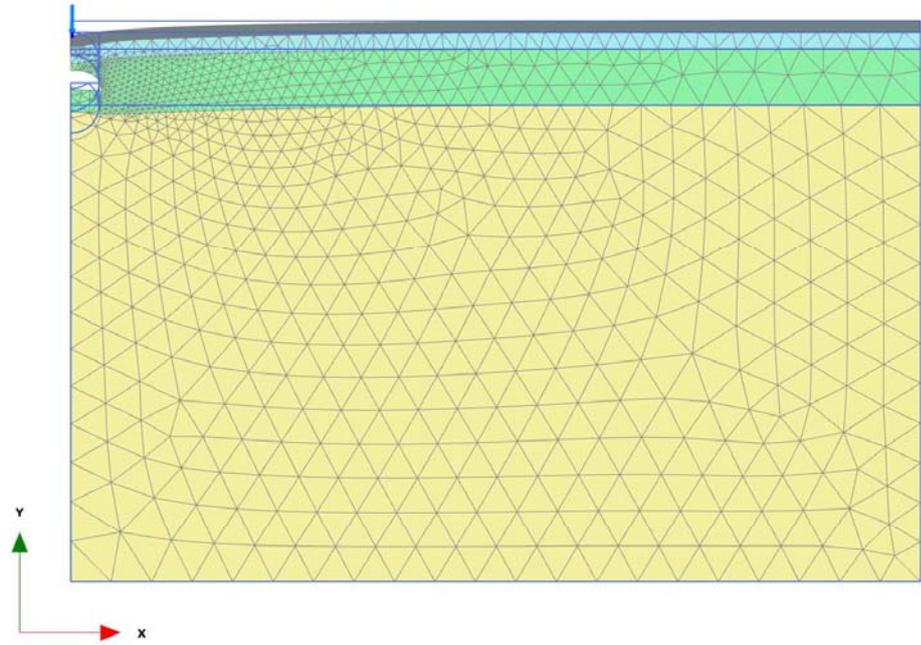
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 2.277×10^{-3} m (要素 537 at 節点 719)

图-3.5.5 半円形空洞①-3 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.50$)



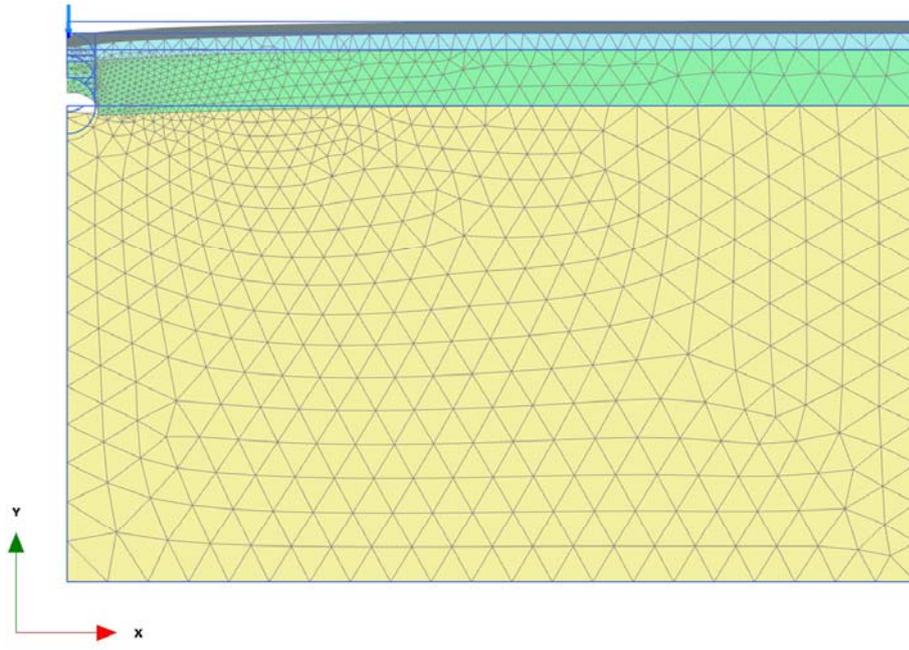
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 3.283×10^{-3} m (要素 184 at 節点 181)

图-3.5.6 半円形空洞②-1 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=0.20$)



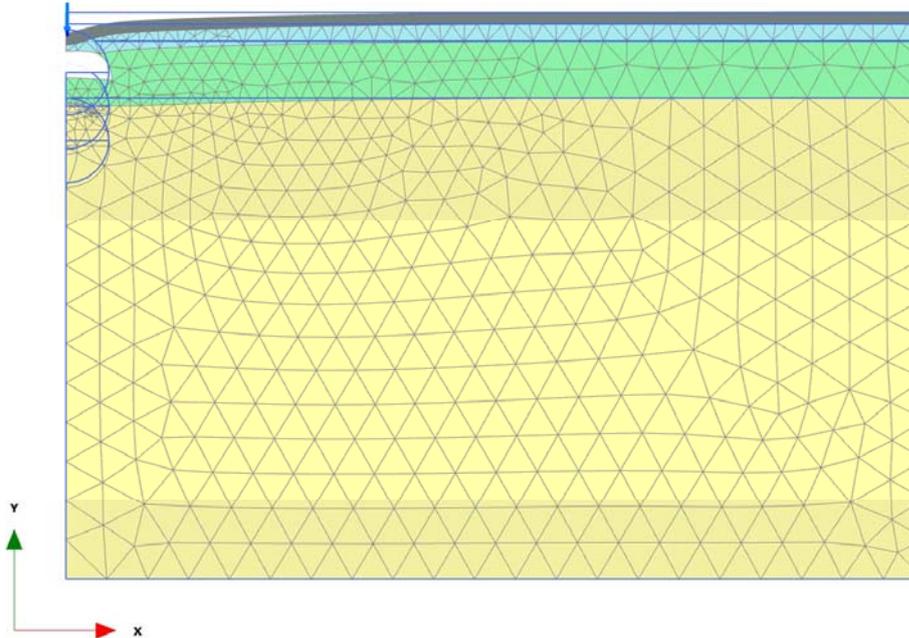
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 2.780×10^{-3} m (要素 386 at 節点 2157)

图-3.5.7 半円形空洞②-2 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=0.60$)



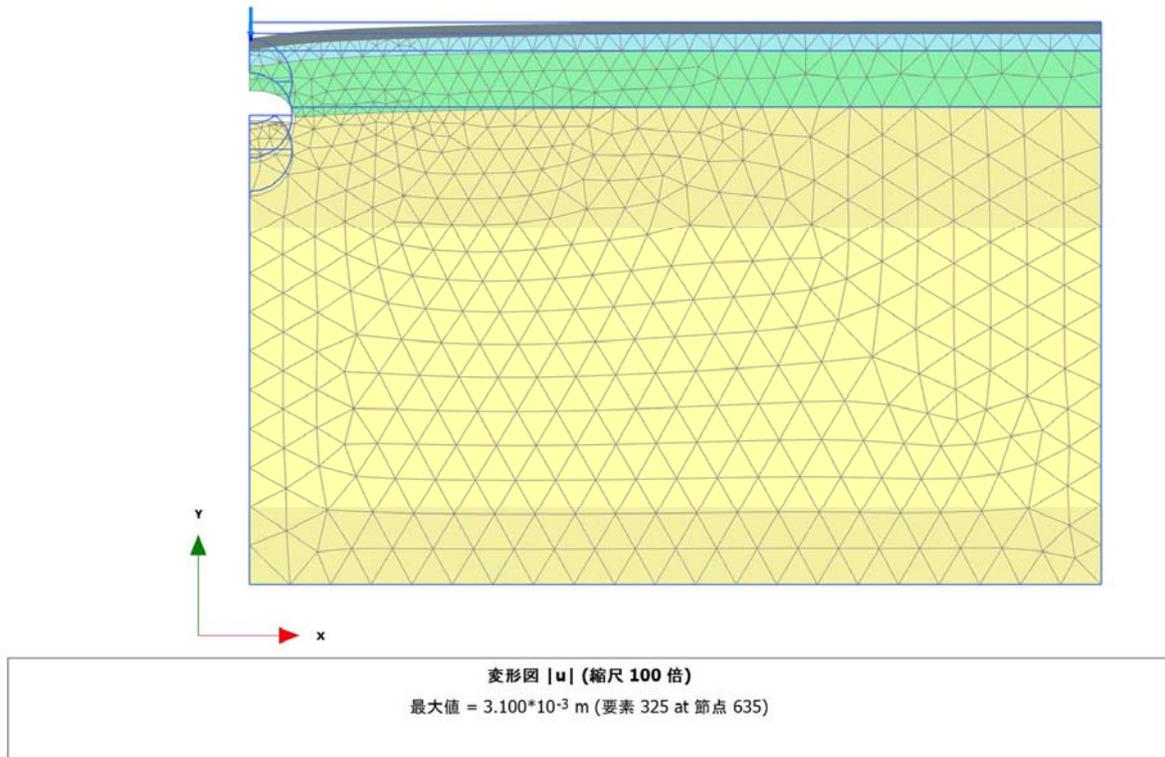
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 2.686×10^{-3} m (要素 458 at 節点 4171)

图-3.5.8 半円形空洞②-3 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=1.00$)

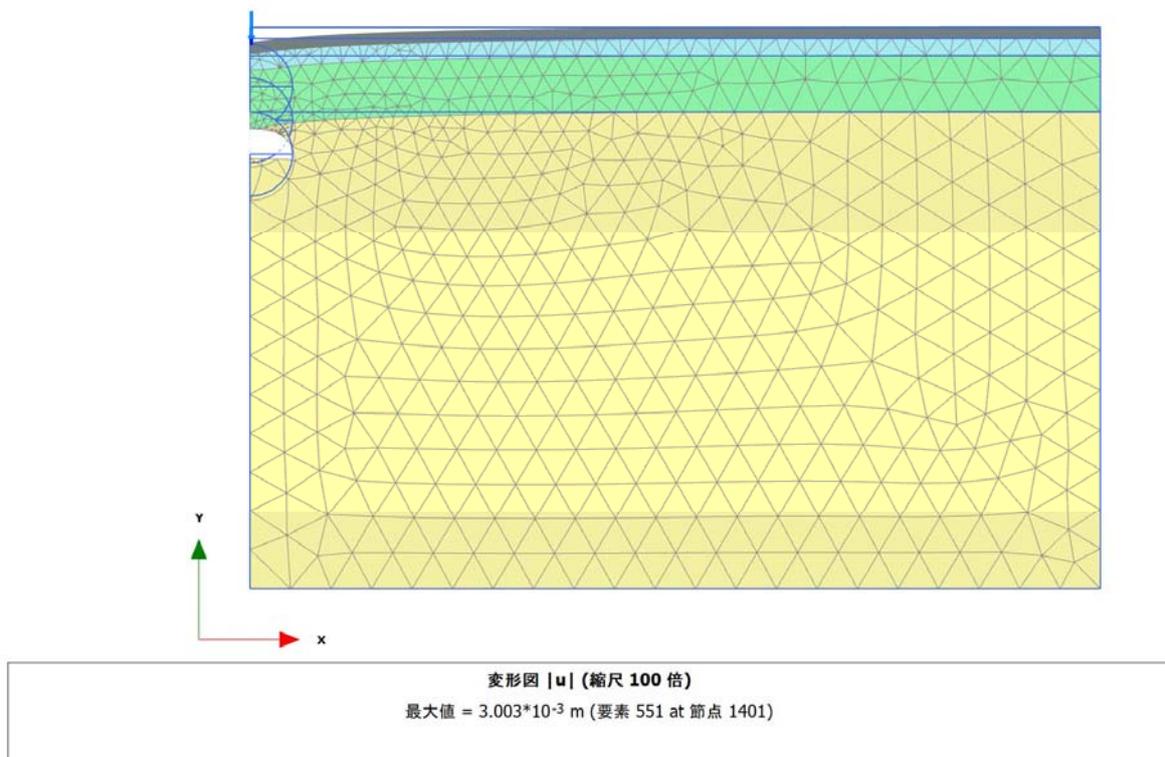


变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 3.824×10^{-3} m (要素 302 at 節点 306)

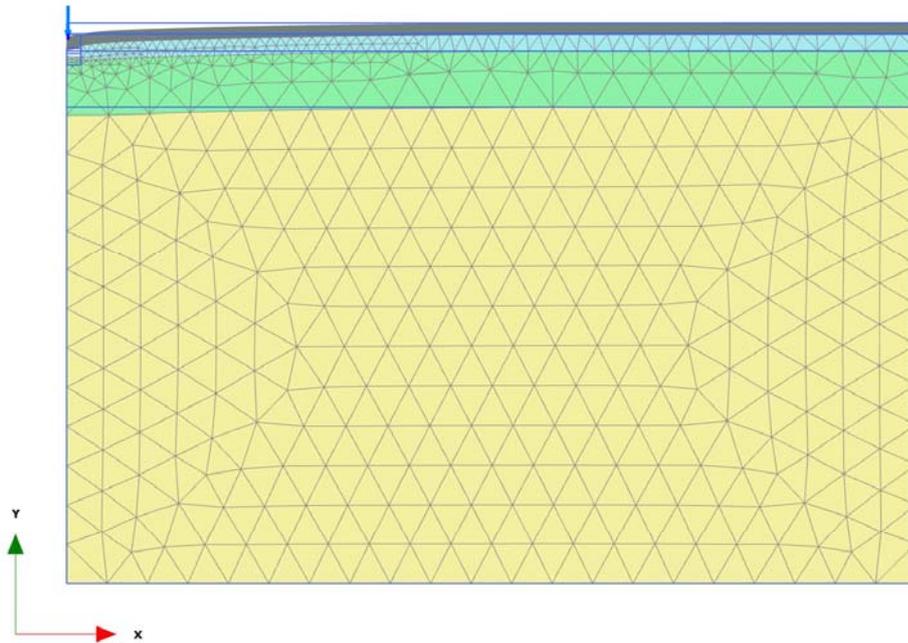
图-3.5.9 半円形空洞③-1 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=0.30$)



图—3.5.10 半円形空洞③-2 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=0.90$)

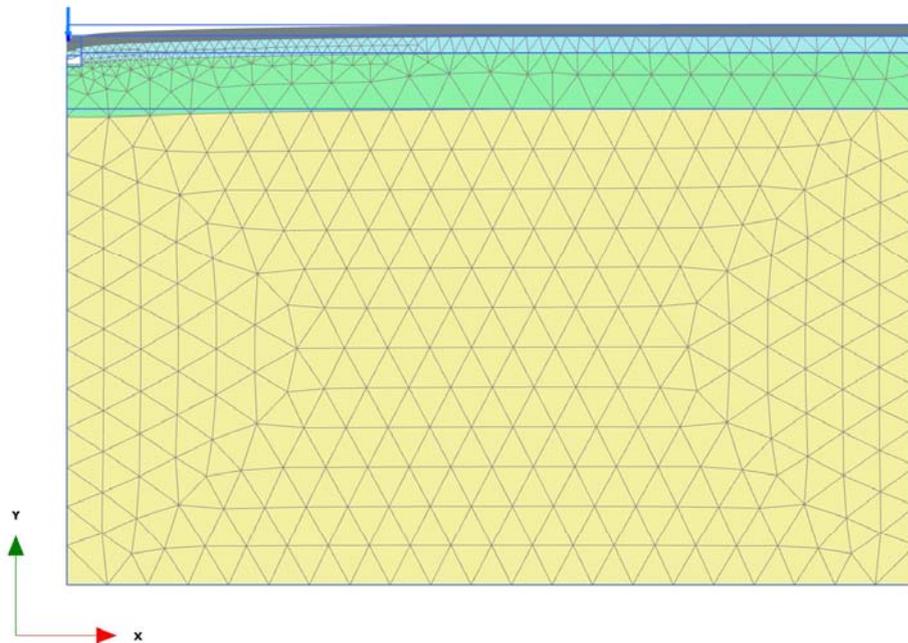


图—3.5.11 半円形空洞③-3 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=1.50$)



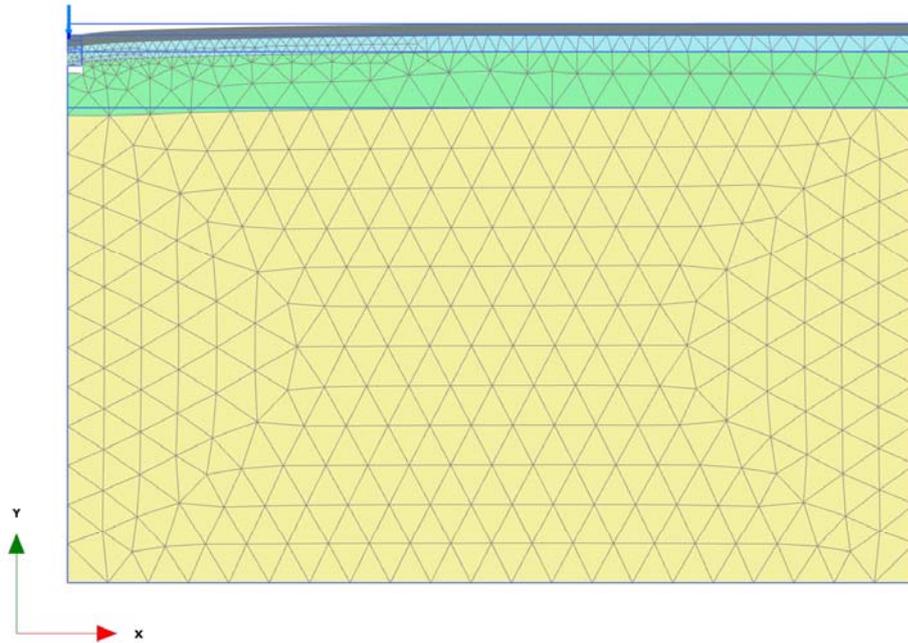
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 2.767×10^{-3} m (要素 151 at 節点 79)

图-3.5.12 四角形空洞 \square -1 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.20$)



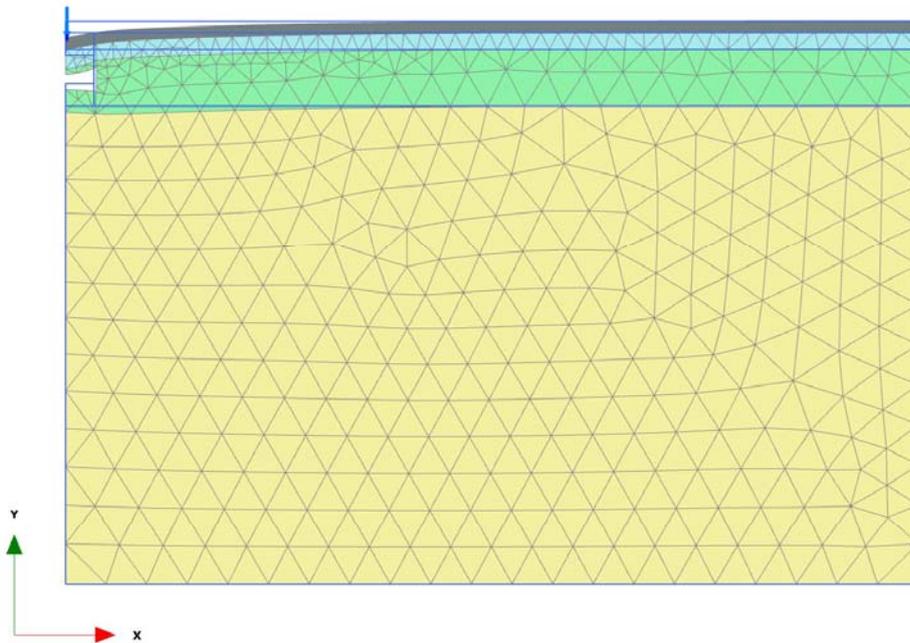
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 3.248×10^{-3} m (要素 201 at 節点 185)

图-3.5.13 四角形空洞 \square -2 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.30$)



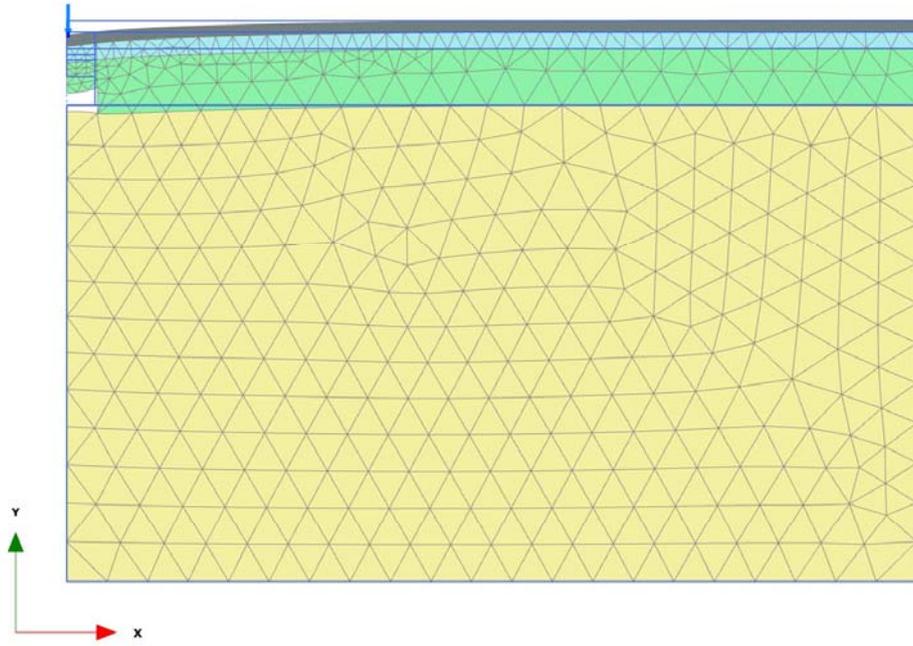
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = $2.383 \cdot 10^{-3}$ m (要素 441 at 節点 603)

图-3.5.14 四角形空洞 \square -3 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.50$)



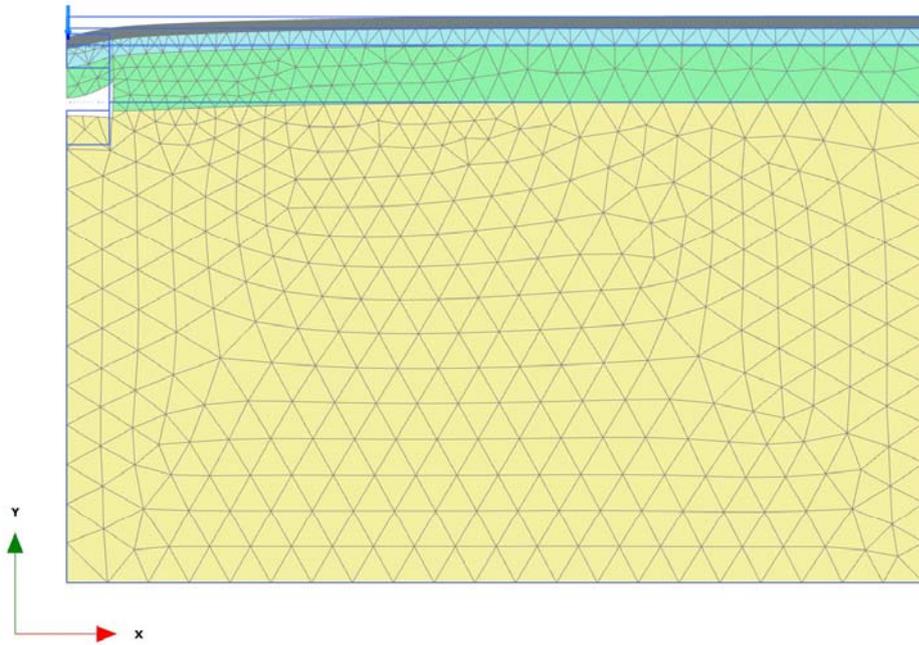
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = $3.394 \cdot 10^{-3}$ m (要素 295 at 節点 8046)

图-3.5.15 四角形空洞 \square -2 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=0.60$)



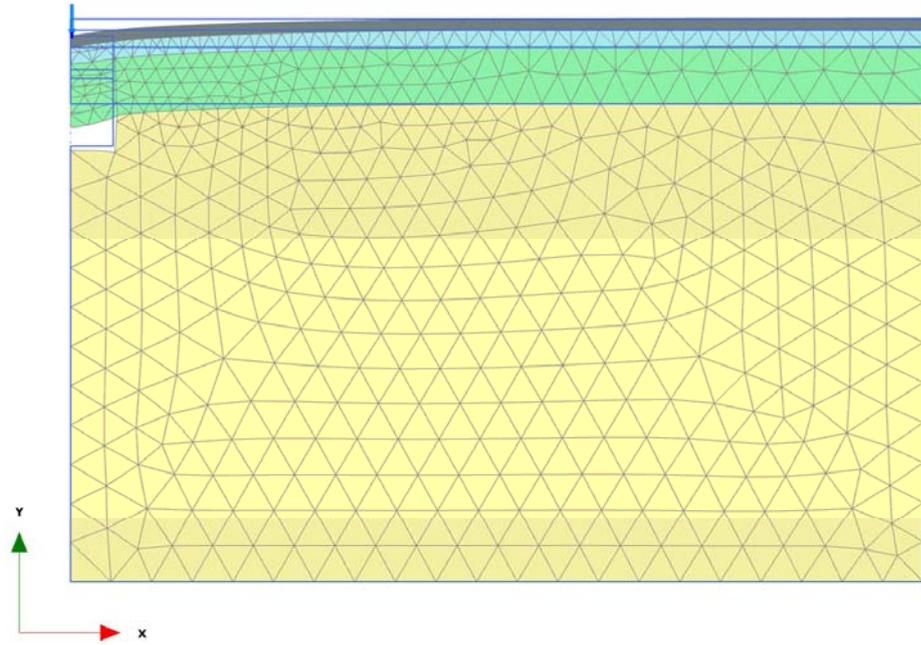
变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 2.844×10^{-3} m (要素 309 at 節点 7509)

图-3.5.16 四角形空洞 C2-3 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=1.00$)



变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 5.305×10^{-3} m (要素 329 at 節点 811)

图-3.5.17 四角形空洞 C3-2 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=0.90$)



变形图 $|u|$ (縮尺 100 倍)
 最大值 = 4.146×10^{-3} m (要素 538 at 節点 1603)

图-3.5.18 四角形空洞 C3 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=1.50$)

(2) 鉛直変位コンター図

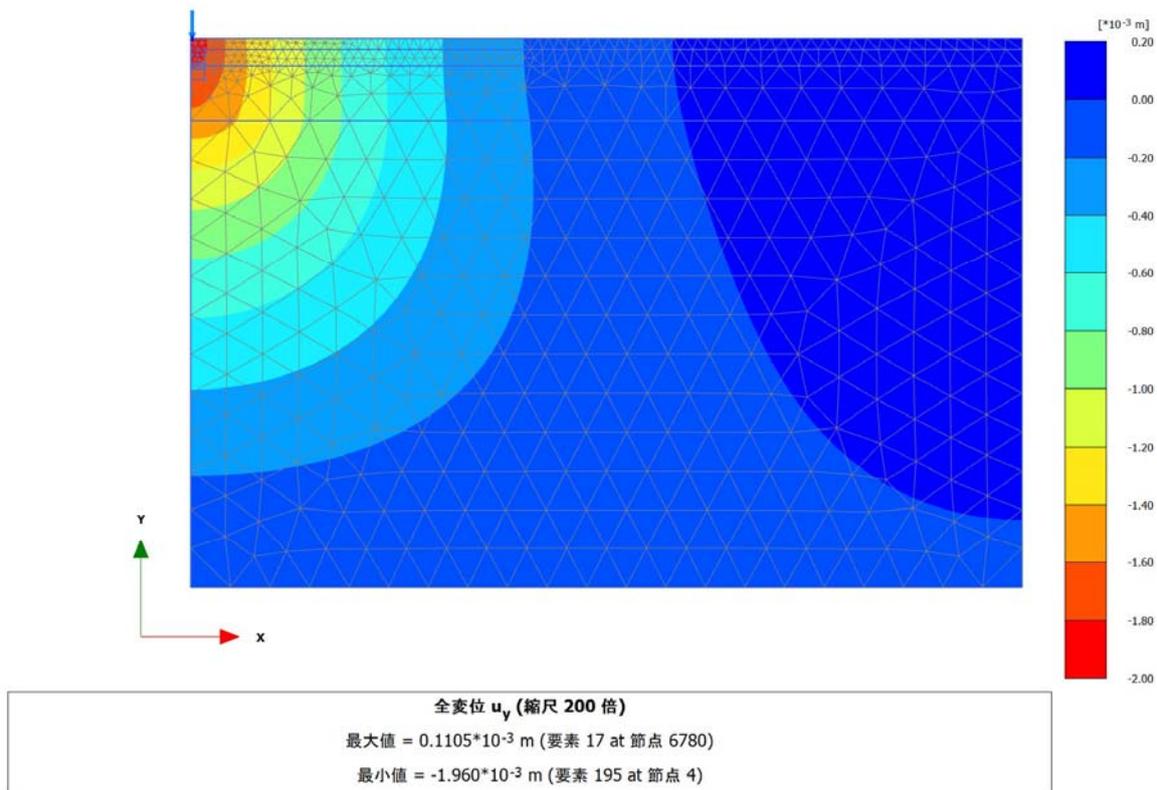


図-3.5.19 空洞のないケース N

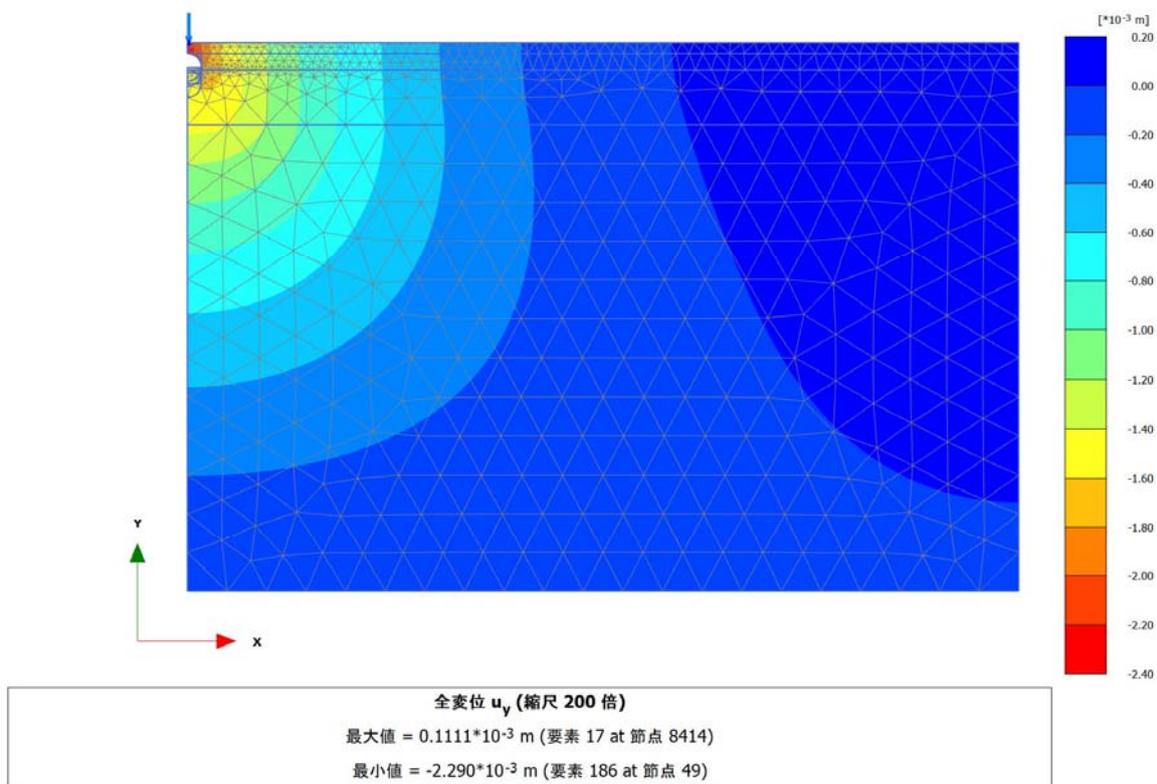


図-3.5.20 半円形空洞①-1 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.20$)

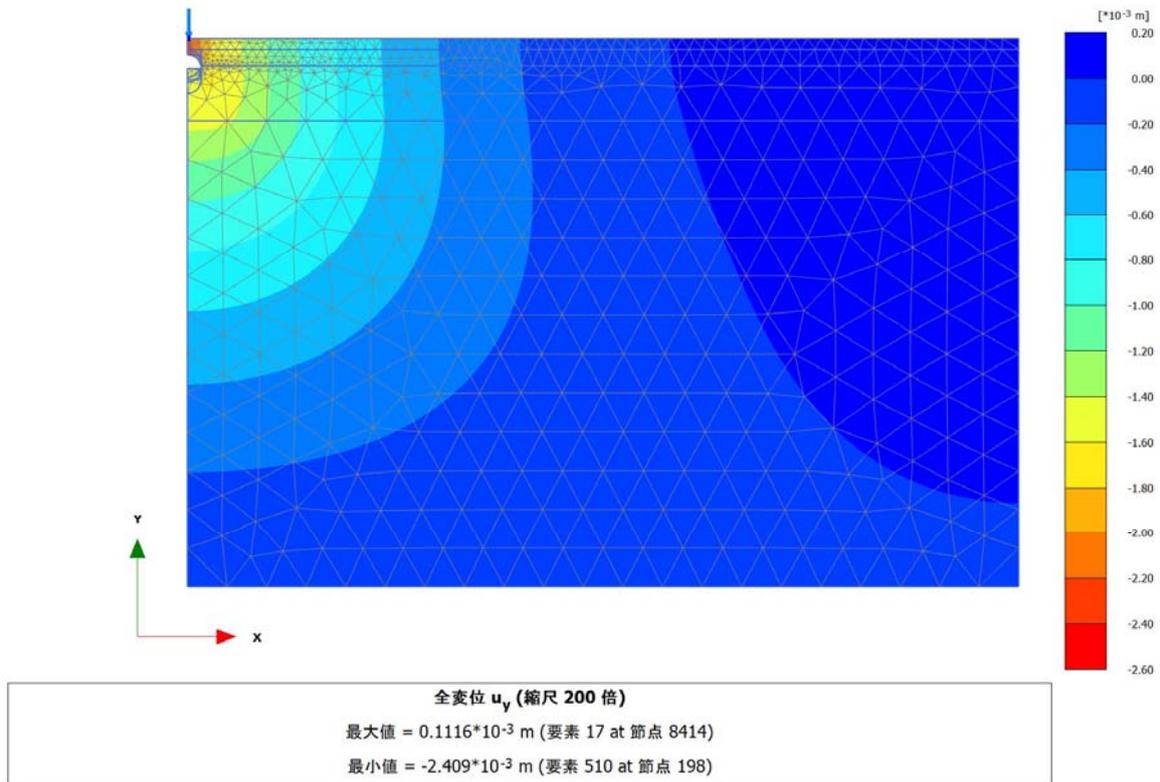


図-3.5.21 半円形空洞①-2 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.30$)

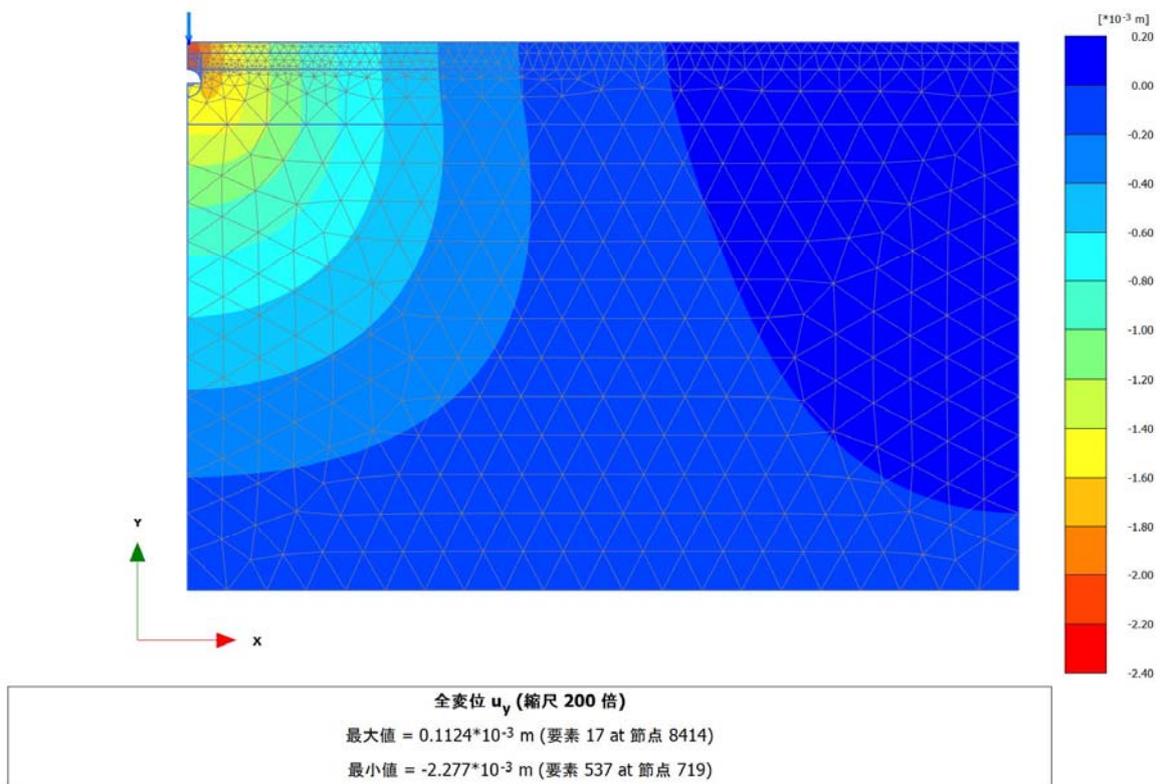
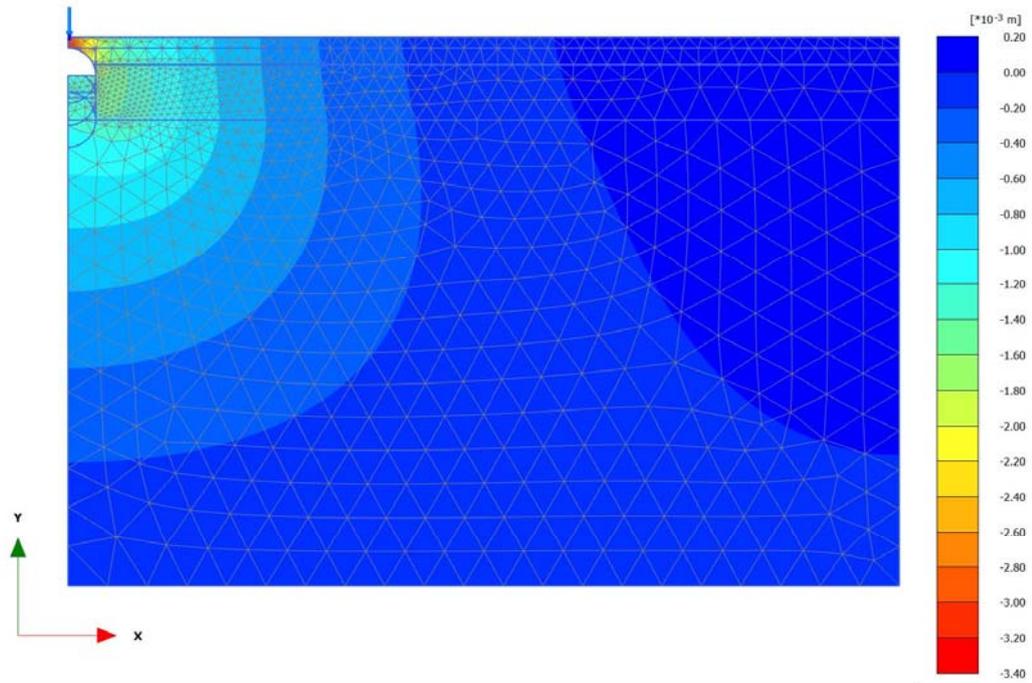
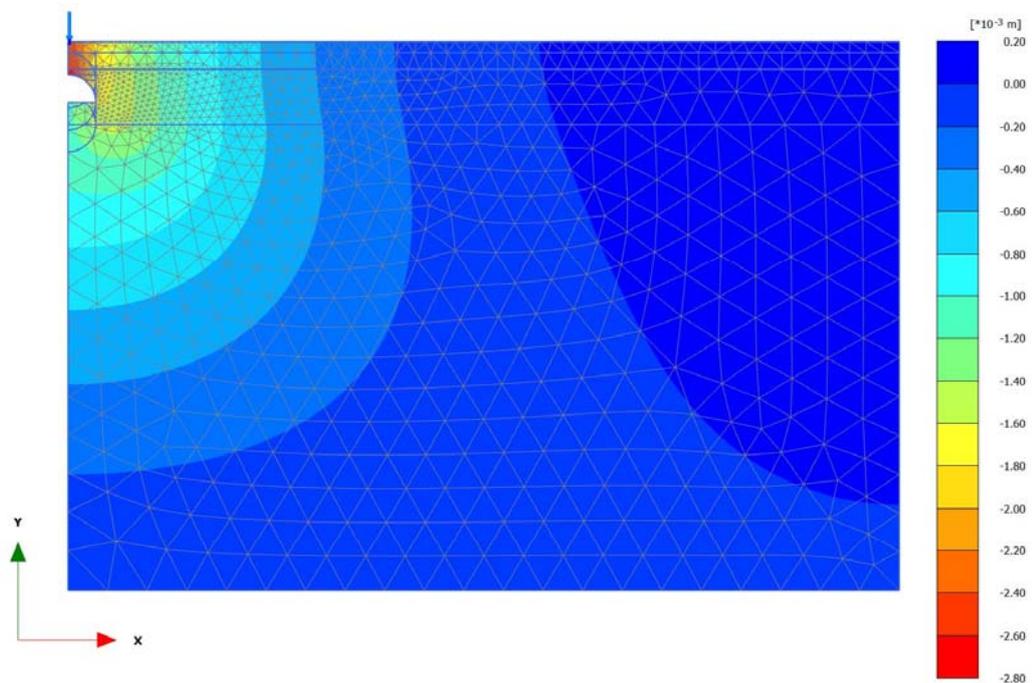


図-3.5.22 半円形空洞①-3 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.50$)



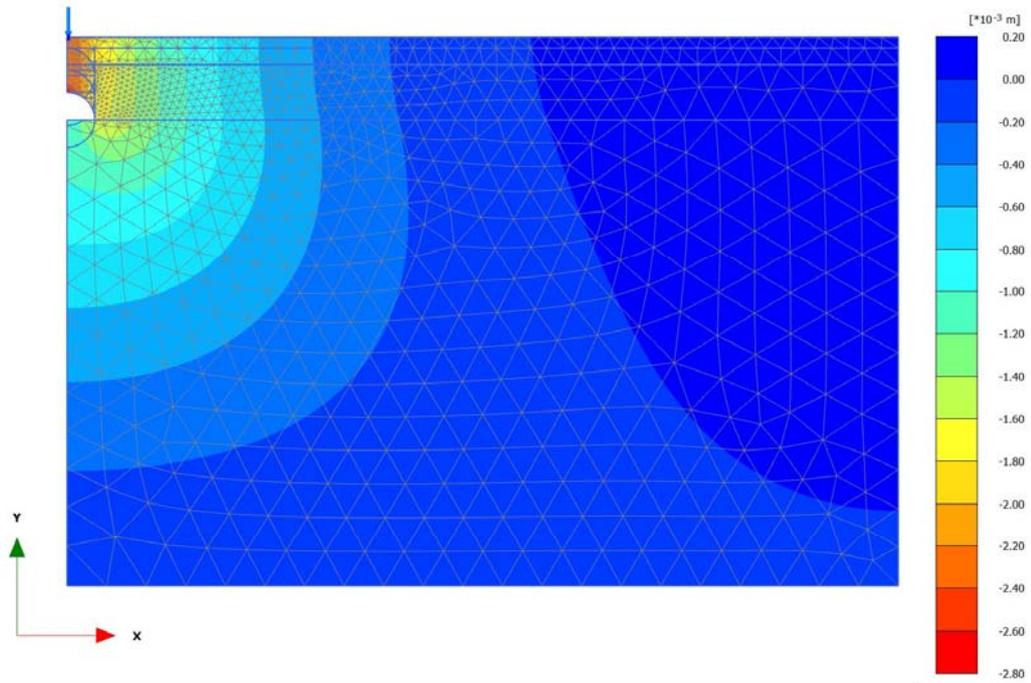
全変位 u_y (縮尺 200 倍)
 最大値 = $0.1120 \cdot 10^{-3}$ m (要素 62 at 節点 16575)
 最小値 = $-3.280 \cdot 10^{-3}$ m (要素 184 at 節点 181)

图-3.5.23 半円形空洞②-1 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=0.20$)



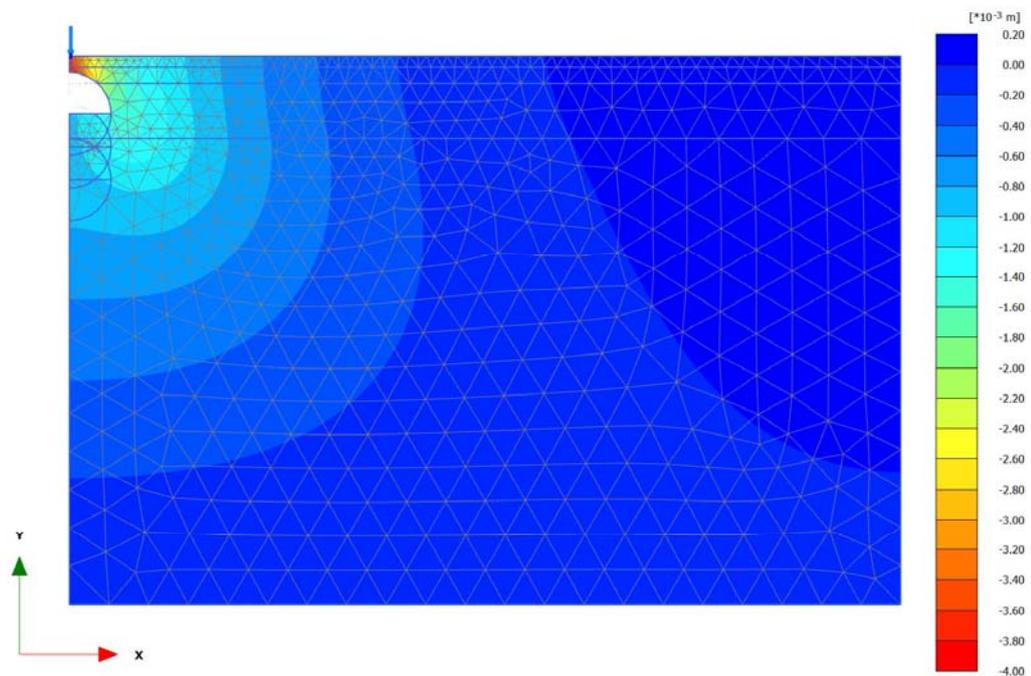
全変位 u_y (縮尺 200 倍)
 最大値 = $0.1161 \cdot 10^{-3}$ m (要素 62 at 節点 16575)
 最小値 = $-2.780 \cdot 10^{-3}$ m (要素 386 at 節点 2157)

图-3.5.24 半円形空洞②-2 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=0.60$)



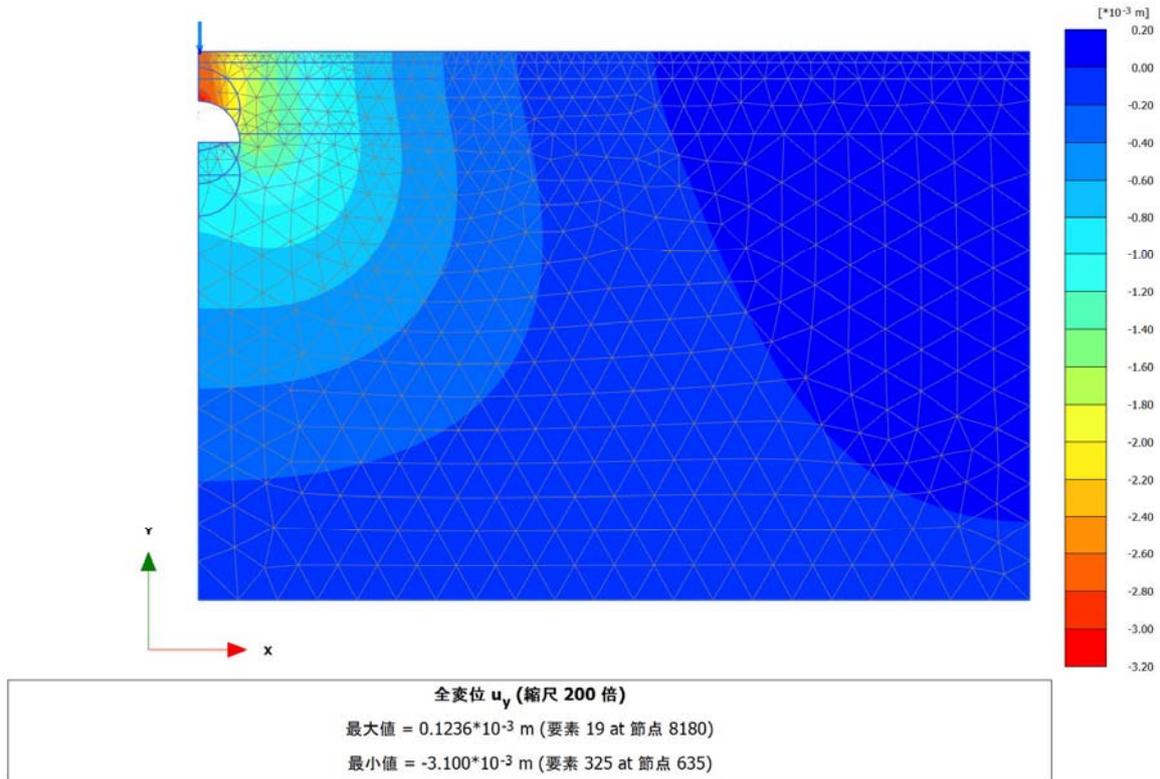
全变位 u_y (縮尺 200 倍)
 最大值 = 0.1182×10^{-3} m (要素 62 at 節点 16575)
 最小値 = -2.686×10^{-3} m (要素 458 at 節点 4171)

图—3.5.25 半円形空洞②-3 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=1.00$)

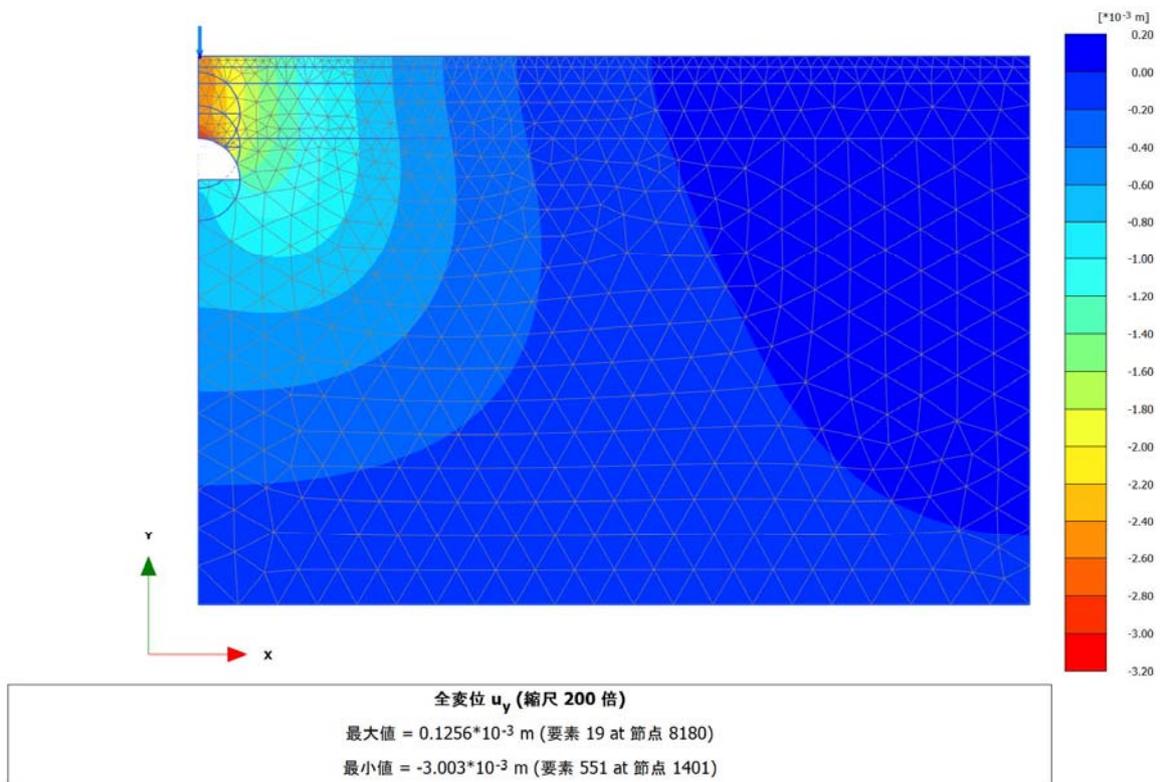


全变位 u_y (縮尺 100 倍)
 最大值 = 0.1171×10^{-3} m (要素 19 at 節点 8180)
 最小値 = -3.823×10^{-3} m (要素 302 at 節点 305)

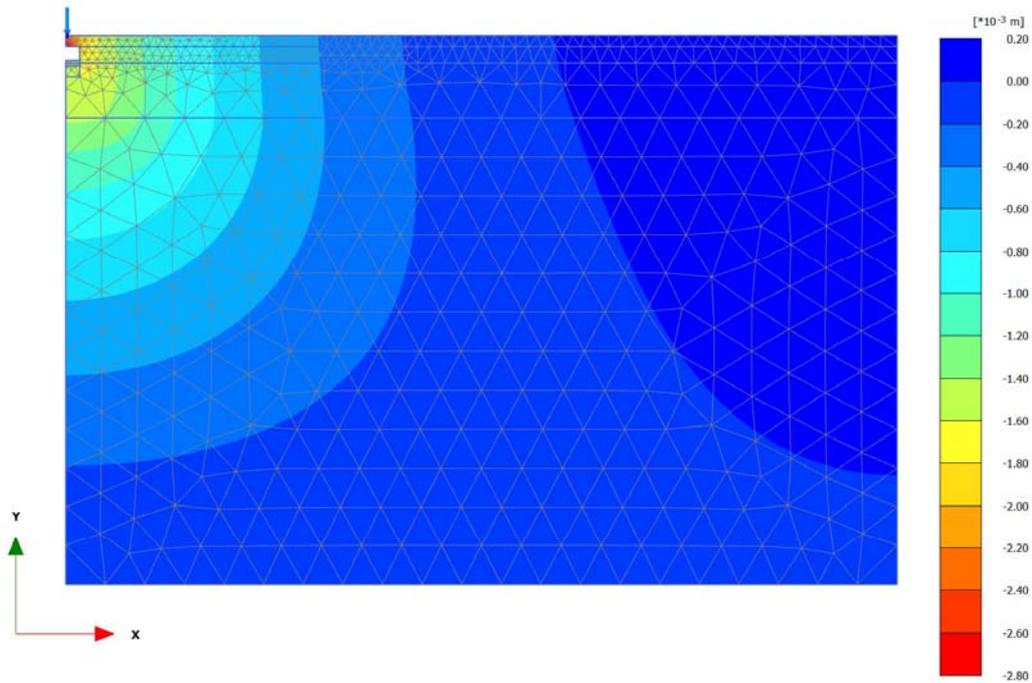
图—3.5.26 半円形空洞③-1 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=0.30$)



图—3.5.27 半円形空洞③-2 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=0.90$)

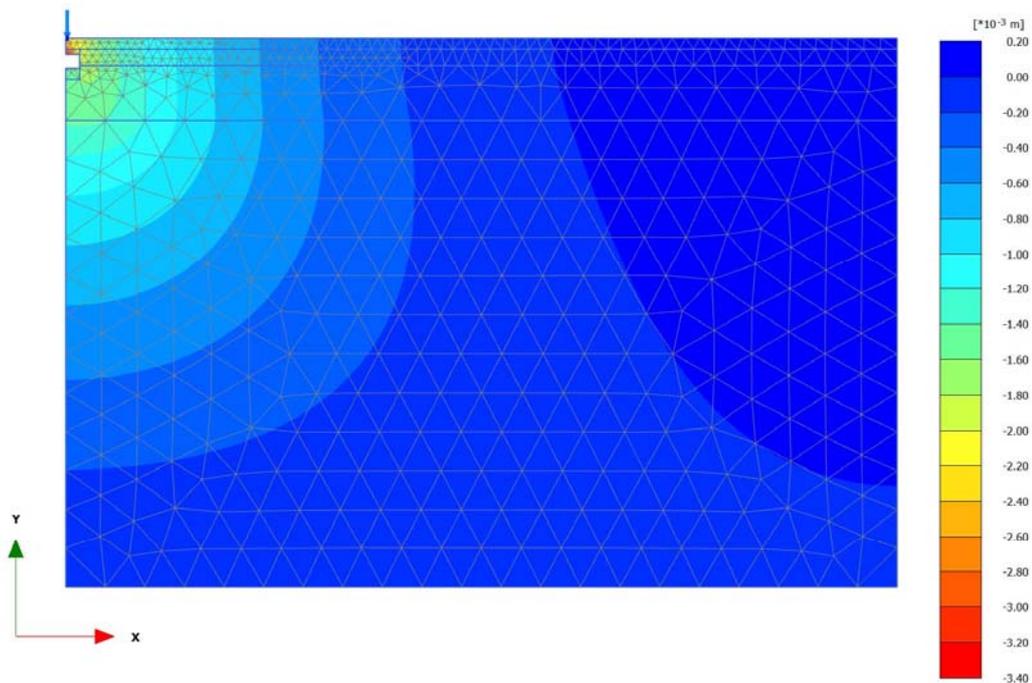


图—3.5.28 半円形空洞③-3 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=1.50$)



全変位 u_y (縮尺 200 倍)
 最大値 = $0.1099 \cdot 10^{-3}$ m (要素 17 at 節点 6780)
 最小値 = $-2.767 \cdot 10^{-3}$ m (要素 151 at 節点 79)

図-3.5.29 四角形空洞 □t-1 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.20$)



全変位 u_y (縮尺 200 倍)
 最大値 = $0.1107 \cdot 10^{-3}$ m (要素 17 at 節点 6780)
 最小値 = $-3.248 \cdot 10^{-3}$ m (要素 201 at 節点 185)

図-3.5.30 四角形空洞 □t-2 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.30$)

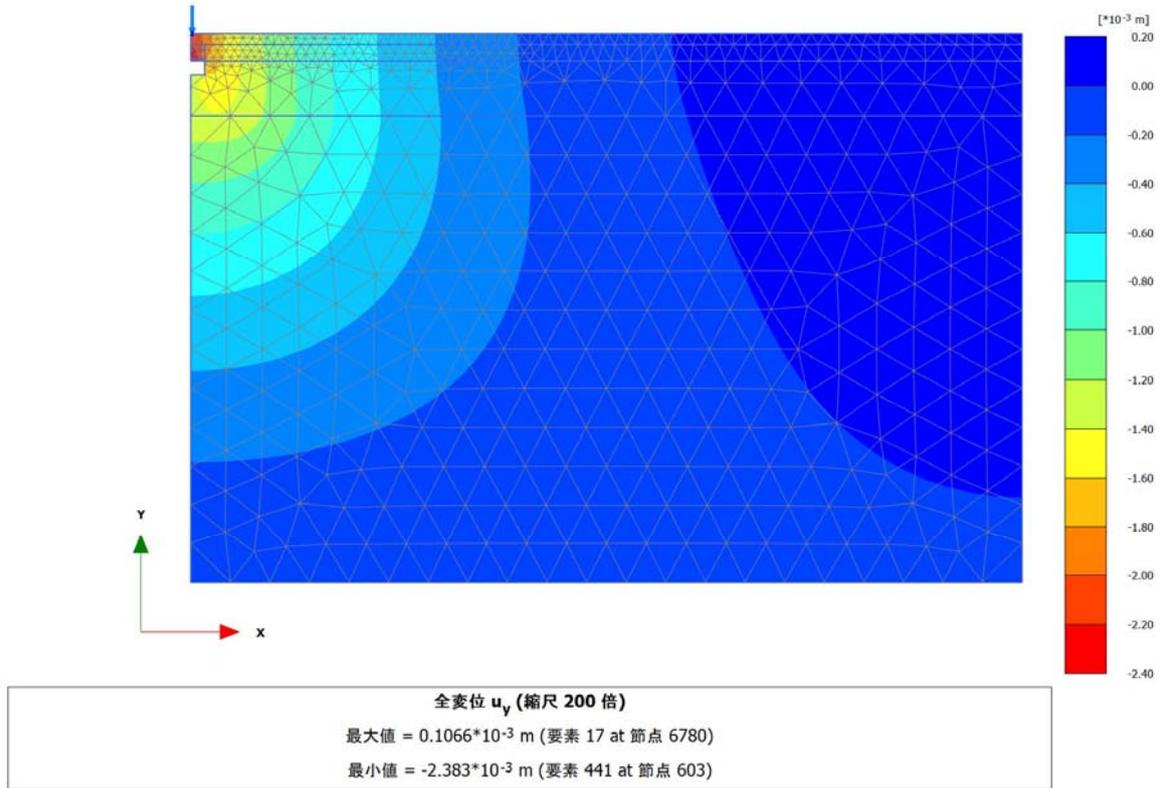


图-3.5.31 四角形空洞 □1-3 (空洞幅 $B=0.50$, 空洞高 $H=0.25$, 空洞発生深度 $d=0.50$)

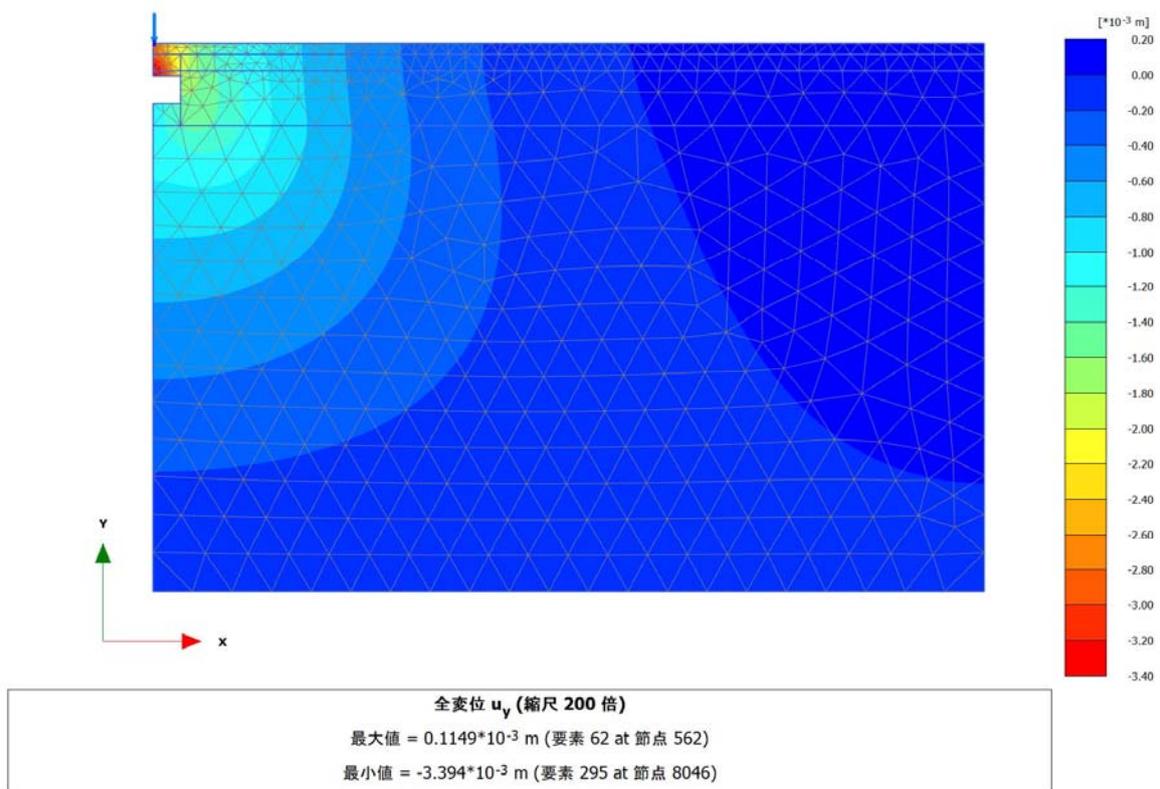
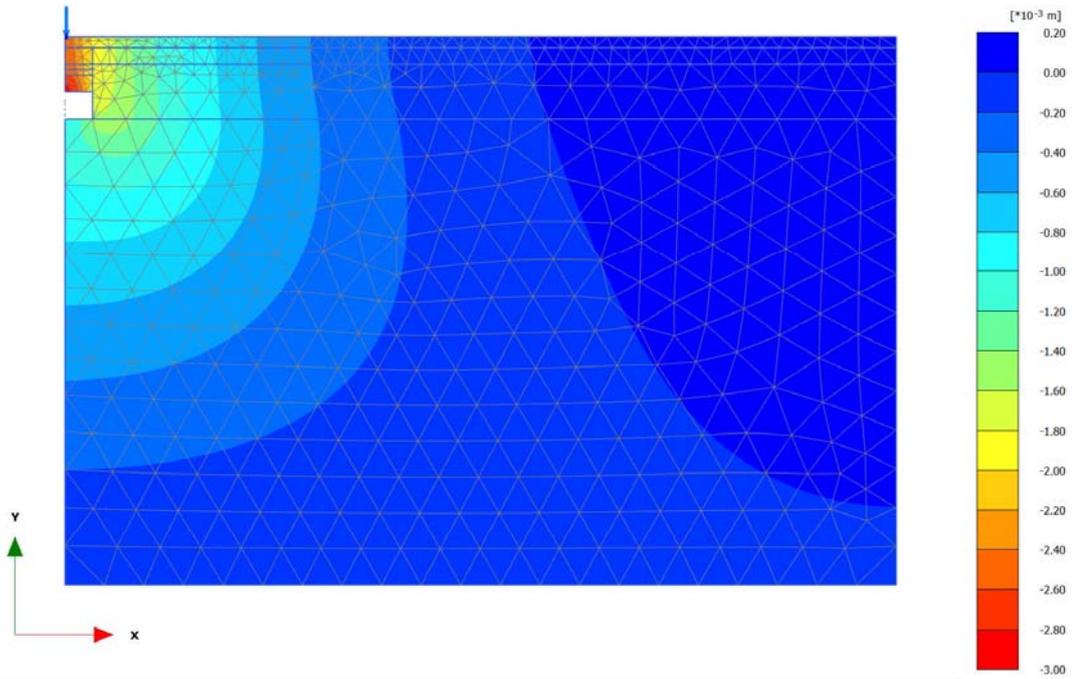
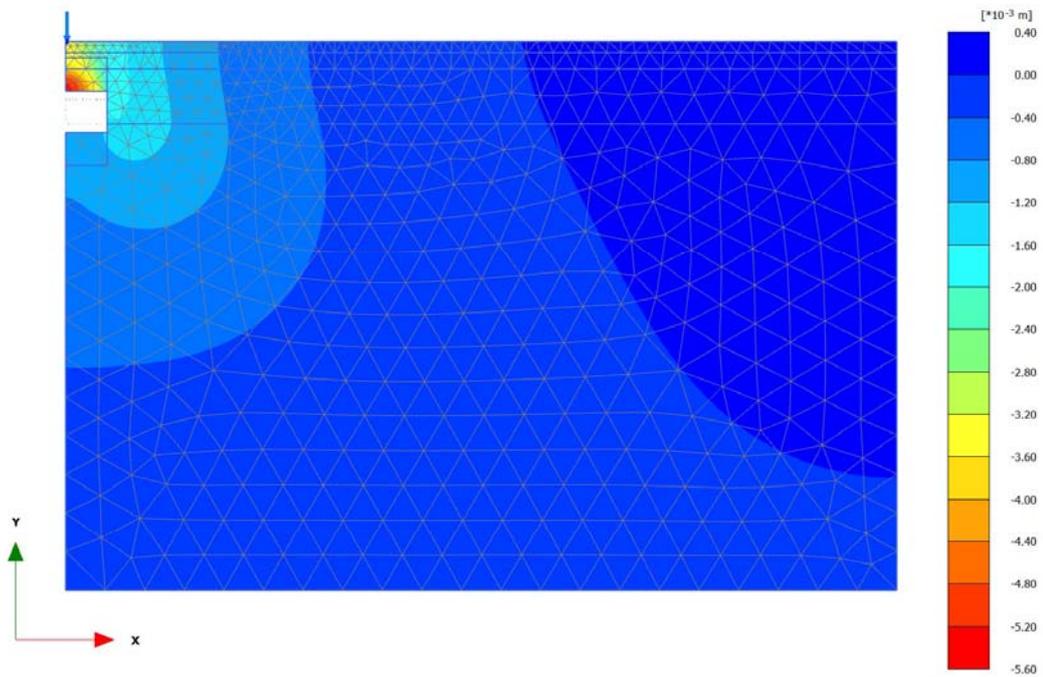


图-3.5.32 四角形空洞 □2-2 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=0.60$)



全変位 u_y (縮尺 200 倍)
 最大値 = $0.1182 \cdot 10^{-3}$ m (要素 62 at 節点 562)
 最小値 = $-2.844 \cdot 10^{-3}$ m (要素 309 at 節点 7509)

図-3.5.33 四角形空洞 C-2-3 (空洞幅 $B=1.00$, 空洞高 $H=0.50$, 空洞発生深度 $d=1.00$)



全変位 u_y (縮尺 50.0 倍)
 最大値 = $0.1242 \cdot 10^{-3}$ m (要素 18 at 節点 7032)
 最小値 = $-5.305 \cdot 10^{-3}$ m (要素 329 at 節点 811)

図-3.5.34 四角形空洞 C-2-2 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=0.90$)

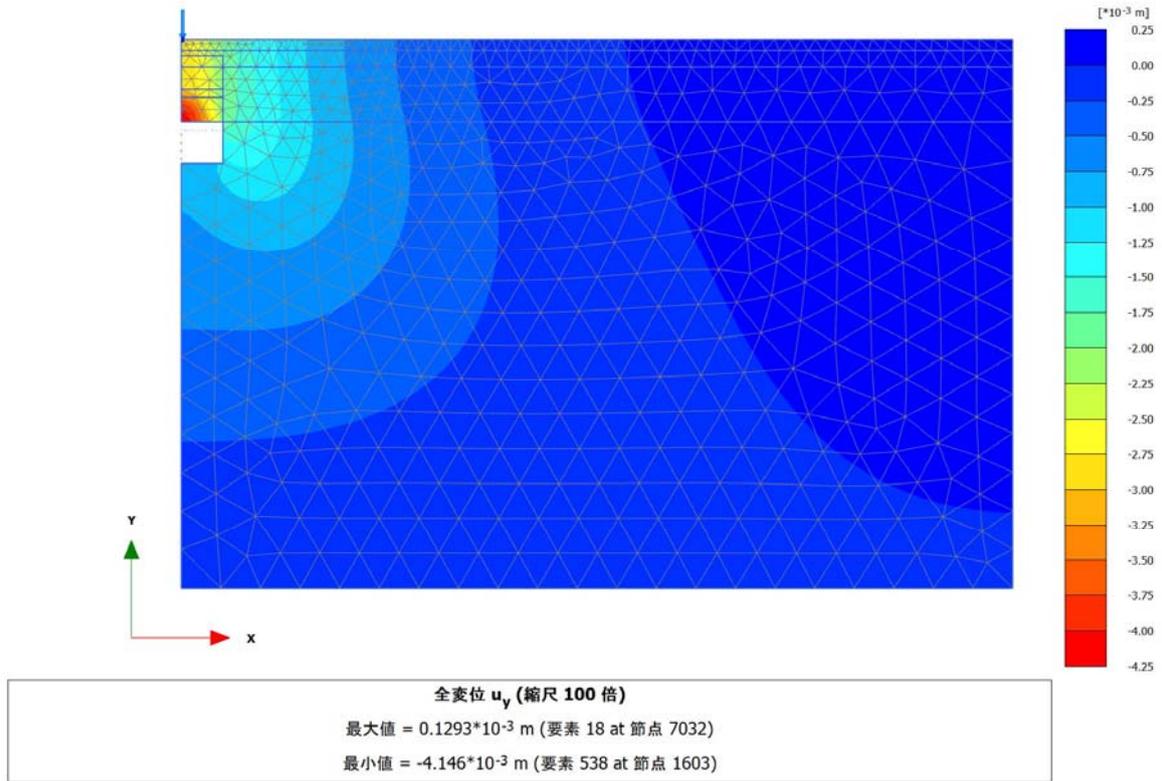


图-3.5.35 四角形空洞 B-3 (空洞幅 $B=1.50$, 空洞高 $H=0.75$, 空洞発生深度 $d=1.50$)

4. 路面たわみ計測へのOCMの適用

4.1 目的

近年、各所において路面陥没事故が発生しており、これらを防止するため道路管理者はレーダー探査による空洞調査を実施している。

神戸市では、令和2年度に延長129km、令和3年度に延長102kmの路面下空洞調査を行い、令和2年度に275箇所、令和3年度に375箇所の異常箇所を検出している(図-1)。図-1に示す異常箇所のうち緊急度の高いAランク空洞は各調査年度中に補修されたが、Bランク、Cランク空洞は、スコープ調査で空洞形状を詳細に調査し、グラウト充填等の対策を次年度以降に実施することとしている。

筆者らは、大量のB、Cランク空洞の補修を単年度で実施することは困難であり、合理的な指標に基づき優先順位を決めて戦略的に補修を進める方法として、空洞上に載荷した際の路面のたわみ量を用いて空洞補修の優先度決定する手法を提案している¹⁾²⁾。既往研究では、FWDを用いて空洞上部に重錘を落下させた際の路面の変位量と空洞部の路面耐力の関係性から空洞の力学的な耐力差の評価が可能であることを確認した。また、より簡易な路面たわみ量計測手法として、安価なCCDカメラを用いて変位を高精度に検出可能なOCM(Orientation Code Matching)に着目し、OCMによる路面のたわみ計測手法について検討を行い、²⁾路面のたわみ量をOCMで計測可能であることを確認している。

本研究では、経済的で簡易な計測手法として輪荷重を載荷荷重とし、OCMを用いて路面たわみ量を計測する手法について検討した。

4.2 OCM法

OCM(Orientation Code Matching)とは、CCDカメラで連続撮影した複数枚の画像にある被写体(テンプレート画像)の動きを精度良く検出する画像処理法の1つであり、この手法を応用することで路面のたわみ量を推定できる可能性がある²⁾。筆者らは道路端部、或いは歩道にカメラを設置し、走行中のトラック等の輪荷重から路面変位を検出することを最終目的とした。

高速動画撮影カメラ(ハイスピードカメラ)は、1秒間に30コマ以上の連写性能、もしくは120fps以上の動画撮影が可能な性能を備えたカメラのことを指す(写真-4.2.1)。本計測では、過去に実施した実験より、路面の動的変位計測に適する500fpsで撮影可能な高速動画撮影カメラを使用する。



写真-4.2.1 高速動画撮影カメラ

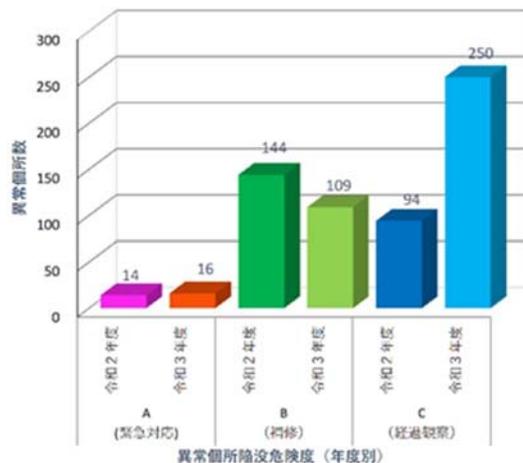


写真-4.1.1 OCMによるたわみ計測状況

表-4.2.1 高速動画カメラ仕様

種 別	規 格
名 称	Blackfly S USB3
A D C (アナログ - デジタル変換器)	8-bit, 10-bit, 12-bit
センサータイプ	CMOS
センサー形式	1/2.9"
クロマ	
ピクセルサイズ	6.9 μm
フレームレート	522 fps
メガピクセル	0.4
解像度	720 × 540
読み出し方法	グローバルシャッター



写真-4.2.2 高速動画カメラによる計測状況

4.3 FWDとOCMによる路面たわみの計測

4.3.1 OCM法の精度確認

表-4.3.1に示す3箇所の異常個所に対し、FWDで発生させた舗装のたわみに対し、FWDの計測結果を基にOCMの計測精度を評価する。図-4.3.1に計測概要を示す。FWDは重錘を落下させることで発生する舗装表面のたわみ量を複数点で同時に計測することでたわみ曲線を求める。OCMでは、載荷板から200, 300, 450, 600mm離れた地点のFWDで発生した路面たわみを計測した。カメラで直接観測できない、載荷点直下の路面たわみ量D0は、OCMで得られる4点の計測値から外挿して推定し、FWDでの計測値と比較して精度評価を行った。

表-4.3.1 計測対象異常箇所

路線No.- 異常番号	車線	空洞規模				陥没 危険度 (一次)
		縦断方向 (m)	横断方向 (m)	発生深度 (m)	空洞厚 (m)	
26-014	1車線	1.8	1.1	0.8	-	C
26-015	1車線	1.2	1.6	0.2	-	A
26-016	1車線	1.30	0.90	0.35	0.04	B

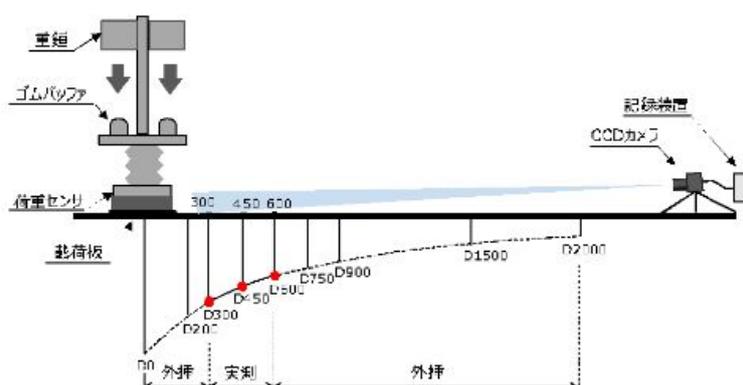


図-4.3.1 計測概要

表-4.3.2 FWD路面たわみ計測位置

計測点	載荷中心からの距離 (mm)
D200	200
D300	300
D450	450
D600	600

以下に計測結果を示す。

【 26-014 】

1) 載荷荷重 50kN

【空洞部】

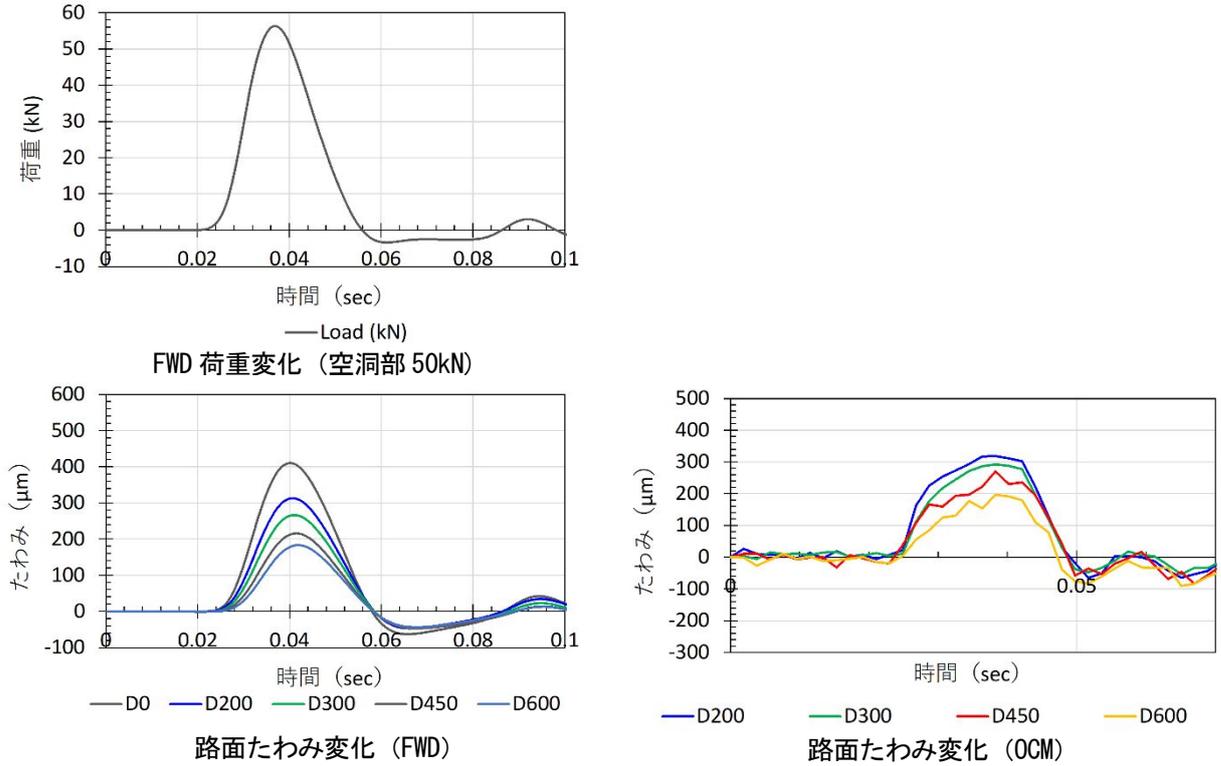


図-4.3.2 路面たわみ計測波形の比較 (空洞部)

表-4.3.3 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	410.1	—
D200	313.0	319
D300	266.4	293
D450	215.6	271
D600	183.1	196

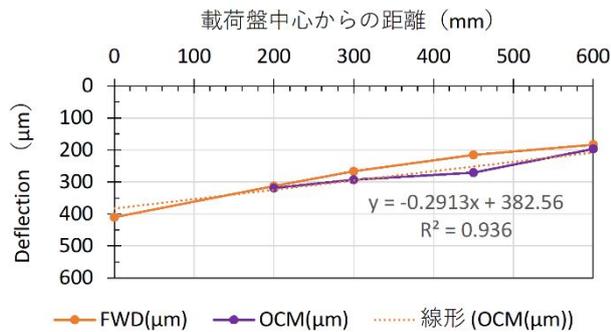


図-4.3.3 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

【健全部】

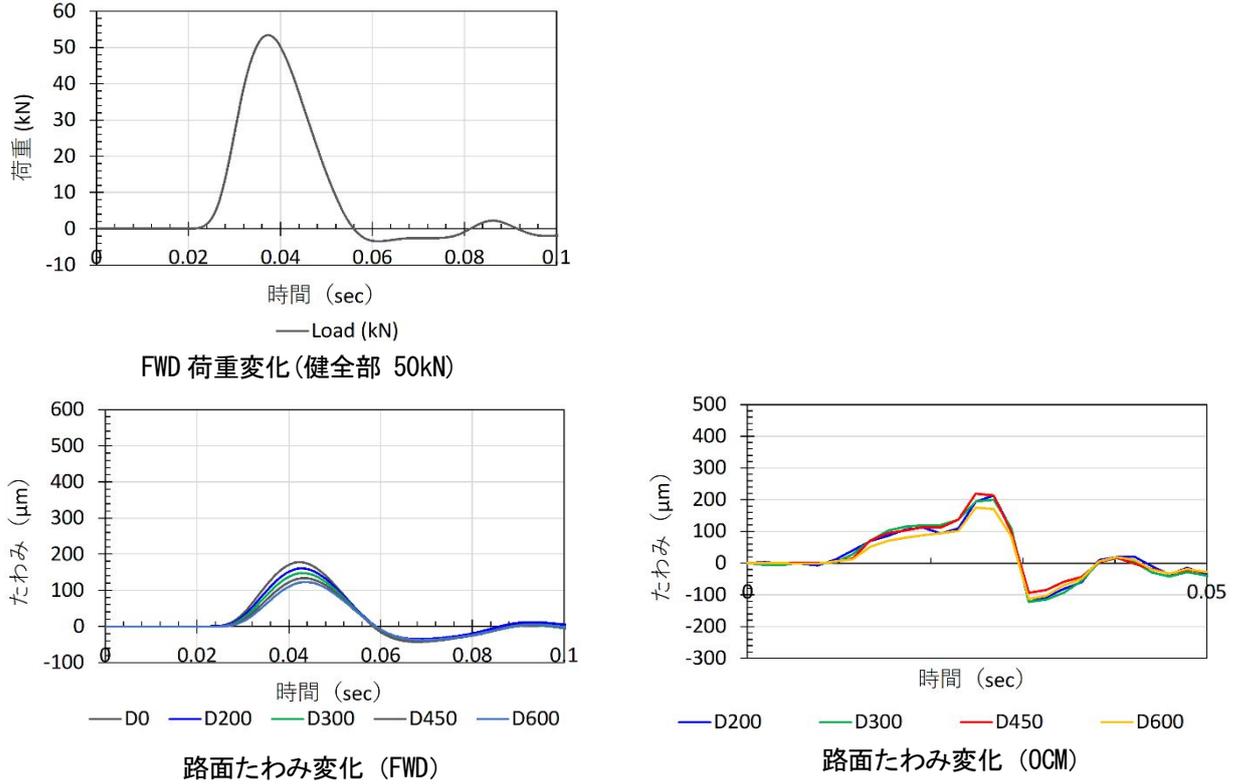


図-4.3.4 路面たわみ計測波形の比較 (健全部)

表-4.3.4 計測点における最大たわみ量比較

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	177.7	—
D200	160.5	214
D300	147.6	200
D450	133.8	219
D600	123.0	175

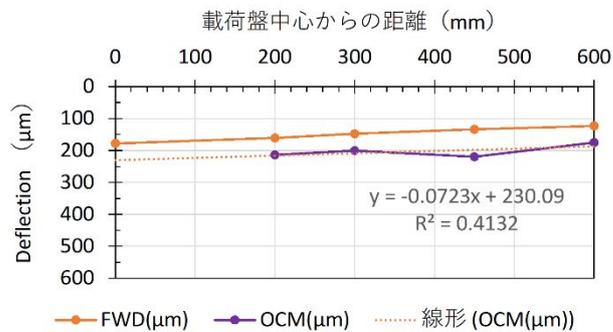


図-4.3.5 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

2) 載荷荷重 75kN

【空洞部】

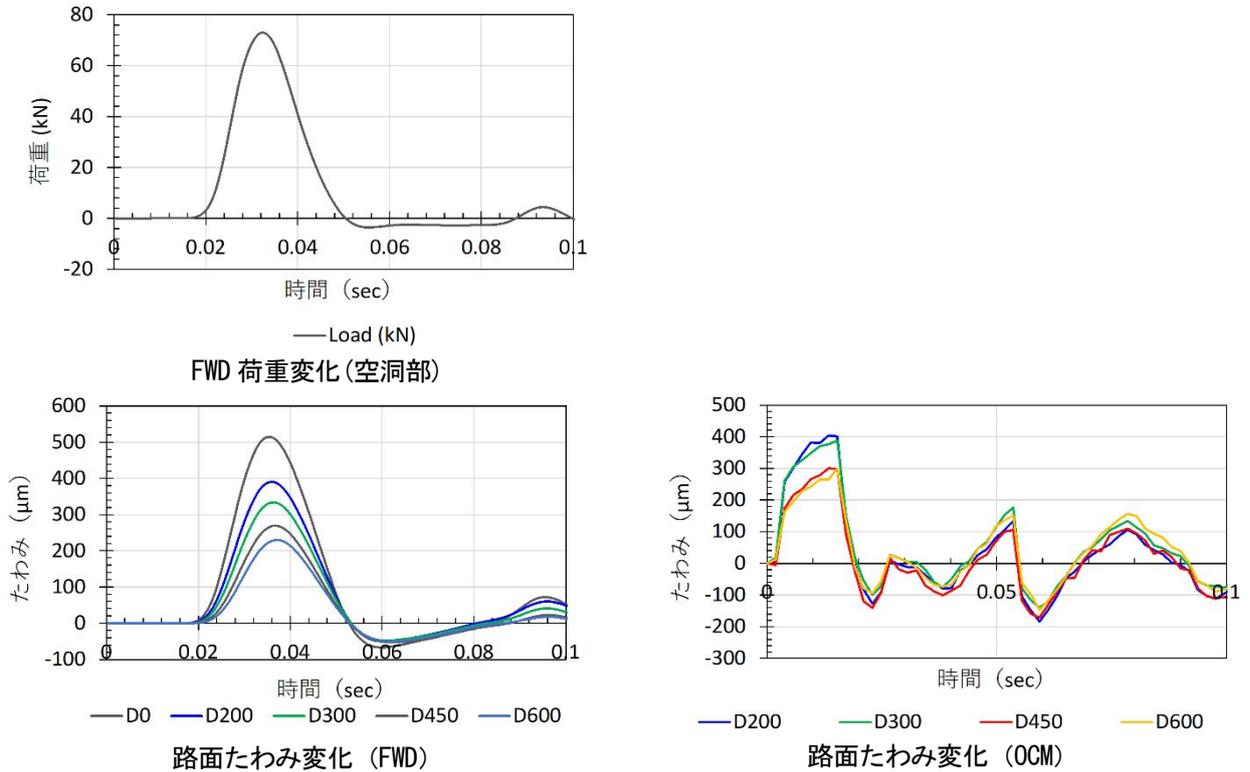


図-4.3.6 路面たわみ計測波形の比較 (空洞部)

表-4.3.5 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	514.8	—
D200	390.4	404
D300	333.7	388
D450	269.4	300
D600	230.0	299

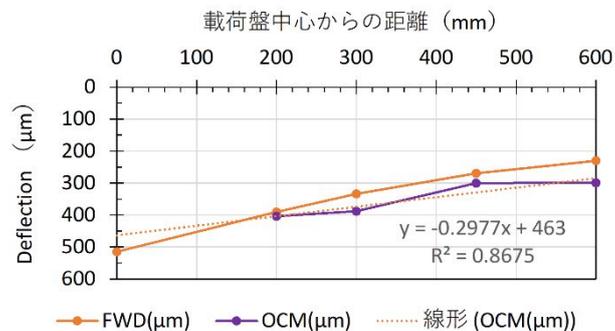


図-4.3.7 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

【健全部】

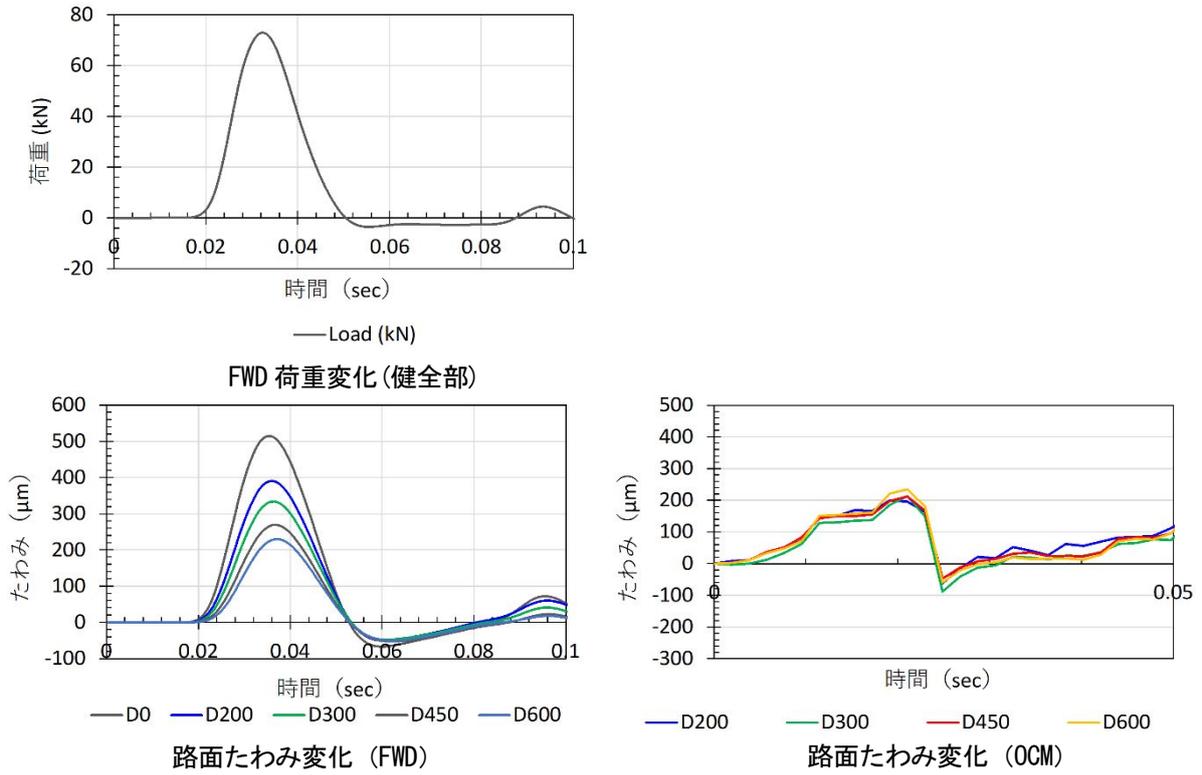


図-4.3.8 路面たわみ計測波形の比較 (健全部)

表-4.3.6 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	234.5	—
D200	211.3	200
D300	195.2	214
D450	177.0	212
D600	163.1	235

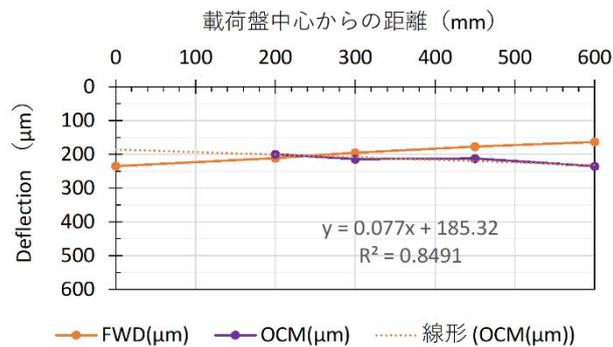
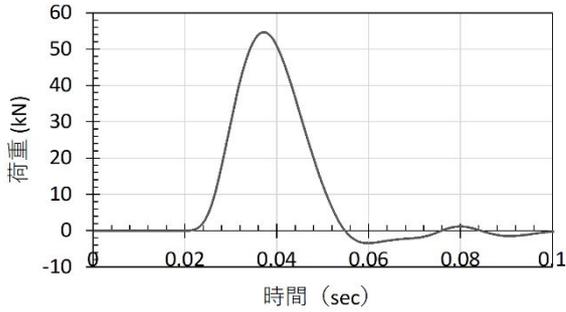


図-4.3.9 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

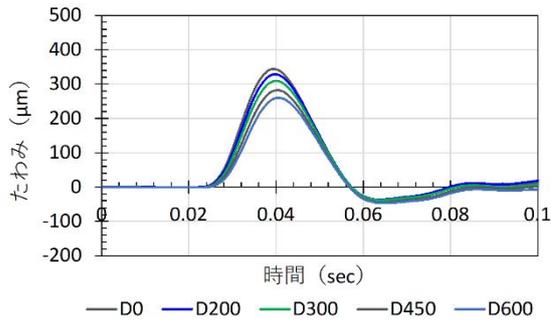
【 26-015 】

1) 載荷荷重 50kN

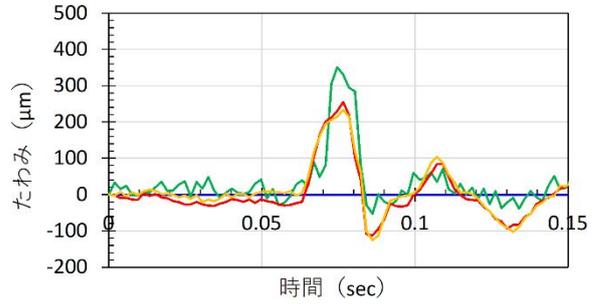
【空洞部】



FWD 荷重変化 (空洞部)



路面たわみ変化 (FWD)



路面たわみ変化 (OCM)

図-4.3.10 路面変位計測波形 (50kN)

表-4.3.7 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	344.2	—
D200	328.6	351
D300	309.4	255
D450	282.4	233
D600	260.4	—

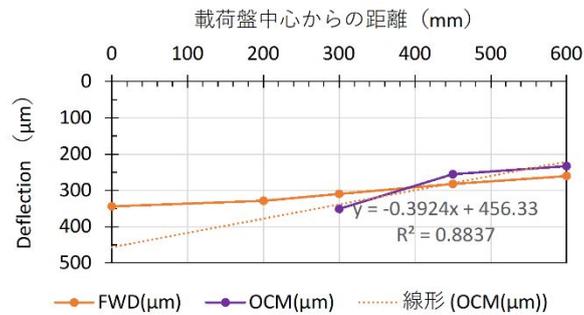


図-4.3.11 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

【健全部】

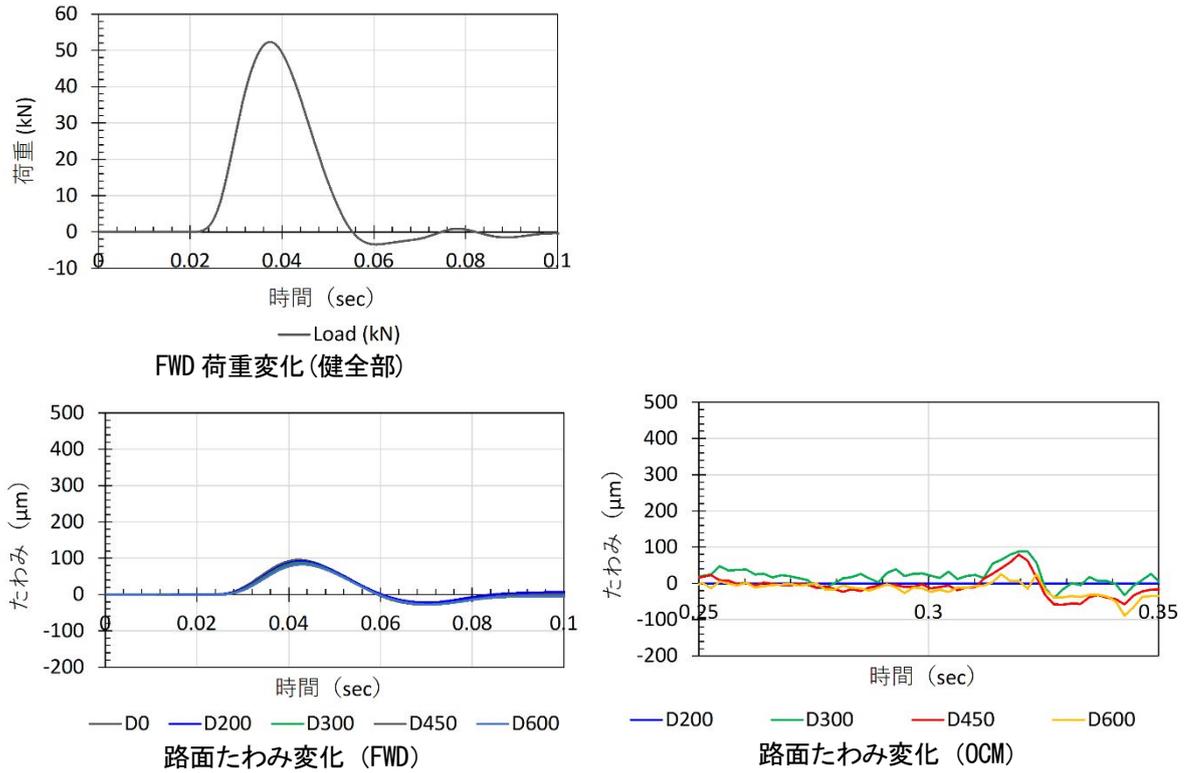


図-4.3.12 路面変位計測波形 (50kN)

表-4.3.8 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	95.6	—
D200	92.0	88
D300	87.6	80
D450	85.3	27
D600	82.9	—

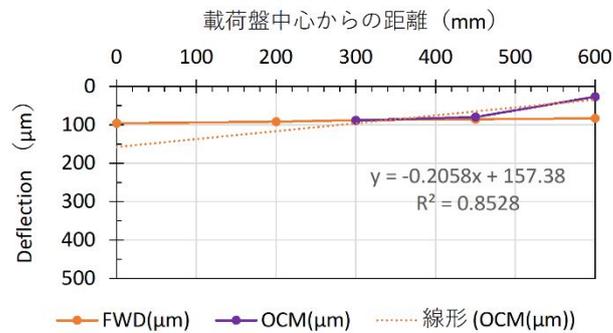


図-4.3.13 空洞上と健全部の路面たわみ比較

2) 載荷荷重 75kN

【空洞部】

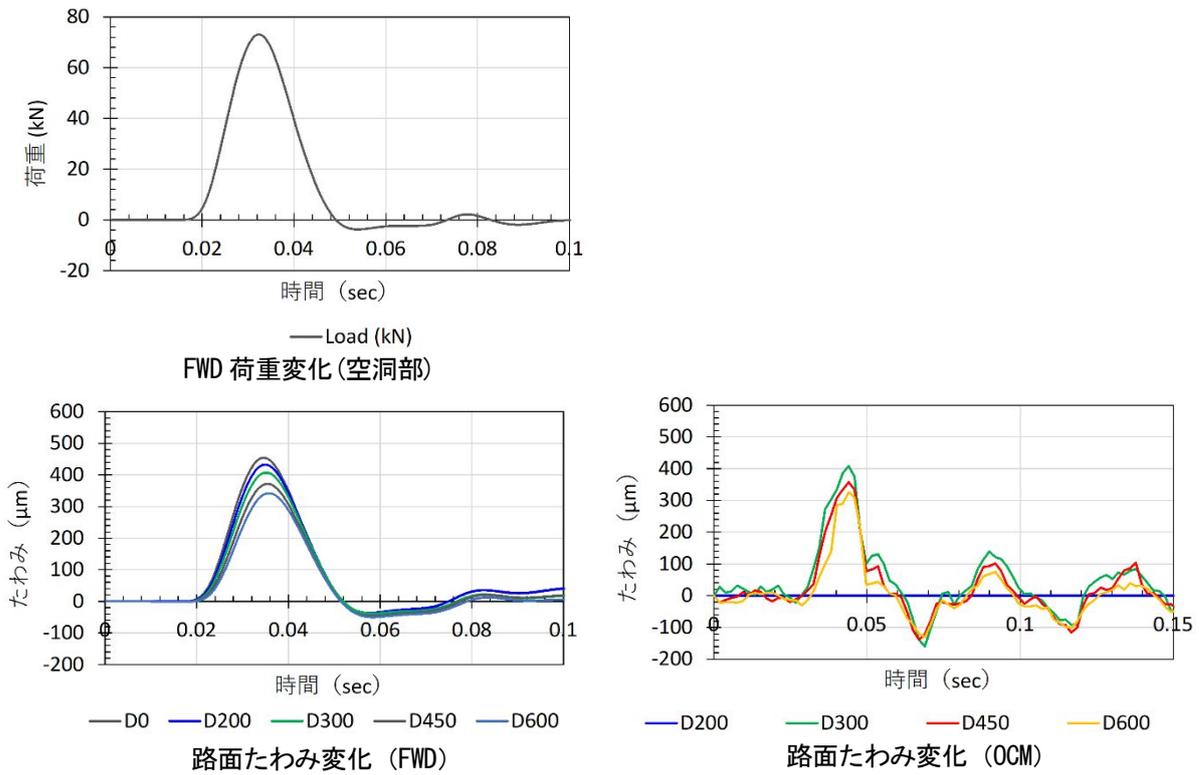


図-4.3.14 路面変位計測波形 (50kN)

表-4.3.9 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	454.0	—
D200	432.4	—
D300	407.4	409
D450	371.5	358
D600	342.2	327

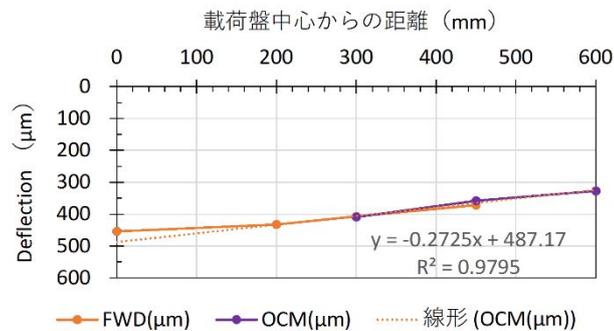


図-4.3.15 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

3) 載荷荷重 100kN

【健全部】

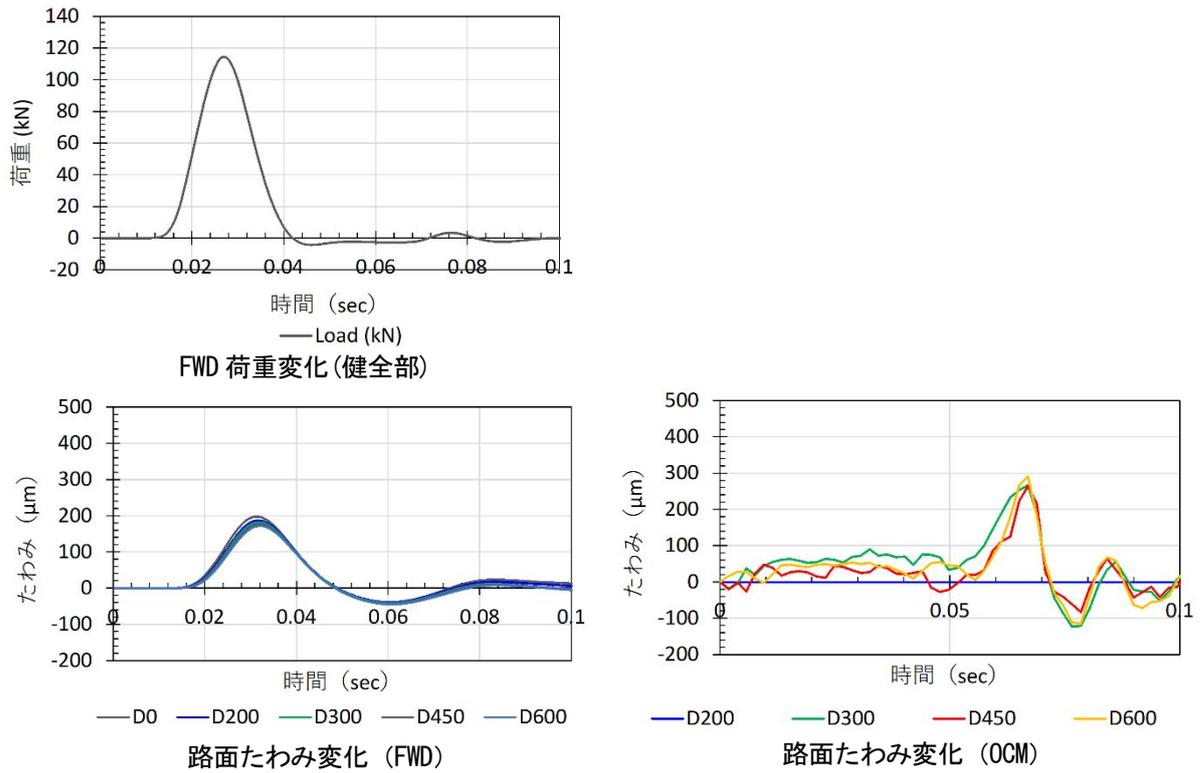


図-4.3.16 路面変位計測波形 (50kN)

表-4.3.10 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	FWD	OCM
D0	197.7	—
D200	186.9	—
D300	181.6	268
D450	176.8	264
D600	171.8	291

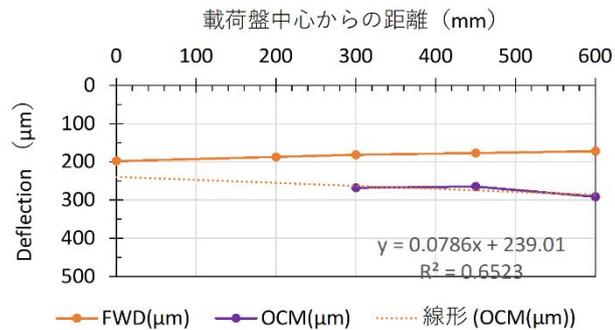


図-4.3.17 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

【 26-016 】

1) 載荷荷重 75kN

【空洞部】

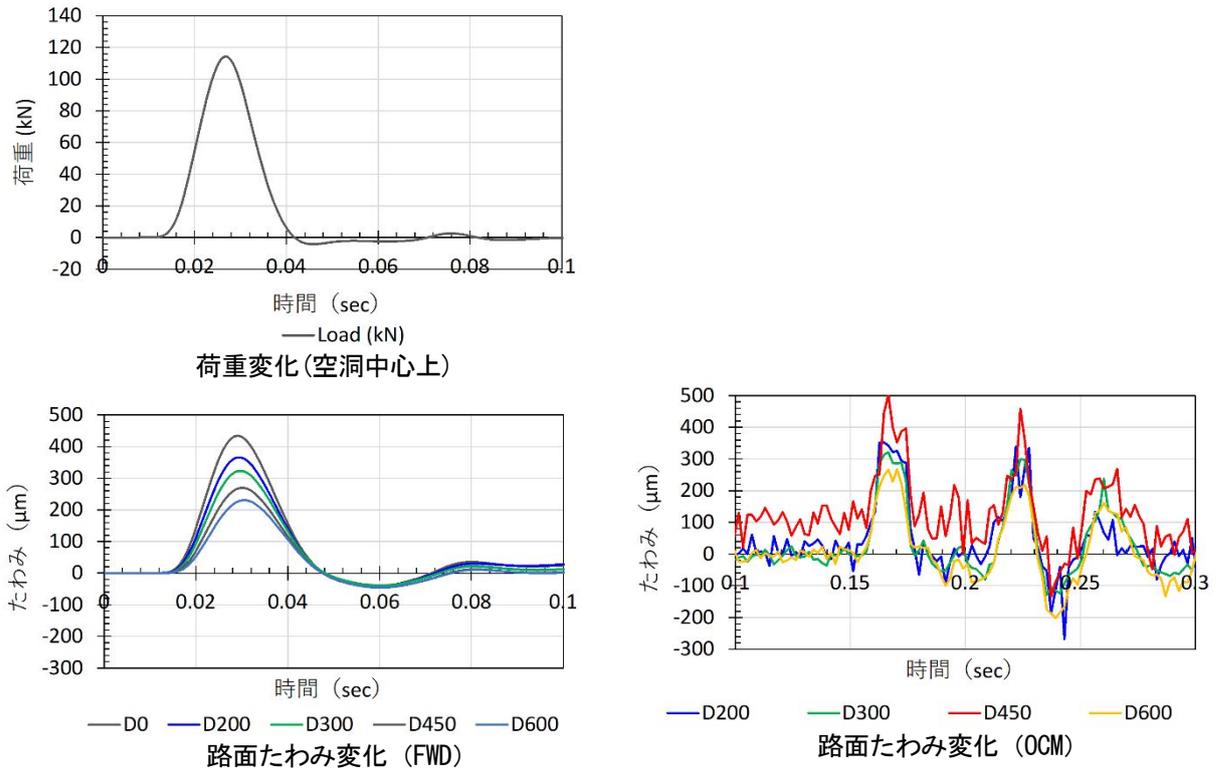


図-4.3.18 路面変位計測波形 (75kN)

表-4.3.11 計測点における最大たわみ量

計測点	最大たわみ (μm)	
	空洞アリ	健全部
D0	433.9	—
D200	365.7	353
D300	323.2	322
D450	269.5	—
D600	230.5	268

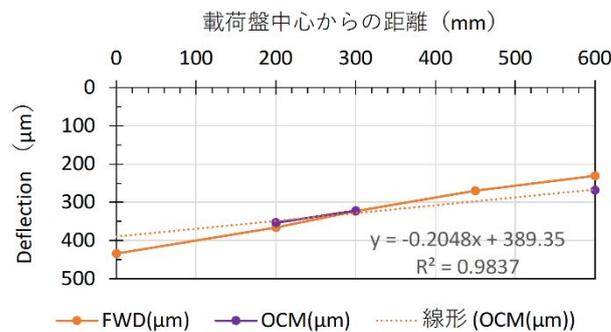


図-4.3.19 FWD と OCM の路面たわみ計測結果比較

表-4.3.12 に結果を整理した。OCM で直接計測した D200～D600 の範囲では、標準偏差から、載荷点直近の D200 の精度が最も高く、載荷点から遠くなるほど精度が低下する傾向にあることがわかる。一方、推定値である D0 は、載荷点から遠い点の計測精度の低さが影響し、若干精度が悪い。これは、OCM でのたわみ量計測精度が、たわみ量の小さい範囲で低下することに起因すると推定するが実用上は問題ないと言えよう。

表-4.3.12 OCM による各計測点での路面たわみ量計測精度

箇所	空洞部/健全部	荷重	FWD D0(μm)	誤差				
				D0	D200	D300	D450	D600
26-14	空洞部	50kN	410.1	7%	-2%	-10%	-26%	-7%
	空洞部	75kN	514.8	10%	-3%	-16%	-11%	-30%
	健全部	50kN	177.7	-29%	-33%	-36%	-64%	-42%
	健全部	75kN	234.5	21%	5%	-10%	-20%	-44%
26-15	空洞部	50kN	344.2	-33%	-7%	18%	10%	11%
	空洞部	75kN	454.0	-7%	5%	12%	4%	4%
	健全部	50kN	95.6	-65%	-	0%	6%	67%
	健全部	100kN	197.7	-21%	-21%	-48%	-49%	-69%
26-16	空洞部	75kN	433.9	10%	3%	0%	-	-16%
平均(%)				-12%	-7%	-10%	-19%	-14%
誤差の標準偏差				26	13	20	25	37

4.4 走行車両輪荷重による路面たわみのOCMによる計測

4.4.1 計測状況および計測方法

1) 計測状況

測定箇所は26-14を対象とした。

計測は2台のカメラを設置して、空洞部と健全部の輪荷重が通過する位置近傍に計測点を設定し、OCMを用いて測点直近を通過する際のそれぞれの変位量を計測し、たわみ量の違いを比較する。

車両荷重として、4tダンプトラックに土砂を積載して総重量8tとした状態で走行させた。



写真-4.4.1 車両荷重による路面変位計測状況



写真-4.4.2 計測器設置状況

2) 計測方法

図-4.4.1に示す様に、計測点を通過するダンプトラックタイヤ直近の路面変位を路肩から計測する。

2台の高速動画カメラでダンプトラックの車輪が、空洞中心部を通過する際と同一車両が近傍の健全部を通過する際の路面変位を撮影し、健全部と空洞上の路面変位の違いを比較する。

車両は4tダンプトラックに最大積載して走行させる。車両総重量は約8tとなる。

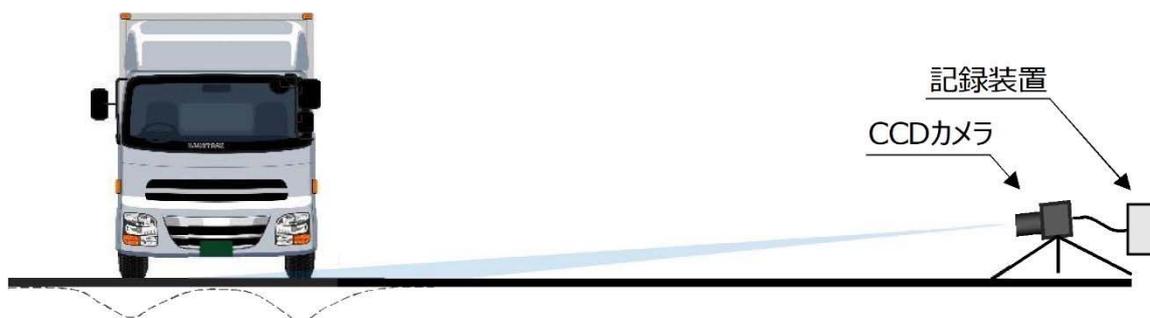


図-4.4.1 車両輪荷重による路面変位計測方法

4.4.2 計測ケース

計測は、停止および徐行状態でタイヤ荷重位置の違いによるたわみ量の違いを計測した4ケースと、走行速度を変えて空洞上のたわみ量を計測した4ケースおよび健全部のたわみ量を計測した1ケース、カメラと計測箇所
の距離を変えた1ケース、併せて10ケースを実施した。(表-4.4.1)

表-4.4.1 計測ケース一覧表

ケース	空洞/健全	計測距離 (m)	空洞中心への 後輪載荷状況	走行速度	摘要
1	空洞	1.5	外側タイヤ	停車	
2	空洞	1.5		徐行	
3	空洞	1.5	後輪片側2輪中心	停車	
4	空洞	1.5		徐行	
5	空洞	1.5	—	10km/hr	
6	空洞	1.5		20km/hr	
7	空洞	1.5		30km/hr	
8	空洞	1.5		40km/hr	
9	健全	1.5		40km/hr	
10	空洞	3.0		10km/hr	

4.4.3 計測結果

1) 輪荷重位置とたわみ量の関係

【後輪外側タイヤを空洞中心に乗せる場合】

ケース1 空洞中心上に停車

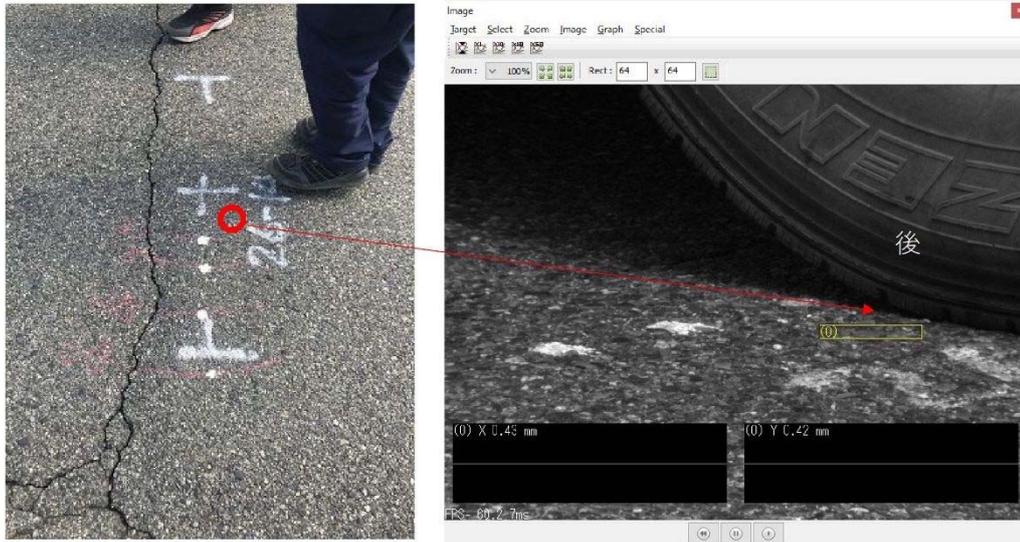
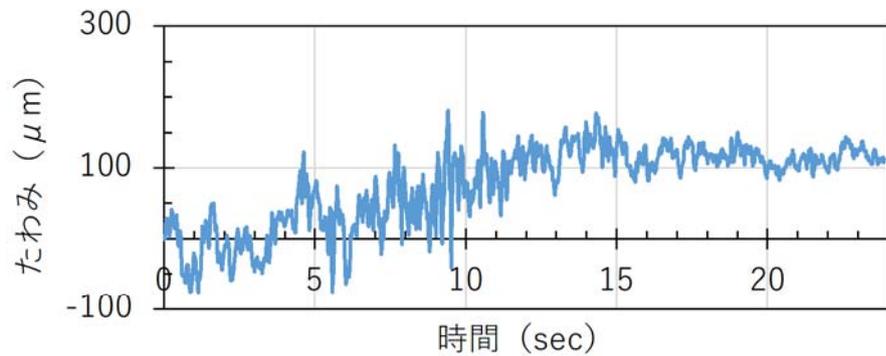


写真-4.4.3 荷重位置と計測位置



— 左タイヤが空洞中心で停止_車輪直近_10km/h_522fps_3m

最大たわみ量(μm)	181
------------	-----

図-4.4.2 たわみの変化と最大たわみ量

ケース 2 空洞中心上を徐行

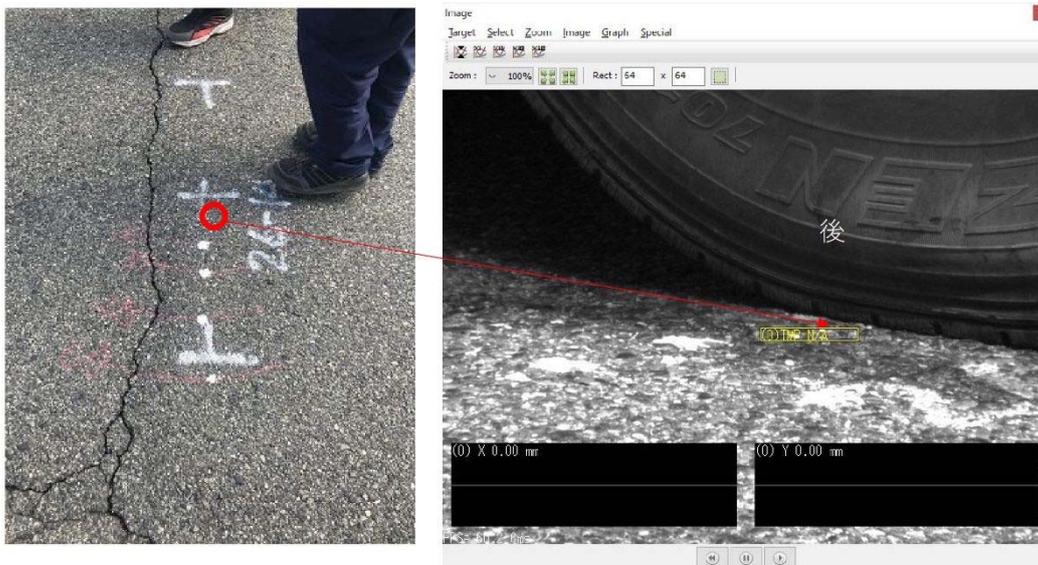
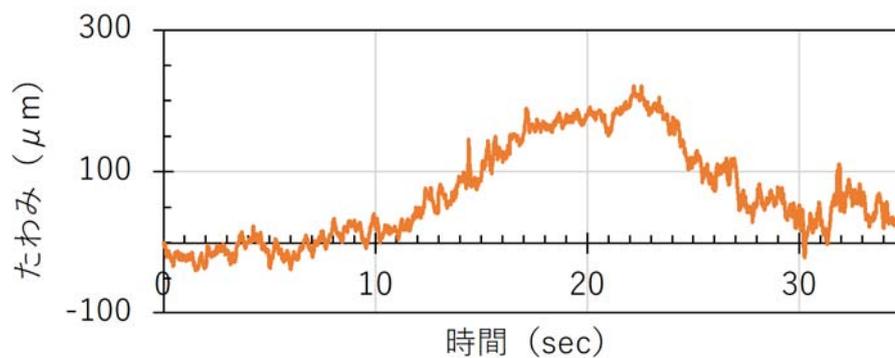


写真-4.4.4 荷重位置と計測位置



— 左タイヤが空洞中心を極低速で通過_車輪直近
_10km/h_522fps_3m

最大たわみ量(μm)	221
------------	-----

図-4.4.3 たわみの変化と最大たわみ量

【後輪タイヤ2本の中心を空洞中心に乗せる場合】

ケース3 空洞中心上に停止

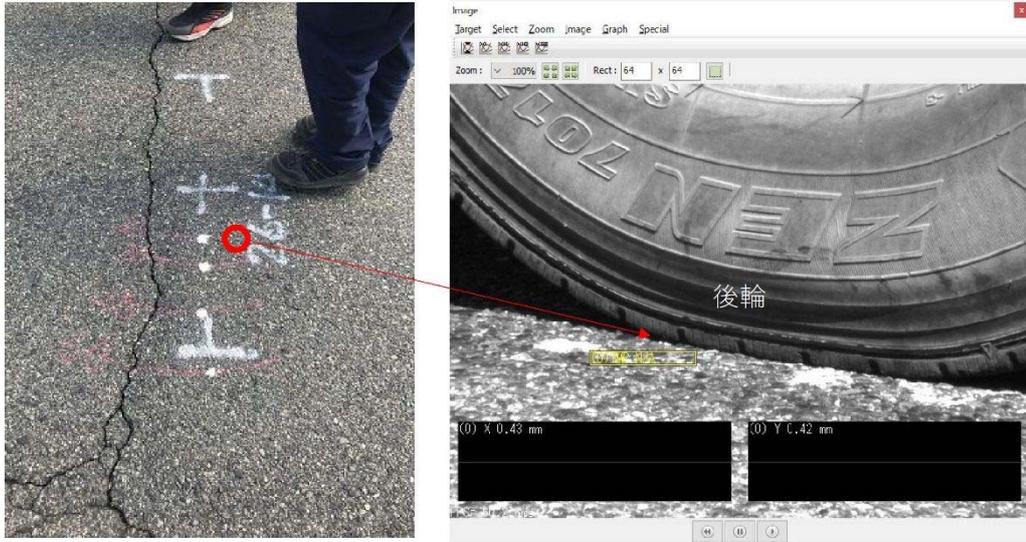
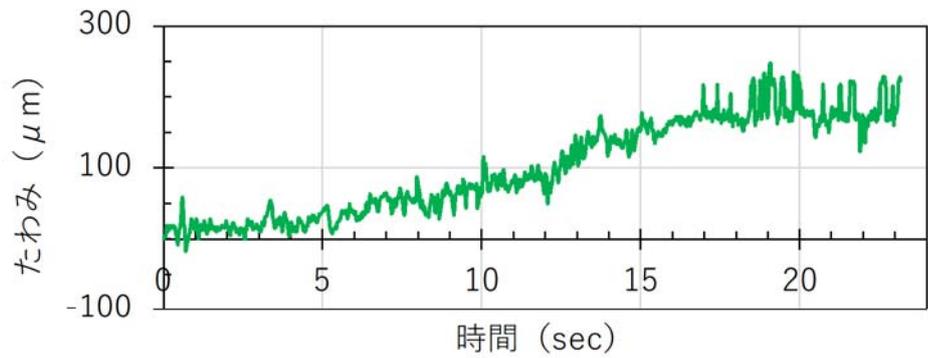


写真-4.4.5 荷重位置と計測位置



— タイヤの中央が空洞中心で停止_車輪直近_10km/h_522fps_3m

最大たわみ量(μm)	247
------------	-----

図-4.4.4 たわみの変化と最大たわみ量

図-4.4.4 に見られるように、たわみはダンプロック停止後に変動が見られ、実際よりも大きめの値となっている可能性が高い。

ケース 4 空洞中心上を徐行

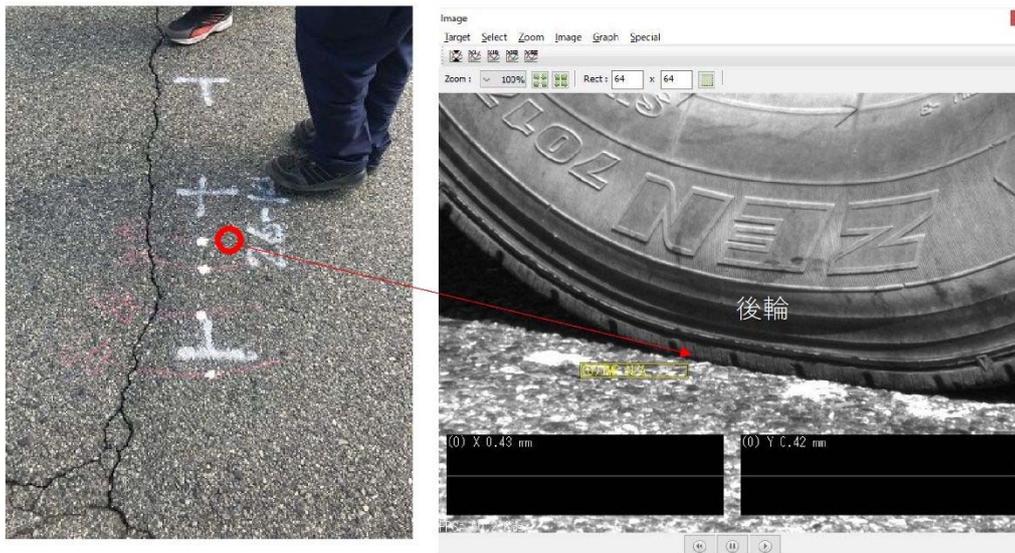
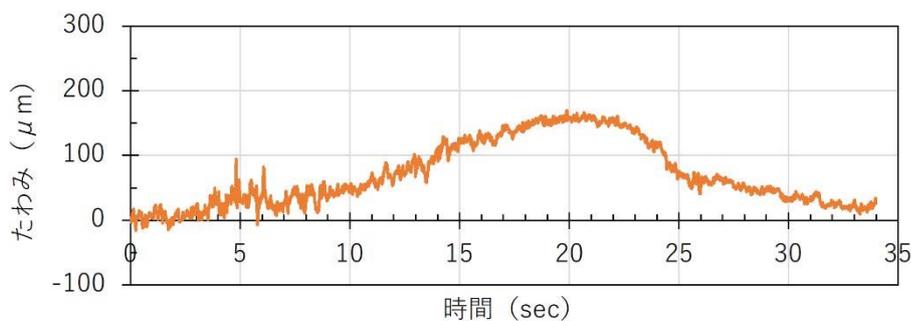


写真-4.4.6 荷重位置と計測位置



— 左タイヤが空洞中心を極低速で通過_車輪直近_10km/h_522fps_3m

最大たわみ量(μm)	170
------------	-----

図-4.4.5 たわみの変化と最大たわみ量

【実験結果の整理】

計測結果を表-4.4.2に整理する。

表-4.4.2 輪荷重載荷位置の違いとたわみ量

空洞中心への載荷状況	たわみ量(μm)		摘要
	停止	徐行	
後輪外側タイヤ中心	181	221	
後輪左側2輪中心	247	170	停止後にたわみの変動がみられる
誤差	27%	-30%	

上表では、たわみ量は、載荷位置により、30%程度の変動がみられるが、計測結果の振動の影響も想定される。実際には、荷重位置で大きな差異はない可能性もあるが、計測ケースが少なく、断定的に判断することは難しい。

2) 走行速度とたわみ量の関係

ケース 5 速度 10km/hr

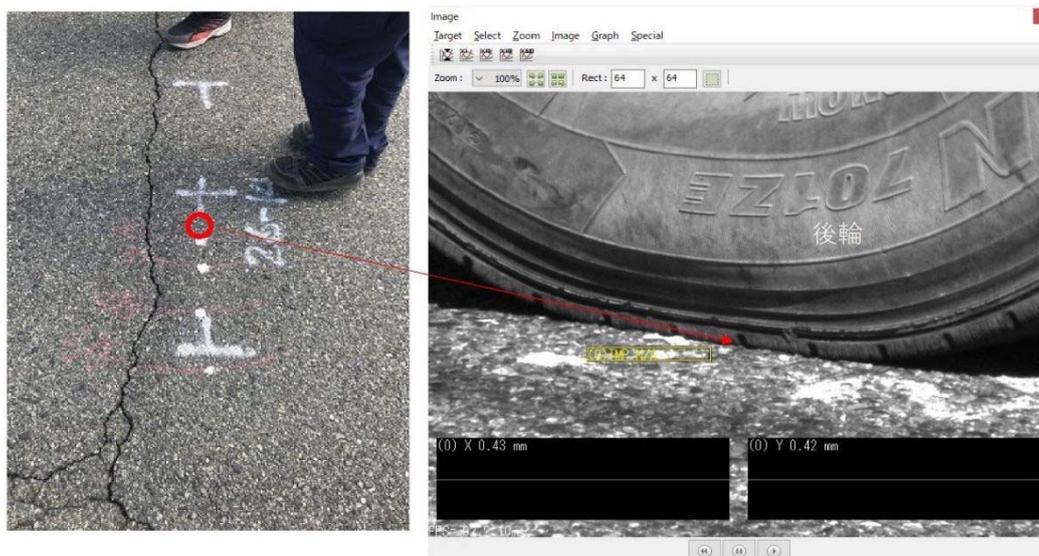
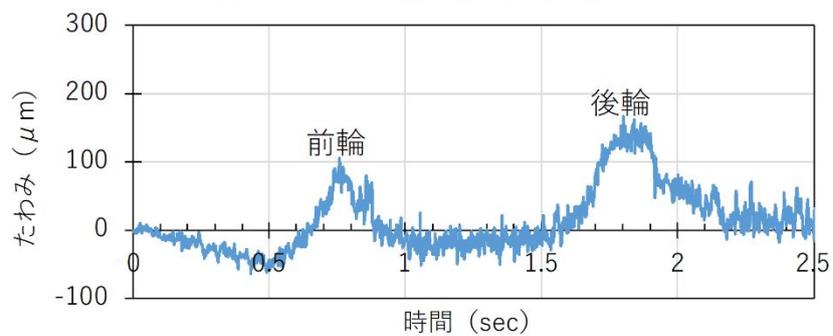


写真-4.4.7 荷重位置と計測位置



— 空洞部+時速10km_距離…

最大たわみ量(μm)	167
------------	-----

図-4.4.6 たわみの変化と最大たわみ量

ケース 6 速度 20km/hr

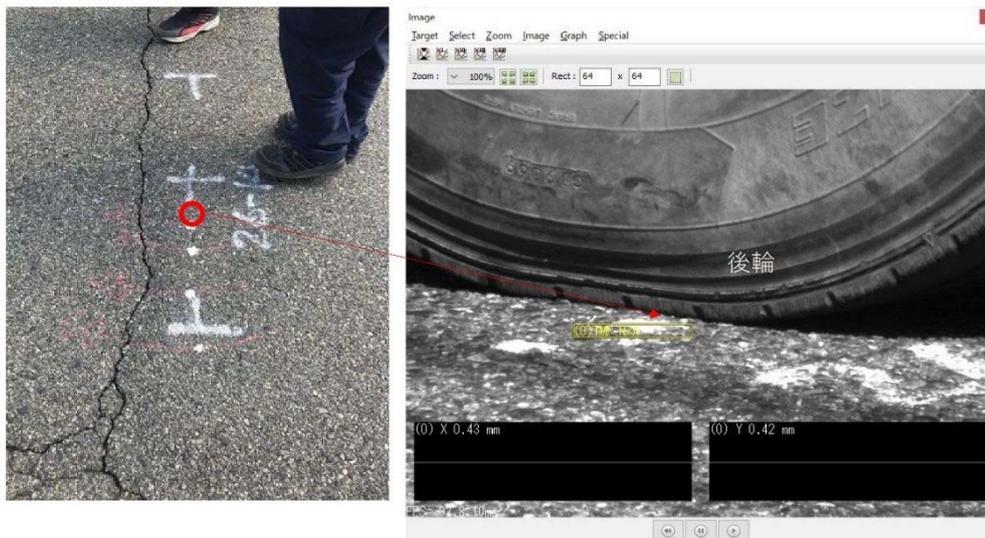
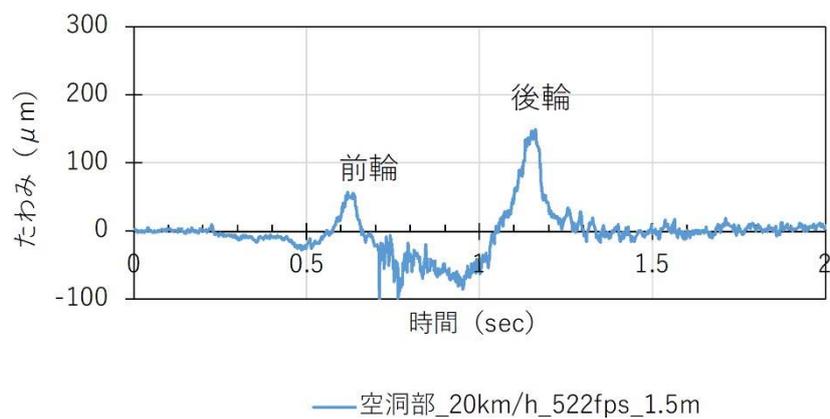


写真-4.4.8 荷重位置と計測位置



最大たわみ量(μm)	150
------------	-----

図-4.4.7 たわみの変化と最大たわみ量

ケース7 速度 30km/hr

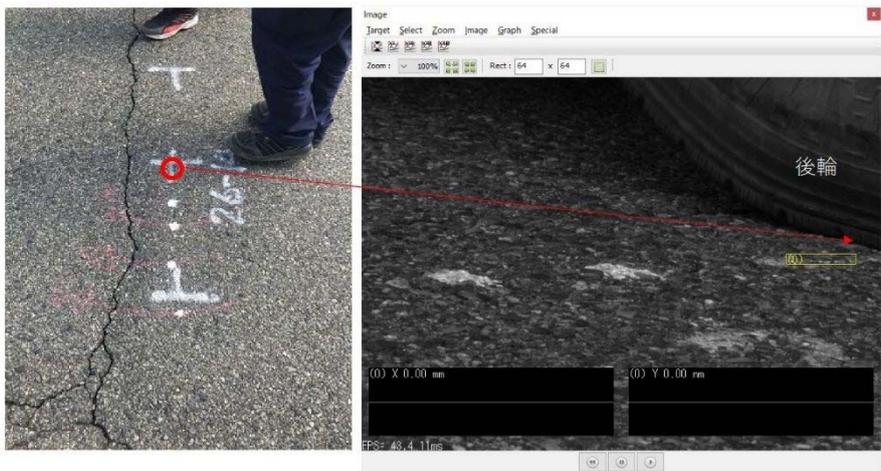
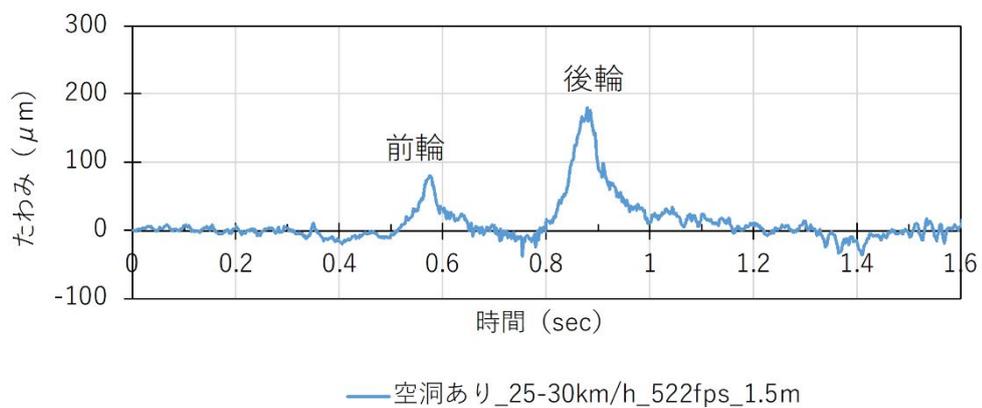


写真-4.4.9 荷重位置と計測位置



最大たわみ量(μm)	181
------------	-----

図-4.4.8 たわみの変化と最大たわみ量

ケース 8 速度 40km/hr

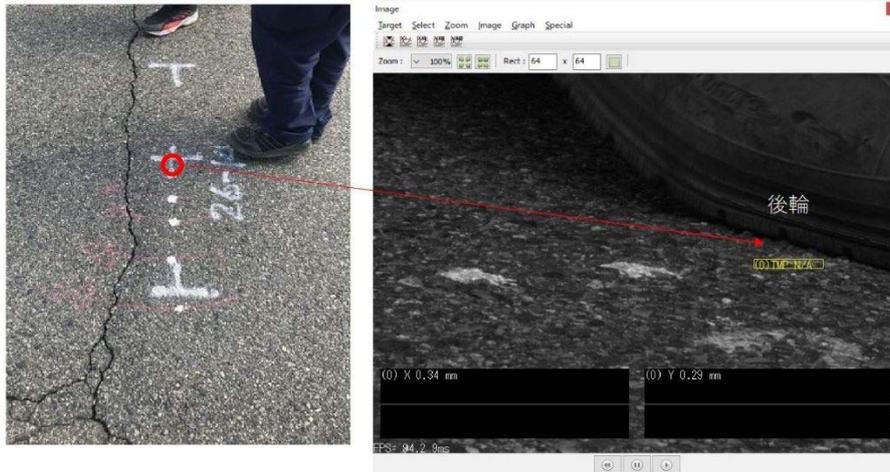
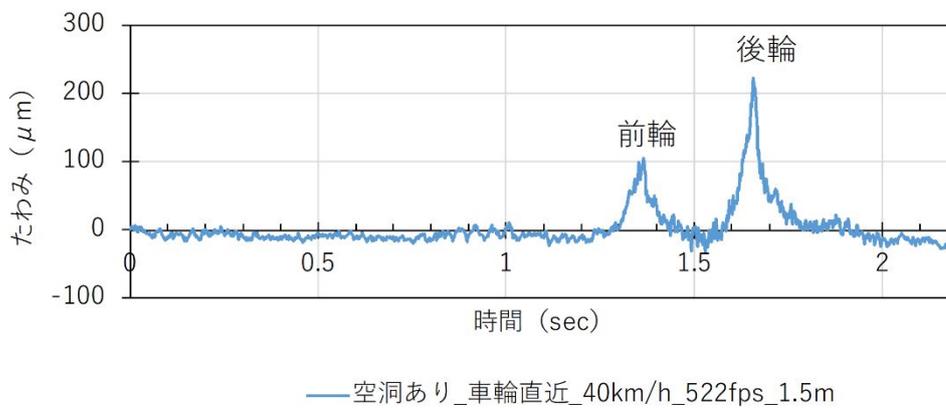


写真-4.4.10 荷重位置と計測位置



最大たわみ量(μm)	222
------------	-----

図-4.4.9 たわみの変化と最大たわみ量

【実験結果の整理】

走行速度と最大たわみ量の関係を下表に示す。

表-4.4.3 走行速度とたわみ量

走行状態	最大たわみ量(μm)	停車時に対する変動率	走行速度による変動率
停車時(2輪中心)	247	100%	—
10km/hr	167	68%	100%
20km/hr	150	61%	90%
30km/hr	181	73%	108%
40km/hr	222	90%	133%

走行速度 40km/hr で、急激にたわみ量が増加している。

30km/hr 程度までは、衝撃の影響が比較的小さく、一定の速度を超えると衝撃の影響急激に増大する可能性が考えられる。

3) 健全部最大たわみ量と空洞部最大たわみ量比較

【健全部最大たわみ量】

走行速度 40km/hr での健全部の最大たわみ量を計測する。

ケース 9 速度 40km/hr

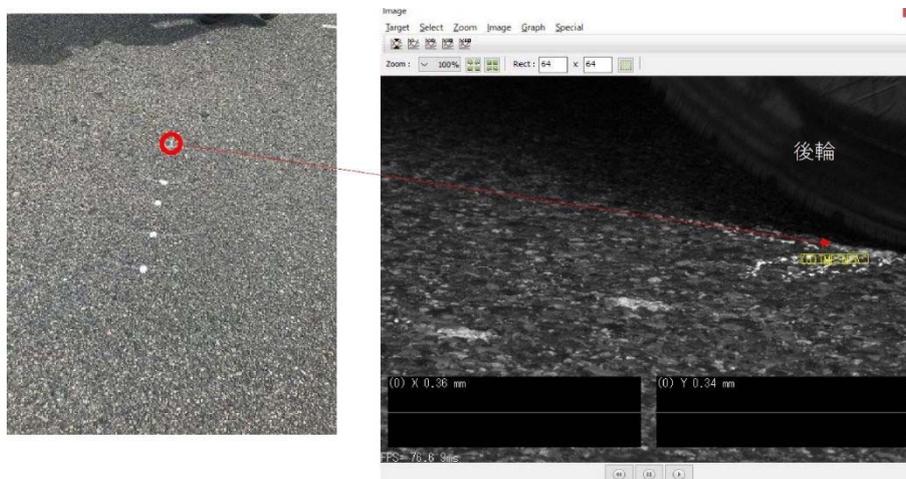
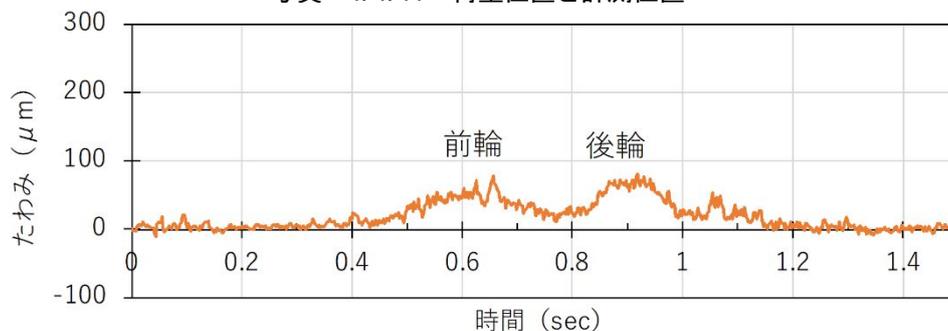


写真-4.4.11 荷重位置と計測位置



— 健全部_車輪直近_40km/h_522fps_1.5m

最大たわみ量(μm)	80
------------	----

図-4.4.10 たわみの変化と最大たわみ量

【実験結果の整理】

健全部と空洞部での最大たわみ量を FWD での計測結果と比較する。

表-4.4.4 たわみ量増加率の比較

計測方法	荷重種別	載荷荷重	最大たわみ量(μm)		たわみ量増加率 D_h/D_s
			空洞部(D_h)	健全部(D_s)	
FWD	FWD(50kN)	50kN	410.1	177.7	231%
	FWD(75kN)	75kN	514.8	234.5	220%
OCM	ダンブトラック	25kN	222	80	278%

載荷荷重の違いと最大たわみ量は概ね比例関係にある

OCM でのたわみ量増加率が、FWD での値よりもやや大きくなっているが、空洞部と健全部の違いが明確に表れている。

5) 計測距離とたわみ観測精度

実務での適用性を考慮して、計測距離を3mとして、計測に支障がないか確認した。

ケース 10 速度 10km/hr

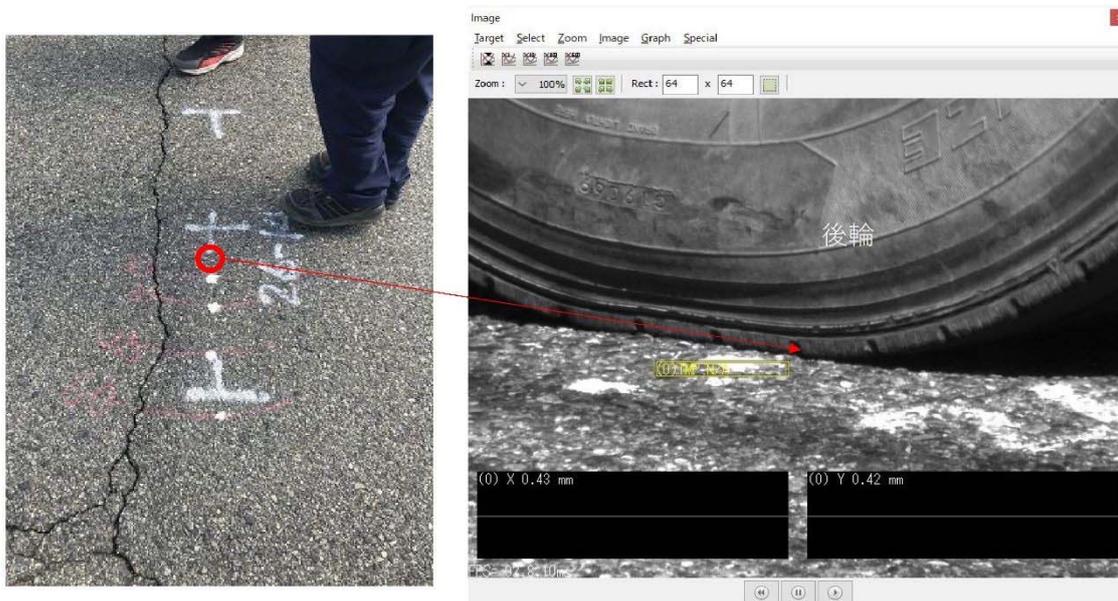
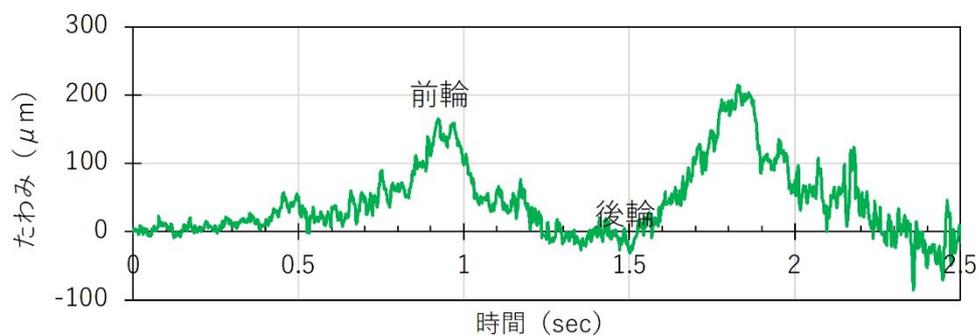


写真-4.4.12 荷重位置と計測位置



— 空洞あり_車輪直近_10km/h_522fps_3m

最大たわみ量(μm)	214
------------	-----

図-4.4.11 たわみの変化と最大たわみ量

【実験結果の整理】

距離1.5mで計測した場合の最大変位は167μmであるが、前輪と後輪によるたわみの変化を計測で来ていることから、タイヤ位置から3mの離隔位置にカメラを設置した場合でも計測に支障はないと考える。

4.4.4 考察

1) 荷重載荷位置とたわみ量の関係について

輪荷重の空洞中心からのズレの影響を計測した結果を表-4.4.5に整理する。

表-4.4.5 輪荷重載荷位置の違いとたわみ量

空洞中心への載荷状況	たわみ量(μm)		摘 要
	停止	徐行	
後輪外側タイヤ中心	181	221	
後輪左側2輪中心	247	170	停止後にたわみの変動がみられる
誤差	27%	-30%	

上表で、たわみ量は、載荷位置により30%程度の変動がみられるが、計測結果の振動の影響も想定される。走行車両の場合、空洞の中心に輪荷重の中心を通過させることは困難であり、荷重通過位置のズレの計測値の信頼性への影響が懸念される。

実際には、荷重位置で大きな差異はない可能性もあるが、計測ケースが少なく、断定的に判断することは難しい。

2) 走行速度とたわみ量の関係

空洞に荷重載荷する車両の走行速度と最大たわみ量の関係を下表に示す。

表-4.4.6 走行速度とたわみ量

走行状態	最大たわみ量(μm)	停車時に対する変動率	走行速度による変動率
停車時(2輪中心)	247	100%	—
10km/hr	167	68%	100%
20km/hr	150	61%	90%
30km/hr	181	73%	108%
40km/hr	222	90%	133%

走行速度40km/hrで、急激にたわみ量が増加している。

30km/hr程度までは、衝撃の影響が比較的小さく、一定の速度を超えると衝撃の影響が急激に増大する可能性が考えられる。

走行車両の輪荷重を載荷荷重とする際には、衝撃の影響が小さい速度で計測を行うことが望ましい。

3) 走行車両輪荷重でのOCMによる路面たわみ計測の適用性について

健全部と空洞部での最大たわみ量をFWDでの計測結果と比較する。

表-4.4.7 たわみ量増加率の比較

計測方法	荷重種別	載荷荷重	最大たわみ量(μm)		たわみ量増加率 D_h/D_s
			空洞部(D_h)	健全部(D_s)	
FWD	FWD(50kN)	50kN	410.1	177.7	231%
	FWD(75kN)	75kN	514.8	234.5	220%
OCM	ダンプロック	25kN	222	80	278%

載荷荷重の違いと最大たわみ量は概ね比例関係にある

OCM でのたわみ量増加率が、FWD での値よりもやや大きくなっているが、空洞部と健全部の違いが明確に表れている。

よって、走行車両の輪荷重を載荷荷重として路面のたわみ量を計測する手法の陥没危険度評価への適用の可能性が認められたと考える。

4.5 今後の展望

今回の計測で、走行車両輪荷重を OCM で計測する動的路面変位計測手法が、空洞陥没危険度の評価への適用可能性があることが、明らかになったと考える。

今後の課題を以下に整理する。

① 計測実施件数の確保

今回の計測は実験的な計測であり、今後実施数を増やし、本手法の妥当性を確認するとともに、計測や解析手法の精度を向上させる必要がある。

② 一般通行車両荷重による路面変位計測手法の検討

一般通行車両による動的路面変位計測が可能となることで、一般交通への影響がほとんどなく計測が可能となる。本手法の確立を目指した手法検討、機器選定の検討や実交通での試験計測等が必要である。

おわりに

神戸市では、令和2年度に延長129km、令和3年度に延長102kmの路面下空洞調査を行い、令和2年度に275箇所、令和3年度に375箇所の異常箇所を検出している。基本的には、これらすべての空洞について補修を行うこととしているが、維持管理予算には限りがあり、すべての空洞を毎年補修していくことは非常に困難であり、危険度の高い空洞から順次補修し、陥没危険性の低い空洞については、経過観察として空洞の変化を監視していくことが現実的である。

現行の空洞調査は、レーダー探査車で空洞の規模と発生深さを計測し、空洞の短辺長と発生深さをパラメーターとして、危険度のランク付けを行っているが、解析結果で明らかのように、同じ短辺長、発生深さでも空洞形状によって、空洞上部の耐力は異なっており、危険度を過大に見たり、逆に過少に評価したりしていることが懸念される。

本研究では、路面下空洞の陥没危険度評価をより合理的に判断する手法として、FWDを用いて荷重を載荷した際の路面のたわみ量に着目し、空洞部と健全部のたわみ量の比較によって陥没危険度を評価する方法を提案した。さらに、より簡易なたわみ量観測手法として、OCMを用いて、画像解析によって路面のたわみ量を計測する手法の検討を行った。

本研究で、観測実績が充分ではないものの、路面のたわみ量と空洞の陥没危険度に一定の関係があることが確認できた。また、路面たわみ量の観測のOCMによる計測が有効であることを確認できたことで、今後の改良の必要はあるものの、OCMを用いた路面たわみ量計測が、空洞陥没危険度評価の省力化につながる技術となる可能性を示したと考えている。

また、神戸市の空洞発生率は、河川沿いが一般道路の倍以上となっており、今後、各路線の調査頻度や調査優先度検討の際に考慮すべきであると考えている。

路面下空洞の発生原因は、道路自体よりも地下埋設物や河川の影響を多く受けている。したがって、空洞の解消については、道路管理者だけでなく関係部署との調整や、道路を掘削した際の埋戻し手法についての検討が、空洞発生を抑制につながると考える。

本研究が、神戸市の道路の維持管理を考える際の、一助となれば幸いである。

本研究には神戸市建設局道路管理課の多大なる協力と助力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。