

第36回 ICUSオープンレクチャー

「第2回 路面下空洞対策連絡会」

# 神戸市における路面下空洞 調査結果分析の取組み

2020年12月3日

神戸大学大学院 工学研究科

澁谷 啓 教授



- 阪神・淡路大震災（平成7年）の後、神戸市・神戸大学を中心とする技術者・研究者が協力し、地盤情報DB「**神戸JIBANKUN**」を構築
- 「**神戸JIBANKUN**」は、神戸市において一般公開され、神戸市の減災研究になくはない地盤情報を与えるアーカイブ
- **神戸の減災研究会**の前身である「神戸の地盤研究会、沖村孝会長（当時）」は、神戸市と連携して、先端的な技術や知識と「**神戸JIBANKUN**」を融合して神戸市の自然災害の減災に活用することを目的として平成11年に設立され、**神戸の減災研究会**にもその理念は継承されている

神戸の減災研究会HP ➡ <http://kobe-gensai.com/>

# 神戸の減災研究会(会長：澁谷 啓 神戸大学教授)の組織図(H30年度現在)

## 【目 的】

神戸における自然災害の防止・減災もしくは軽減に関連する調査・研究活動を行い、その成果を社会に還元すること。

## 【研究内容】

- (WG 1) 道路路面下空洞の発生傾向の分析に関する検討
- (WG 2) 事前道路通行規制基準および規制解除に関する検討
- (WG 3) 住宅開発に係る自然がけお調査・対策に関する検討
- (WG 4) 神戸市の地震動特性と中高層建築物の耐震補強に関する研究
- (WG 5) 土砂災害の軽減のための防災教育
- (WG 6) 「阪神・淡路大震災と神戸の割断層」の改訂

## ワーキンググループ (11社1大学)

- 協和設計株式会社
- 株式会社建設技術研究所
- 中央開発株式会社
- 東洋建設株式会社
- 株式会社ニュージェック
- 神鋼スラグ製品株式会社
- ジオ・サーチ株式会社
- 株式会社 三井E&Sテクニカルサーチ
- 東亜道路工業株式会社
- 株式会社カナン・ジオリサーチ
- 地球観測株式会社
- 近畿大学

## 神戸 JIBANKUN

### 神戸 JIBANKUN 運営委員会

#### 【目 的】

神戸の地盤情報データベースシステム「神戸 JIBANKUN」の保全、更新により維持発展させ、また広く普及を図ること。

#### 【活動内容】

「神戸 JIBANKUN」の所有及びその円滑な更新、維持管理

#### 【委 員】

会 長：神戸市建設局長

委 員：神戸市、(一財)建設工学研究所、  
(株)ドーン、中央開発(株)

#### 【事 務 局】

神戸市建設局道路部技術管理課

#### 【運営事務】

#### 【契約利用者】

大学・企業など約60団体

活用

連絡調整

(神戸市建設局道路部技術管理室)

## 神戸市オブザーバー

- ・危機管理室 (地盤災害情報 WG)
- ・建設局防災部防災課 (河川水文 WG)
- ・ " 河川課 (河川水文 WG)
- ・ " 宅地開発指導課 (土構造物 WG)
- ・ " 道路部工務課 (土構造物 WG)
- ・ " 下水道部計画課 (液状化 WG)
- ・住宅都市局建築指導部耐震推進課 (住宅 WG)
- ・ " 建築技術部技術管理課 (住宅 WG)
- ・みなと総局技術部計画課 (液状化 WG)
- ・水道局事業部配水課 (液状化 WG)
- ・(一財)神戸すまいまちづくり公社  
住環境再生部支援課(地盤災害情報 WG)

# 目次

---

1. 神戸市における路面下空洞調査結果分析の事例
  - ・ 空洞発生傾向分析【H8～29年度調査結果】
  - ・ 空洞発生傾向分析及び進行性の評価【H8～R1年度調査結果】
2. 空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性の評価
3. 3次元地下水流動解析を用いた路面下深層部で生じる空洞の危険度評価手法
4. FWDによる路面変位量計測と空洞危険度評価法
5. 結論



---

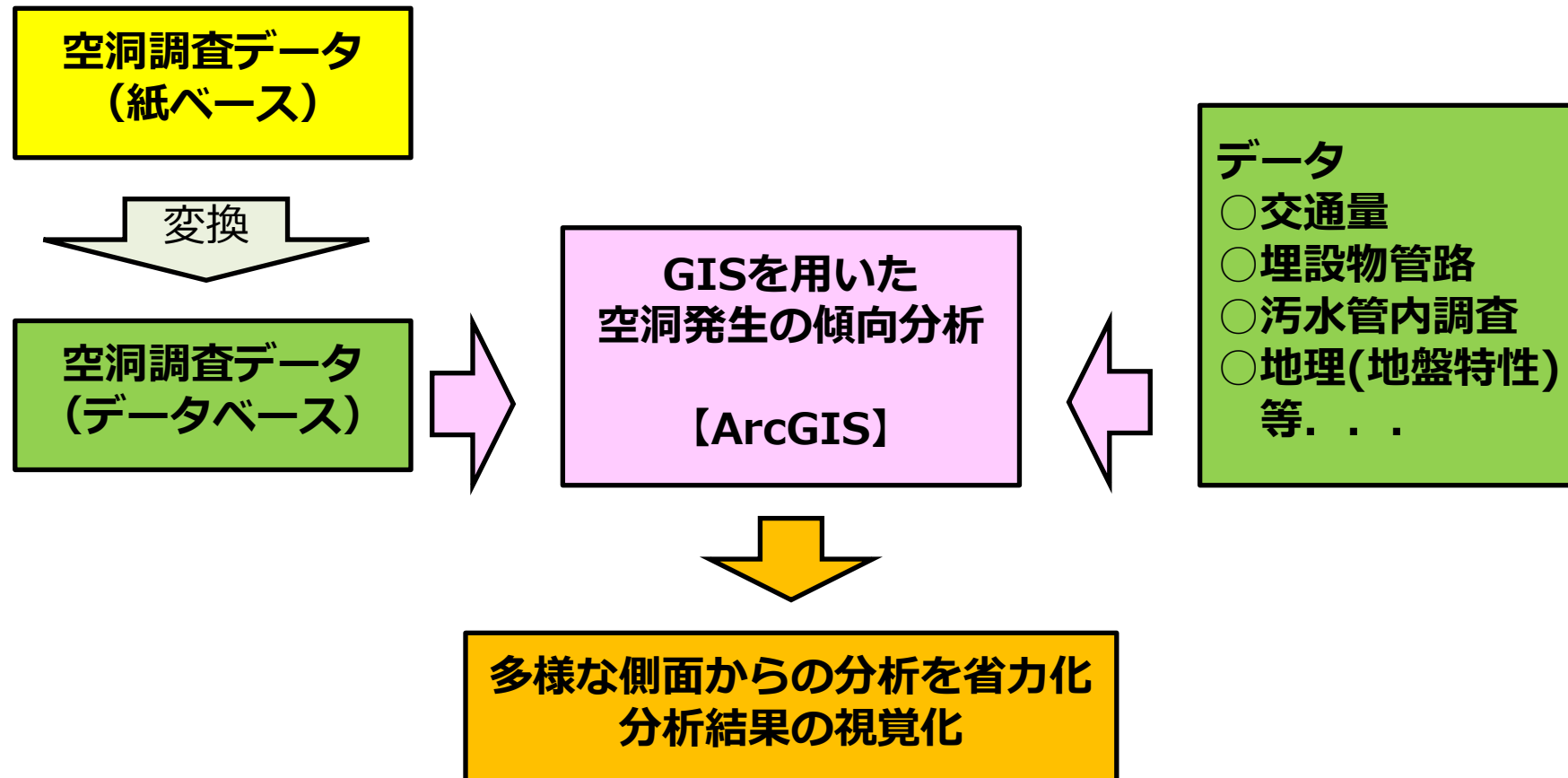
# 1. 神戸市における路面下空洞 調査結果分析の事例

## 【参考文献】

澁谷啓, 田中正吾, 白濟民: 神戸市における路面下空洞調査結果分析の取組み,  
基礎工, Vol.47, No.12, pp.13-16, 2019年12月.

# 空洞調査結果データの分析方法

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ことにより、空洞発生の分類、傾向などの分析を行ってきた。



# 空洞概要

実際の路面下空洞調査データ(神戸市)  
路面下空洞調査データ**960件(H8-H29)**のうち

①空洞：**329件**

レーダ探査の後、スコープ調査を実施・判断

②空洞の可能性有：**960件**

レーダ探査の後、スコープ調査未実施

→直接補修の実施(空洞充填作業)

③その他：**501件**

埋設物・異物等の可能性または異常なし、調査中止

トースコープ撮影記録		③空洞上下部構成	
異常箇所No. 東部-2-2		撮影深度0.00~0.47(m)	構成/層厚(m)
	アスコン	0.10	0.10
	スラグ	0.15	0.25
	空洞	0.19	0.44
	碎石		

## 空洞調査調書(車道部)

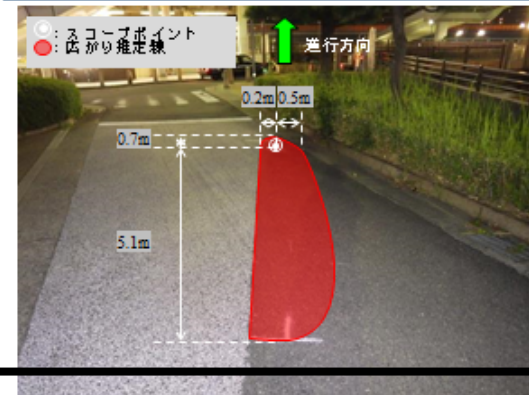
異常箇所No. 東部-2-2

管轄	神戸市建設局 東部建設事務所	路線名	住吉川沿い市道 左岸
レーダ探査日	平成28年8月11日	位置	KP -
スコープ調査日	平成28年9月9日	方向	南行
地先名	神戸市東灘区魚崎中町4丁目8	車歩道	車道部
判定	空洞あり	車線	一方通行左から新設車線

位置図



空洞の広がり



空洞内部撮影記録

撮影深度	構成/層厚(m)	深 度(m)
0.00	アスコン	0.10
0.15	スラグ	0.25
0.19	空洞	0.44
0.44	砕石	

空洞規模

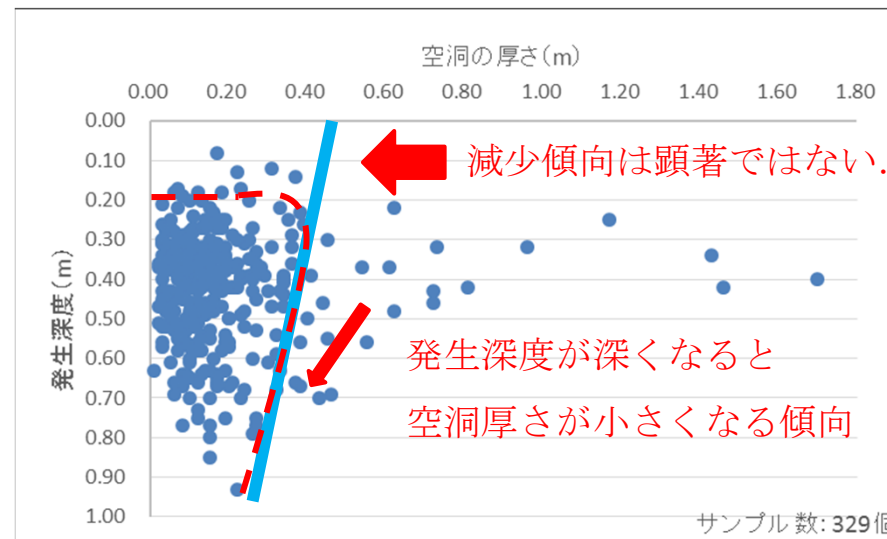
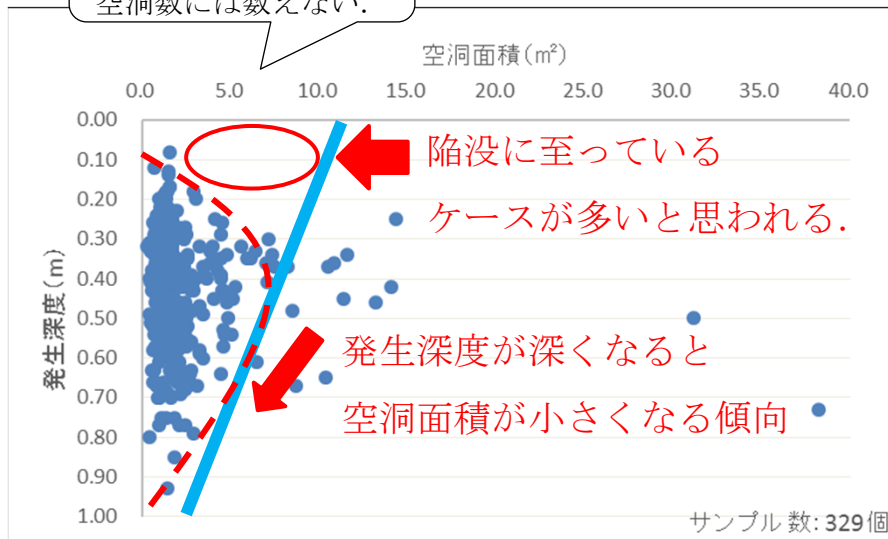
発生深度(m)	0.25	空洞厚(m)	0.19
縦断方向(m)	5.8	横断方向(m)	0.7
面積(m <sup>2</sup> )	4.06	体積(m <sup>3</sup> )	0.77
ゆるみ	無	ゆるみ厚(m)	-

②空洞規模

# 空洞発生状況 ~道路陥没との関連~



道路陥没の場合、  
空洞数には数えない。



- ◇発生深度が深くなると発見される空洞面積、  
空洞厚ともに小さくなる傾向が顕著である。
- ◇発生深度の浅い箇所では、空洞面積は小さい。
- ➡ 大規模な場合、陥没に至っている。
- ◇発生深度が浅い場合でも、  
比較的空洞厚の大きな空洞が存在する。
- ➡ 空洞厚は道路陥没との関連性が低い。

可能性として挙げられる要因 ①管渠



地中埋設管等の  
頭頂部が損傷し、  
上に自立できない  
砂がある場合

破損した管渠  
に見立てた  
土槽実験



吸出し部は  
面積・厚さ  
ともに小さい

桑野ら, (2010)

# 路盤材料構成

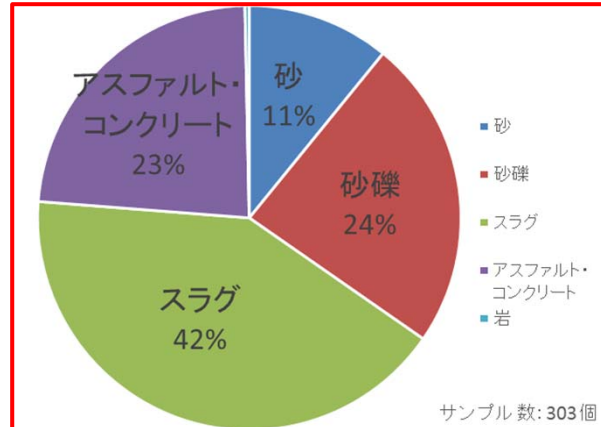
路面下空洞データ329件  
(H8-H29, 神戸市)



空洞内部の状況

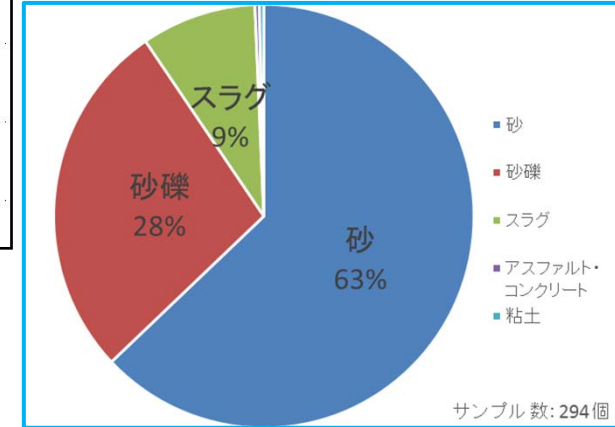
ド-ロスコブ撮影記録		
異常箇所No. 東部-2-2	構成/層厚(m)	深 度(m)
	アスコン 0.10	0.10
	スラグ 0.15	
	空洞 0.19	0.25
	碎石	0.44

空洞上部の路盤材料構成



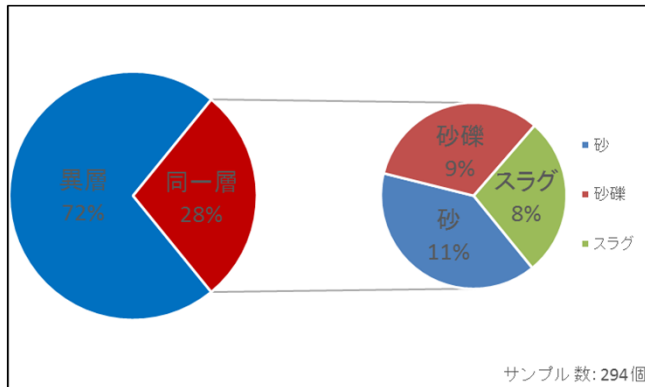
石分が過半数を占める

空洞下部の路盤材料構成



粗粒分が80%を占める

空洞上下部の路盤構成



地盤層の崩壊	空洞数 (個)
同一層	83
異層	211
総計	294

異層構成が  
空洞の70%を占める。

同一層	空洞数 (個)
砂	33
砂礫	27
スラグ	23
総計	83

同一層には  
特異的な点は見られない。

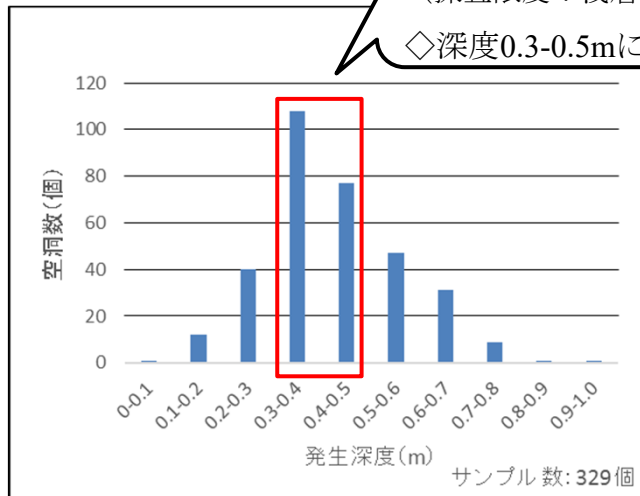
空洞発生傾向①：異層構成で、堅固層と軟弱層の間。



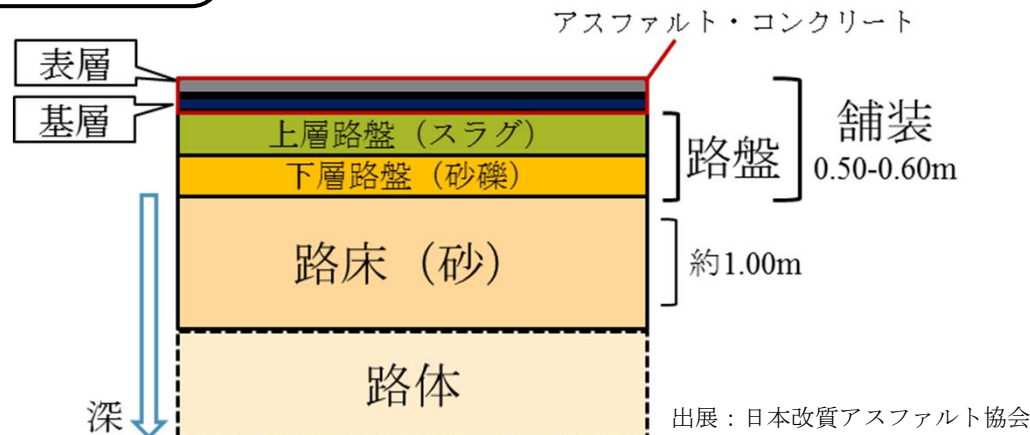
# 路盤材料（素因）の傾向分析 （素因：空洞ができやすい素質）



- ◇発生深度は概ね1.0m以浅  
(探査限度：浅層1.5m)
- ◇深度0.3-0.5mにかけて空洞数が多い



一般的な道路路盤の材料構成



交通振動・土圧  
条件固定

深度0.3-0.5mにおける空洞上下部の路盤材料構成

空洞下部 \ 空洞上部	スラグ	砂礫	砂	総計
アスコン	1	14	26	41
スラグ	14	20	43	77
砂礫	0	9	24	33
砂	0	0	15	15
総計	15	43	108	166

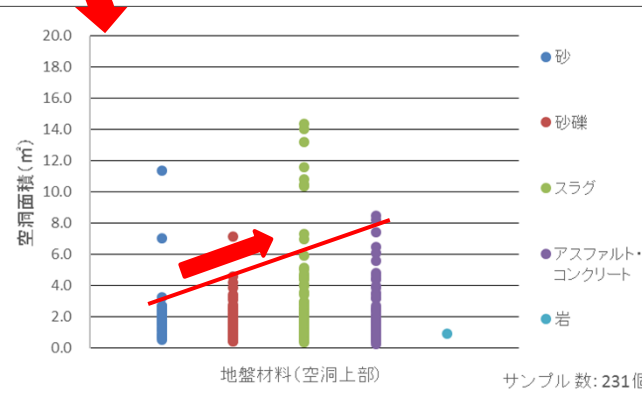
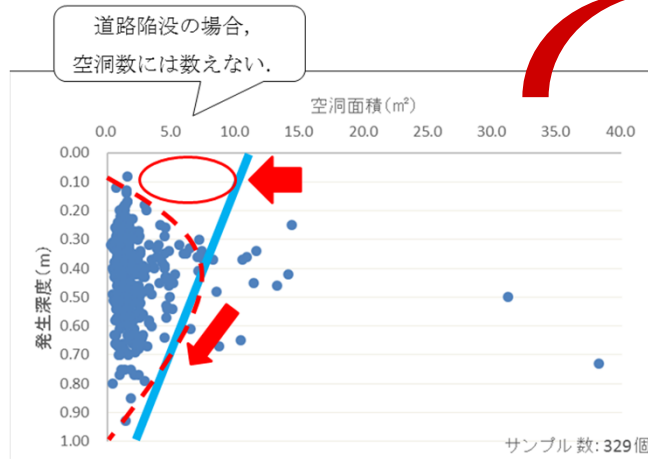
路盤材料間で  
材料強度差が大きいほど  
空洞数が多い傾向

空洞発生傾向②：  
一般的な道路路盤  
の構成でない場合

# 路盤材料（素因）の傾向分析 （素因：空洞ができやすい素質）



同じ特徴を捉えている。



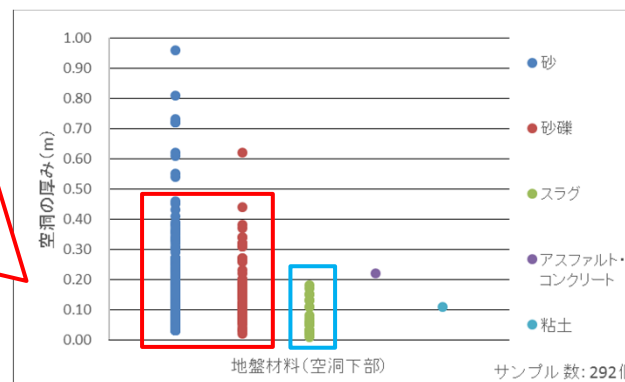
発生深度が浅いと  
空洞面積は拡大する傾向

➡ 吸出し型

一方で・・・

吸出し型だと  
スラグに関する  
空洞の厚みは  
大きくなるはず！

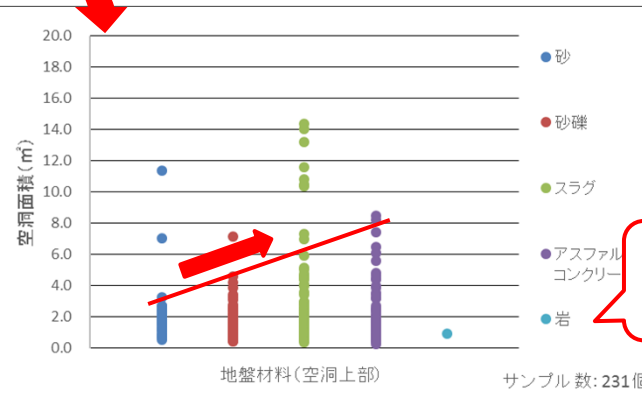
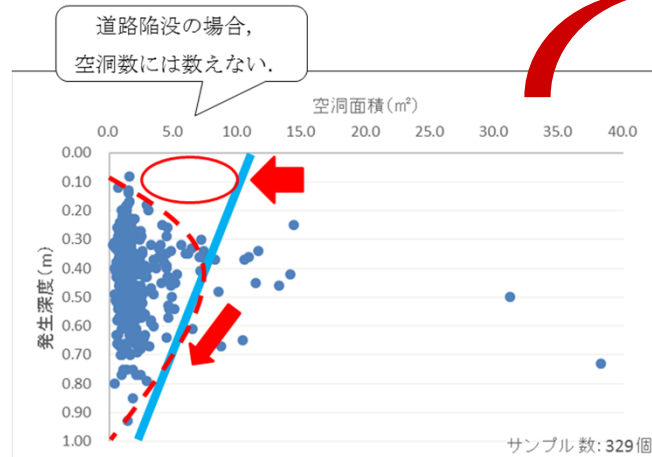
↓  
吸出し以外  
による影響？



# 路盤材料（素因）の傾向分析 （素因：空洞ができやすい素質）



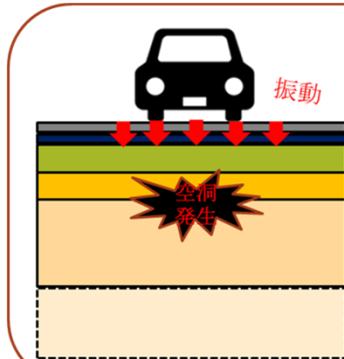
同じ特徴を捉えている。



発生深度が浅いと  
空洞面積は拡大する傾向

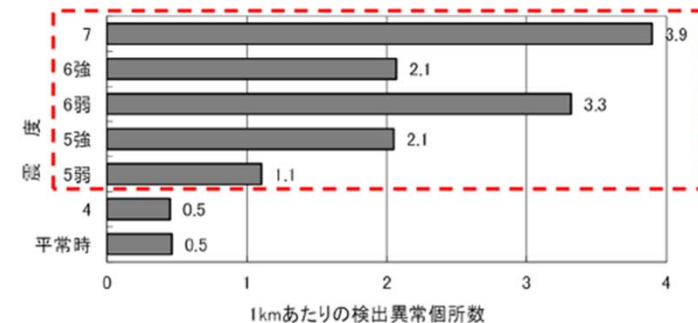
交通活荷重(振動)の影響も  
考えられるのではないかと?

可能性として挙げられる要因 ②振動



振動（交通活荷重や地震動）により、  
地盤材料ごとに異なる挙動を示すことで  
異なる地盤材料の境界面で  
空洞が生成されるのではないかと？

小池ら，（2012）新潟県中越地震前後の異常信号箇所頻度



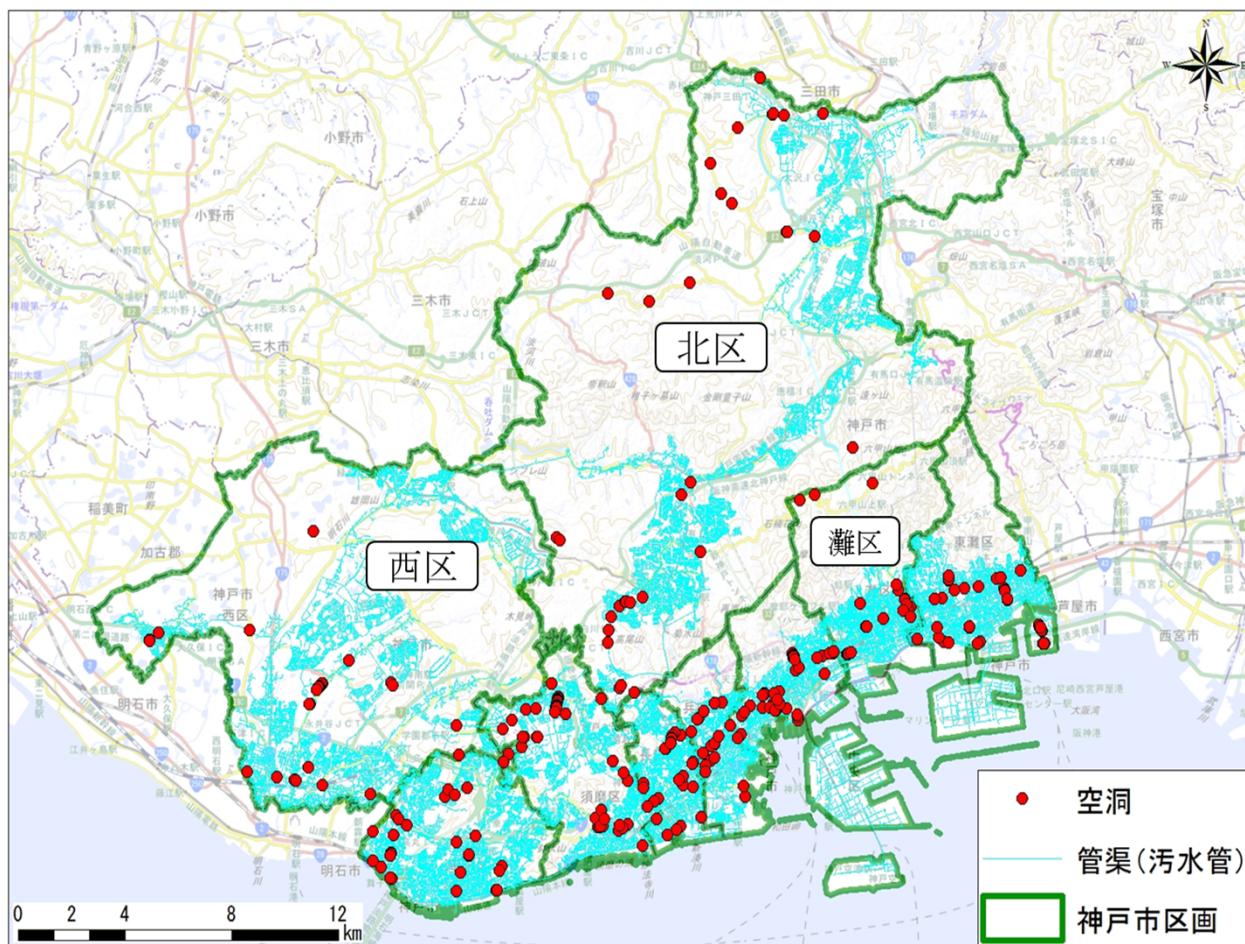
平常時，約0.5件/kmの空洞頻度が  
震度5以上の強振動にさらされると2-8倍近く頻度が高まる。

# 管渠（誘因）の傾向分析

(誘因：空洞へと至るきっかけ)

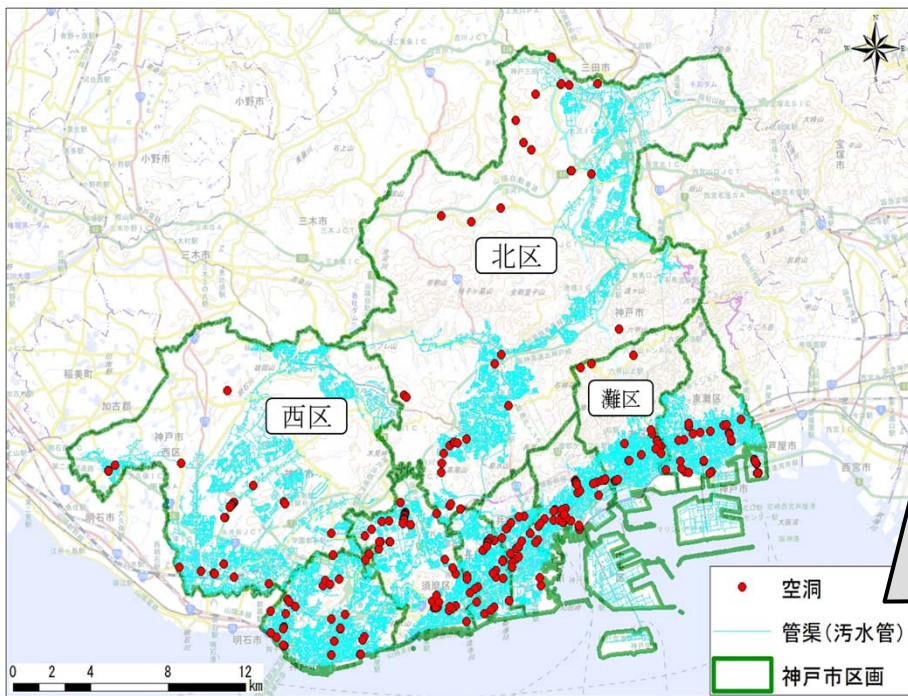
対象地域：神戸市全域

管渠（污水管）：平成25年度神戸市公共下水道管路  
施設台帳システムを使用.

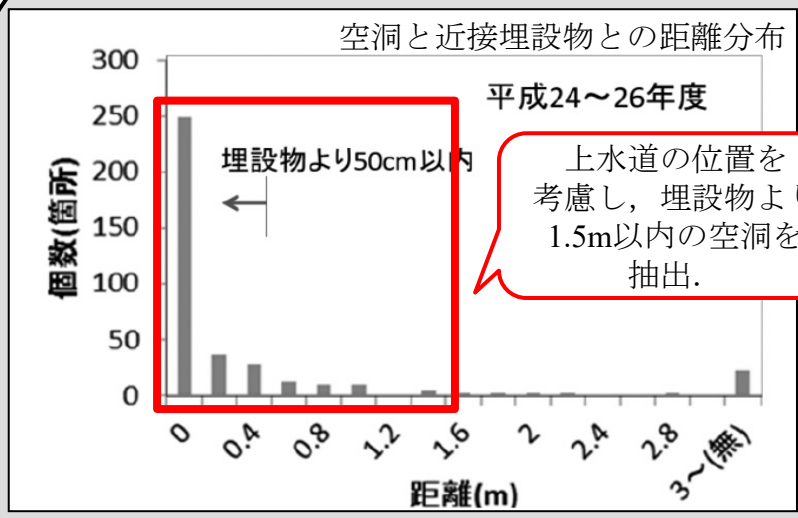




# 管渠（誘因）の傾向分析



堀田ら, (2016)

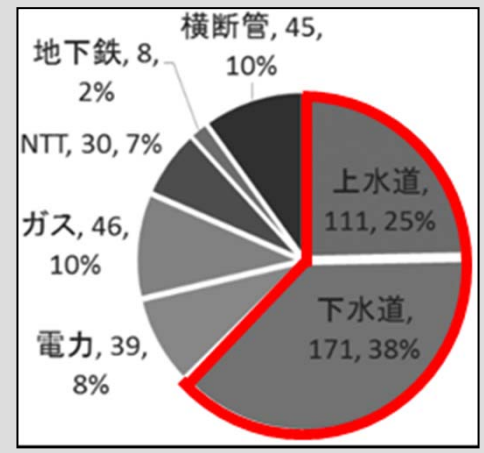


管渠に起因する空洞  
**64/329** → およそ**19%**

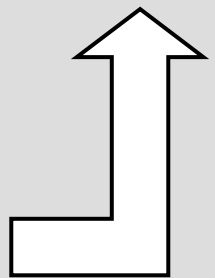
空洞下部の路盤材料は、  
**38/60(63%)**が砂材料であった。

↓

地下水位の変動による吸出しによって  
 細粒分が流出したことで  
 空洞が生成された。



近接埋設物の割合

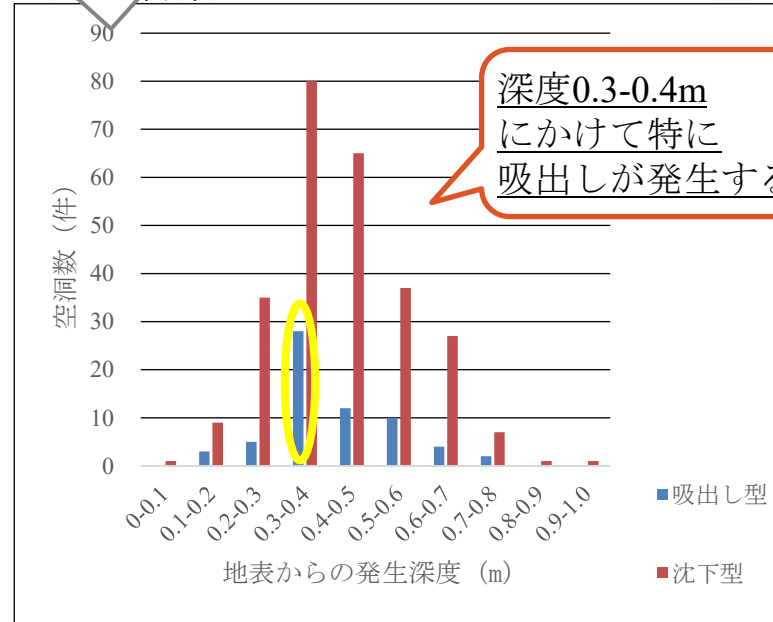
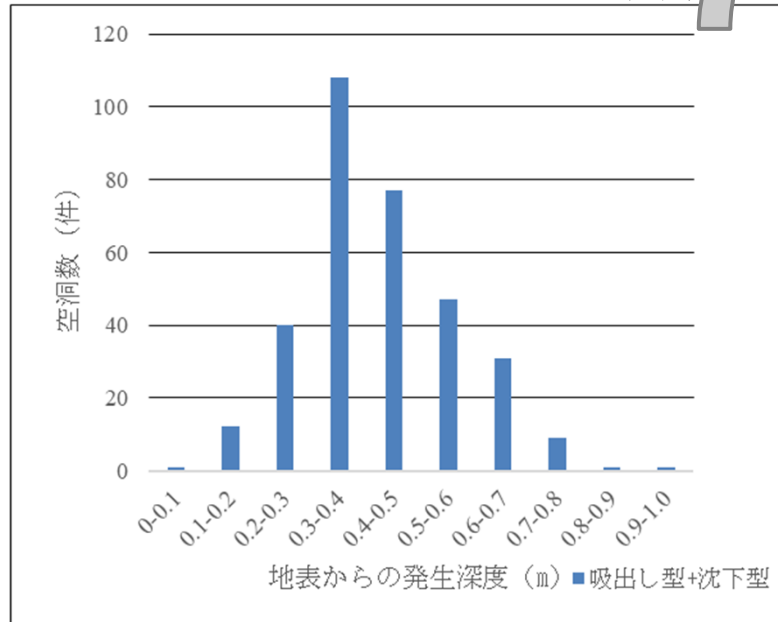




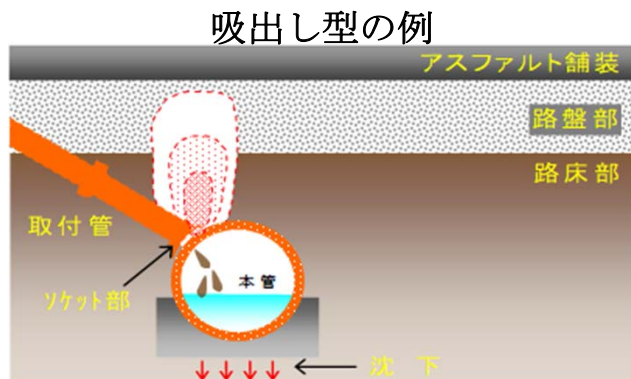
# 管渠（誘因）の傾向分析



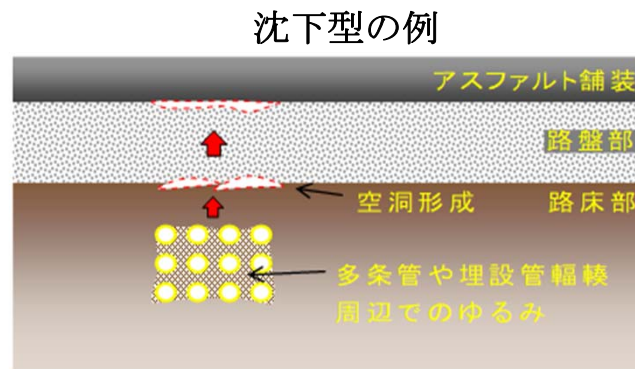
吸出し型と沈下型に分類



深度0.3-0.4m  
にかけて特に  
吸出しが発生する



台風や豪雨の影響を大きく受け、急速に空洞が拡大する傾向



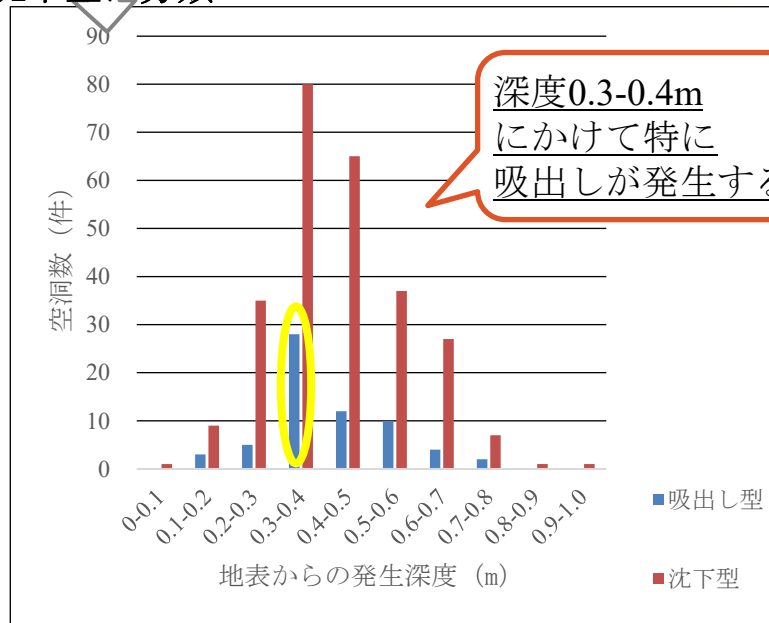
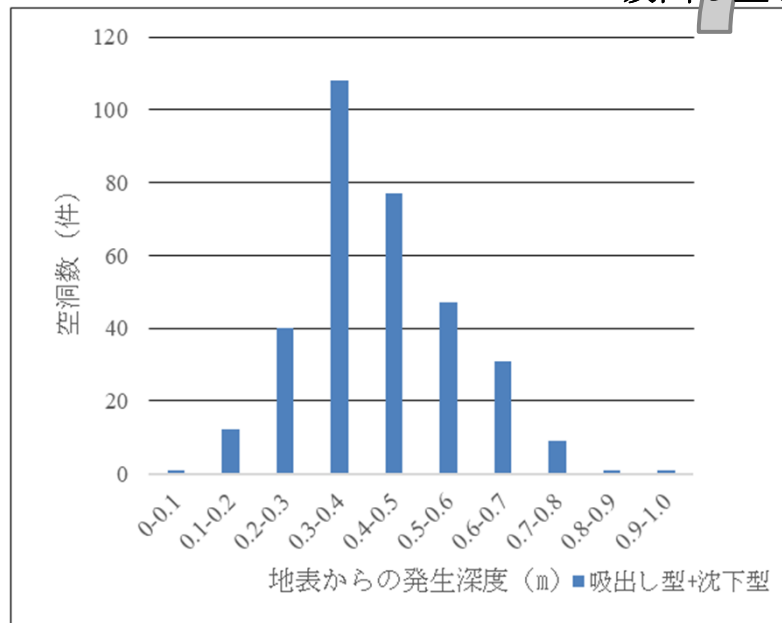
埋設管敷設時の転圧不足ゆるみが時間をかけて拡大、成長速度が遅い

空洞発生傾向③：  
吸出し型で  
深度0.3-0.4m  
もしくは  
砂材料の空洞は  
おおよそ15%の  
割合で発生する。

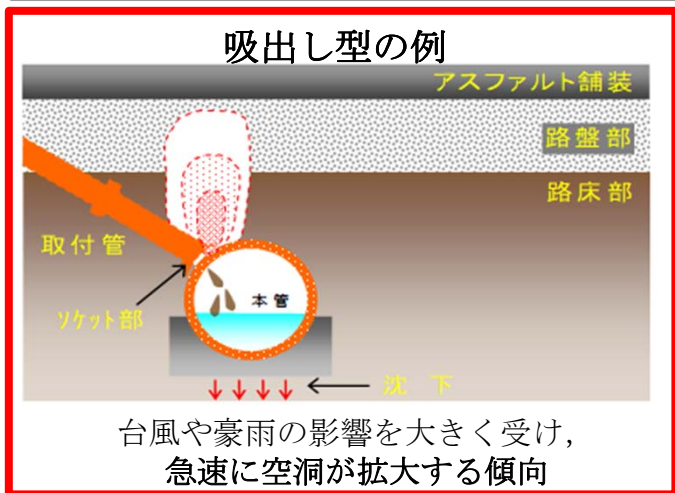
# 管渠（誘因）の傾向分析



吸出し型と沈下型に分類



深度0.3-0.4m  
にかけて特に  
吸出しが発生する

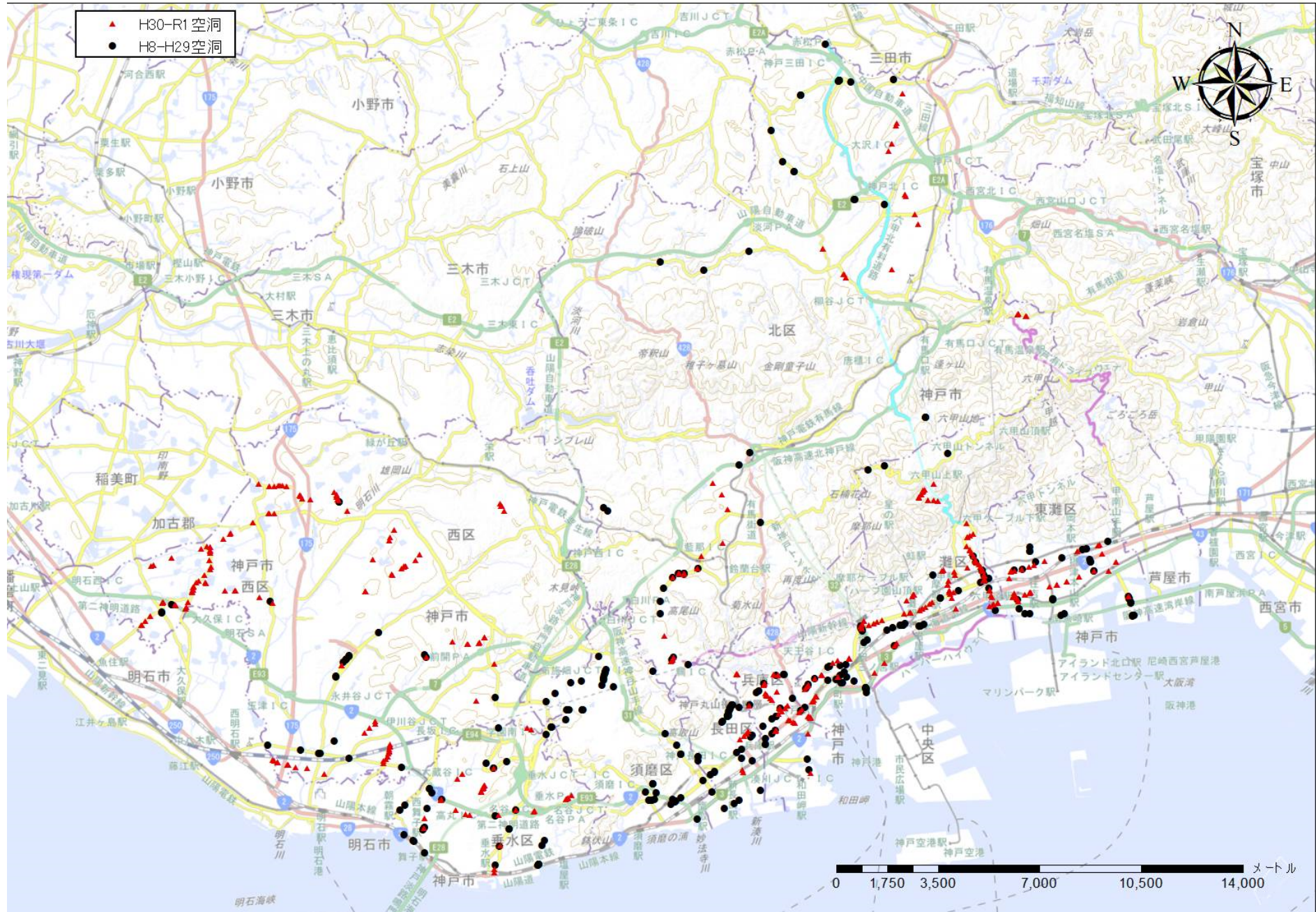


深度1.5m以深で生じる吸出し型の深層空洞は現状の方法では探査できない。  
→対策ができず、非常に危険。

深層部で生じる空洞の危険度評価が重要課！！

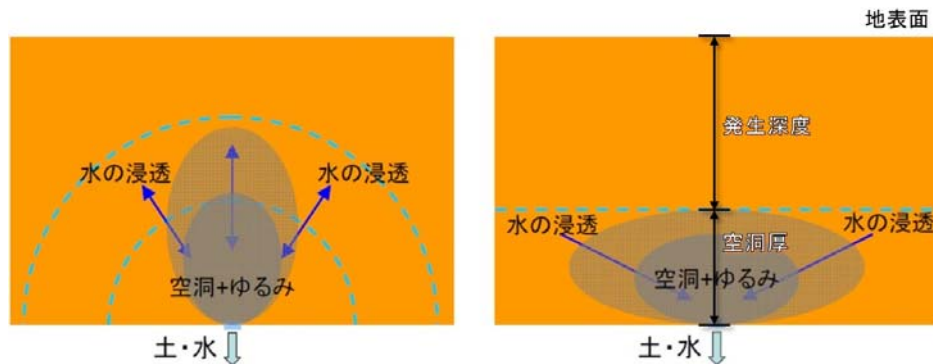
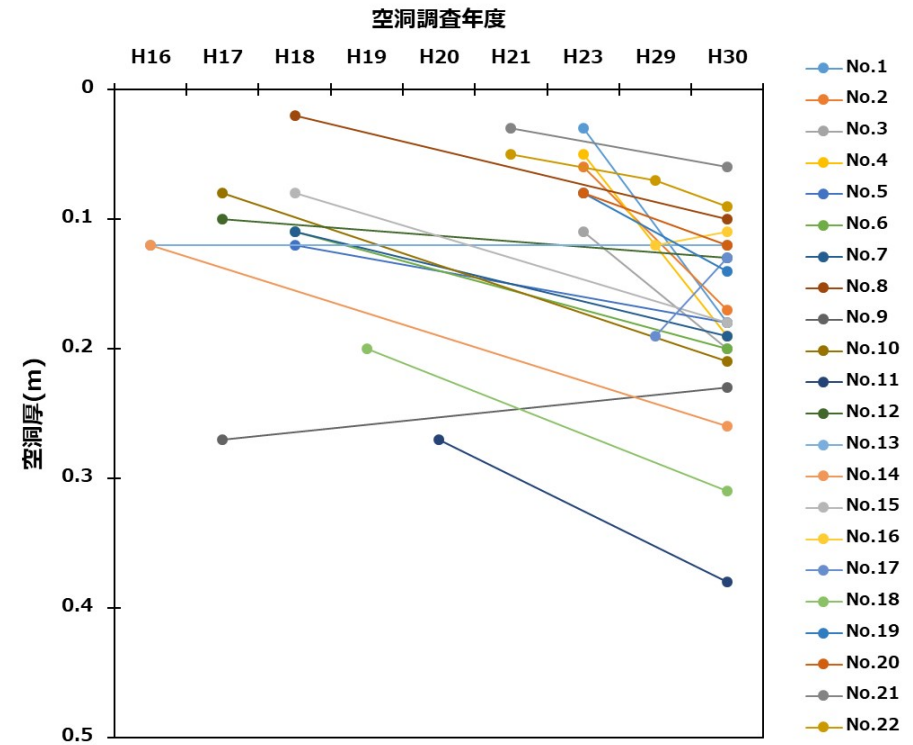
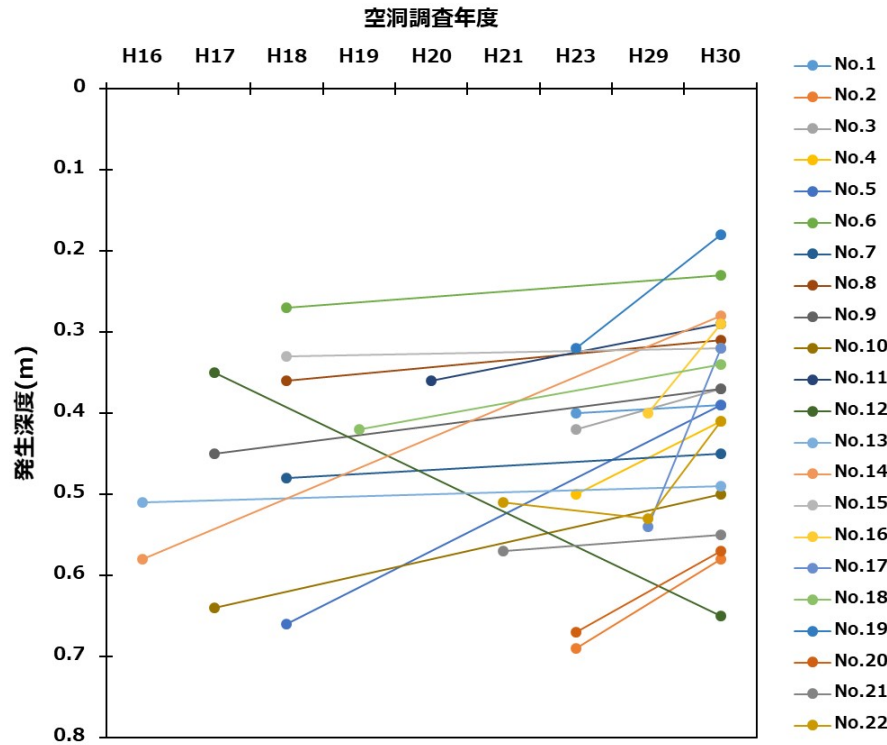


# 空洞分布図 (H8~R1年度)





# 年数経過に伴う発生深度と空洞厚との関係



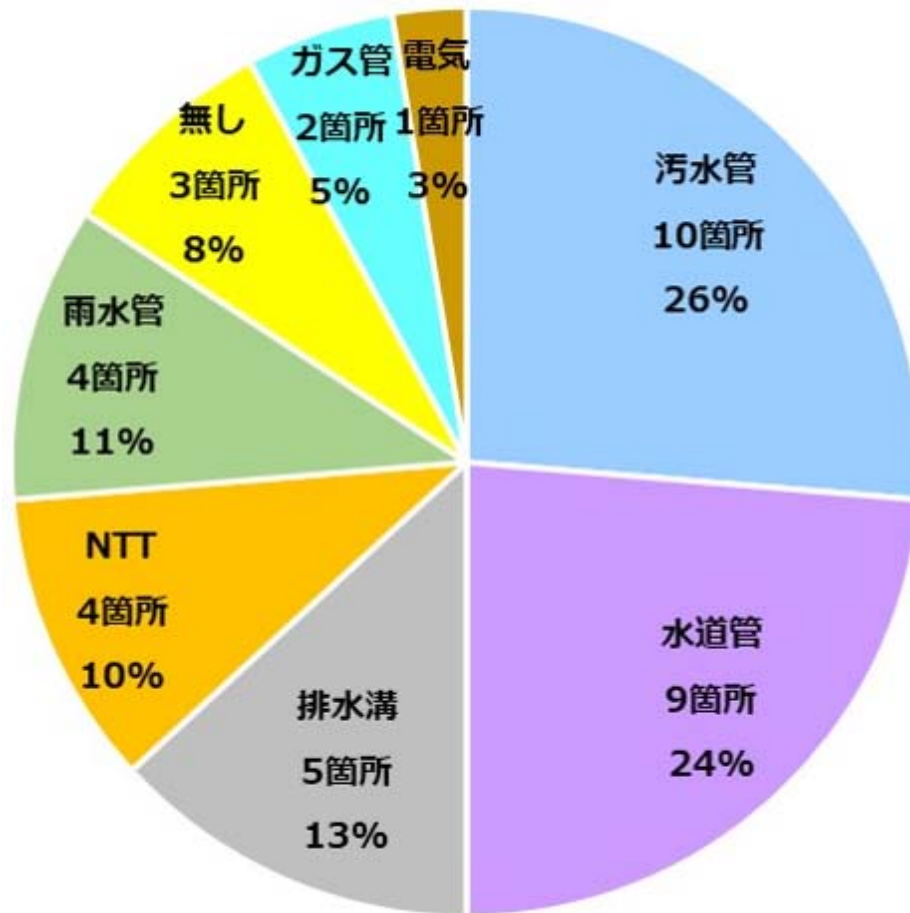
給排水繰返し試験で観察された空洞+ゆるみの進展パターン

定水位土砂流出試験で観察された空洞+ゆるみの進展パターン

過去(H16～29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及び崩落することにより、空洞が上方に進行したと考えられる。

# 重複空洞箇所周辺の埋設管の種類 (数量の重複あり)



都市部で頻発している路面下空洞は、多くの場合、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。本業務で把握した重複空洞箇所（計22箇所）の内、**19箇所**も本ケースに近いと考えられる。

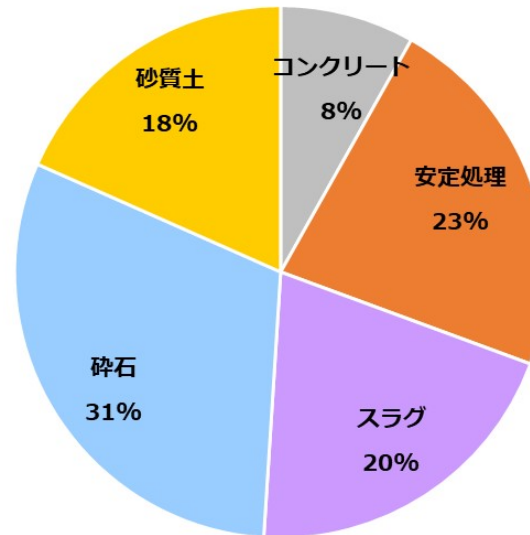
河川沿いに発生した空洞箇所として、**4箇所**（No. 9,10,16,17）程度があるものの、河川沿いの反対側の車線に空洞がある場合や河川から多少距離があることから、吸出しの影響で発生した空洞ではなく、転圧不足の可能性が高いと推察される。No.9,10,17の空洞箇所には地下埋設管が0.5m以内で近接されており、No.16の場合は地下埋設管がないが、開削跡と近接していることから開削工事後、埋戻しの時の転圧不足の可能性がある。



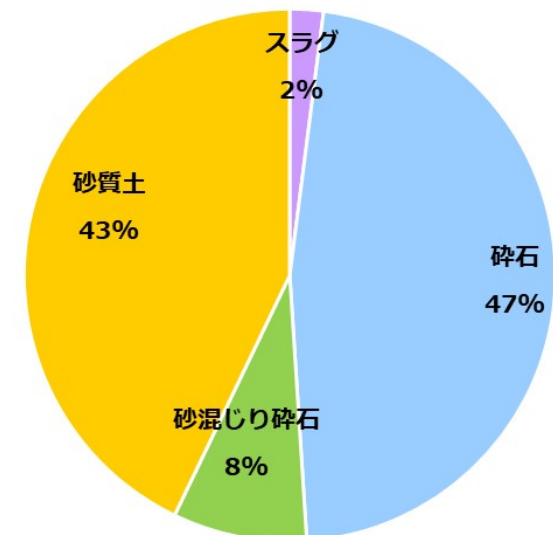
# 空洞上下部での路盤層の構成割合

ドロースコップ撮影記録		
異常箇所No. 東部-2-2		
撮影深度0.00~0.47(m)	構成/層厚(m)	深 度(m)
	アスコン 0.10	0.10
	スラグ 0.15	0.25
	空洞 0.19	0.44
	砕石	0.44

空洞上部材料



空洞下部材料



**空洞上部の路盤材料**は砕石、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。**

**空洞下部の路盤材料**は砕石、砂質土、砂混じり砕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、下層が砂質土や砕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。

下部 \ 上部	材料				総計
	スラグ	砕石	砂混じり砕石	砂質土	
コンクリート	0	0	0	4	4
安定処理	0	7	2	2	11
スラグ	1	5	0	4	10
砕石	0	11	2	2	15
砂質土	0	0	0	9	9
総計	1	23	4	21	49

---

## **2. 空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性の評価**

# 日本の道路舗装(路面)のメンテナンスの現況(1/2)

## STEP1 道路舗装(路面)の現状調査実施

路面の損傷状態を示す、ひび割れ・わだち掘れ・平坦性などを測定し、損傷度を判定する調査

\*IRI(International Roughness Index)

## STEP2 舗装維持管理計画(短期補修計画)の策定

- ① 舗装補修対象の設定  
:例えば、「 $MCI \leq 3.0$ またはひび割れ率 $\geq 40\%$ もしくはわだち掘れ量 $\geq 40\text{mm}$ 」
- ② 優先箇所選定項目の設定  
:例えば、舗装補修対象の設定項目、現況総交通量、現況大型車交通量
- ③ 優先順位分類  
:例えば、定量化した区間を点数により、A・B・C判断に分類
- ④ 舗装補修、(今後5ヶ年補修目標設定)

# 日本の道路舗装(路面)のメンテナンスの現況(2/2)

---

## STEP3 舗装維持管理計画の見直し

- ① 舗装維持管理計画の運用:5年/サイクル
- ② 目標に対する評価:調査・補修達成度、MCI値
- ③ 老朽予測モデル作成:性状調査、補修履歴データを用いて老化傾向の把握
- ④ 重点管理区間の設定:老化速度が著しい区間抽出
- ⑤ 予算計画の見直し、舗装維持管理計画の見直し

# 舗装の維持管理指数MCI(Maintenance Control Index)

- 舗装の共用性を「ひび割れ率」、「わだち掘れ量」および「平たん性( $\sigma$ )」という路面性状値によって定量的に評価するものである
- 1981年に建設省土木研究所が道路局、地方建設局とともに、維持修繕判断を行う総合的な指標として開発したものである
- $MCI=10-1.48C^{0.3}-0.29D^{0.7}-0.47\sigma^{0.2}$

ここで、C=ひび割れ率(%)

D=わだち掘れ(mm)

$\sigma$ =平たん性(mm)

維持管理指数 (MC I)	判定
$5.0 < MC I$	修繕の必要なし (望ましい管理水準)
$4.0 < MC I \leq 5.0$	修繕することが望ましい
$3.0 < MC I \leq 4.0$	修繕が必要
$MC I \leq 3.0$	早急に修繕が必要



# 路面性状集計表(一部)

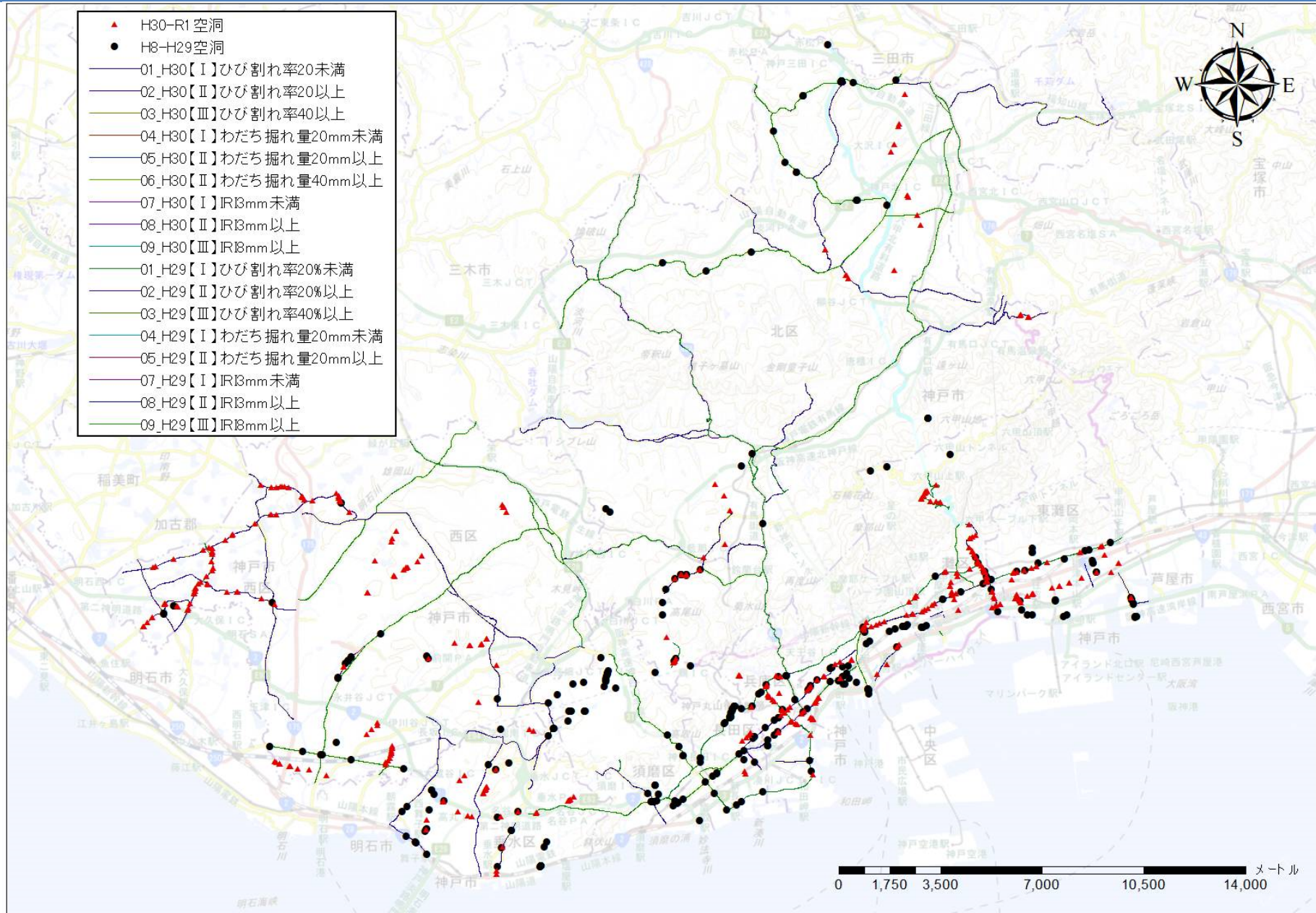
## 平成29～30年度路面性状集計表(一部)

道路種別	路線			調査延長 (m)	路面性状平均値				Ⅲ修繕段階		Ⅱ表層機能維持段階	
	路線番号	枝番	路線名		MCI	ひび割れ (%)	わだち掘れ (mm)	IRI (mm)	延長 (m)	占有率 (%)	延長 (m)	占有率 (%)
平成29年度調査全体				381,565	5.8	8.9	10.8	4.1	8,305	2.2	290,860	76.2
国道 (指定 区間外)	1176	0	国道176号	7,030	5.6	8.8	11.5	3.1	0	0.0	3,815	54.3
	1176	1	国道176号(旧道)	1,550	5.2	12.1	11.2	4.3	0	0.0	1,450	93.5
	1428	0	国道428号	48,960	5.5	11.9	10.7	4.2	2,100	4.3	40,260	82.2
	1428	1	国道428号-1(旧道)	2,230	6.0	6.5	10.2	4.8	100	4.5	2,030	91.0
	1428	2	国道428号-2(旧道)	1,010	5.1	13.9	10.4	4.9	5	0.5	1,005	99.5
一般国道計				60,780	5.5	11.4	10.8	4.1	2,205	3.6	48,560	79.9

## 舗装の損傷レベル

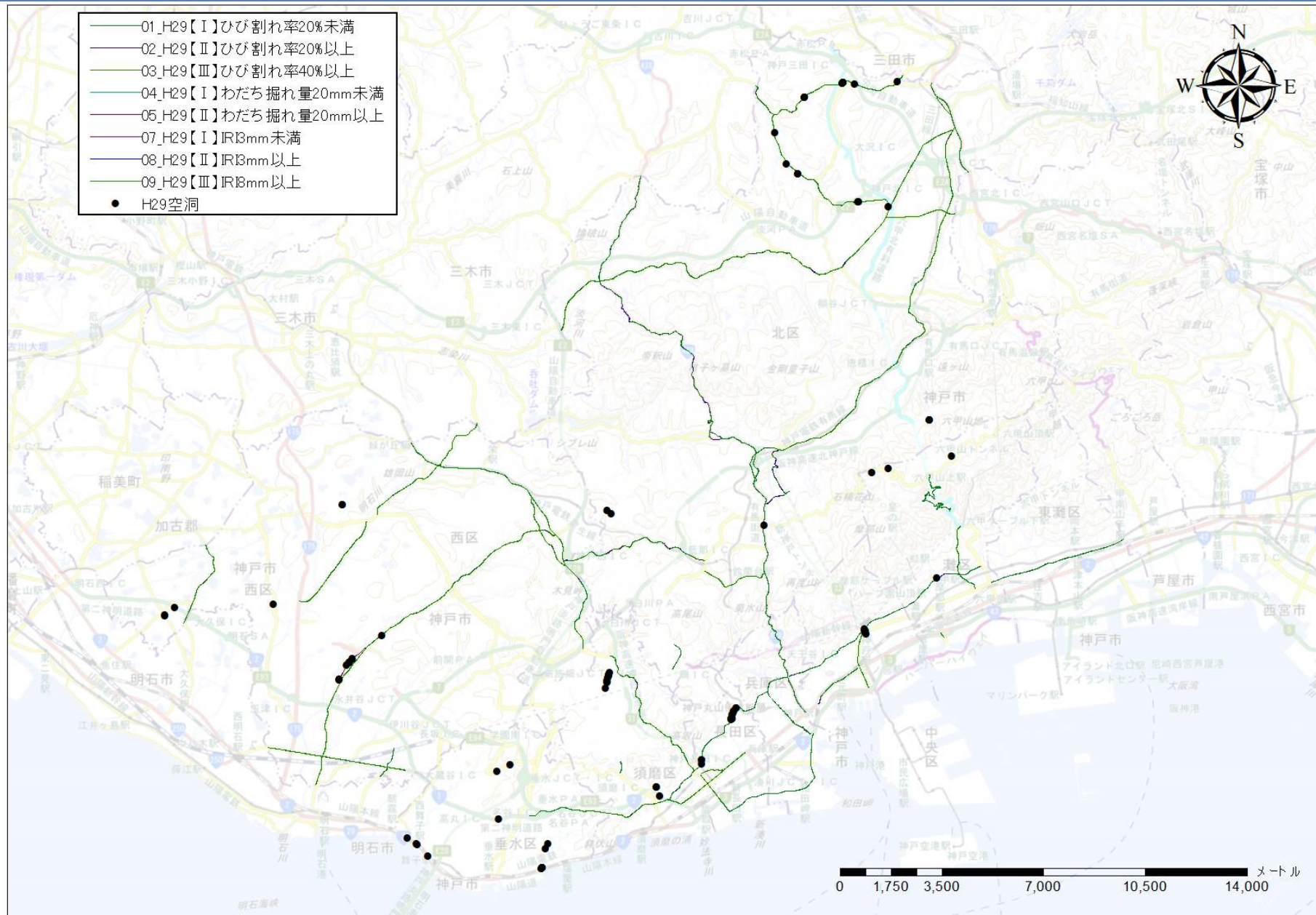
区分		ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI
I	健全	20%未満程度	20mm未満程度	3mm/m未満程度
II	表層機能保持段階	20%以上程度	20mm以上程度	3mm/m以上程度
III	修繕段階	40%以上程度	40mm以上程度	8mm/m以上程度

# H8～R1年度空洞箇所とH29～30年度路面性状調査結果



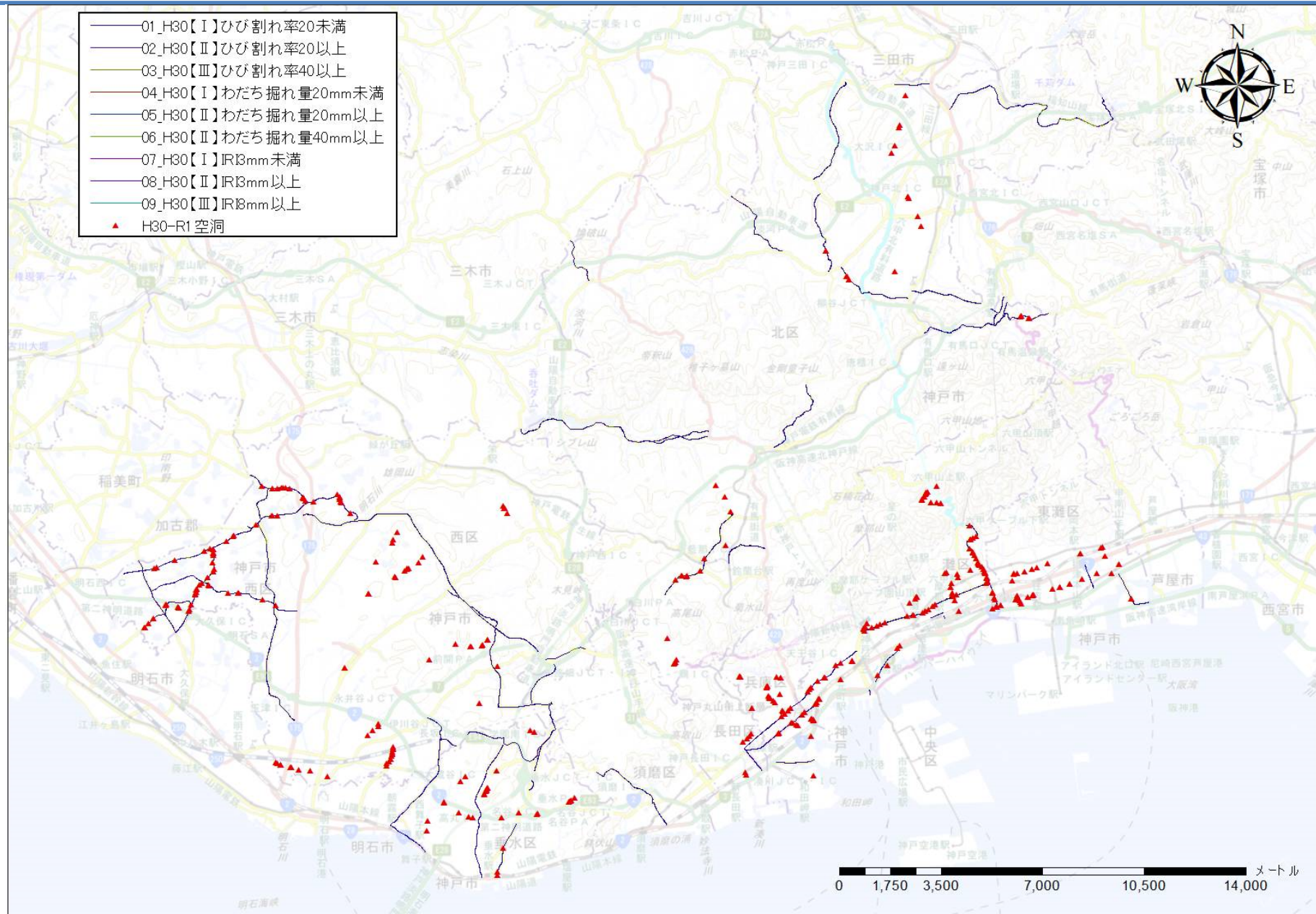


# H29年度空洞箇所とH29年度路面性状調査結果





# H30～R1年度空洞箇所とH30年度路面性状調査結果



# 分析結果（集計表）

## H29年度路面性状調査結果とH29年度空洞調査結果の集計表

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

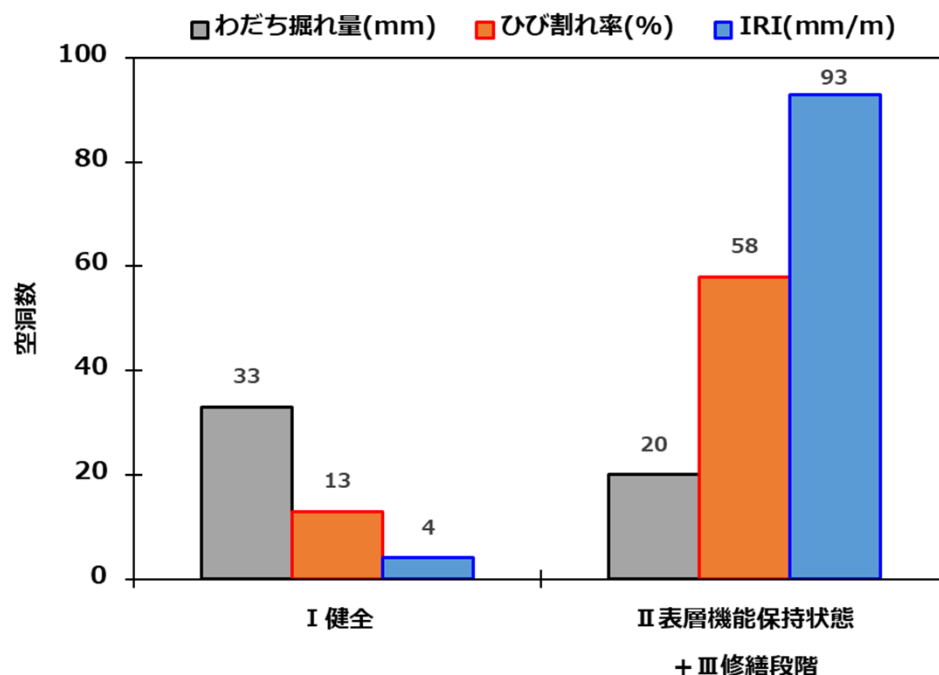
※計110箇所のH29年度空洞の内，路面性状を調査した対象路線と重複されている空洞箇所は97箇所程度である（I，II，IIIが重複されている区間に空洞がある場合は，損傷レベルが高い方（III>II>I）の空洞箇所として調整した）。

## H30年度路面性状調査結果とH30～R1年度空洞調査結果の集計表

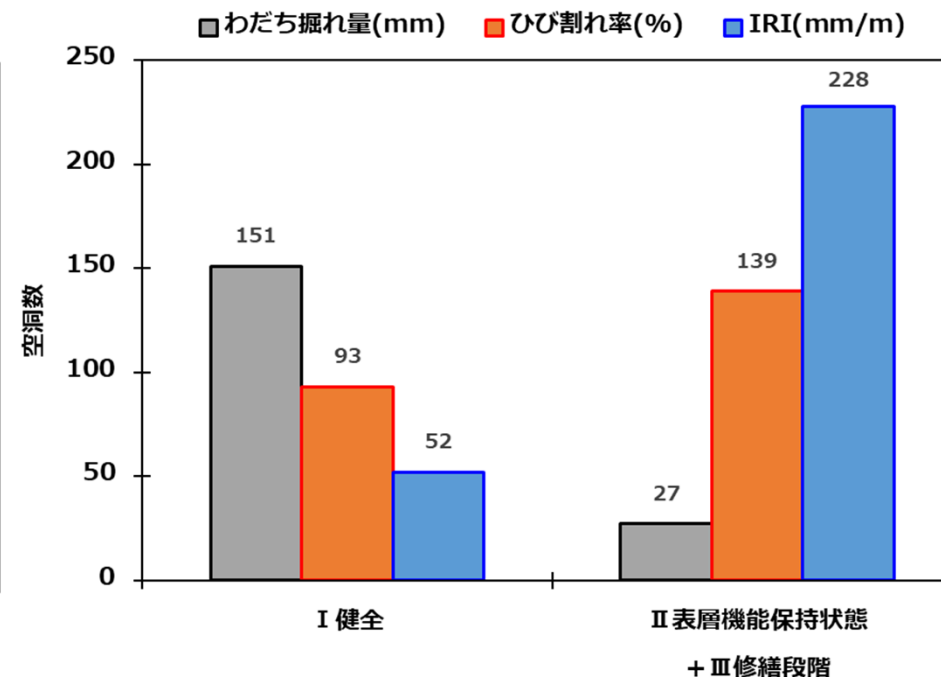
区分	ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI
I 健全	93箇所 (20%未満)	151箇所 (20mm未満)	52箇所 (3mm/m未満)
II 表層機能保持状態	83箇所 (20%以上)	25箇所 (20mm以上)	216箇所 (3mm/m以上)
III 修繕段階	56箇所 (40%以上)	2箇所 (40mm以上)	12箇所 (8mm/m以上)

※計451（H30：251箇所+R1：200箇所）箇所のH30～R1年度空洞の内，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232箇所程度である（I，II，IIIが重複されている区間に空洞がある場合は，損傷レベルが高い方（III>II>I）の空洞箇所として調整した）。

# 分析結果 (グラフ)



H29年度路面性状調査結果と  
H29年度空洞調査結果の集計グラフ



H30年度路面性状調査結果と  
H30~R1年度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。

---

# 3. 3次元地下水流動解析を用いた路面下深層部で生じる空洞の危険度評価手法

## 【参考文献】

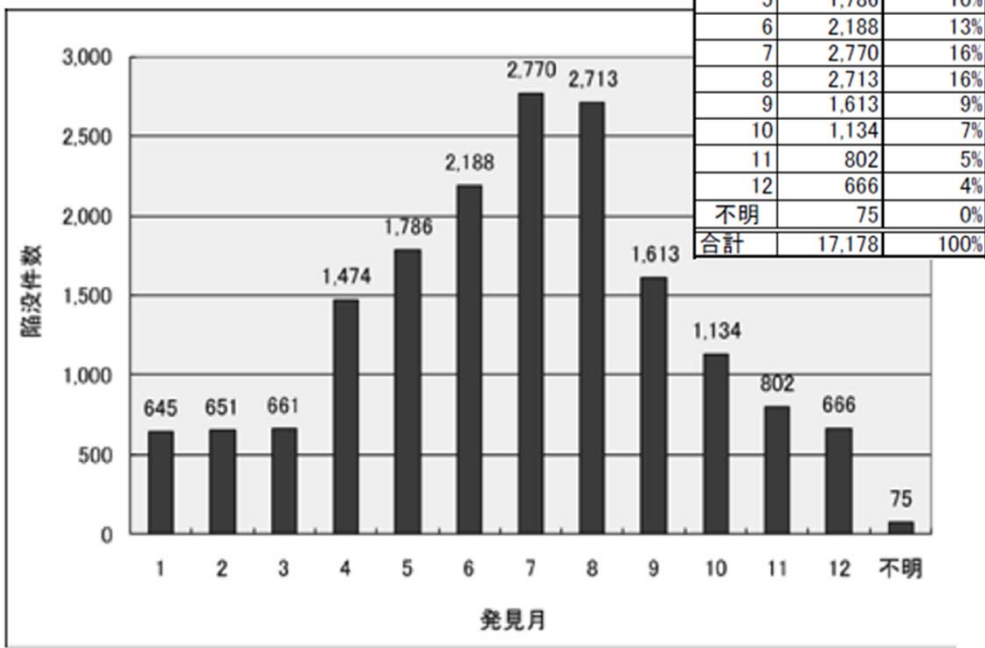
- 1) 白濟民, 許晋碩, 澁谷啓: 地下水流動解析を用いた路面下深層部で生じる空洞の危険度評価手法, 基礎工, Vol.47, No.12, pp.51-54, 2019年12月.
- 2) 澁谷啓, 白濟民, 齋藤雅彦: 雨水浸透施設の適地マップ作成のための地盤調査・解析法, 土木学会論文集C (地圏工学), 公益社団法人土木学会, Vo.71, No.4, pp.380-394, 2015年, DOI : <https://doi.org/10.2208/jscejge.71.380>



# 地下水位による深層空洞への影響推定



横田ら, (2012)  
平成18-21年における陥没発生月別集計結果



◇夏季前後も陥没が多い傾向。  
→梅雨や台風の影響による降雨量の増加

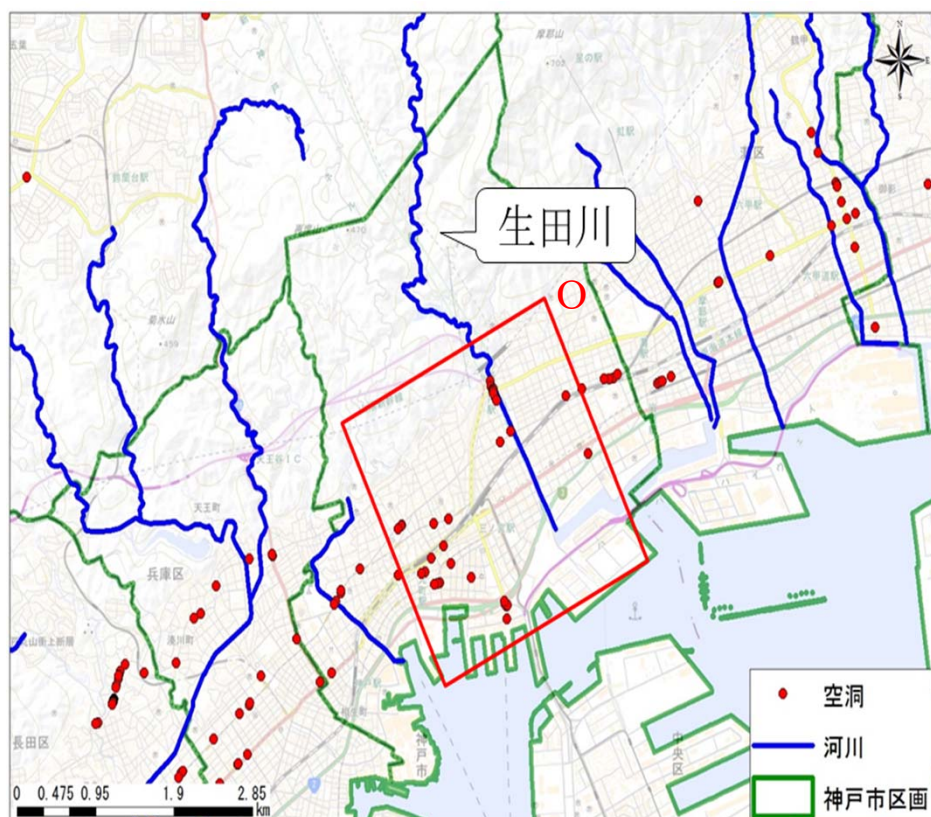
- ①地下水位の急激な変動による沈下作用
- ②管渠内の水量増加変動に伴う土砂流入の促進作用

これらにより、空洞の拡大が進行するとみられる。



目的：3次元地形・地盤モデルを構築、各種境界条件を設定し、地下水流動解析を実行することで降雨時の地盤浸透水が地下水位の変動に及ぼす影響を検討することで、地下水位による深層空洞の危険度評価を行う。

# 解析準備



- 対象地域：  
神戸市中央区の一部地域  
(南北約2.5km, 東西約3km)
- 山地から丘陵, 扇状地, 海岸低地, 埋立地といったひな壇型の地形構造を有する。  
(地質: 沖積層)
  - 領域内に空洞分布の偏りがある。
  - 生田川が北から南へと流れる。  
(かつ付近で空洞が発生している。)

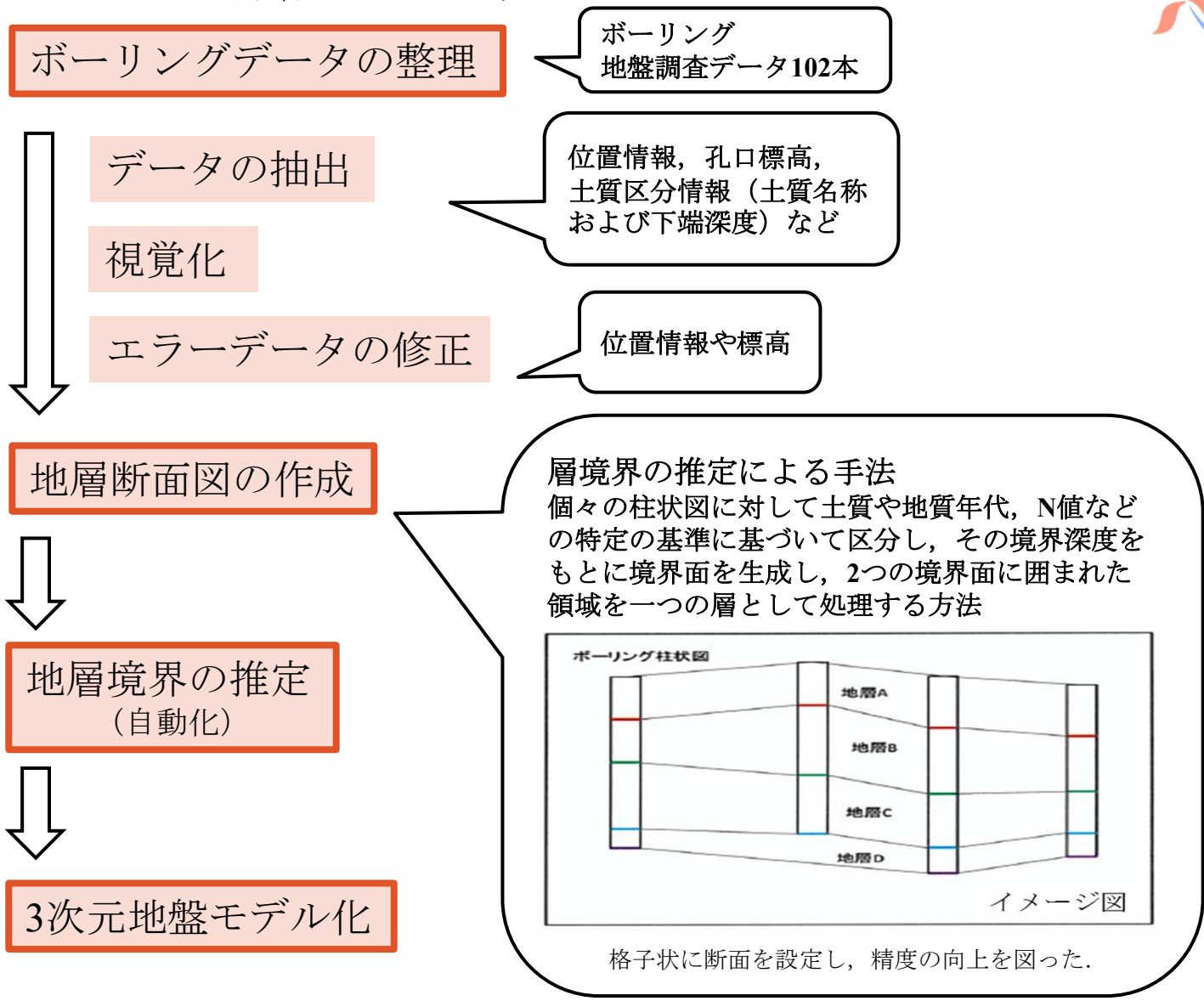
ボーリングデータ: 神戸JIBANKUNより入手。  
〔 神戸JIBANKUN: 神戸市が実施したボーリング地盤調査データを  
地図上で検索, 利用できるシステム 〕

Groundwater Modeling System-MODFLOW :  
地下水流動解析等を行えるソフトウェアで, ボーリングデータの入力, 地盤モデルの構築,  
境界条件の設定, 解析を一元的に管理・実行できる。AQUAVEO社製。

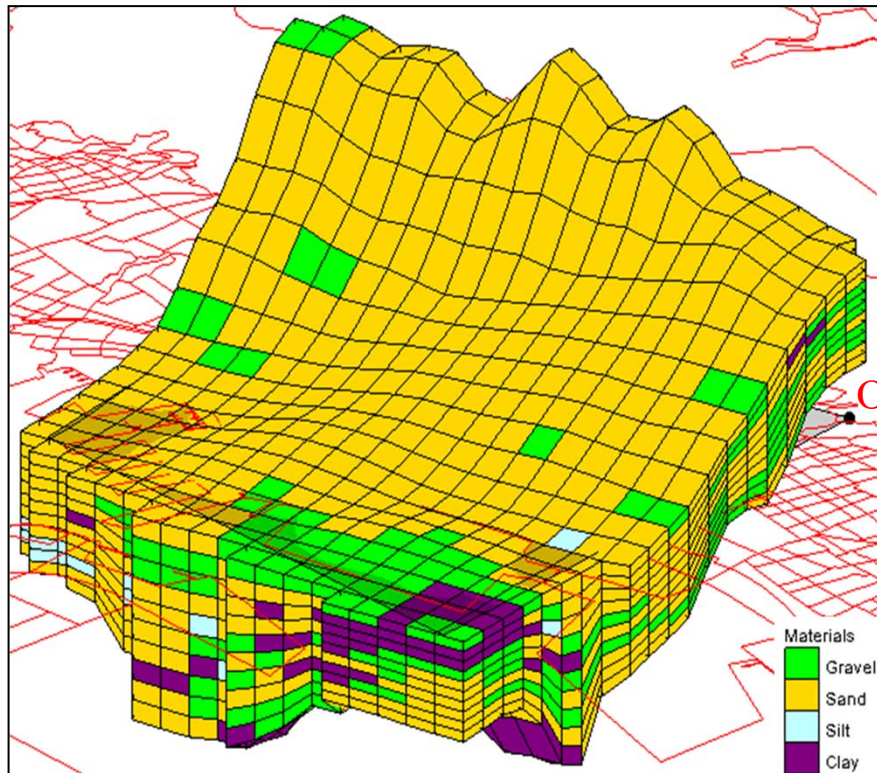
# 3次元地形・地盤モデルの構築



3次元地形・地盤モデル構築のフローチャート



# モデルグリッド・浸透パラメータ



透水係数 (地盤工学会 地盤材料試験の方法と解説)

地層色	地層区分	透水係数 $k_{x,y,z}$ [m/s]
緑	礫	$2.0 \times 10^{-4}$
黄	砂	$2.8 \times 10^{-5}$
青	シルト	$1.0 \times 10^{-6}$
紫	粘土	$1.0 \times 10^{-8}$

浸透パラメータ

比貯留係数 $S_s$ [1/m]	比産出率 $S_y$	有効間隙率 $P_{eff}$	全間隙率 $P_{tot}$
$1.0 \times 10^{-5}$	0.2	0.15	0.3

不飽和浸透パラメータ

(白ら, 2015)

指標	数値
Brooks-Corey指数	3.452
飽和含水比 ( $m^3/m^3$ )	0.3156
初期含水比 ( $m^3/m^3$ )	0.2
浸透率 (m/d)	0.0004
蒸発散要求率 (m/d)	0.0001
蒸発散収束深さ (m)	1.0
蒸発散収束含水比 ( $m^3/m^3$ )	0.1002

モデルグリッド：水平方向は150m四方，鉛直方向は地層区分ごとに設定。

土質分類の簡略化：礫，砂，シルト，粘土の4地層。

透水係数：原位置試験等を行っていないため，文献値を採用，異方性は考慮しない。

浸透パラメータ：全ての層（グリッド）に同一値を設定。

不飽和浸透パラメータ：表層地盤の保水性を考慮。

→地下水面と地表面の間にある不飽和領域における水の浸透，流れ，貯留を想定。  
現場注水試験を行っていないため，芦屋市での同パラメータを使用。

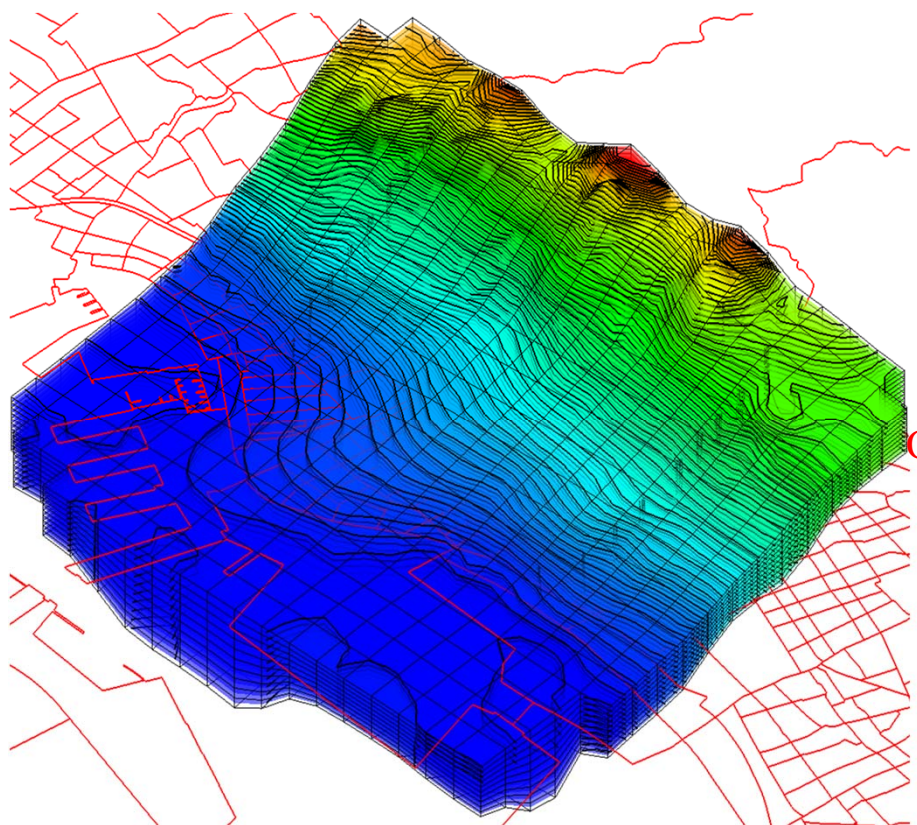




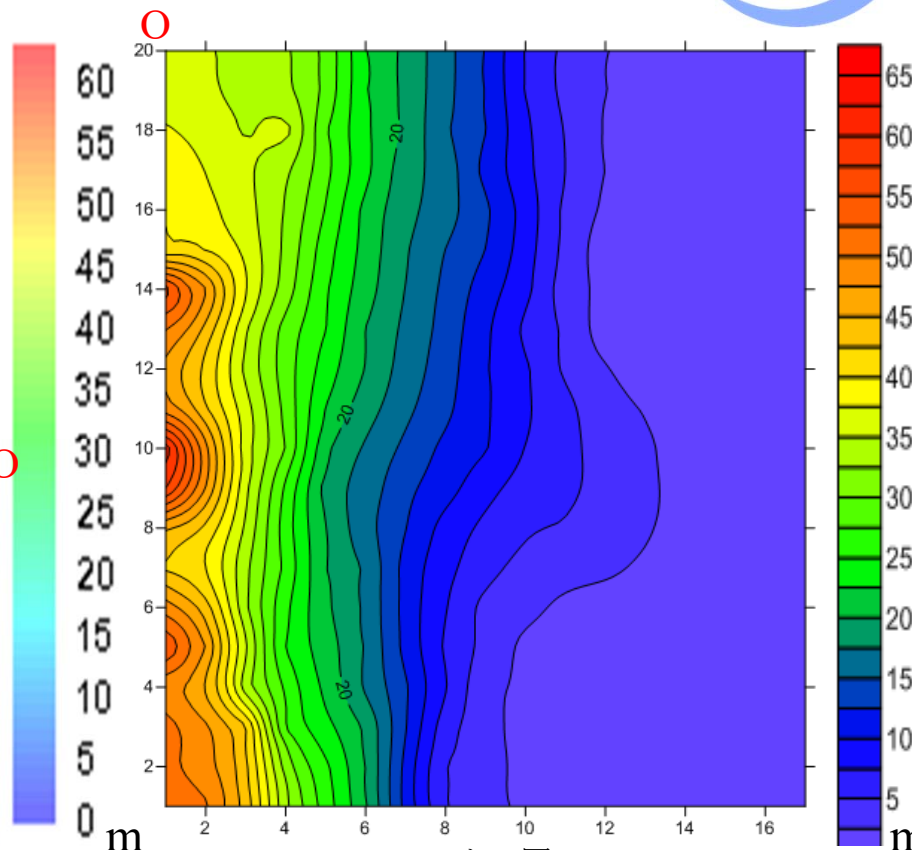
# 各種条件



## 初期条件



3次元表示



コンター図

初期条件：

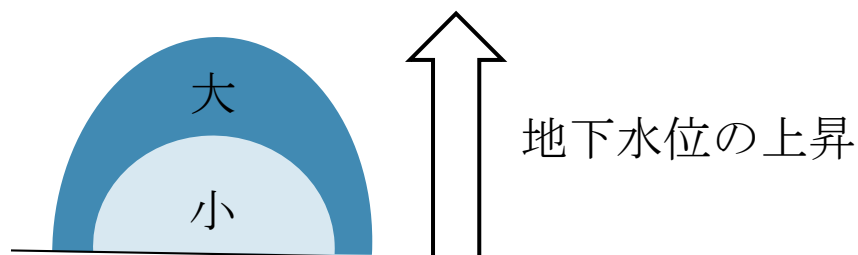
定常状態の地下水位を再現した後，3時間(降雨シナリオ：100mm/h)の集中豪雨を与えて，3ヶ月間無降雨状態を継続させて水位変動が収束した時点の地下水位を利用  
浸透率：公園などの緑地を除く解析対象領域全域に浸透率=0.4を設定（緑地=0.75）

# 深層空洞の危険度評価

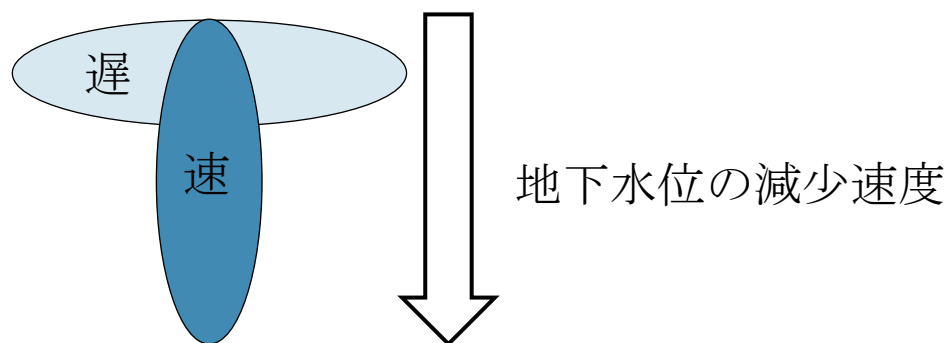


桑野ら，地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討，2010

- ①初期の地下水位 ( $H_0$ ) に対する  
降雨終了直後の地下水位 ( $H$ ) の**上昇量** $\Delta H$  ( $\Delta H = H - H_0$ )



- ②降雨終了から1日経過後の地下水位 ( $H_1$ ) に対する  
降雨終了直後の地下水位 ( $H$ ) の**減少変動量** $\Delta H'$  ( $\Delta H' = H - H_1$ )



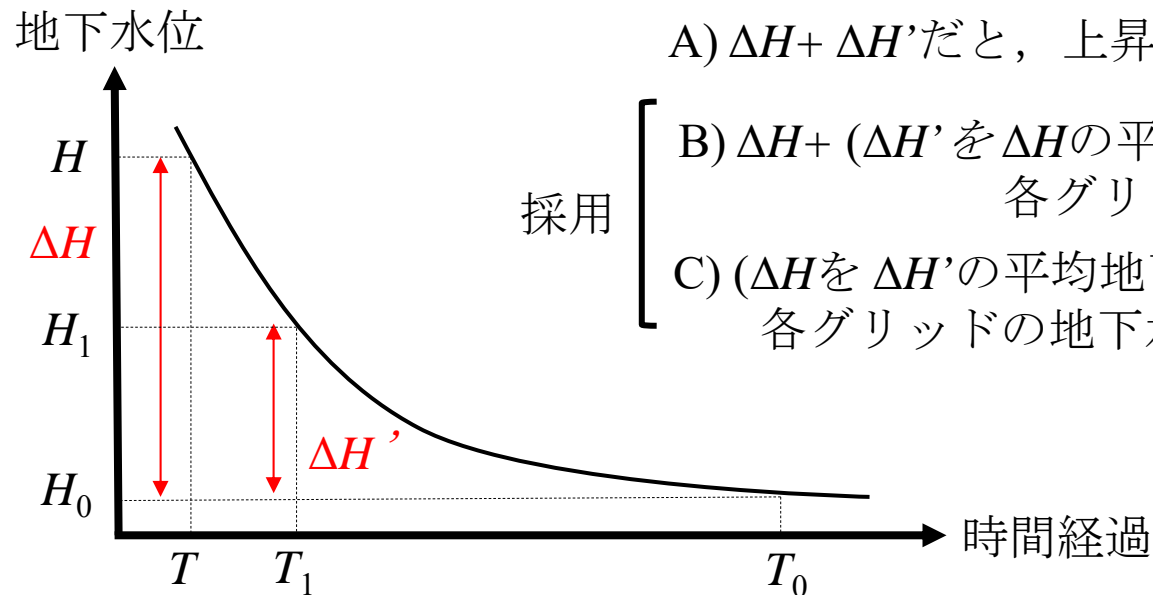


# 深層空洞の危険度評価



桑野ら，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，2010

- ①初期の地下水位 ( $H_0$ ) に対する  
降雨終了直後の地下水位 ( $H$ ) の**上昇量** $\Delta H$  ( $\Delta H = H - H_0$ )
  
- ②降雨終了から1日経過後の地下水位 ( $H_1$ ) に対する  
降雨終了直後の地下水位 ( $H$ ) の**減少変動量** $\Delta H'$  ( $\Delta H' = H - H_1$ )



A)  $\Delta H + \Delta H'$ だと，上昇量の影響を強く受ける．

採用

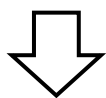
- B)  $\Delta H + (\Delta H'$ を $\Delta H$ の平均地下水位に合わせて各グリッドの地下水位を調整)
- C) ( $\Delta H$ を $\Delta H'$ の平均地下水位に合わせて各グリッドの地下水位を調整) +  $\Delta H'$

深層空洞へ与える  
地下水位の2変動の影響を考慮

# 深層空洞の危険度評価



- ①初期の地下水位 ( $H_0$ ) に対する  
降雨終了直後の地下水位 ( $H$ ) の**上昇量** $\Delta H$  ( $\Delta H = H - H_0$ )
- ②降雨終了から1日経過後の地下水位 ( $H_1$ ) に対する  
降雨終了直後の地下水位 ( $H$ ) の**減少変動量** $\Delta H'$  ( $\Delta H' = H - H_1$ )



深層空洞へ与える

地下水位の2変動の影響を再現

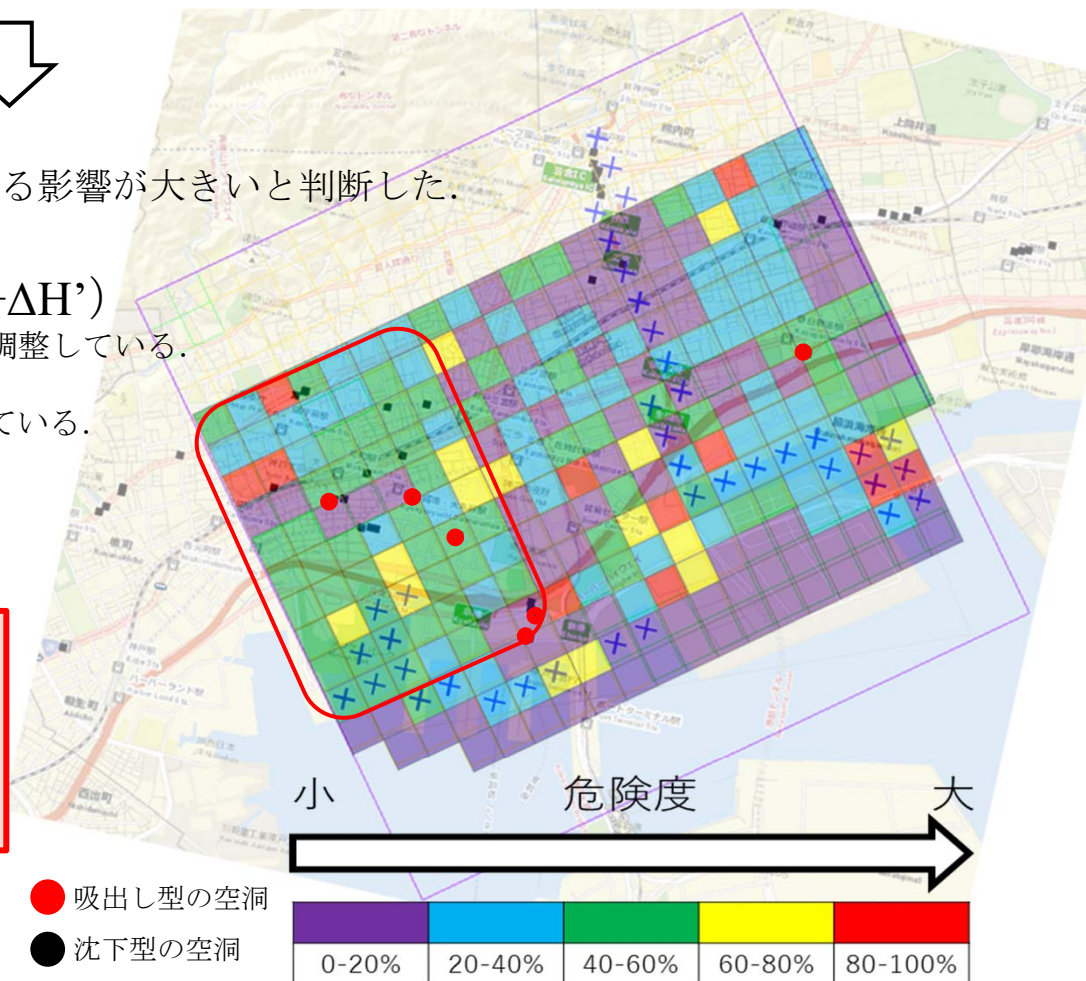
→(桑野ら,2010)を基に、深層空洞へ与える影響が大きいと判断した。

## 深層空洞の危険度評価 ( $\Delta H + \Delta H'$ )

$\Delta H$ と $\Delta H'$ の変動量の平均値が等しくなるように調整している。

危険度評価は絶対評価とした。

地下水位変動量の大きい山地部は削除している。



・解析対象領域西側は危険度が高い傾向  
→'路面下'の空洞推定にも有用

深層部で発生する空洞との整合性を  
精査する必要がある。

● 吸出し型の空洞

● 沈下型の空洞

---

# 4. FWDによる路面変位量計測 と空洞危険度評価法

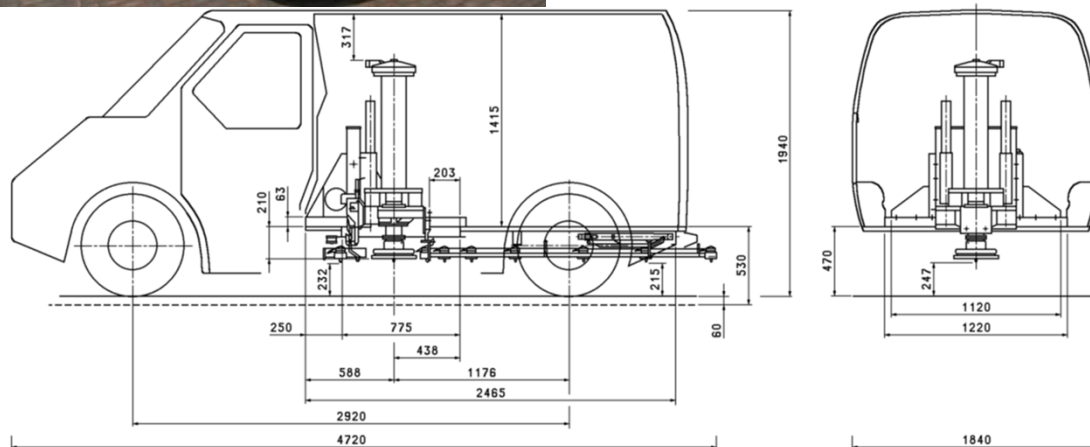
## 【参考文献】

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，Vol.47，No.12，pp.40-43，2019年12月.

# FWDによる路面変位量計測と空洞危険度評価法（1 / 4）

## 道路舗装構造評価装置(FWD : Falling Weight Deflectometer)

路面上に設置した直径30cmの載荷板におもりを落下させることで衝撃荷重を与え、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



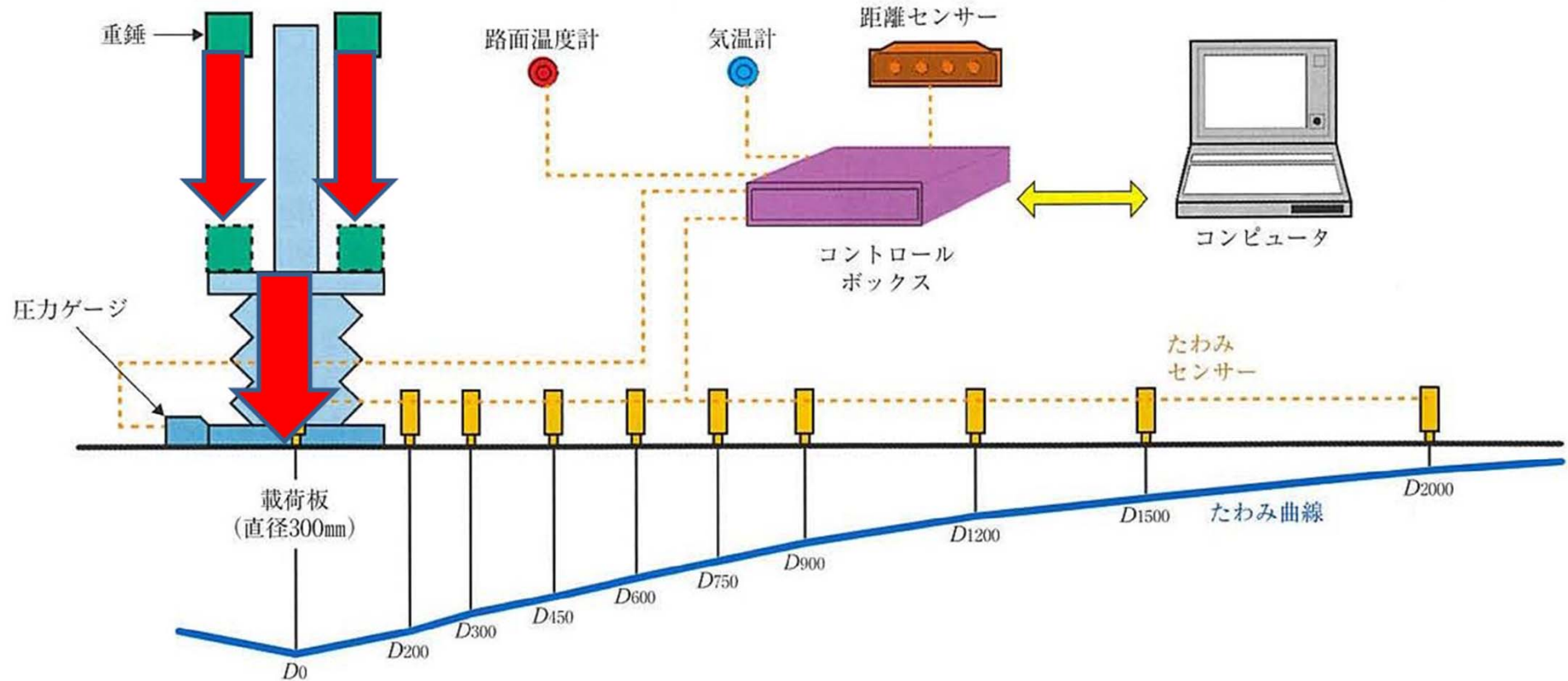
### 【参考文献】

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, Vol.47, No.12, pp.40-43, 2019年12月.



# FWDによる路面変位量計測と空洞危険度評価法（2/4）

## 【FWD計測の概念図 개념도】



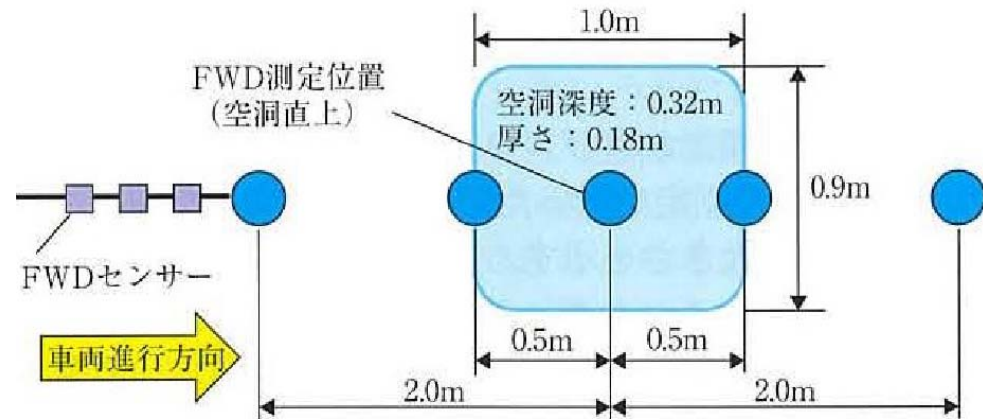
### 【参考文献】

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, Vol.47, No.12, pp.40-43, 2019年12月.



# FWDによる路面変位量計測と空洞危険度評価法 (3 / 4)

道路舗装構造評価装置(FWD)から測定した空洞上の路面沈下量で、空洞の危険度を評価

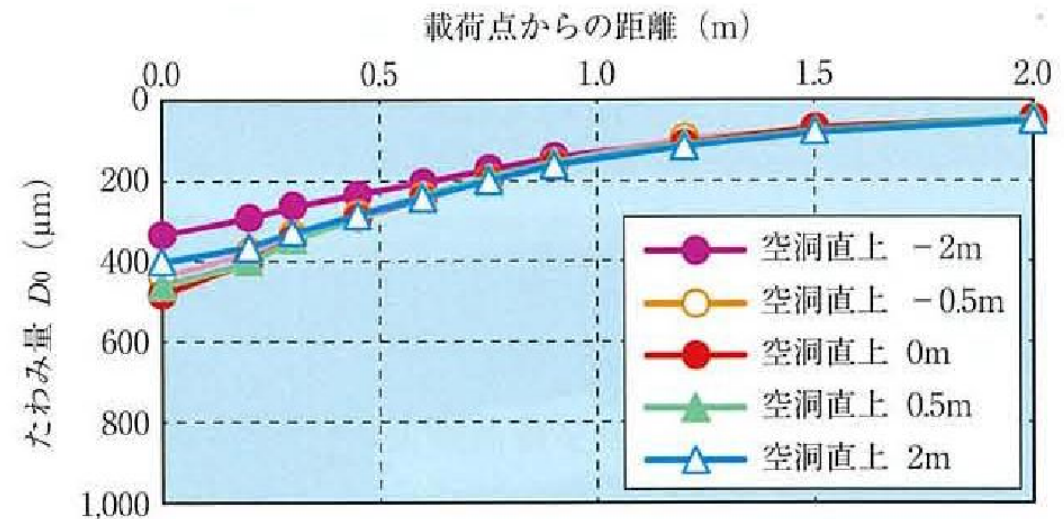


FWD载荷位置 (平面)

空洞上部  
路面変位



健全部  
路面変位



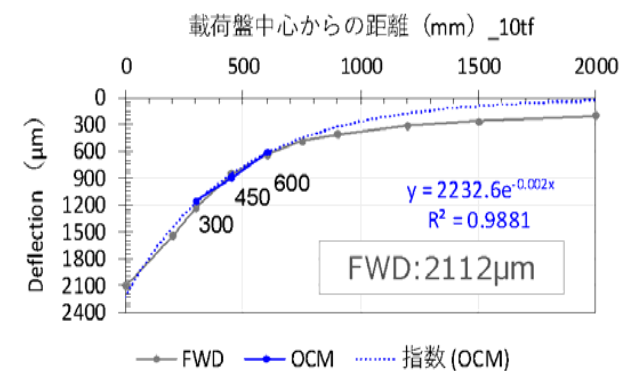
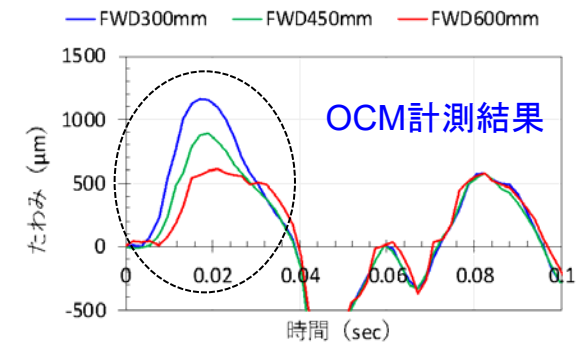
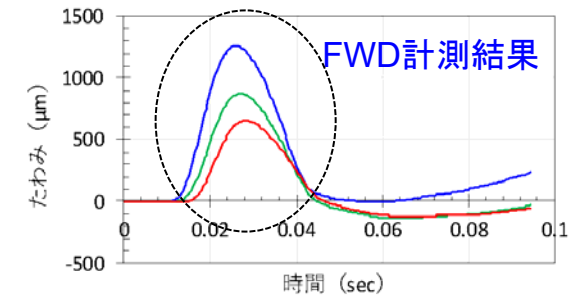
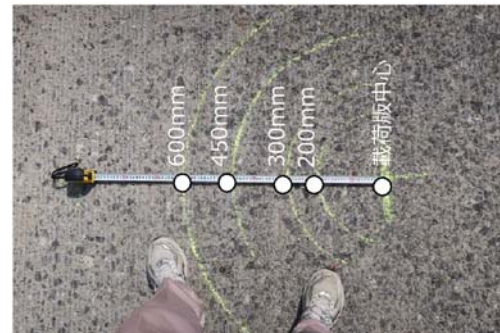
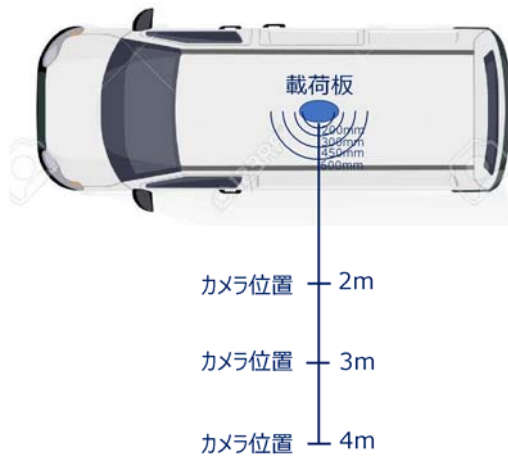
载荷位置と路面変位

【参考文献】

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, Vol.47, No.12, pp.40-43, 2019年12月.

# FWDによる路面変位量計測と空洞危険度評価法（4/4）

方向符号照合法(Orientation Code Matching: OCM)を用いた画像解析技術による路面たわみ計測（FWD計測結果との照合）



**FWDとOCMは概ね一致**

➔ (一財)建設工学研究所, (株)地球観測, 東亜道路(株)の共同研究

## 5. 結論 (1.神戸市における路面下空洞調査結果分析の事例)

平成8～29年度に行われた路面下空洞調査から得られた320件近くの調査結果を精査し評価した。また、**空洞上下部に広がる地盤材料に着目して発生傾向を分析**した。

- ・ **深度0.3m～0.5m**にかけて空洞が多発する。
- ・ 発生深度が深い空洞ほど道路陥没に対する影響は小さい。
- ・ 空洞面積が大きい場合、道路陥没へと至る可能性が高まる。
- ・ 空洞は、路盤層が異層構造で**上層が堅固層**、**下層が軟弱層**、さらには層間に材料強度差が見られるほど、**その層間で生成されやすい傾向**にある。

**空洞発生**の傾向分析や**進行性**について把握するため、H8～29年度に発生した空洞箇所と、近年(H30～R1年度)、空洞が確認された箇所との比較検討を実施した。

- ・ 年数経過に伴い空洞の発生深度が浅くなっており、**空洞厚が異なる？浅くなる？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。
- ・ 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。
- ・ 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。

## 5. 結論 (2.空洞発生箇所と道路の路面性状との相関性の評価)

---

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、H8～R1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。

## 5. 結論 (3.3次元地下水流動解析を用いた路面下深層部で生じる空洞の危険度評価手法)

---

神戸市中央区の地域を対象として、ボーリング地盤調査データを用いて**3次元地形・地盤モデルを作成**し、モデルグリッドに浸透パラメータ、各種の推理条件を与えて地下水流動解析を実施することで**地下水位の変動が深層空洞へ与える影響を検討**した。

本解析は、ある程度現実的な地下水流動を再現できているものと考えられる。解析結果から、**降雨により地下水位が急激に大きく上下する場所には吸い出し型の空洞が発生し易いと考え、降雨終了直後の地下水位の上昇量と消散速度に着目した深層空洞発生の新たな危険度評価指標を提案**した。



**本研究は、「神戸の減災研究会」の活動の一環として実施した。**

**神戸市建設局道路部のご支援・ご協力に深く謝意を表します。**