路面下空洞の実態と陥没対策

東京大学　生産技術研究所
桑野玲子

第1回路面下空洞連絡会
2019.11/13

陥没の原因となる地盤内空洞

地盤陥没のプロセス

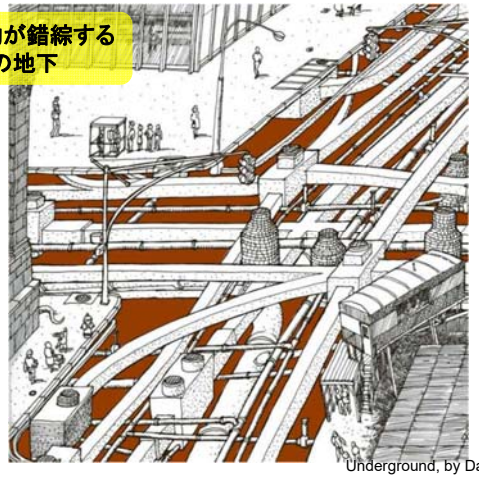
自然生成：
- 鍾乳洞など自然に生成した空洞、水みち、パイピング

人工空洞：
- 採石跡
- 防空壕や軍用トンネル
- 盛土内排水管、下水や上水などの地下埋設管
- トンネル工事起因の急速な土砂流出

人工生成の地盤内空洞による陥没

都市部では、
地下利用の高度化・輻輳化に伴う埋設物起因の空洞・陥没が主体

地中構造物が錯綜する都市の地下



Underground, by David Macaulay（1976）

国内外で頻発する道路陥没

（路面下空洞対策戦略会議第2回WG資料を再構築）

国内外で頻発する道路陥没

Bronx, New York, USA (2015/5/11)

Tredo, Ohio, USA (2012/8/1)

Munbai, India (2009/12/4)

Liverpool, UK (2008/11/11)

Beijing, China (2011/4/28)

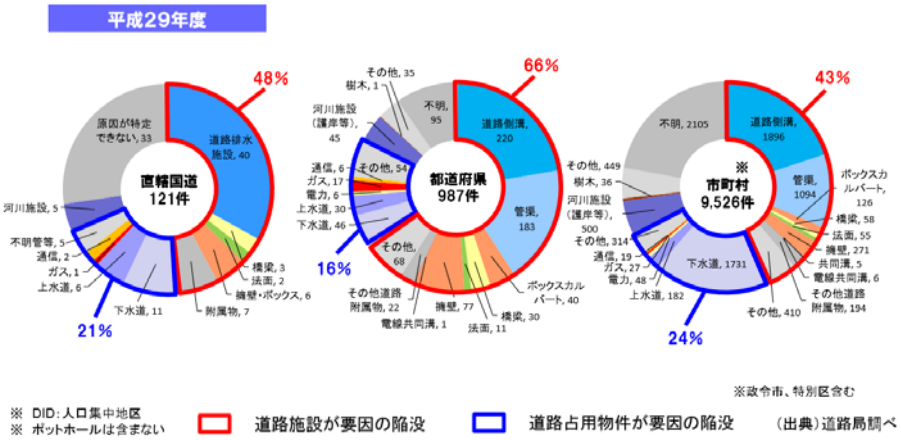
Bangkok, Thailand (2012/3/20)

Phuket, Thailand (2009/8/29)

Bronx, New York, USA (2010/4/8)

都市の道路路面陥没

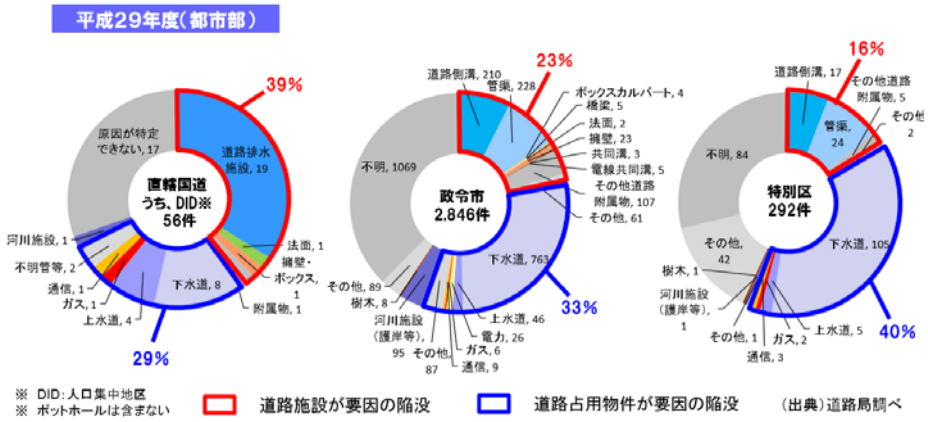
道路の陥没発生件数とその要因：道路陥没発生件数の内訳



国土交通省道路局HP http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/ijikanri/pdf/h27-29kanbotu.pdf

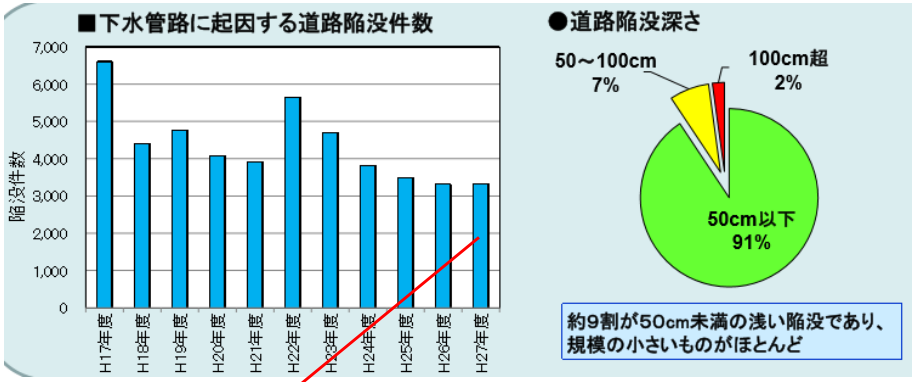
都市の道路路面陥没

都市部における道路の陥没発生件数とその要因：道路陥没発生件数の内訳



国土交通省道路局HP http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/ijikanri/pdf/h27-29kanbotu.pdf

下水管路に起因する道路陥没

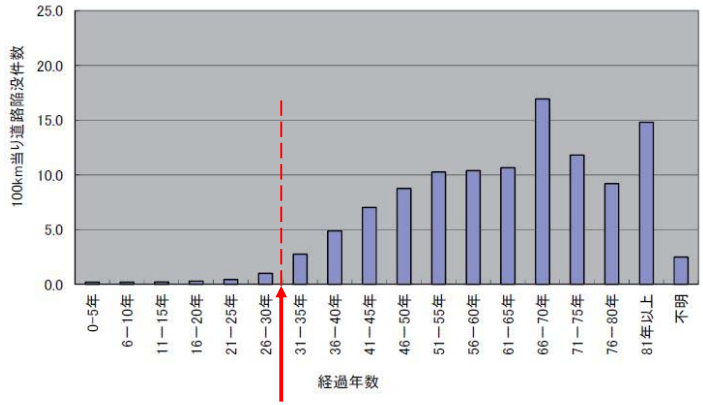


1日平均約10件！！

国土交通省　地下空間の利活用に関する安全技術の確立に関する小委員会　資料（2017）より

下水管の損傷による道路陥没

下水管の経過年数と道路陥没発生頻度

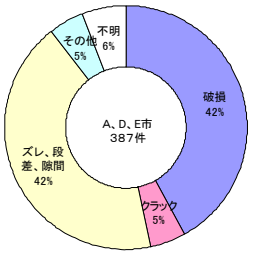


下水管敷設後30年を経過すると道路陥没の発生が増加する。

出典： 横田、深谷、宮本(2012)、下水道管路施設に起因する道路陥没の現状(2006-2009年度)、国土技術総合政策研究所資料No.668

破損の状況

塩ビ管継手部のクラック

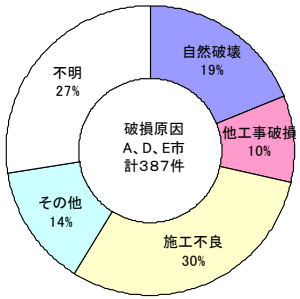


2001～2002年に発生した陥没について土木研究所調べ

腐食による破損

破損の原因は明確に特定できない場合も多い。クラックやズレ、隙間などの軽微な損傷も道路陥没に至る場合がある

推定される破損の原因



自然劣化と施工不良(埋設土の締固不足等)による破損の見分けは明確ではない。

老朽化による劣化は下水中の硫化水素により促進される。

他工事による破損も無視できない。

ガス管や水道管により破損した下水管

下水管と道路陥没

- 管渠の老朽化と道路陥没には明らかな相関がある。
- 管渠の軽微な損傷でも道路陥没を引き起こすことがある。

- 陥没発生件数が多いのは、
  - 供用後25～30年以上経過した管
  - 夏季
  - 降雨時・降雨後
  - 陶管、次にコンクリート管
  - 取付管、またその接続部

ただし、付近に管の損傷が確認されない陥没事例(原因不明)も少なくない。

桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊(2010), 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, 349-361.

路面下空洞 → 道路陥没

← 知らぬが仏？？

陥没数 ⋘ 空洞数

陥没を未然に防ぐための
路面下空洞探査

何故路面下空洞ができるのか？
空洞がどのように拡大・進展し、路面陥没に至るのか？

課題先進都市の情報共有と連携

都市の危機管理における路面下空洞対策戦略会議
（2017年8月～2018年5月）

博多駅前陥没（2016年11月）を契機として、地震時などの備えとして防災の観点から路面下空洞問題を考える

福岡市（議長）
札幌市、仙台市、横浜市、神戸市、広島市、熊本市

↓

維持管理は危機管理

空洞対策戦略会議における提言

維持管理は危機管理　ー防災対策との連携ー

維持管理の中で空洞対策として取り組むべきアクション

・効率的かつ質の高い調査・補修の実施

・経験の共有の促進、空洞陥没データの共有と活用

↓

第1回空洞対策連絡会

空洞探査

一次調査（路面下空洞探査車による計測+データ解析）

空洞の可能性のある信号を抽出

空洞上面の大きさと深さ

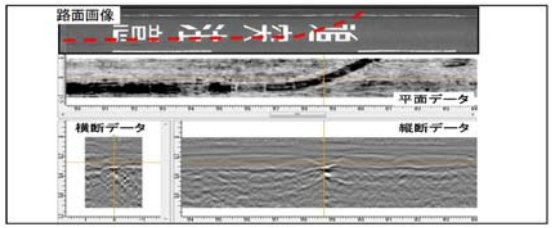
最大80km/hで走査可能

路面下空洞探査車による計測

↓

三次元データ化

データ解析



1.5メートル以浅、0.5メートル四方以上の大きさの空洞を探査

空洞探査

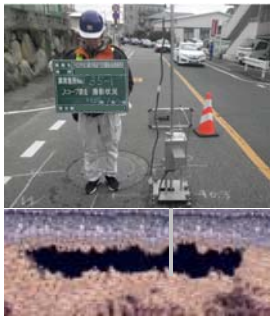
二次調査（手押型地中レーダ調査+スコープ調査）

手押型地中レーダ調査

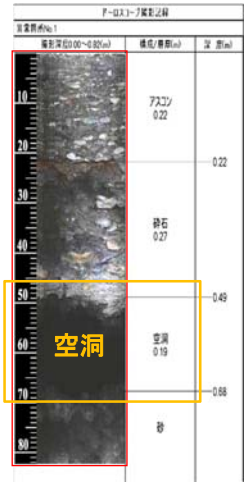
異常の種類や広がり等を判定

スコープ調査
（小口径削孔・孔壁画像撮影）

空洞の有無と規模を確認



スコープデータ例



地中レーダ探査の精度と信頼性

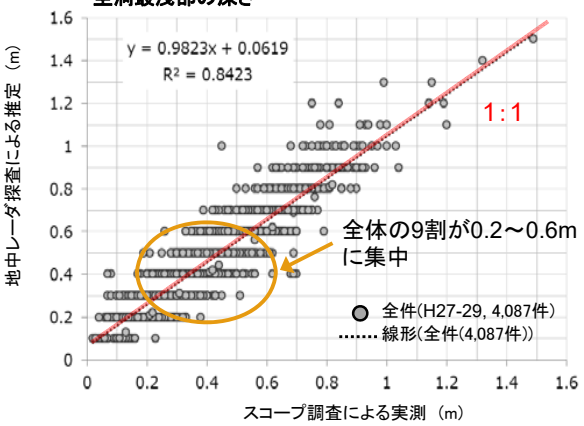
レーダ探査（一次調査）
適用深度：1.5m以浅
測定単位：10cm

空洞探査能力の指標
検知率：潜在する空洞を見逃さずに見つけ出す能力
的中率：一次調査で判別した空洞信号の正答率

H27-29の3年間の空洞探査データのうちスコープ調査を実施し空洞の有無が明確なものについて
的中率：80～100%
（平均88.7%）
（徳永ら:2019より）

地中レーダ探査技術はほぼ成熟

空洞最浅部の深さ



空洞最浅部の深さは20cm程度深めに評価する場合あり
- レーダ探査とスコープ調査の計測単位の違い
- スコープ用削孔時の空洞上部土塊の崩落
- レーダー探査とスコープ調査の実施時の差異

（濱也ら:2019より）

路面下空洞の発生状況

路面下空洞の発生頻度

道路管理区分	単位道路延長あたり空洞数（個/km）
国・道・府・県	0.59
東京都・政令市	2.06
東京23区	2.09
その他自治体	1.37

2014・2015年度に調査した道路延長10,091km（空洞数9984箇所）のデータより

典型的な路面下空洞の諸元

深度：0.3-0.6m （大半が舗装直下）
厚さ：0.6m未満が約半数
大きさ(面積)：0.25～2m²

小池ら、路面下空洞の発生状況の分析と考察、
第72 回土木学会年次学術講演会、福岡、2017年9月

路面下空洞の発生要因

東京都の2001～2009年度までの空洞調査で確認された1018件の空洞の発生要因は、
下水道および雨水取付管等の破損が要因となった空洞：28%
埋戻し不良：32%
地下埋設物輻輳：14%

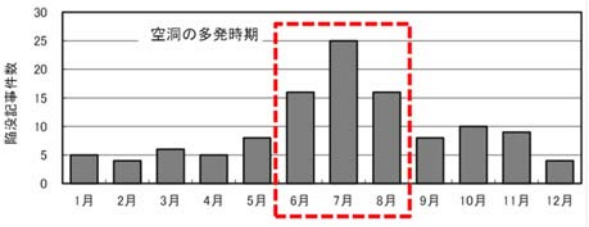
内山・大石（2012）:4.路面下空洞の開削状況調査結果、東京都土木技術支援・人材育成センター平成24年度年報

都市部においては地下埋設物起因の空洞が多くを占めている

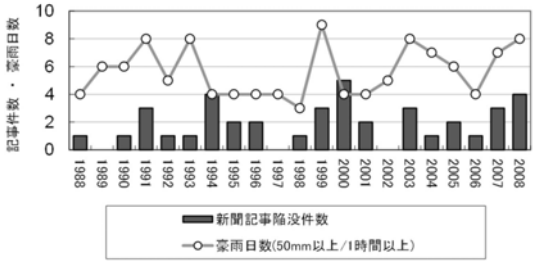
主要7分類	要因の詳細
占用埋設物周辺土砂の流出	管破損、管接続不良、管未閉塞、人孔躯体破損、桝・側溝破損、水道管漏水
占用埋設物周辺地盤の圧密	埋戻し転圧不足、戻し材不良、近接部工事の影響、推進・シールド工事の影響
大型地下構造物関連	地中残置物、地下構造物周辺の水みち
雨水・地下水の影響	地下水の影響、雨水浸食
地震の影響	地震の影響
護岸の吸出し	護岸からの土砂流出
その他・不明	ー

小池・瀬良（2012）:路面下空洞の発生状況に関する考察（その1）
空洞発生状況の特徴、地盤工学研究発表会（八戸）

空洞の拡大要因：雨



新聞記事（1988~2006年、日本全国）にみる路面陥没事故の月別発生件数

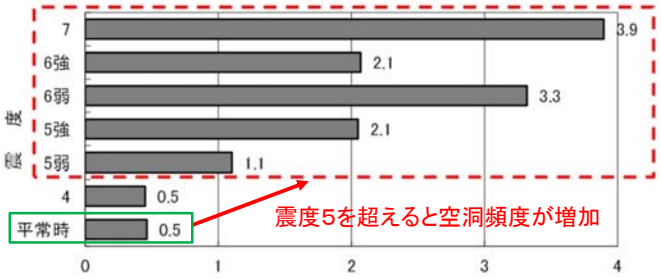


新聞記事にみる路面陥没事故と年間豪雨日数の年別件数（1988~2008年、関東地方）

小池ら、路面下空洞の発生状況に関する考察(その1)、第47 回地盤工学研究発表会、八戸、2012 年7 月

空洞の拡大要因：地震

新潟県中越地震前後の異常信号箇所頻度と震度、および空洞規模



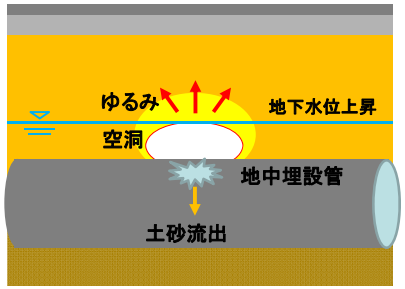
調査種別	1kmあたりの異常信号箇所数	空洞規模 深度 M	厚さ m	縦長 m	横長 m	面積 m^2
地震前	0.46	0.38	0.20	1.40	1.20	1.68
地震後	1.72	0.36	0.11	1.40	3.20	4.48

小池ら、路面下空洞の発生状況に関する考察(その1)、第47 回地盤工学研究発表会、八戸、2012 年7 月

路面下空洞の生成

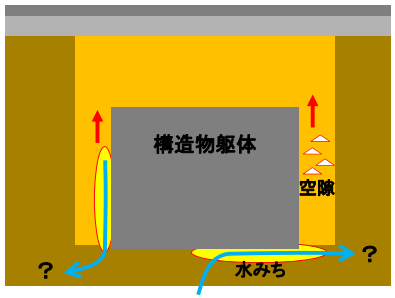
主な原因

成熟した都市における
埋設インフラの老朽化



埋設管など、
道路下の地中構造物の破損

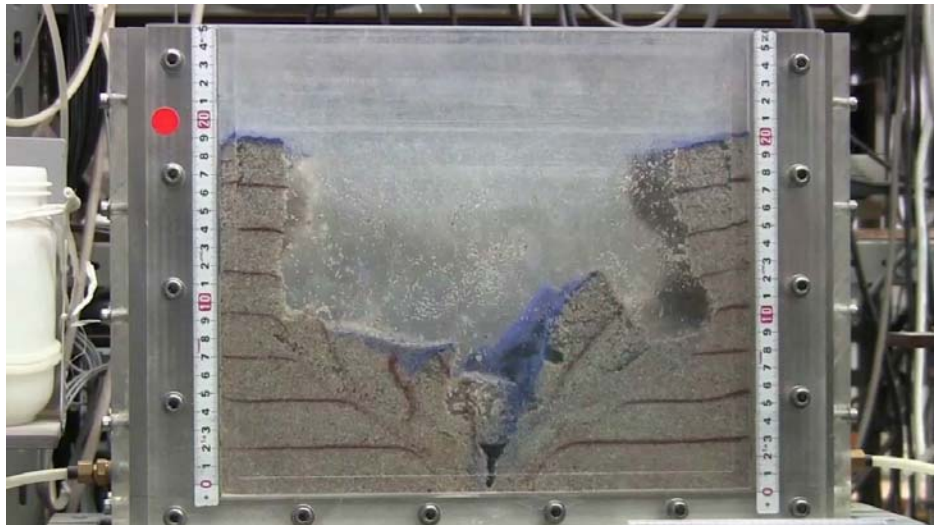
ただし、顕著な空洞を伴わないまま
路面陥没に至る場合もある



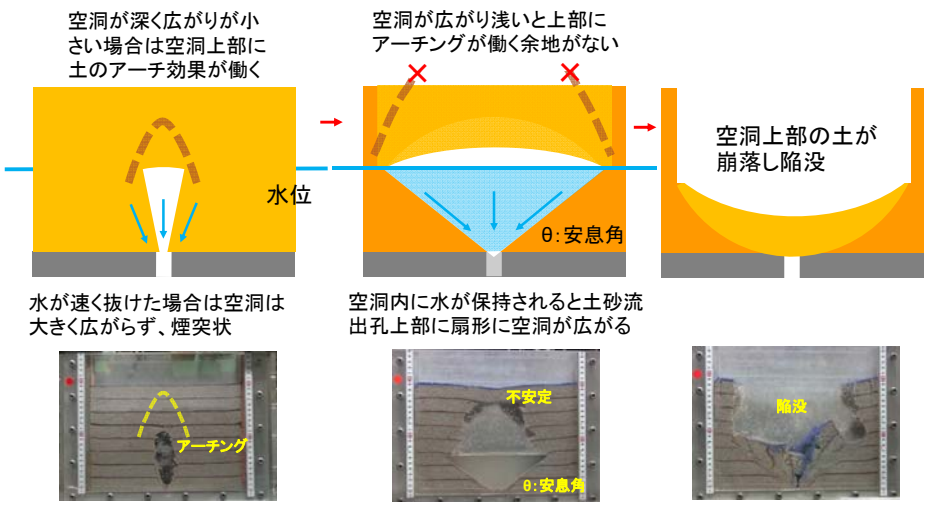
埋戻し材の締固め不良？
水みち周辺の細粒分流出？
その他不明な原因？？

空洞生成・拡大のプロセス

空洞生成・拡大～陥没プロセス　動画



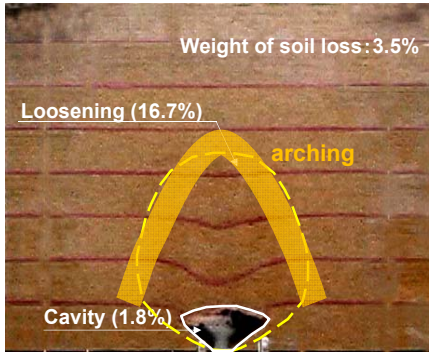
空洞生成・拡大のプロセス



流出孔(隙間)が小さくても、継続的な土砂流出により空洞は拡大しうる
地表面に変状が表れるのは末期的状況になってから
水位の上下、または高い地下水位は空洞拡大の主要因

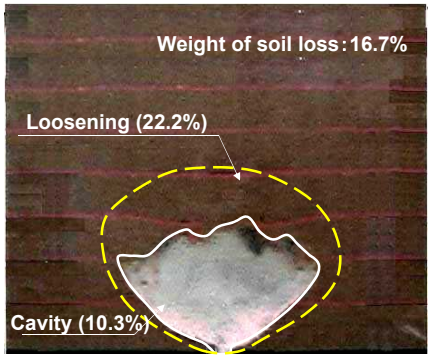
空洞とゆるみ領域

均等な砂　(3 cycle)



小さい空洞領域
with
広範囲のゆるみ領域

山砂　(13 cycle)



大きい空洞領域
with
小さい緩み領域

空洞生成・拡大の要因

素因:
- 地中埋設物の輻輳
- 流出しやすい土質(裏込材)
- 地質・地形・地下水
- 掘削工事履歴　　等

誘因:
- 地中埋設インフラの老朽化・破損
- 雨
- 地震　　等

空洞が出来やすい素質・要件が備わった上に、

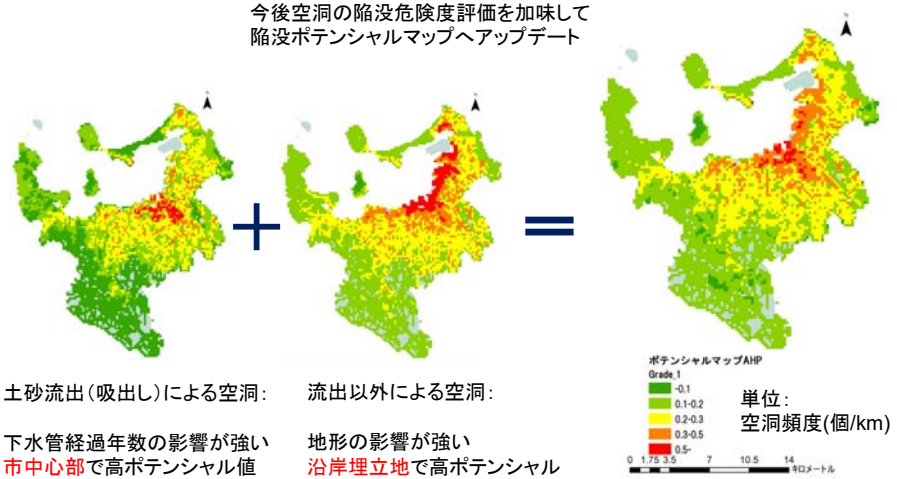
土砂の流出経路が確保されると、

空洞の生成・拡大が加速化

空洞ポテンシャルマップの試作(福岡市)

空洞ポテンシャル:空洞の出来やすさの指標(生成可能性)

今後空洞の陥没危険度評価を加味して
陥没ポテンシャルマップへアップデート



土砂流出(吸出し)による空洞:

下水管経過年数の影響が強い
市中心部で高ポテンシャル値

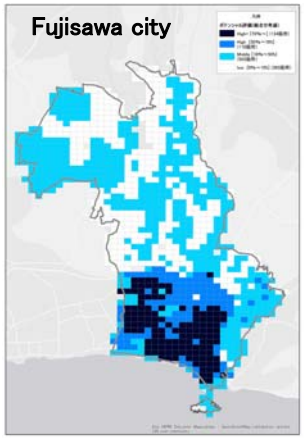
流出以外による空洞:

地形の影響が強い
沿岸埋立地で高ポテンシャル

単位:
空洞頻度(個/km)

空洞ポテンシャルマップの試作（藤沢市）

既存の空洞・陥没データと諸条件を分析し、
空洞ポテンシャル：空洞の出来やすさの指標（生成可能性）を設定



空洞形成に影響する4つの支配要因
・下水合流式・1960-1980年代
・下水管取付管多い
・砂質土
・地下水位（参考）GL-3m以浅

ポテンシャル		要因	頻度（/km） 陥没	空洞
	High+	3因子以上	1.2	4.6
	High	下水･砂質	0.7	2.4
	Middle	上記以外	0.4	0.4
	Low	なし	0.1	0.3

空洞ポテンシャルマップ

試作した空洞ポテンシャルマップの検討過程、及び他の道路管理者での作成にあたっての適用性

空洞ポテンシャルマップの検討過程

空洞生成／陥没の素因・誘因となりうるパラメータを抽出し、それぞれの寄与度を算定
対象地域の各要素地点の空洞ポテンシャル（生成可能性）を評価し、地図情報として表現

必要な情報

◎空洞データ
○陥没データ
◎地質
○地形
○地下水位
○舗装仕様
○交通量
○埋設物（埋設管の輻輳）
◎下水本管（埋設年代、材料等）
◎下水取付管
○大型埋設構造物（地下鉄、共同溝等）
○降雨・地震履歴

◎必須、○あるのが望ましい

他都市への適用性

福岡市、藤沢市におけるポテンシャルマップの試作にあたって、多少の地域性の差異はあるものの、空洞生成の主な要因はほぼ共通している。
同様の手法を他都市に展開しそれぞれの都市でポテンシャルマップを作成することは可能。ただし、その精度は、空洞データの精度に大きく依存する。

藤沢市

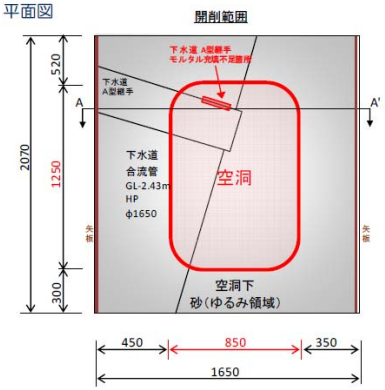
下水管に起因する空洞の開削事例

空洞規模　：縦断方向広がり 1.25m
　　横断方向広がり 0.85m
　　上端深度　GL-0.20m
開 削 日　：2017年 5月18・19日

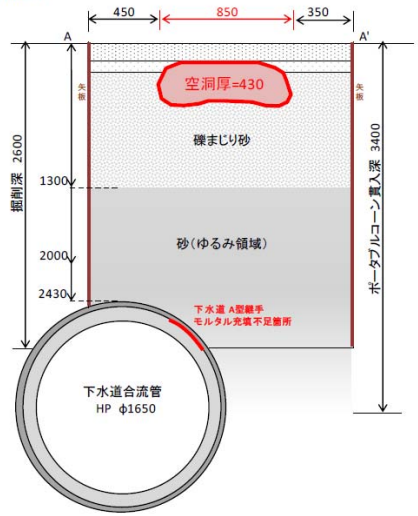
藤沢市

下水管に起因する空洞の開削事例①

平面図



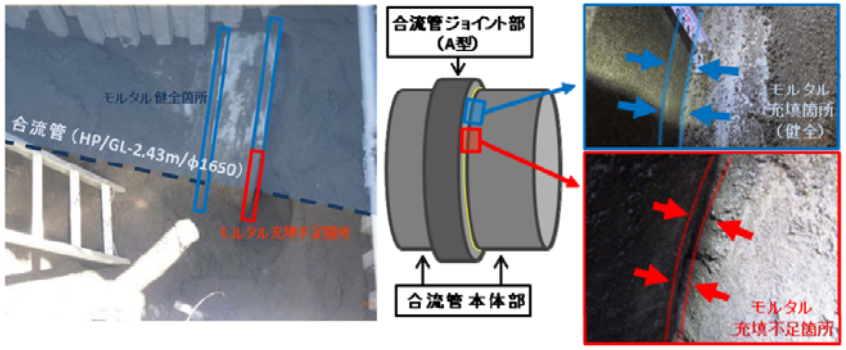
断面図



藤沢市

下水管に起因する空洞の開削事例①

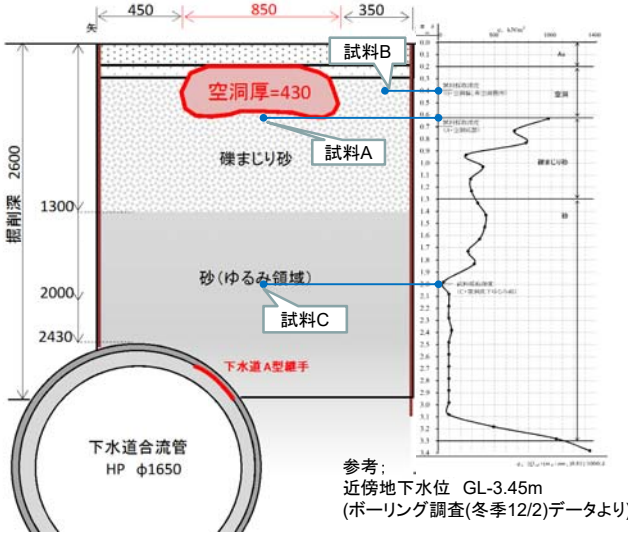
空洞直下の下水管（合流管）に、
ジョイント・本体接合部の目止め剤（モルタル）の不足箇所を確認



藤沢市

下水管に起因する空洞の開削事例①

開削断面図とポータブルコーン貫入試験結果　　は試料採取箇所

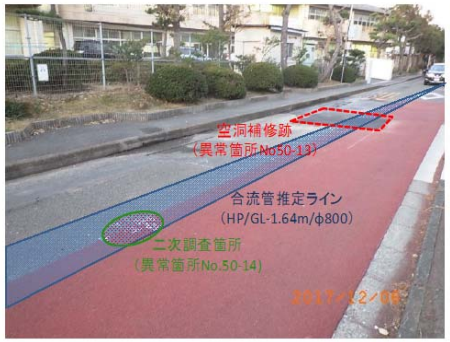


参考：
近傍地下水位　GL-3.45m
(ボーリング調査(冬季12/2)データより)

藤沢市

下水管に起因する空洞の開削事例②

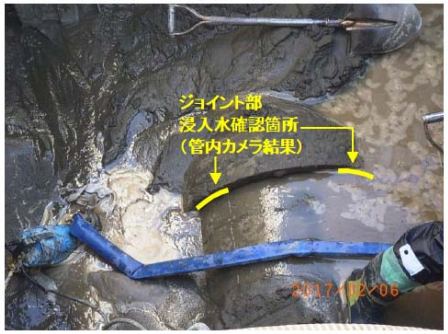
周辺状況



藤沢市

下水管に起因する空洞の開削事例②

空洞規模（W700, L700, H180）

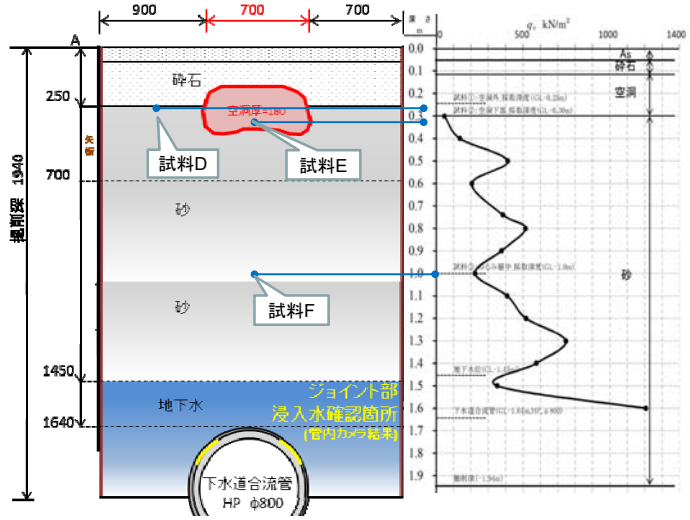


合流管（Φ800, GL-1.64m）

藤沢市

下水管に起因する空洞の開削事例②

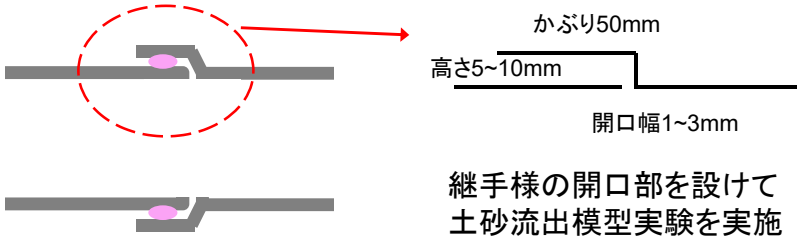
開削断面図とポータブルコーン貫入試験結果　●―●　は試料採取箇所



下水管への漏水による空洞形成

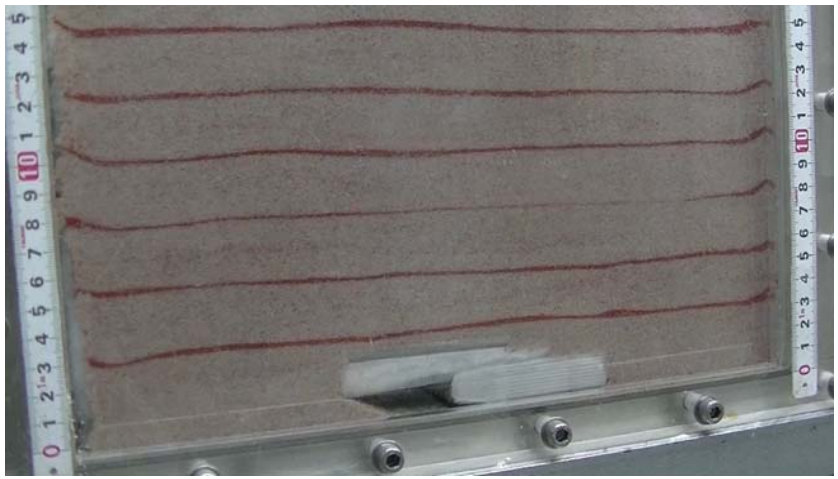
下水管内から明確な破損が確認されない場合でも空洞形成の可能性あり

例えば、管渠継手部の止水パッキンの損傷による漏水は土砂流出の原因箇所となりうるか？



継手様の開口部を設けて土砂流出模型実験を実施

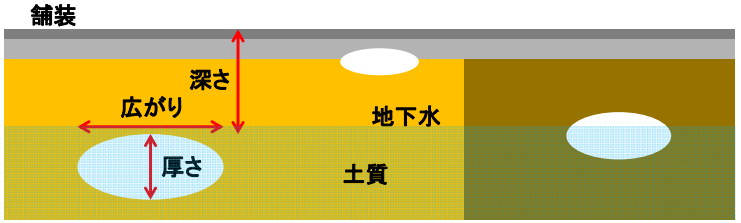
下水管への漏水による空洞形成



継手のかぶり部が水で満たされて、砂粒を水平に運ぶのに十分な流速があれば流出する

空洞の危険度評価

道路陥没を引き起こす危険な空洞とは？



空洞の陥没危険度を考える上での2つの観点

- 現時点における舗装路体の構造安定性に対する影響
  浅くて大きい空洞が危ない？
  道路構造の安定性への影響度：　空洞の深さ、広がり、舗装の厚さなど

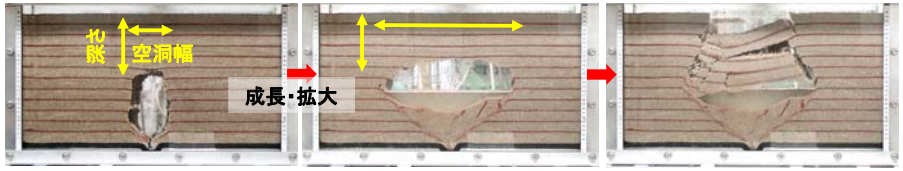
- 現時点では大丈夫でも将来は？
  空洞の成長速度：土質や地下水などの素因、降雨や地震などの誘因

空洞生成・拡大過程

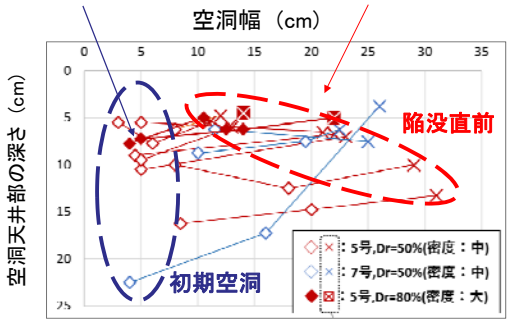
土砂流出実験：空洞生成から表面陥没への空洞拡大過程

初期空洞（煙突状）→水位以下の空洞幅拡大→上部土塊の不安定化・崩落

空洞生成・拡大過程



煙突状の初期空洞　　陥没直前　　崩落・陥没



煙突状の縦長の初期空洞

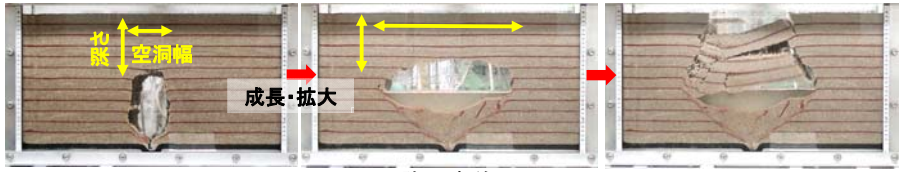
↓

地下水位以下の空洞幅拡大

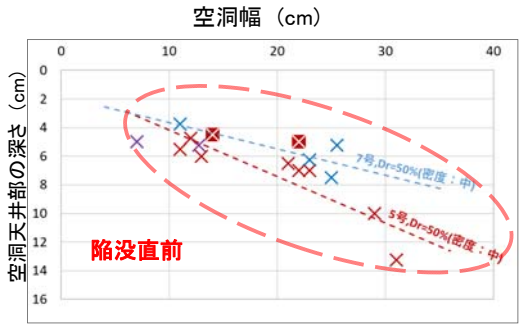
↓

空洞上の土塊が崩落し陥没

空洞生成・拡大過程



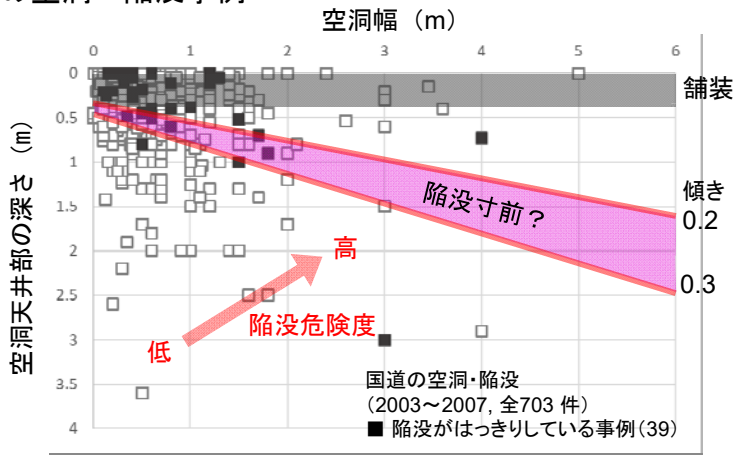
煙突状の初期空洞　　陥没直前　　崩落・陥没



均等均質な砂地盤内の空洞が空洞上土塊の自重で崩落・陥没する場合、空洞幅と平均深さは傾き0.2～0.3の関係

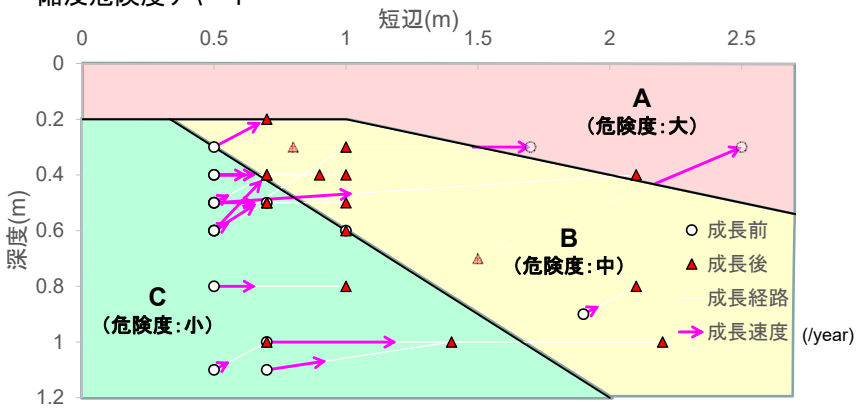
空洞の陥没危険度評価

国道の空洞・陥没事例



空洞の陥没危険度　－成長速度

陥没危険度チャート



平成24~28年度の国道の路面下空洞調査結果のうち、
比較調書にサイズの変化が与えられていた19個について整理

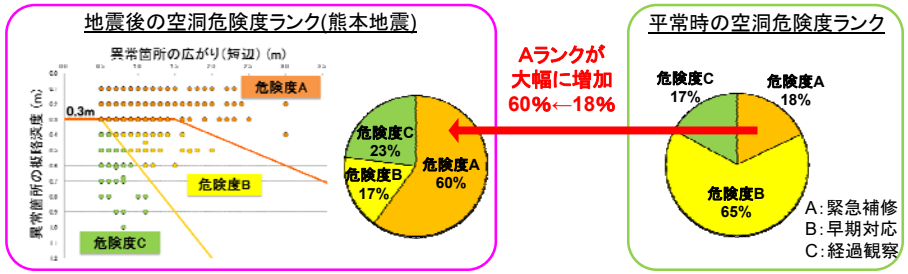
・空洞（深度変化有）：　平均0.108㎥/年　　・空洞（深度変化無）：　平均0.52㎥/年

地震の空洞危険度への影響

中越沖地震、東日本大震災、熊本地震後に実施された調査報告および分析結果から、明らかになった実態

・地震後に路面下空洞数が増加する(2～8倍)
　空洞の多発区間が発生する傾向があり、総数が増える
・陥没危険度の高い 広い・浅い空洞の割合が極端に高くなる

Aランク：いつ陥没してもおかしくない危険度の高い空洞



(岡本ら，地震災害後の早期道路復旧に向後の早期道路復旧に向けた路面下空洞調査の活用，土木学会第72回年次学術講演会(平成29年9月)、
これまで最も早く被災後に現地計測がされた調査結果から分析されたもの(熊本地震から10日後))

(小池ら，路面下に発生する空洞の発生状況の分析と考察，土木学会第72回年次学術講演会(平成29年9月))

空洞・陥没への対応

陥没：

- 埋戻し
- ただし、陥没の原因を明らかにし土砂の流出孔を塞ぐことが重要

空洞：

- 原則として、埋戻しまたは充填
- ただし、空洞生成の原因を明らかにし、土砂の流出孔を塞ぐことが重要
- 短期的に崩落を防止する応急対策と、抜本的に土砂流出を食い止める恒久対策
- 陥没危険度が低い場合は、モニタリングによる経過観察も有効

空洞対策の効果

東京都・大田区の取り組み　（路面下空洞対策戦略会議第2回WG資料より再構築）

空洞対策の効果

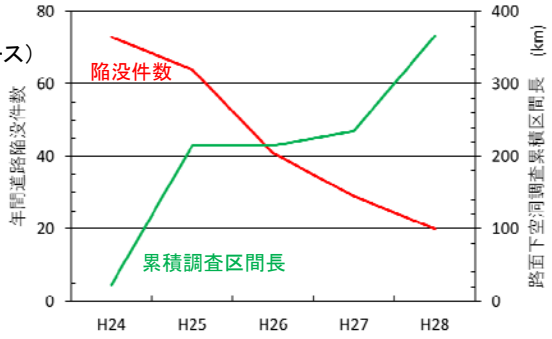
東京都・大田区の取り組み （路面下空洞対策戦略会議第2回WG資料より再構築）

H24より路面下空洞調査開始
主要路線＋生活道路　区道全長770km

生活道路の探査のために
小型空洞探査車（2tトラックベース）
を導入

空洞頻度
　主要路線　1．8箇所／km
　生活道路　2～3箇所／km

空洞箇所合計　828箇所
（うちAランク101箇所, 12%）



対策により顕著な陥没抑止効果

空洞・陥没問題に関する主な課題

空洞・陥没の

発見：空洞探査技術に限界がある
　　探査会社の技術にバラツキがある

診断：空洞特性や陥没危険度の定量的評価

治療：状況に応じた必要十分な補修方法の開発

予防：空洞が生成・拡大しにくい裏込材とは？
　　陥没しにくい舗装構造とは？

産官学の共同研究にて検討中

道路陥没対策と安全・安心な都市インフラ

現状

- 道路陥没問題はインフラの老朽化と不可分
  都市の急激な成長から約20年超で問題が顕在化
- 気象の激甚化により問題は加速化

陥没対策

- 探査によって路面下に空洞を見つけ、陥没を未然に防止
  探査技術の品質確保が不可欠
- 空洞の成因や発生場所等の条件により、拡大・進展速度や陥没危険度が異なる　→　地域特性の把握と陥没危険度の評価
- 空洞特性や危険度に応じた補修工法の開発および適切な選択
- 空洞・陥没データの蓄積と空洞拡大・進展メカニズムに関する知見を融合し、効率的・合理的な道路・インフラ管理へ

参考文献

- 横田敏宏, 深谷渉, 宮本豊尚（2012）、下水道管路施設に起因する道路陥没の現状 (2006-2009年度), 国土技術総合政策研究所資料No.668.
- 桑野玲子, 堀井俊孝, 山内慶太, 小橋秀俊（2010）, 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, 349-361.
- 都市の危機管理における路面下空洞対策戦略会議: 都市の危機管理における路面下空洞対策に関する提言 http://resilience-jp.biz/wp-content/uploads/2018/06/teigen0606.pdf
- 徳永珠未、瀬良良子、佐藤雅規、大野敦弘、濱也幸樹、加納晋太郎、桑野玲子、道路陥没対策における空洞探査能力の指標化の意義と現状分析、第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム(札幌)、2019年9月
- 濱也幸樹、瀬良良子、佐藤雅規、大野敦弘、徳永珠未、加納晋太郎、浅見文美恵、桑野玲子、道路陥没対策に求められる空洞情報高度化のための基礎的検討、第1回交通地盤工学に関する国内シンポジウム(札幌)、2019年9月
- 小池豊, 濱也幸樹: 路面下空洞の発生状況の分析と考察, 第72 回土木学会年次学術講演会, 福岡, 2017年9月.
- 内山・大石（2012）:4.路面下空洞の開削状況調査結果、東京都土木技術支援・人材育成センター平成24年度年報
- 小池豊、瀬良良子（2012）、路面下空洞の発生状況に関する考察(その1)、第47 回地盤工学研究発表会、八戸、2012年7 月.
- 堀田真由子, 桑野玲子、福岡市の路面下空洞の生成傾向の分析及び空洞ポテンシャルマップの作成, 第52回地盤工学研究発表会, 名古屋, 2017年7月,1421-1422.
- 堀田真由子, 桑野玲子, 瀬良良子、福岡市における空洞ポテンシャルマップの作成, 第53回地盤工学研究発表会, 高松, 2018年7月, 1625-1626.
- 瀬良良子, 桑野玲子, 平田良祐, 張ヶ谷昌彦, 米本幸子: 藤沢市の効率的な道路陥没防止手法の実践的研究 -陥没ポテンシャルマップ開発に向けた空洞素因の地域分析-, 土木学会第73回年次学術講演会, 札幌, 2018年8月, Ⅲ-078.
- 西山博光、瀬良良子、藤井邦男、桑野玲子（2019）、官学産連携の路面下空洞対策の取り組み－路面下空洞の開削調査事例－、地盤工学会誌、Vol.67, No.8,12-15.
- 大原勇、桑野玲子、瀬良良子、模型実験および陥没事例の分析に基づく陥没生成メカニズムの検討、第54回地盤工学研究発表会、さいたま、2019年7月、1463-1464.
- 中田祐輔, 桑野玲子, 瀬良良子、国道の路面下空洞の成長傾向に関する検討, 土木学会第73回年次学術講演会, 札幌, 2018年8月, Ⅲ-079.
- 岡本順平、松隈努、濱崎哲次、地震災害後の早期道路復旧に向けた路面下空洞調査の活用、土木学会第72回年次学術講演会、福岡、2017年9月.