

埋設インフラの老朽化に伴う 周辺地盤の空洞化の現状と課題

東京大学生産技術研究所
桑野玲子

八潮市の道路陥没

発生日時：2025年1月28日 午前10時頃

交差点を通行中のトラックが転落

陥没規模：1/28当初 幅約9-10m、深さ約5m

1/31時点 幅約40m、深さ最大15m

陥没地直下に下水道管（管径4.75m、1983年整備、経過年数42年）

1/28陥没発生当初



1/31陥没孔拡大後



「下水道等に起因する大規模な道路陥没事故を踏まえた対策検討委員会」第1回資料より 写真出典 ANN NEWS

都市に潜む落とし穴！

こんなことがどこにでもありうるのか？

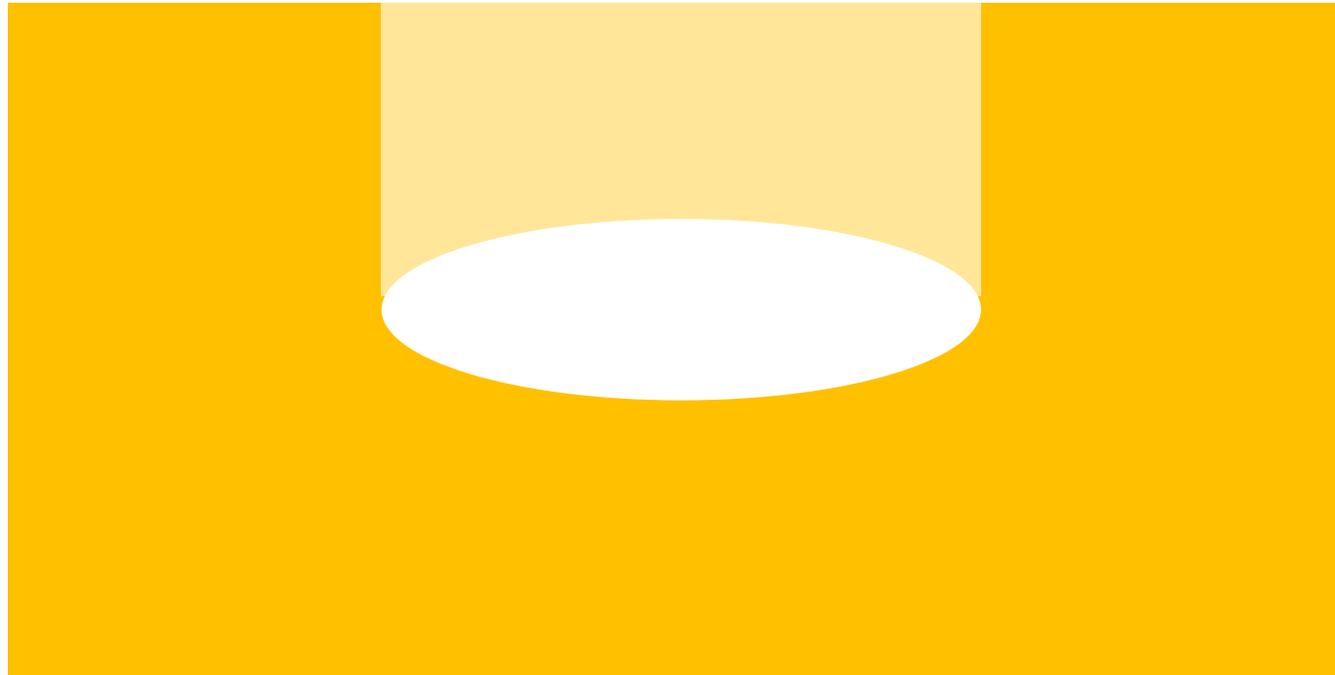
地盤陥没

何故、地盤が陥没するのか？



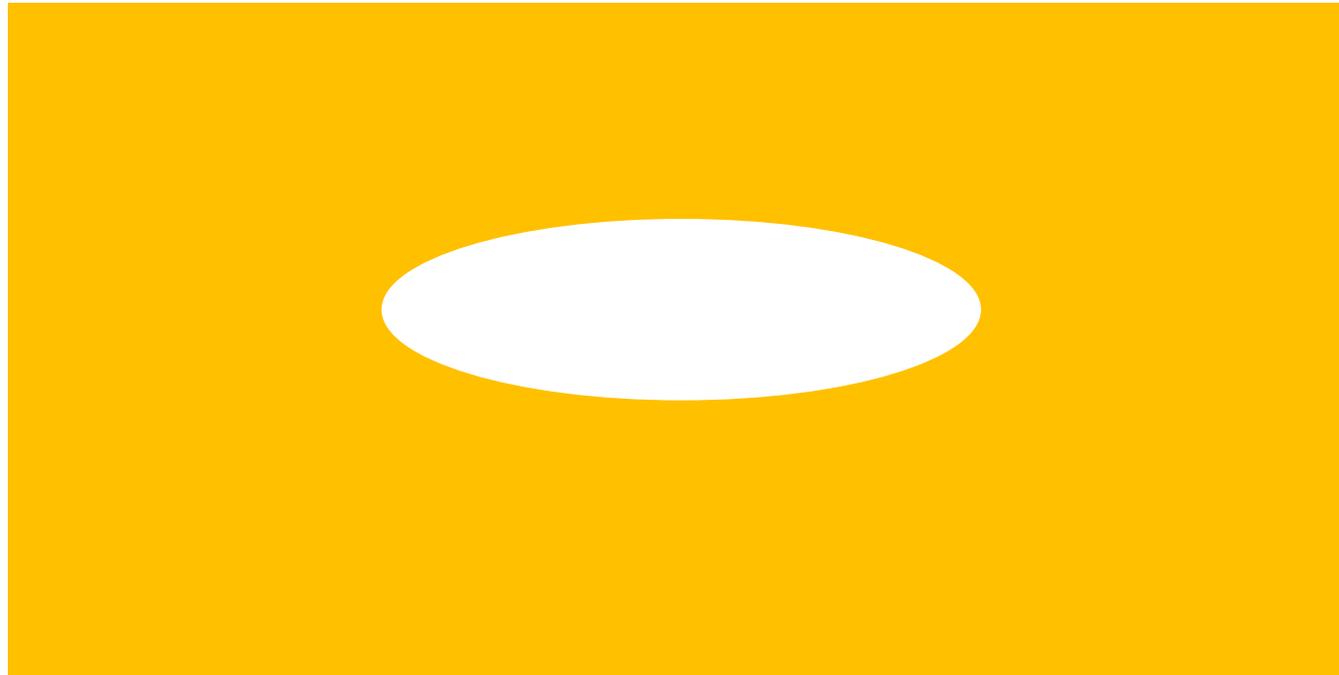
地盤陥没

地盤内に空洞があり、
空洞天井部が崩落したから



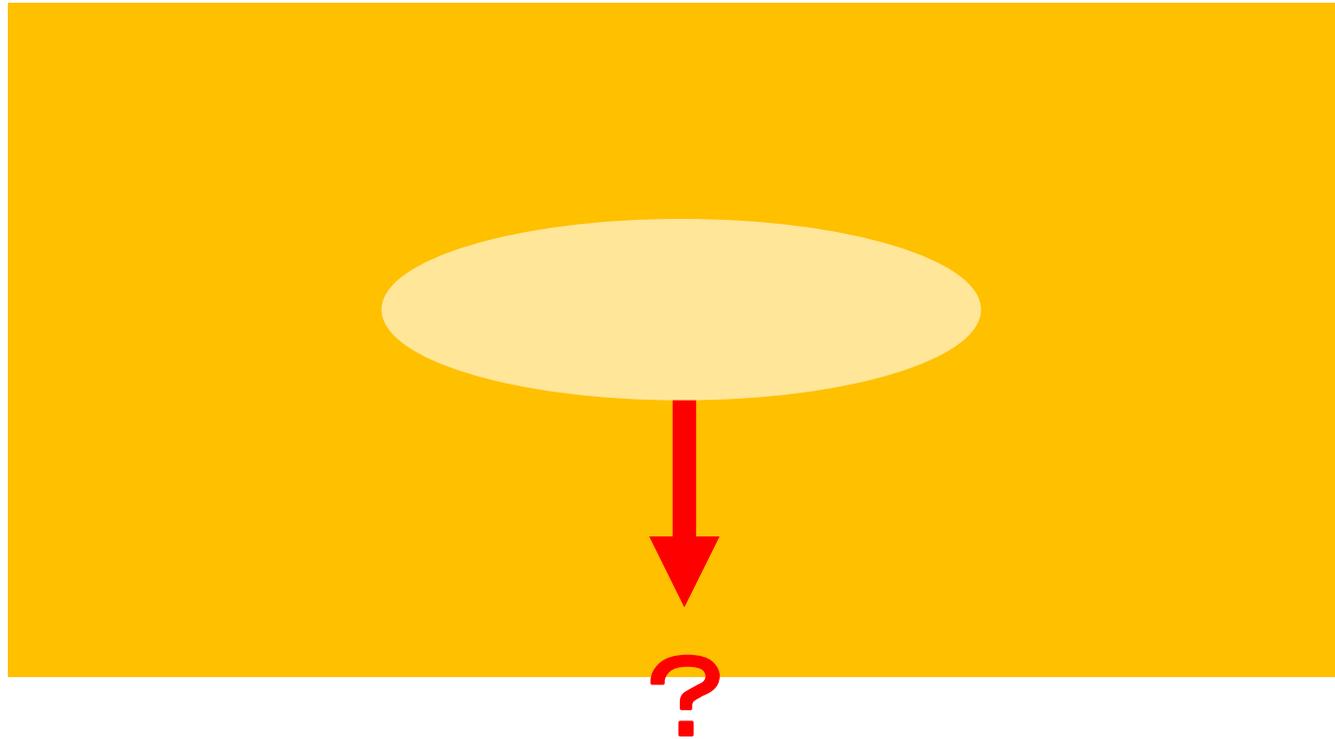
地盤陥没

何故、地中に空洞ができたのか？



地盤陥没

あったはずの土が、
どこかに（通常は下に）
運び去られたから



陥没の原因となる地盤内空洞

地盤陥没のプロセス



何らかの原因により空洞生成

降雨や地下水の上昇により進展

地表面近くまで空洞やゆるみが到達し陥没

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

地盤陥没現象

なぜ厄介か . . .

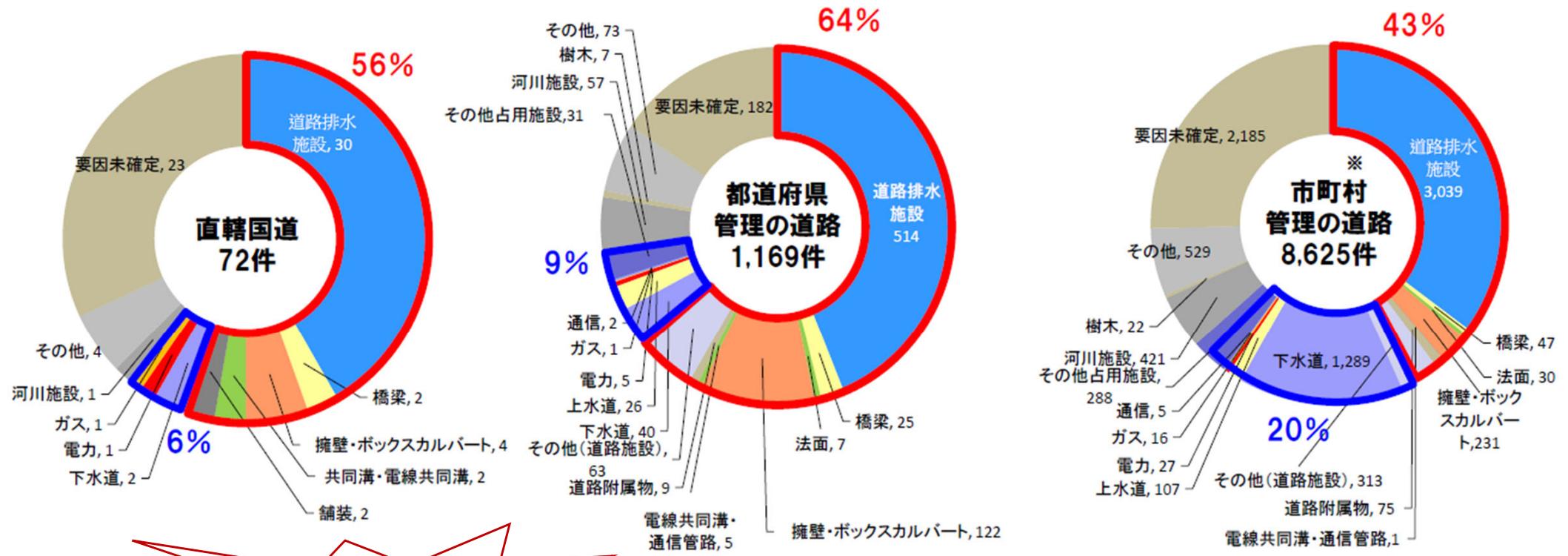
地表から見ただけでは
地中の状態がわからない

- ・ 陥没直前まで地表に顕著な変状が現れず突然起こったように見える
- ・ 地中の空洞を見つけるのは簡単ではない

都市の道路路面陥没

令和6年度

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



総数約10000件

* ポットホールは含まない 道路施設が要因の陥没 道路占有物件が要因の陥没 (出典)道路局調べ

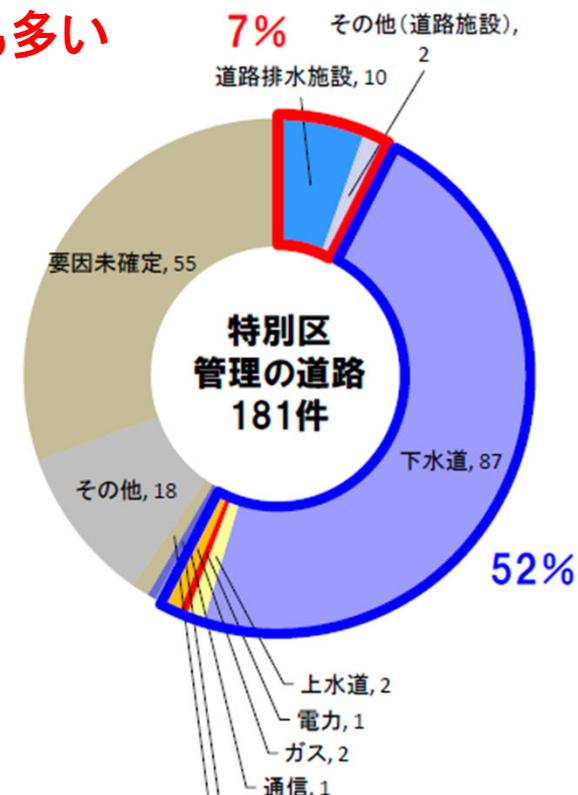
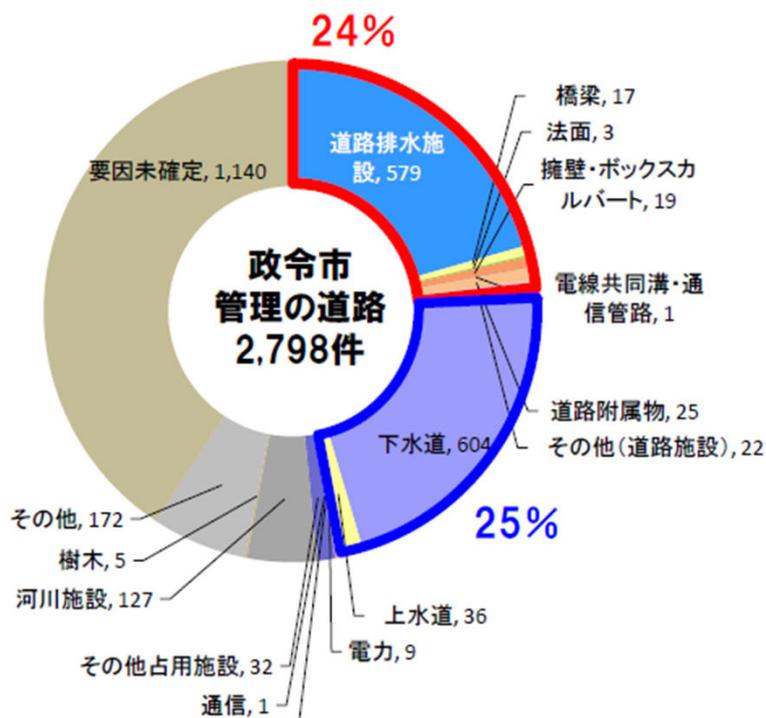
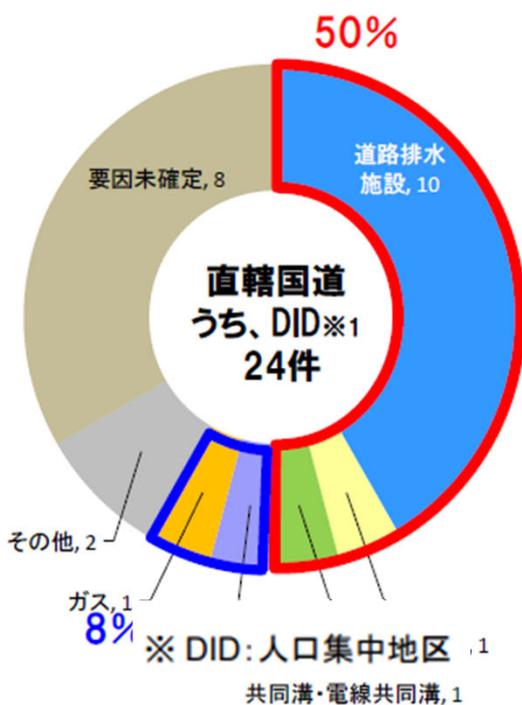
都市の道路路面陥没

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

令和6年度

下水道など埋設管起因が多い
原因不明も多数

排水施設や道路横断施設
起因も多い



* ポットホールは含まない



道路施設が要因の陥没



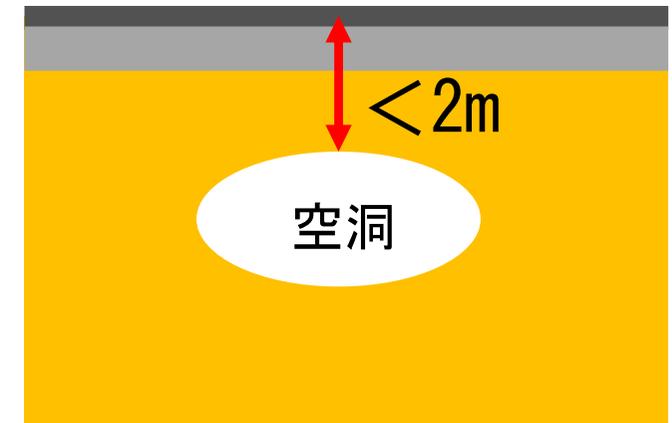
道路占用物件が要因の陥没

(出典)道路局調べ

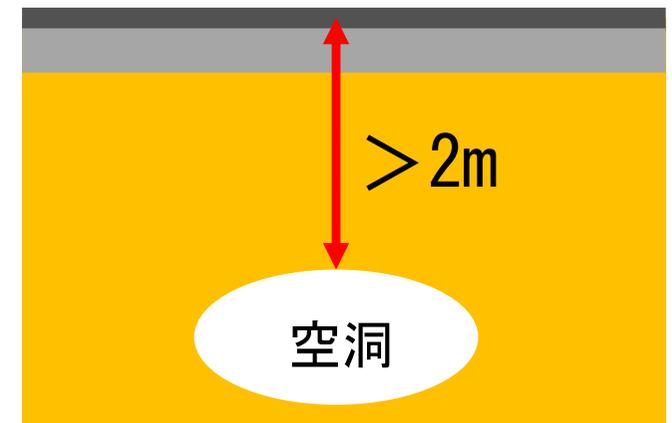
浅層空洞と深層空洞

前述の道路陥没事例は、
ほとんどが浅層空洞起因

浅層空洞：空洞の天井部の深さが地下2m以浅
地中レーダ探査で探知可能でこれ
まで路面下空洞のデータがある程
度蓄積されている

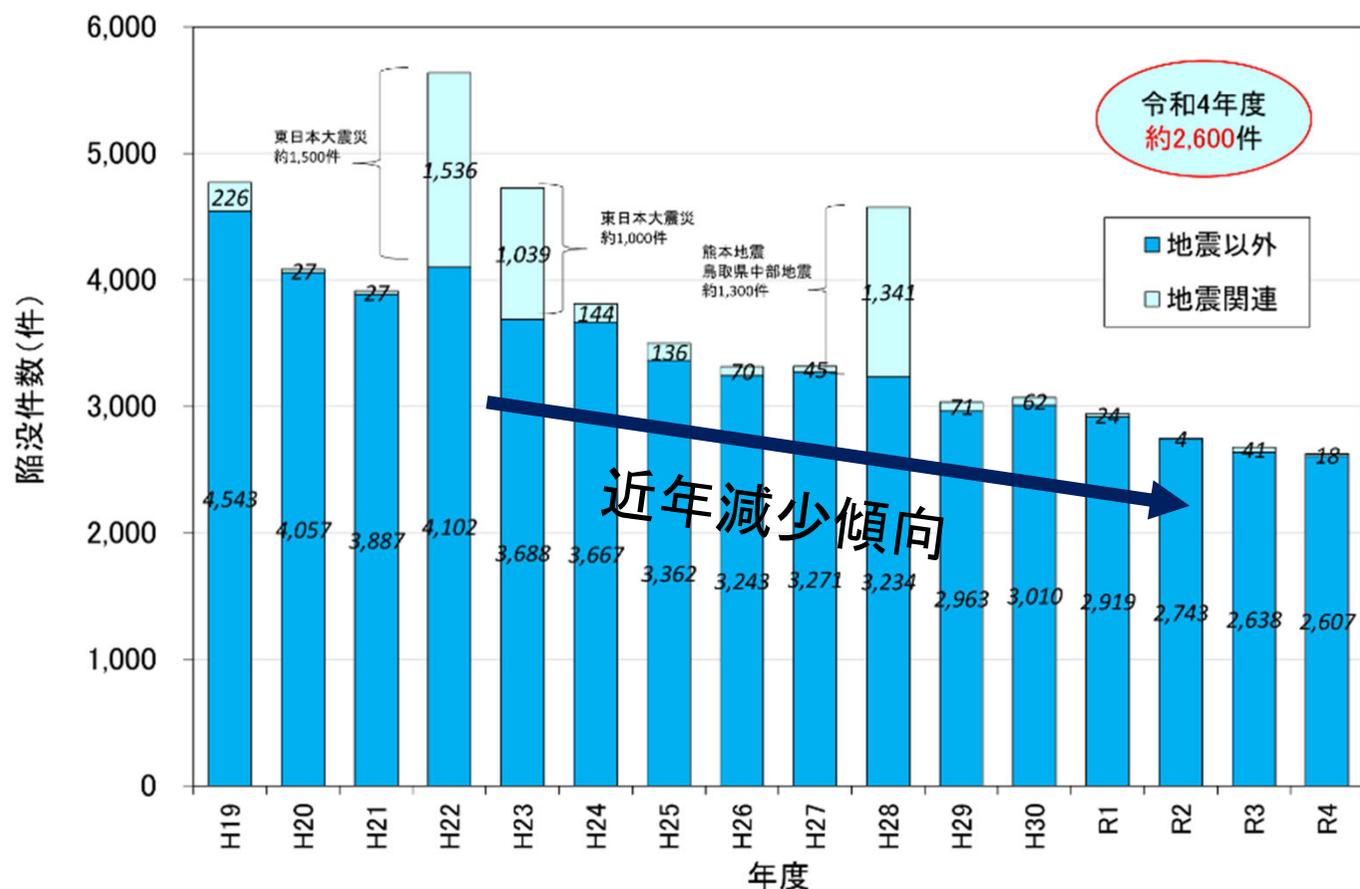


深層空洞：空洞の天井部の深さが地下2m以深
実用可能な既存の空洞探査方法が
なく実態が不明
事例は少ないが大規模陥没を起こ
しうる

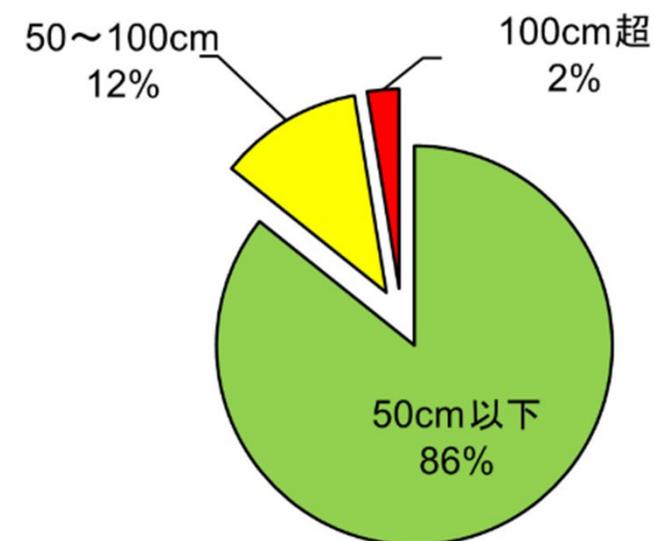


下水管路に起因する道路陥没

下水管路に起因した道路陥没件数の推移



道路陥没深さ (令和4年度)

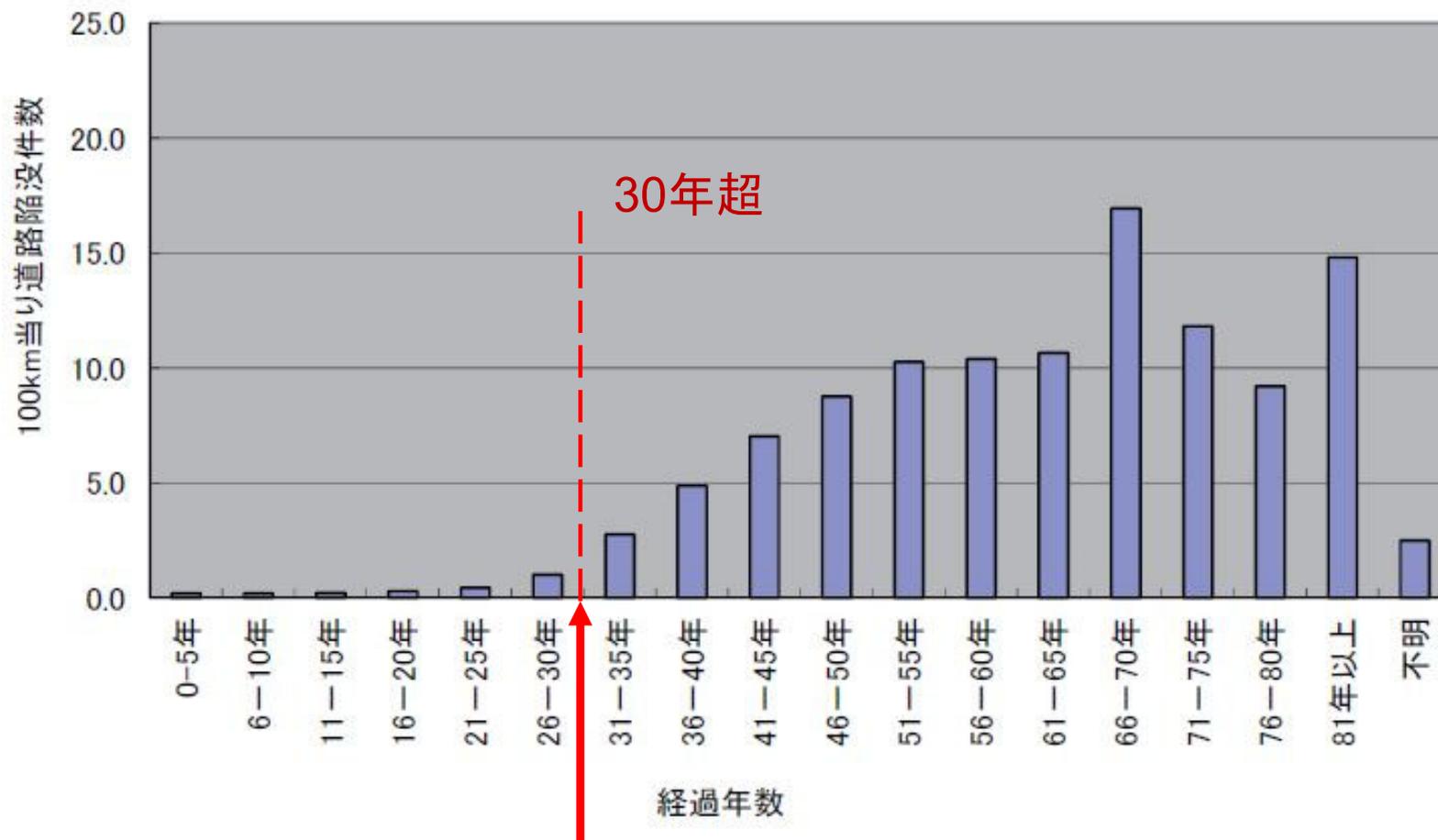


8割以上が50cm未満の浅い陥没で規模の小さいものがほとんど

年間約2600件！ 大きな地震があると顕著に増える

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

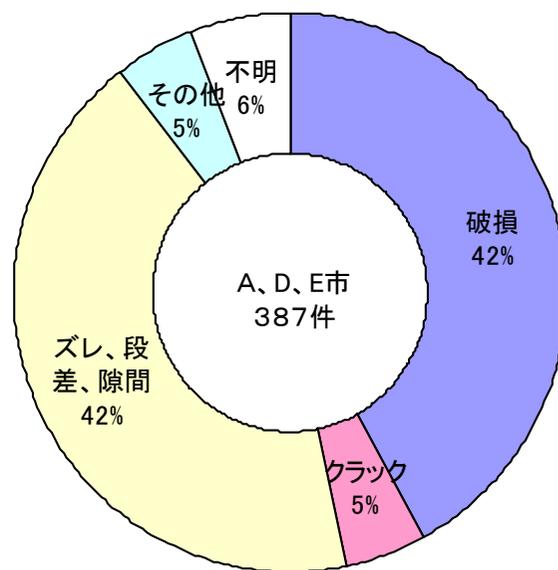


下水管敷設後30年を経過すると道路陥没の発生が増加する。

破損の状況



塩ビ管継手部のクラック



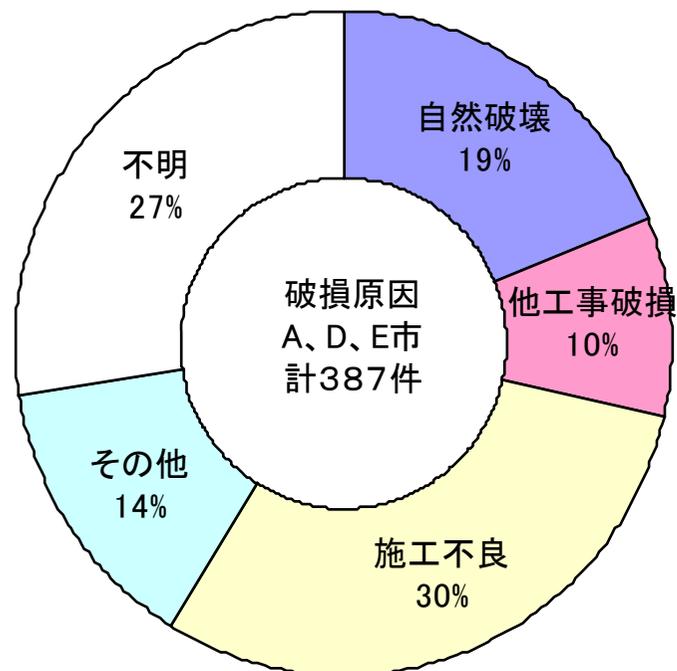
2001～2002年に発生した陥没について土木研究所調べ



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。



ガスパイプ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。

路面下空洞 → 道路陥没



← 知らぬが仏??

陥没数 ≪≪ 空洞数

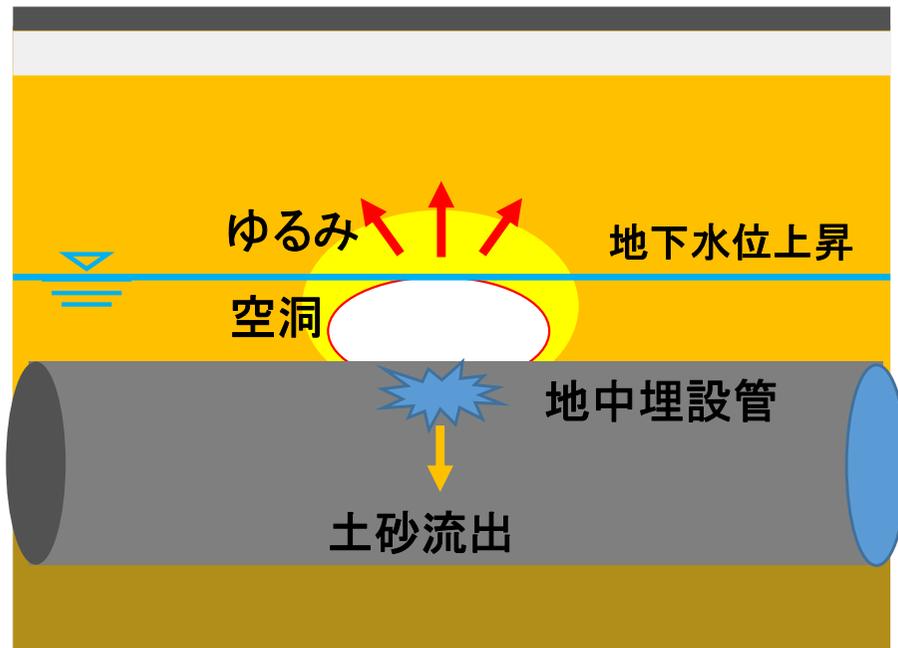
陥没を未然に防ぐための
路面下空洞探査

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？

路面下空洞の生成

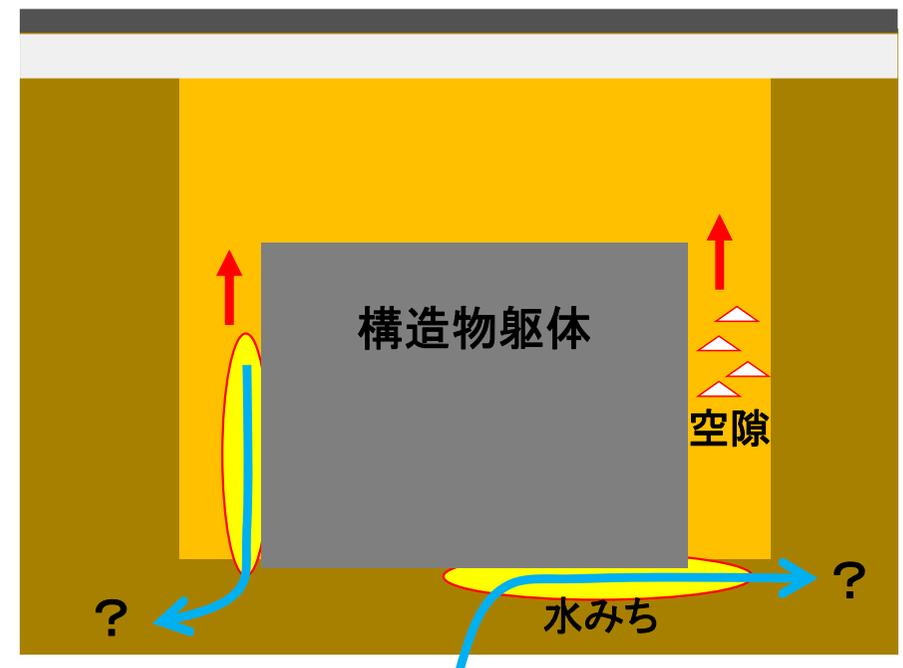
主な原因

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？？

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 (箇所/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年度に調査された道路延長10,091km(空洞数9984箇所)のデータより

2024年度の国土交通省実施の調査(国道)によると
 $4739 \text{箇所} / 3079 \text{km} = 1.54 \text{(箇所/km)}$

典型的な路面下空洞の諸元

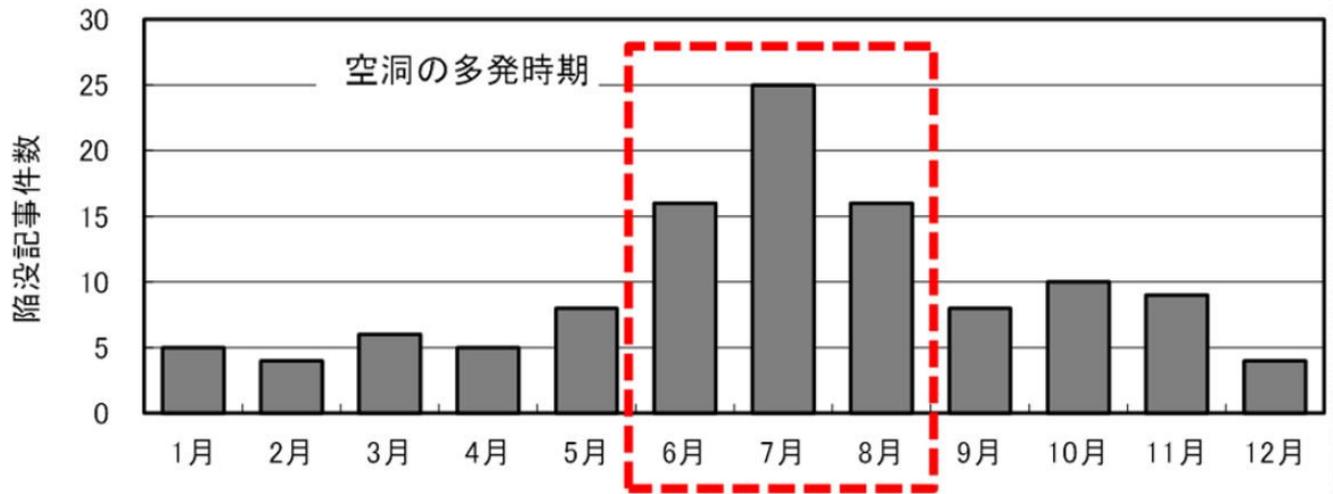
深度: 0.3-0.6m (大半が舗装直下)

厚さ: 0.6m未満が約半数

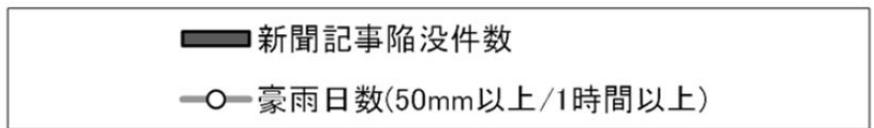
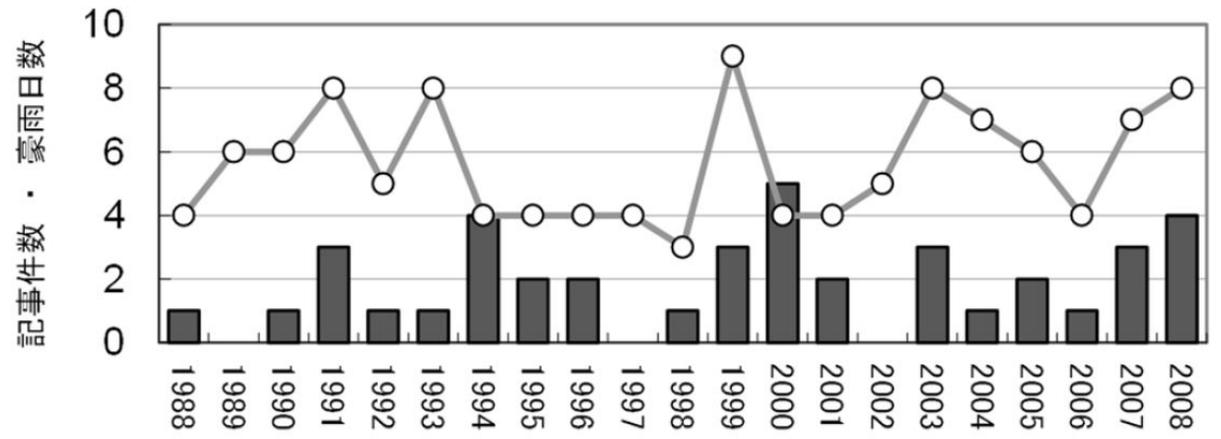
大きさ(面積): 0.25~2m²

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

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

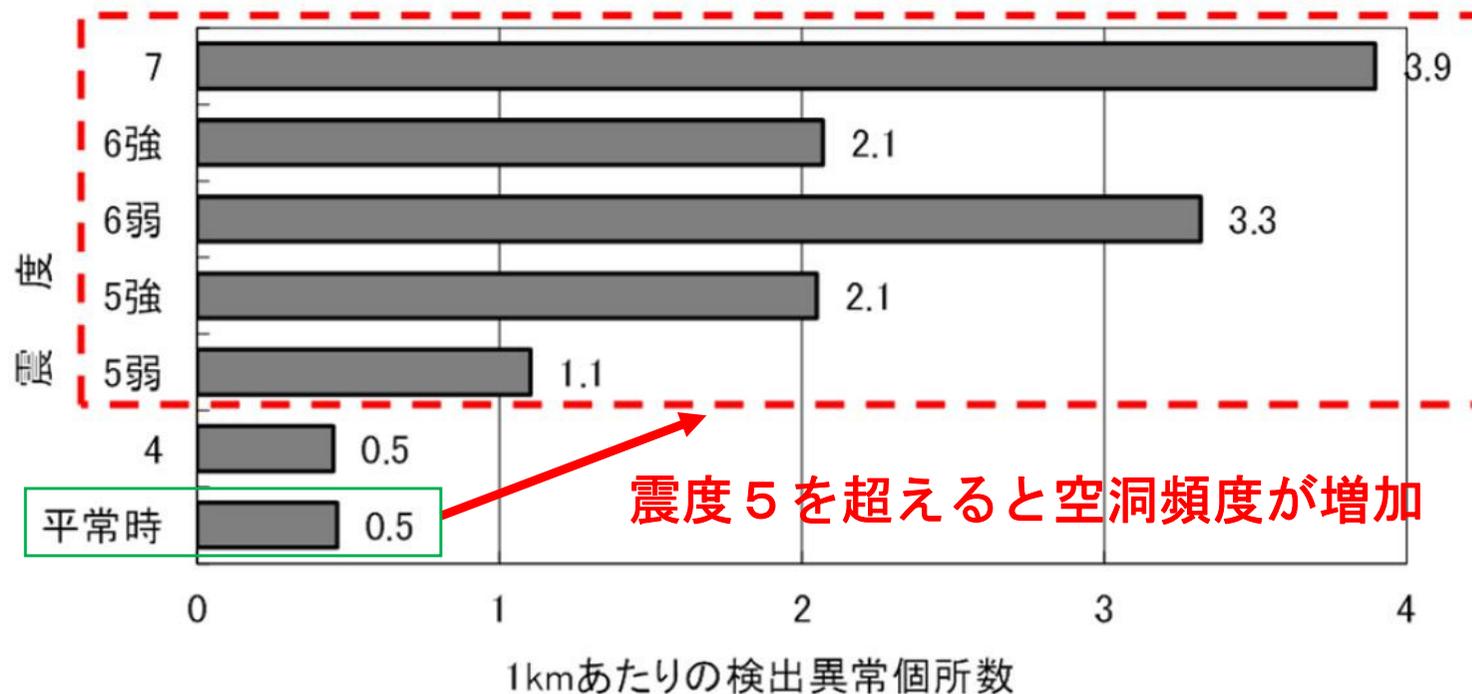


小池ら、路面下空洞の発生状況に関する考察(その1)、第47回地盤工学研究発表会、八戸、2012年7月

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)

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

空洞生成・拡大の要因

素因:

空洞ポテンシャルマップ

- ・ 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

空洞が出来やすい素質・要件が備わった上に,

誘因:

- ・ 地中埋設インフラの老朽化・破損
- ・ 雨
- ・ 地震 等

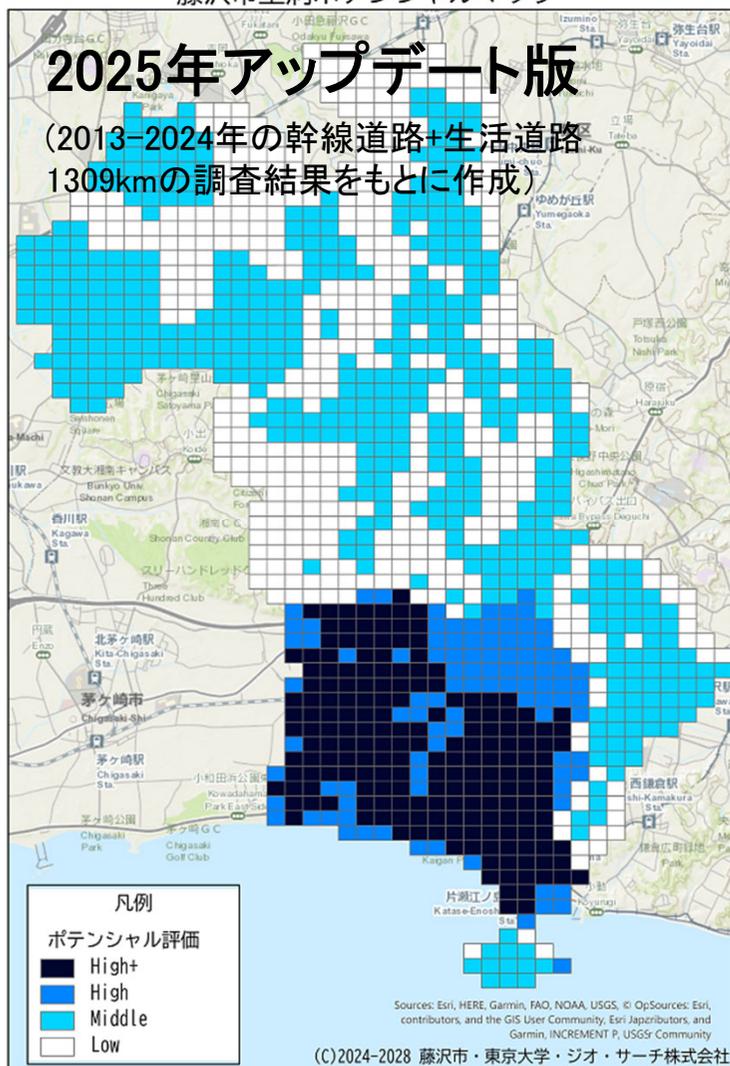
土砂の流出経路が確保されると,

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と検証

既存の空洞・陥没データと周辺状況・環境条件を分析し、
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

藤沢市空洞ポテンシャルマップ



空洞形成に影響する4つの支配要因

- ・ 下水合流式
- ・ 砂
- ・ 下水管取付管多い
- ・ 地下水位（参考）GL-3m以浅

ポテンシャル	要因	頻度 (/km)			
		陥没 幹線 生活		空洞 幹線 生活	
High+	下水合流&砂	1.8	2.7	5.8	9.1
High	下水合流or砂	1.4	0.7	4.3	4.3
Middle	上記以外	0.1	0.2	0.9	1.1
Low	なし	0.1	0.1	0.7	1.1

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？

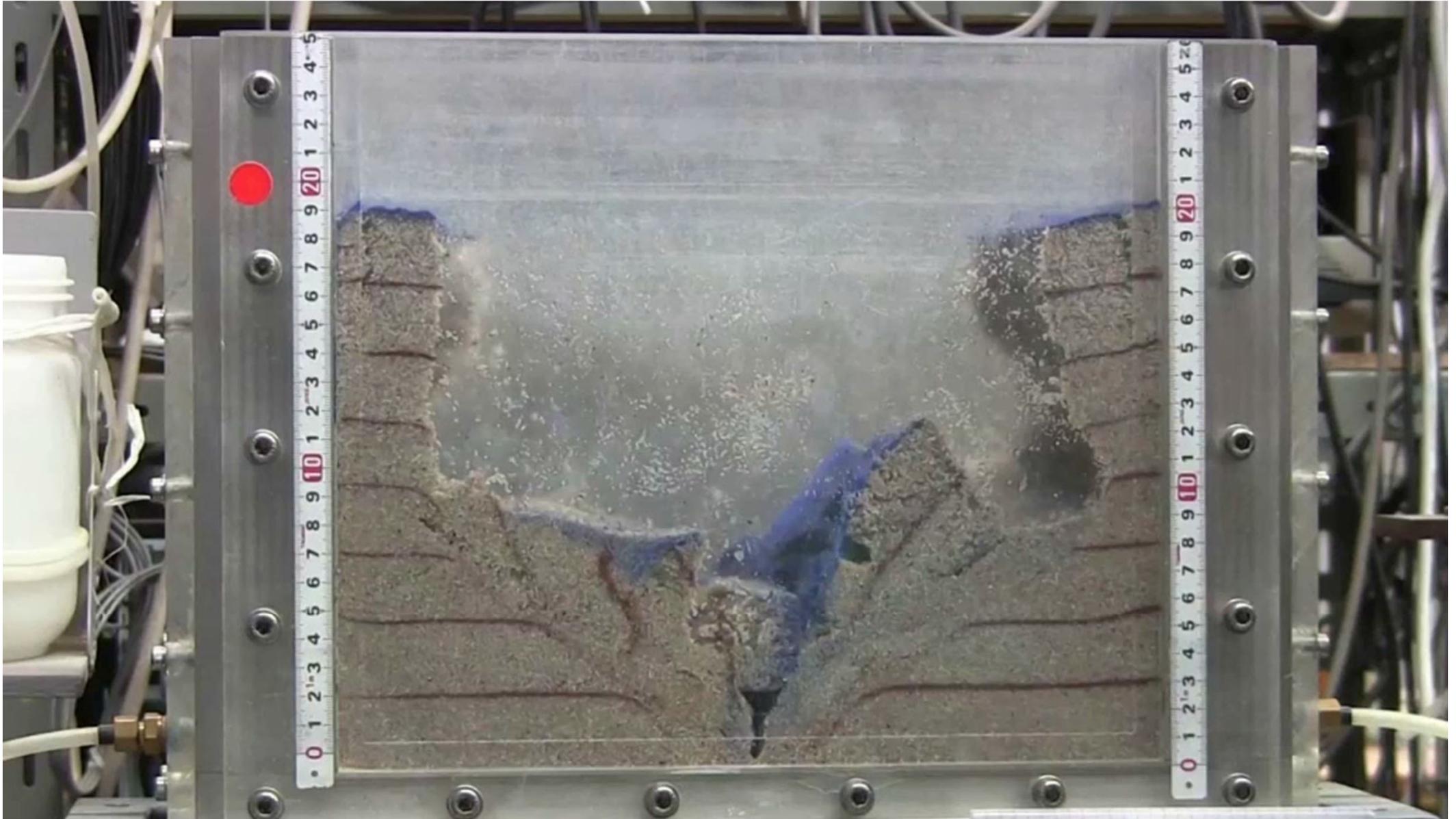


空洞の陥没危険度を考える上での2つの観点

- 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

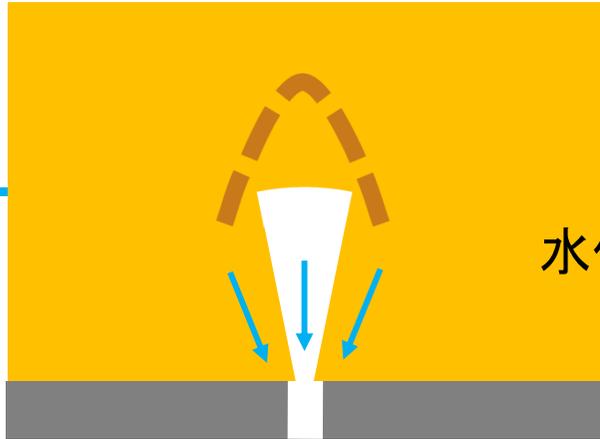
空洞生成・拡大のプロセス

空洞生成・拡大～陥没プロセス 動画

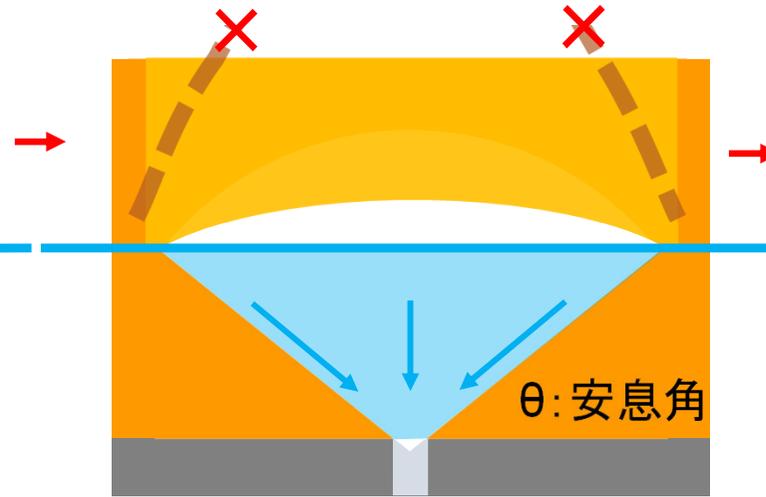


空洞生成・拡大のプロセス

空洞が深く広がりが小さい場合は空洞上部に土のアーチ効果が働く



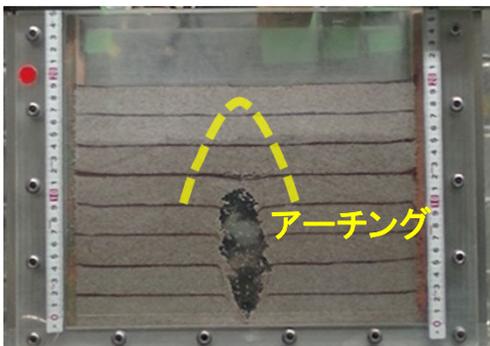
空洞が広がり浅いと上部にアーチングが働く余地がない



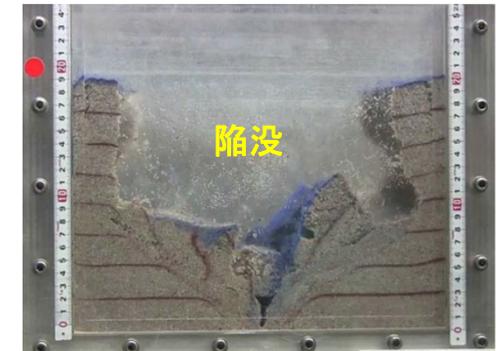
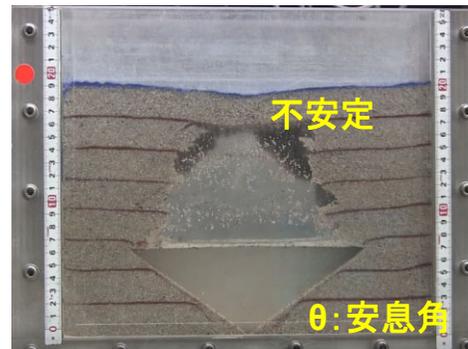
空洞上部の土が崩落し陥没



水が速く抜けた場合は空洞は大きく広がらず、煙突状



空洞内に水が保持されると土砂流出孔上部に扇形に空洞が広がる

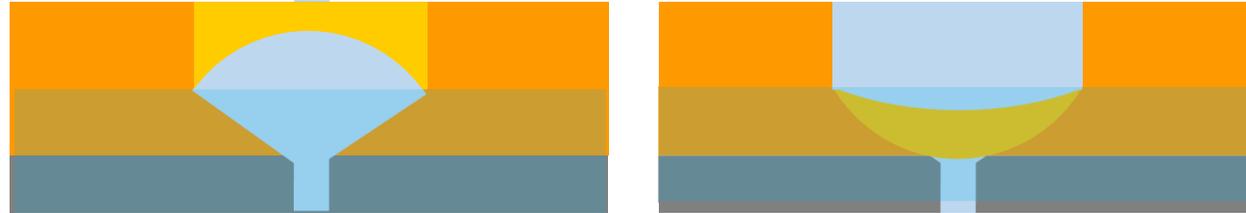


流出孔(隙間)が小さくても、継続的な土砂流出により空洞は拡大しうる
 地表面に変状が表れるのは末期的状況になってから
 水位の上下、または高い地下水位は空洞拡大の主要因

空洞生成・拡大のプロセス

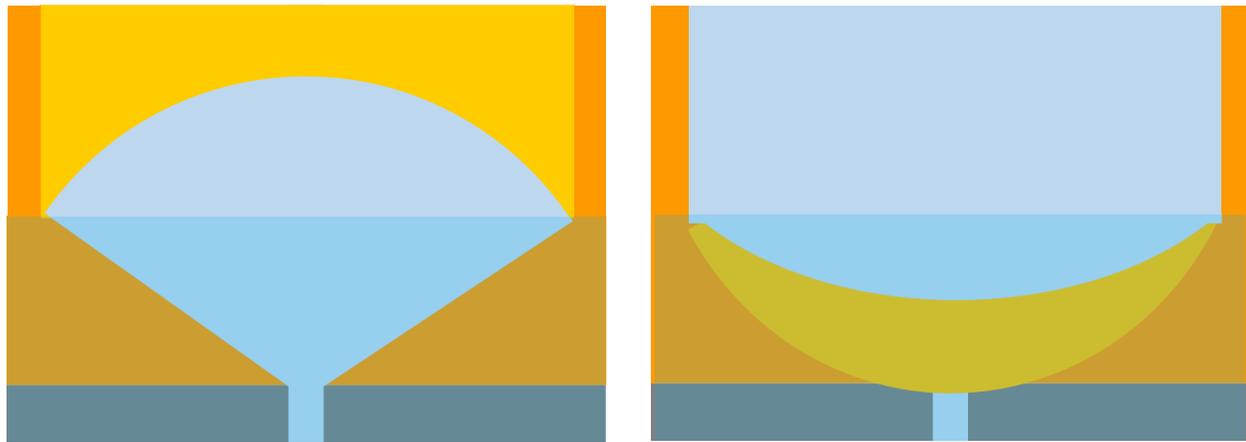
自立しない土層の下に抜け道があることによる土の亡失

流出孔が
浅い場合



陥没規模
小

流出孔が
深い場合



陥没規模
大

流出孔が地中深くなるほど陥没孔も大きくなる傾向あり

土砂流出による空洞生成・拡大・陥没過程

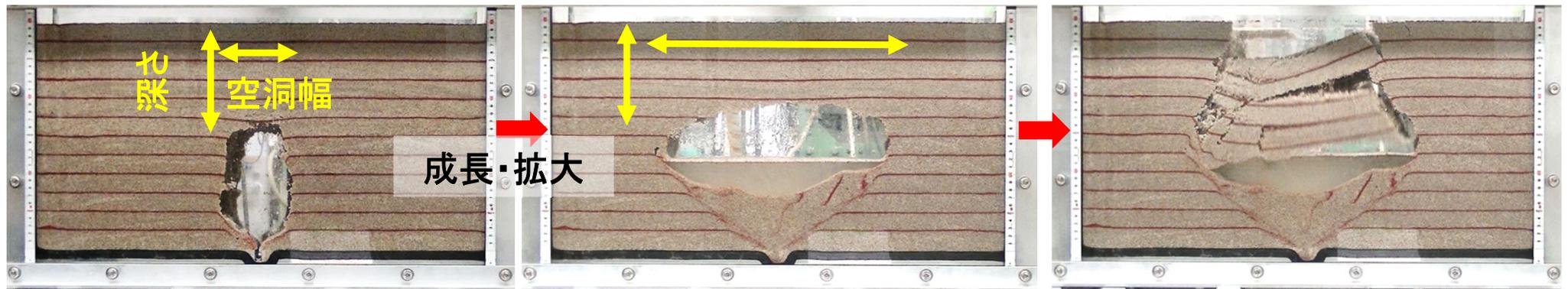
模型実験 (土槽底部の開口部より給排水繰返し)

初期水位
→



初期空洞 → 空洞の拡大・進展 → 地表面の崩壊・陥没

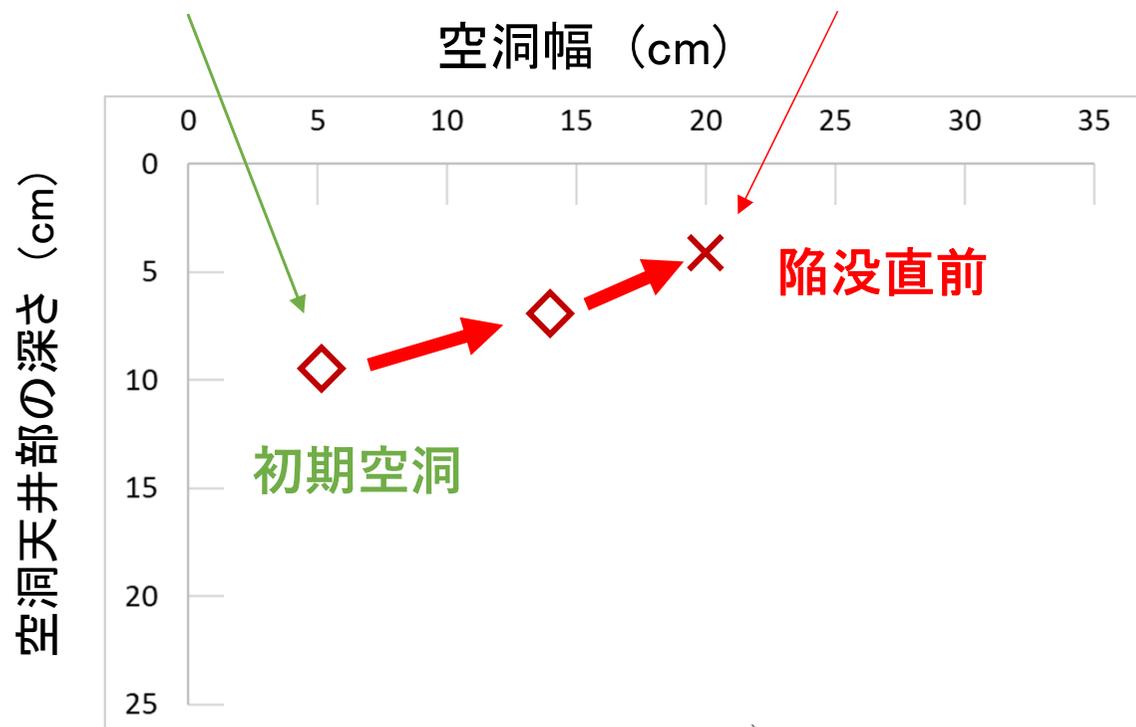
空洞生成・拡大過程



煙突状の初期空洞

陥没直前

崩落・陥没



煙突状の縦長の初期空洞

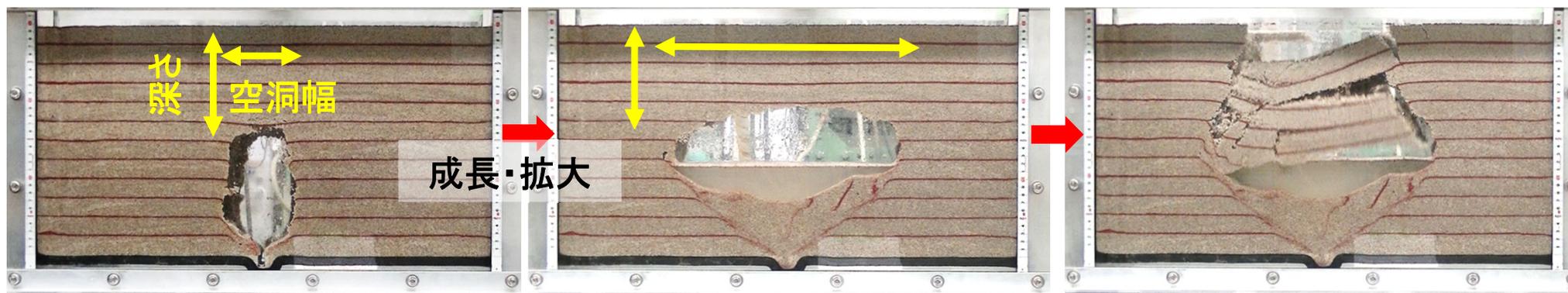


地下水位以下の空洞幅拡大



空洞上の土塊が崩落し陥没

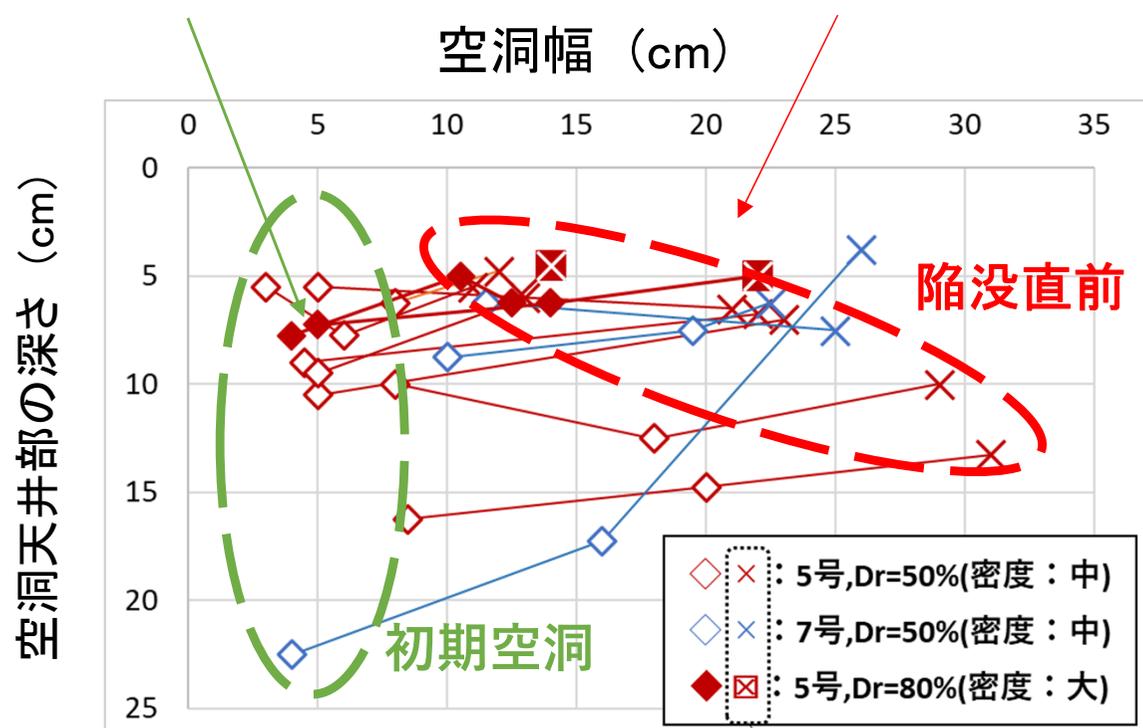
空洞生成・拡大過程



煙突状の初期空洞

陥没直前

崩落・陥没

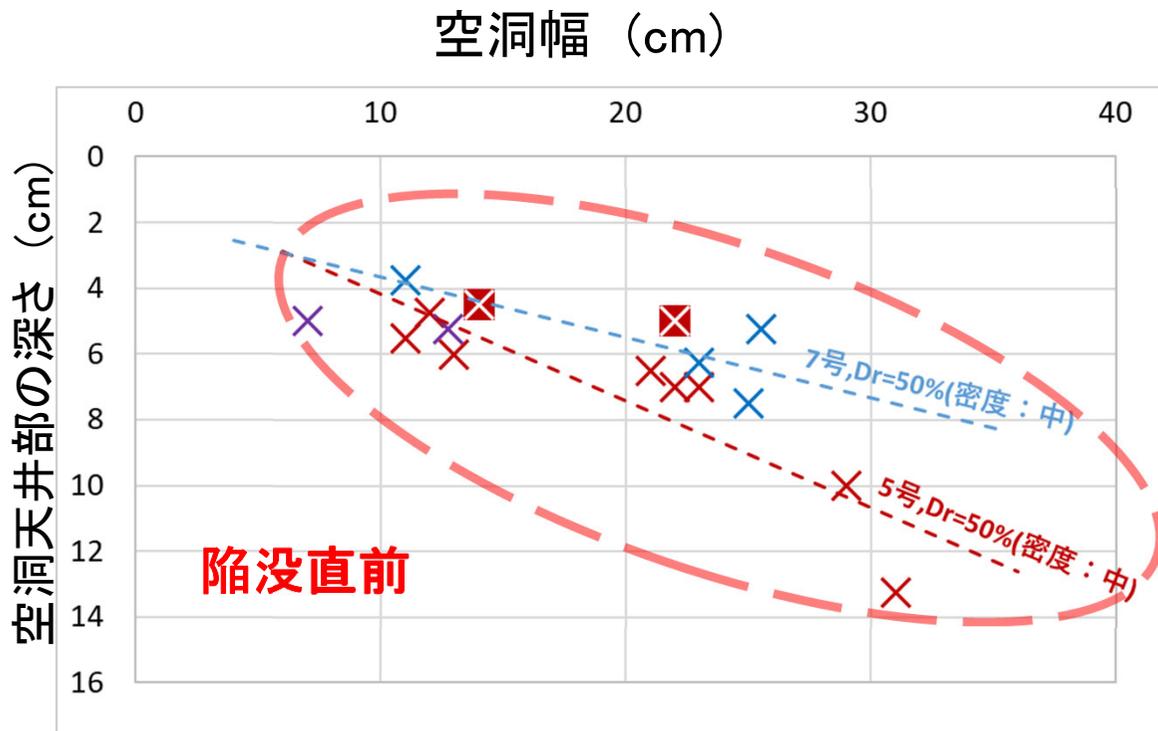
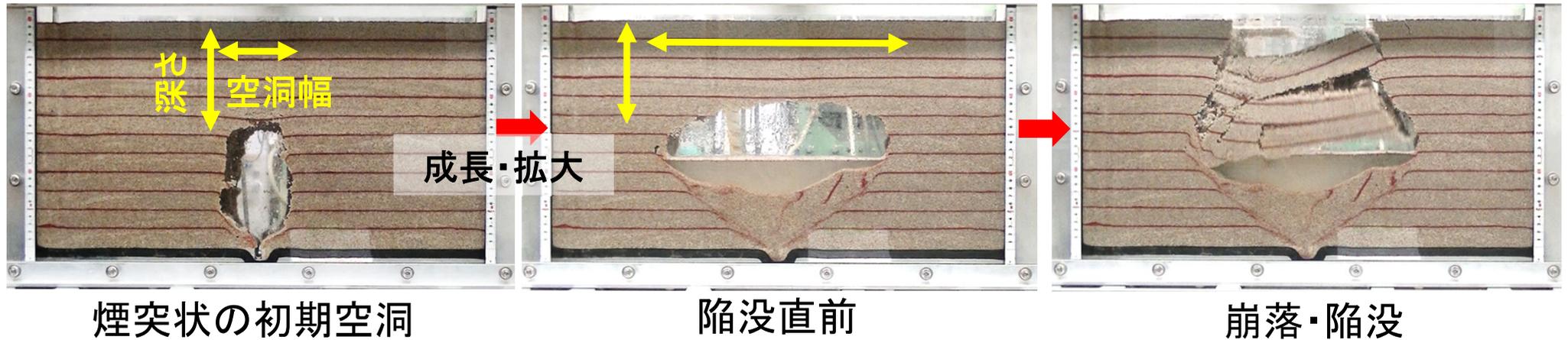


煙突状の縦長の初期空洞

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

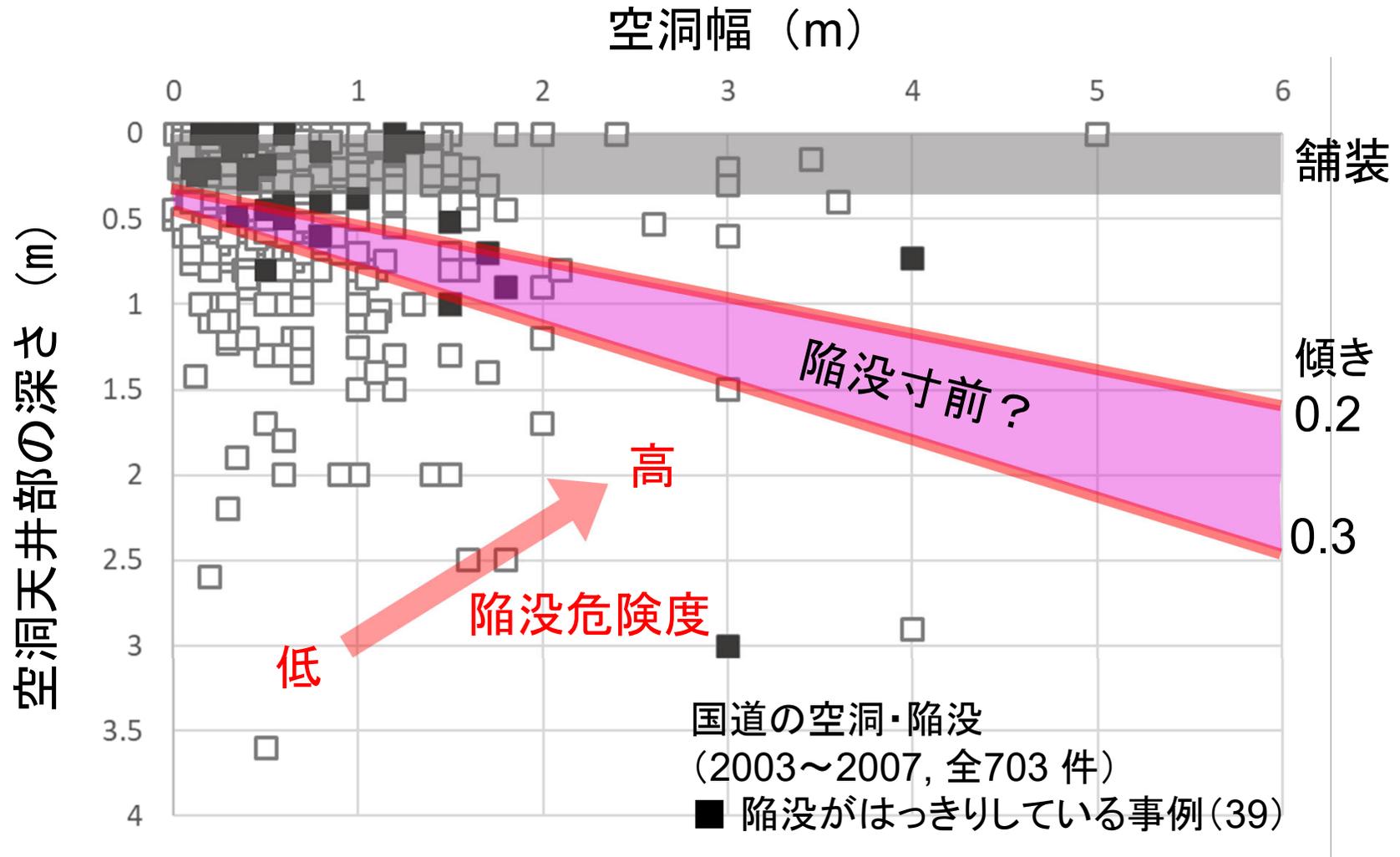


空洞は，土砂流出が継続する場合，地下水位以下で水平方向に広がり成長する

地盤の支持力喪失に関する限界状態は，空洞幅と空洞天井深さで概ね表現でき，空洞深さと空洞幅の比が0.2を切ると空洞上の土は自重による崩落の危険がある

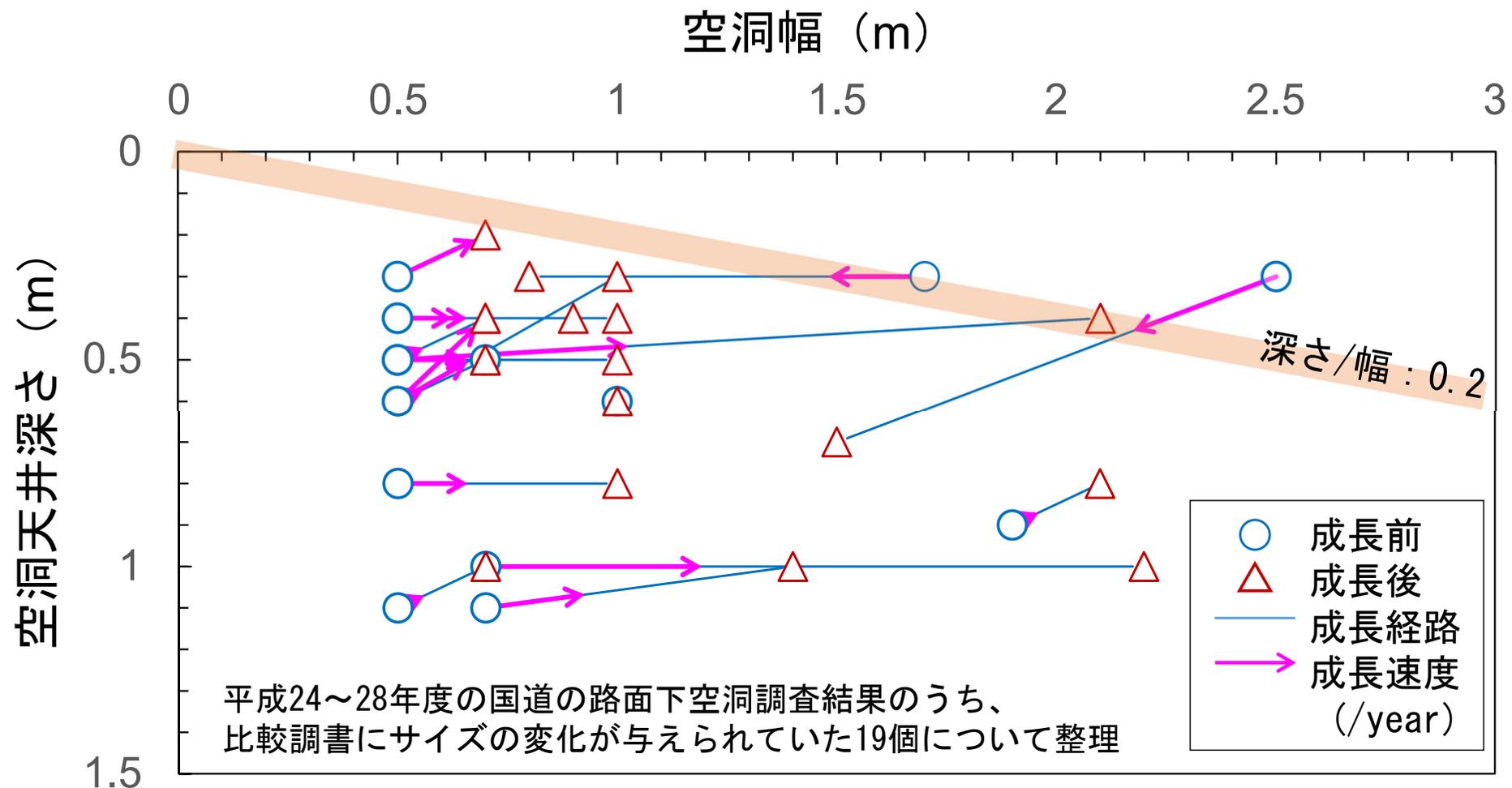
空洞の陥没危険度評価

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

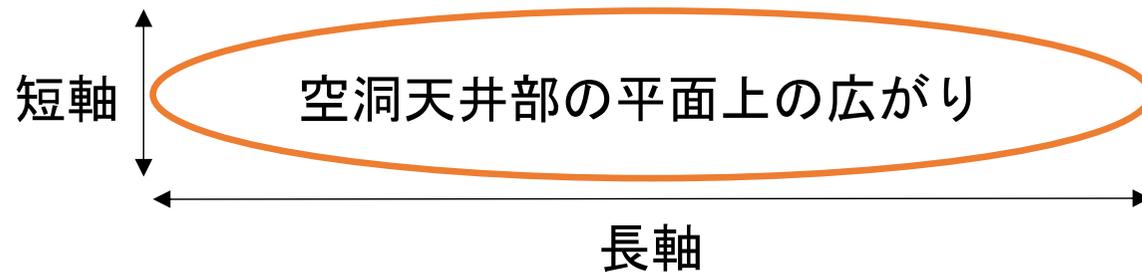


・空洞(深度変化有) : 平均 $0.108\text{m}^3/\text{年}$

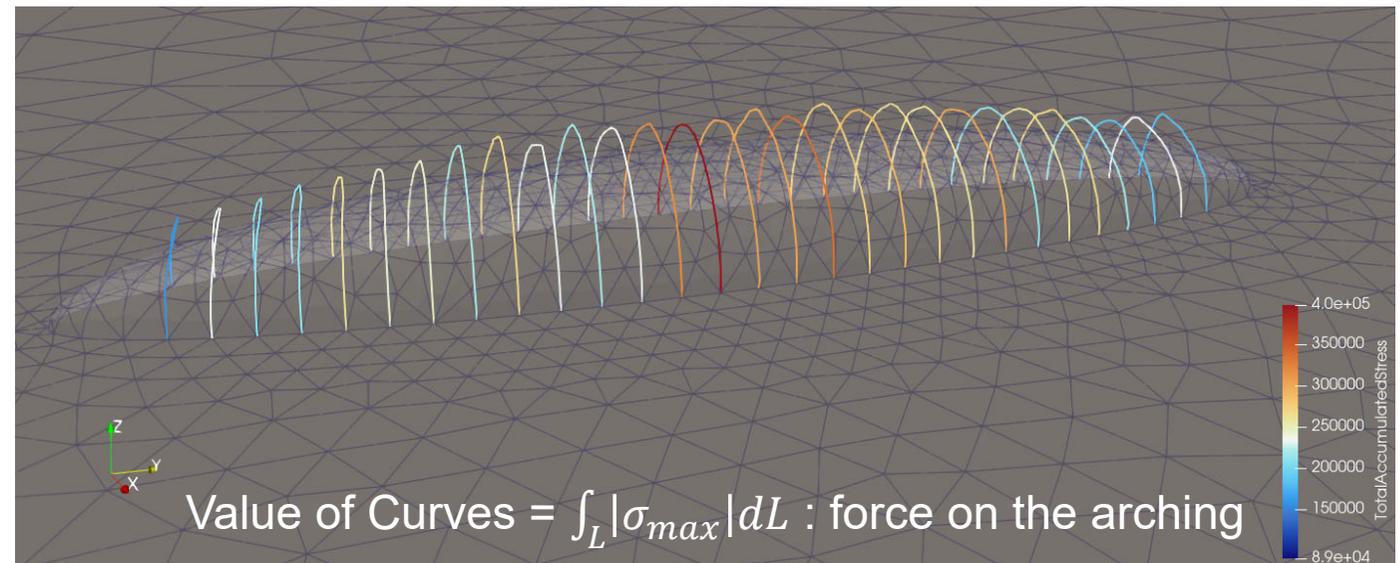
・空洞(深度変化無) : 平均 $0.52\text{m}^3/\text{年}$

空洞の陥没危険度評価

細長い空洞形状の場合の空洞上のアーチング



空洞上に生成するアーチングのイメージ



陥没危険度は空洞の**短軸方向の幅**と**空洞天井深さ**で評価可

下水管に起因する空洞の開削事例

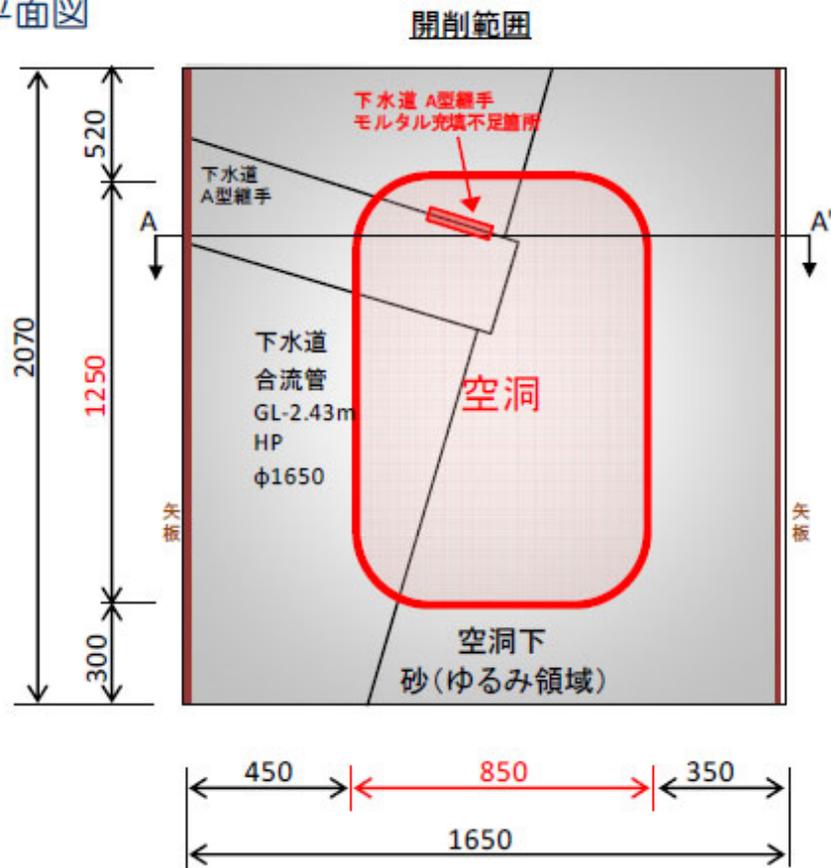


空洞規模 : 縦断方向広がり 1.25m
横断方向広がり 0.85m
上端深度 GL-0.20m
開削日 : 2017年 5月18・19日

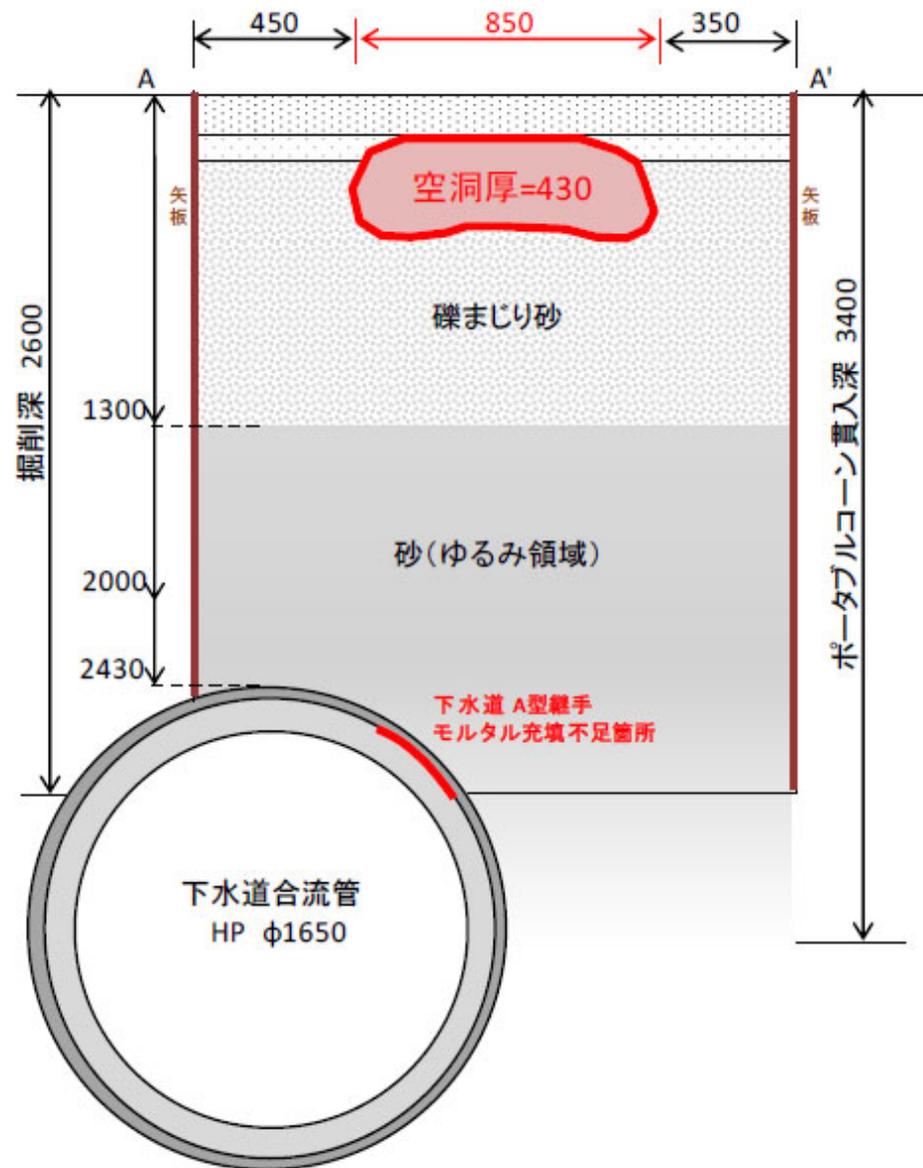


下水管に起因する空洞の開削事例①

平面図

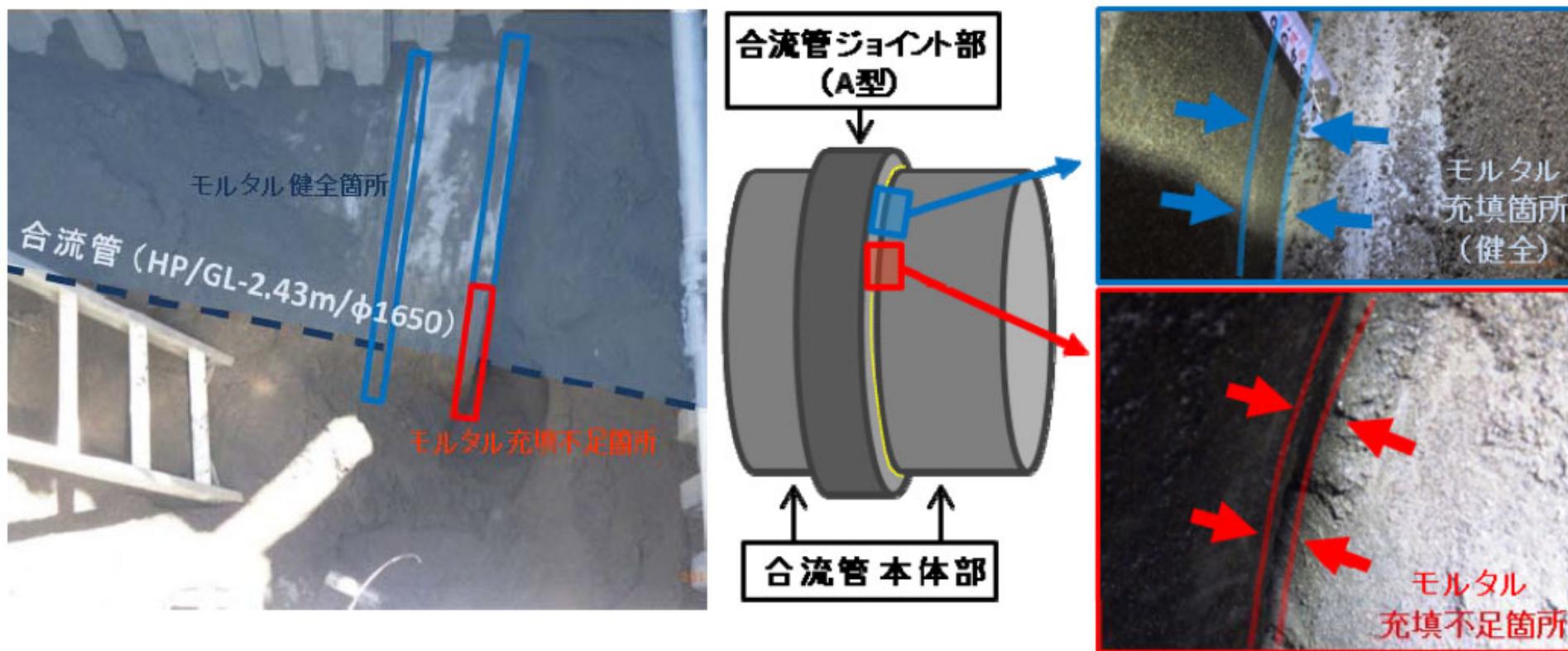


断面図



下水管に起因する空洞の開削事例①

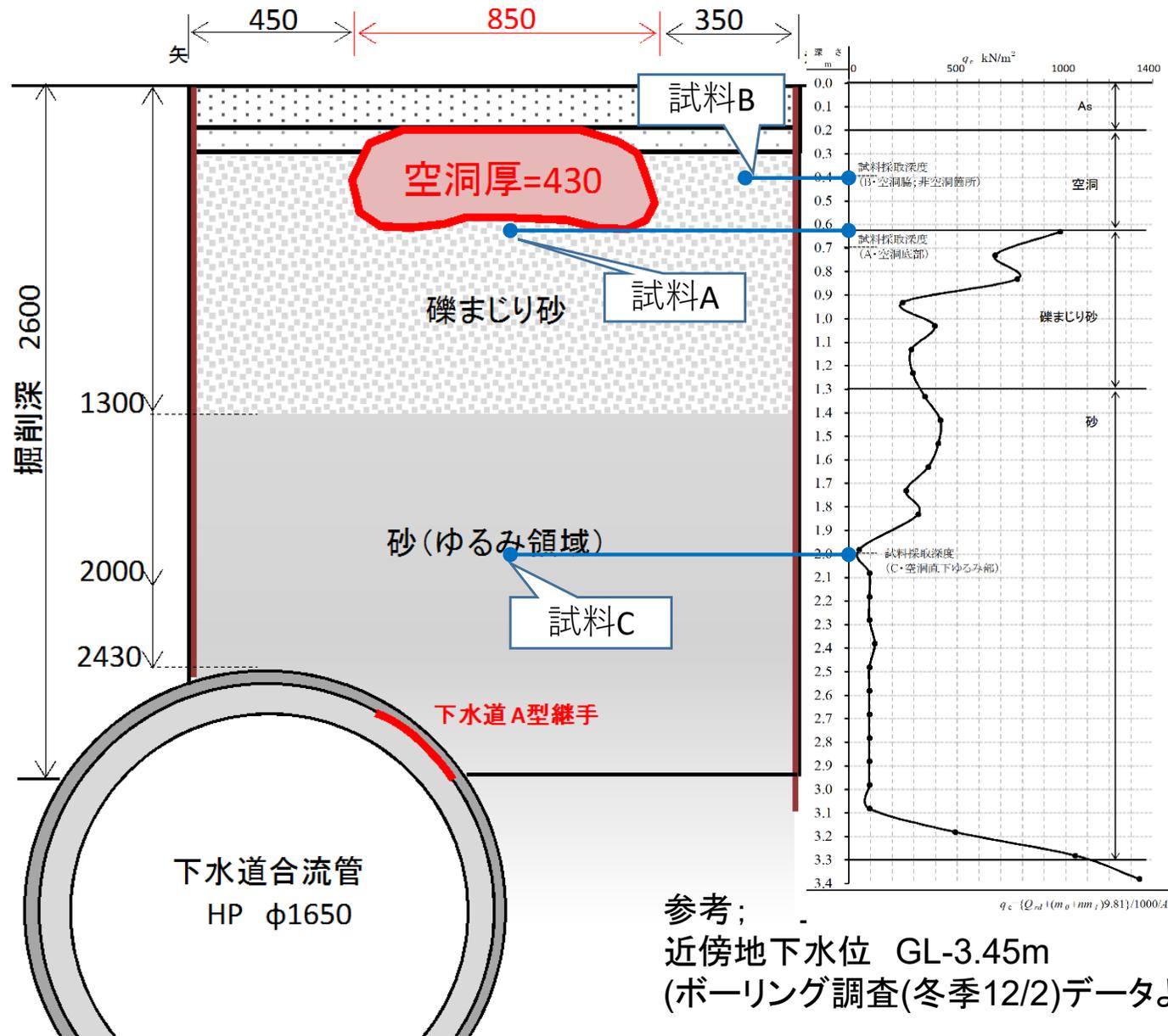
空洞直下の下水管（合流管）に
ジョイント・本体接合部の目止め材（モルタル）の
不足箇所を確認



下水管に起因する空洞の開削事例①

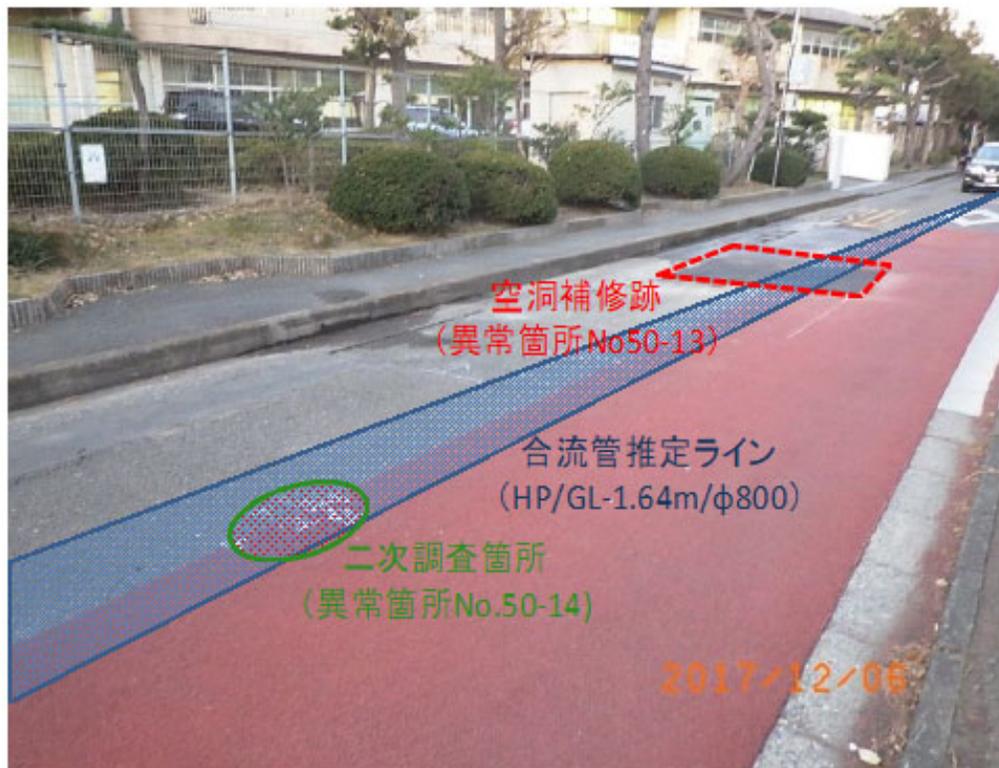
開削断面図とポータブルコーン貫入試験結果

● は試料採取箇所



下水管に起因する空洞の開削事例②

周辺状況



下水管に起因する空洞の開削事例②



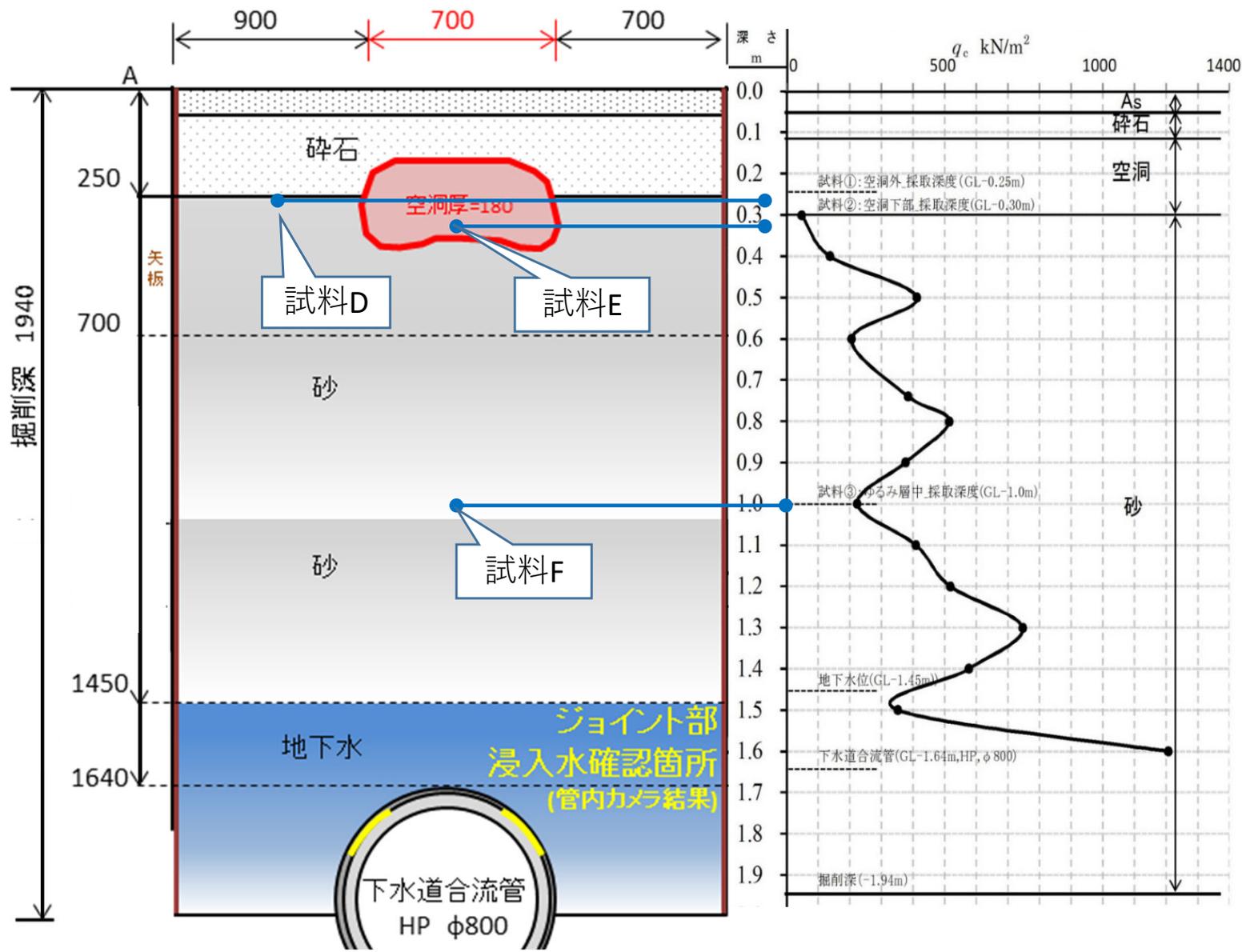
空洞規模 (W700, L700, H180)



合流管 (Φ800, GL-1.64m)

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？

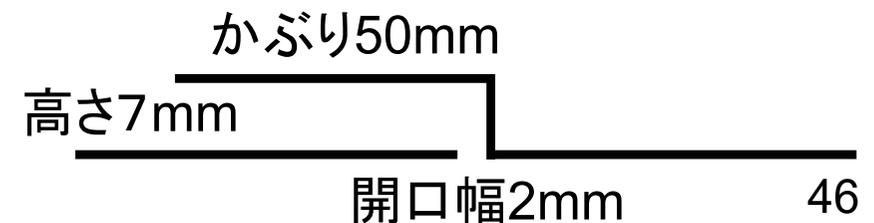


継手様の開口部を設けて
土砂流出模型実験を実施

下水管への漏水による空洞形成

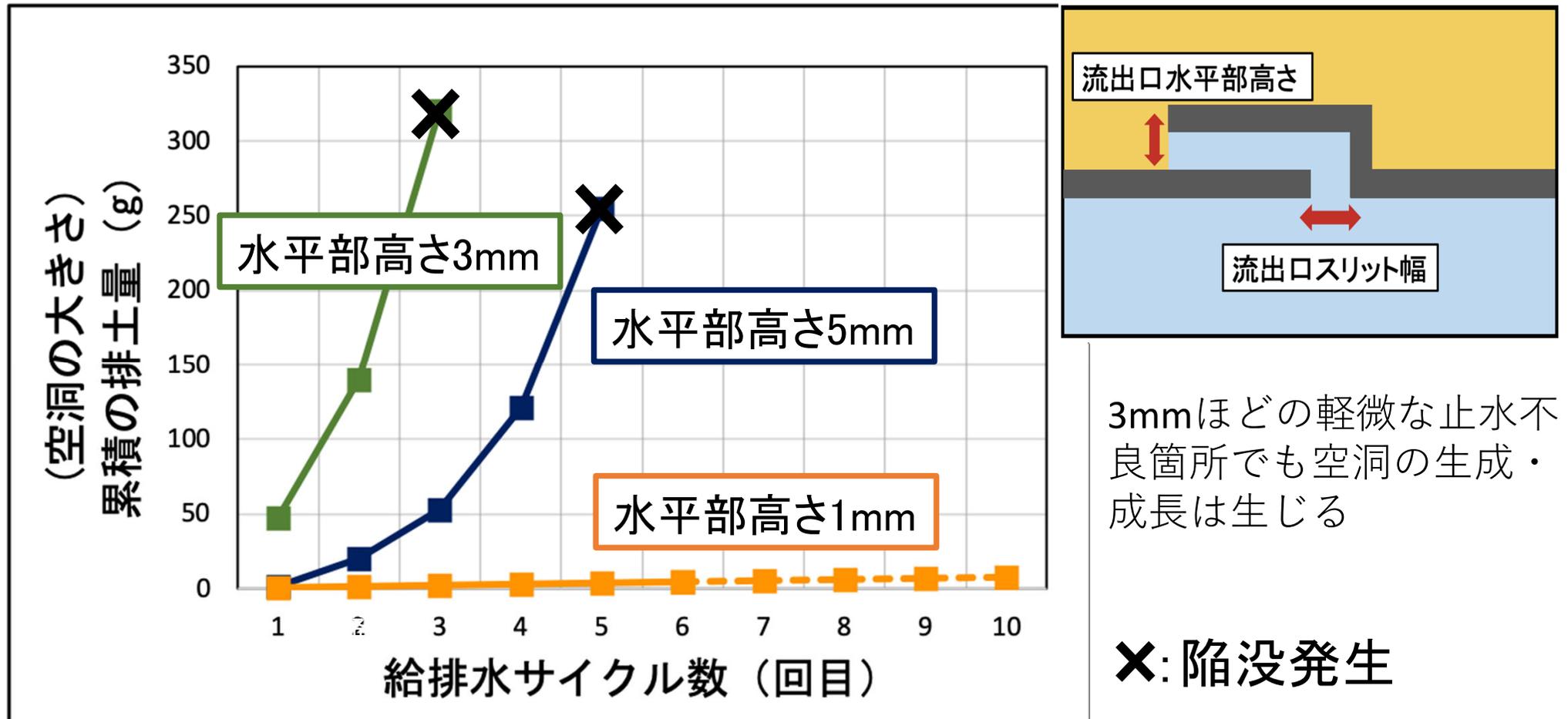


継手のかぶり部が水で満たされて、砂粒を水平に運ぶのに十分な流速があれば流出する



空洞発生現場の再現地盤を用いた模型実験

流出口水平部高さを変化させた場合



- ・ 土砂流出の程度：流出口水平部高さ 3mm > 5mm > 1mm
- ・ 土粒子と水が流動体として一体となって水平部を持続的に流出

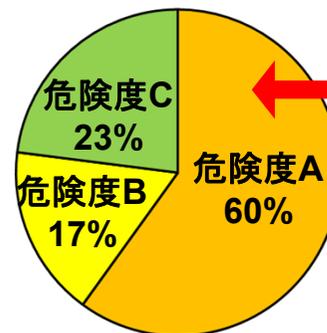
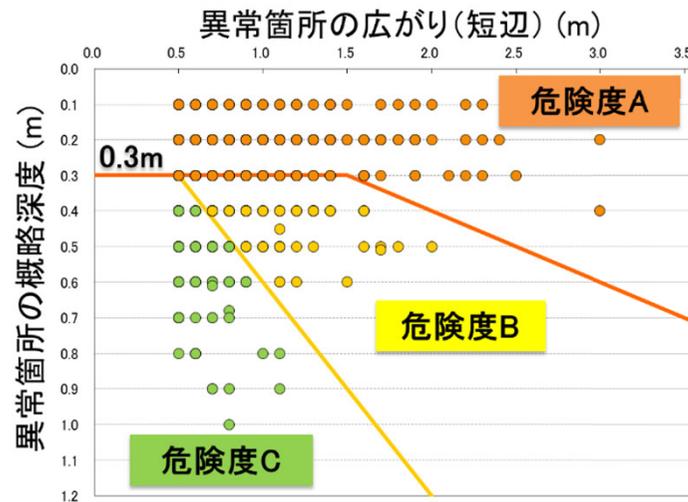
地震の空洞危険度への影響

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

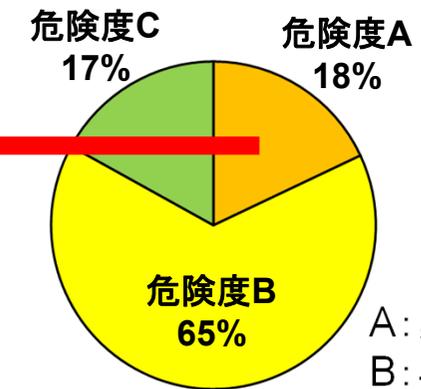
Aランク: いつ陥没してもおかしくない危険度の高い空洞

地震後の空洞危険度ランク(熊本地震)



**Aランクが
大幅に増加
60%←18%**

平常時の空洞危険度ランク



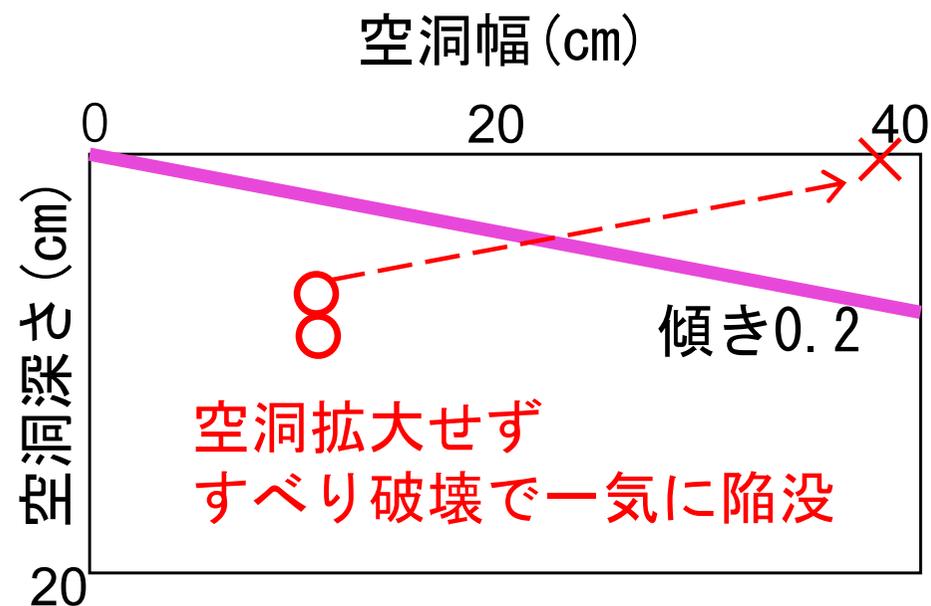
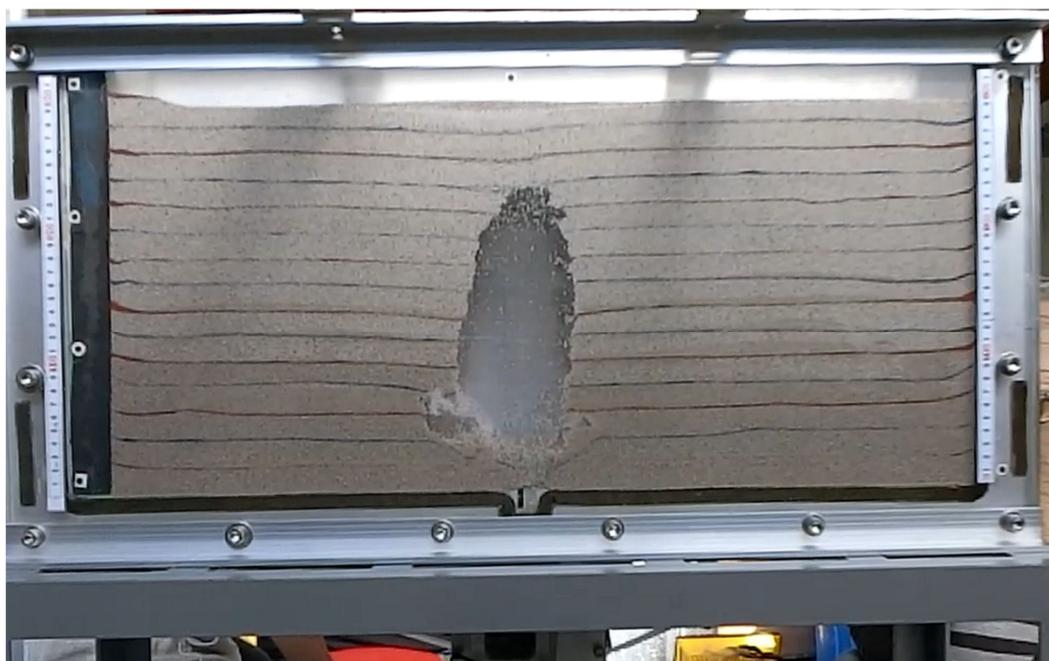
A: 緊急補修
B: 早期対応
C: 経過観察

(岡本ら, 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(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))

空洞の陥没危険度(地震時)

初期空洞を作製して加振
最大加速度: 1200 gal

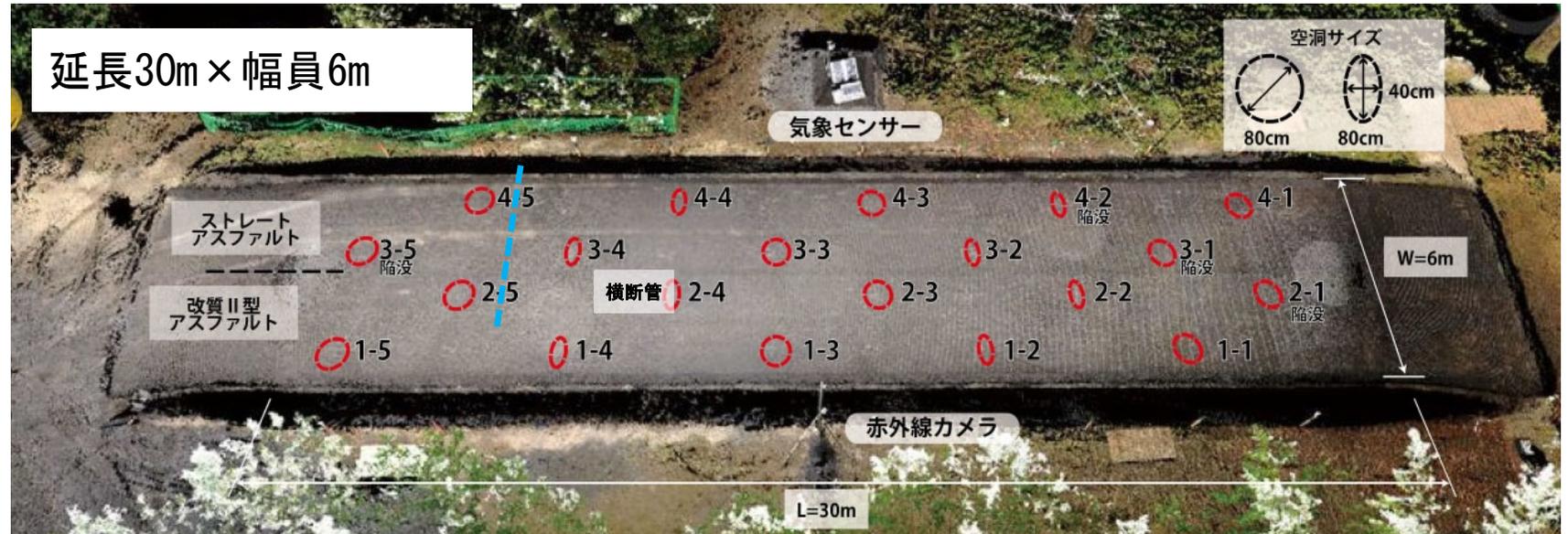


陥没危険度が低い空洞も,
地震時には空洞内への側部土塊のすべり破壊により拡大
↓
地震時に危険度ランクが高い空洞が増加する調査結果に整合

実物大試験道路の構築

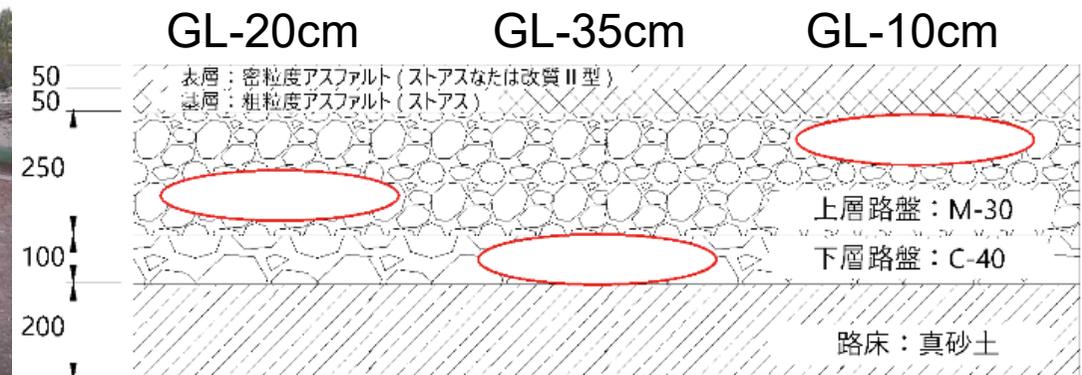
試験道路の概要

- 表層：
 ストレートアスファルト
 改質Ⅱ型
- 上層路盤：
 粒調碎石
 瀝青安定処理
- モニタリング：
 気象
 路面温度
 路面変位



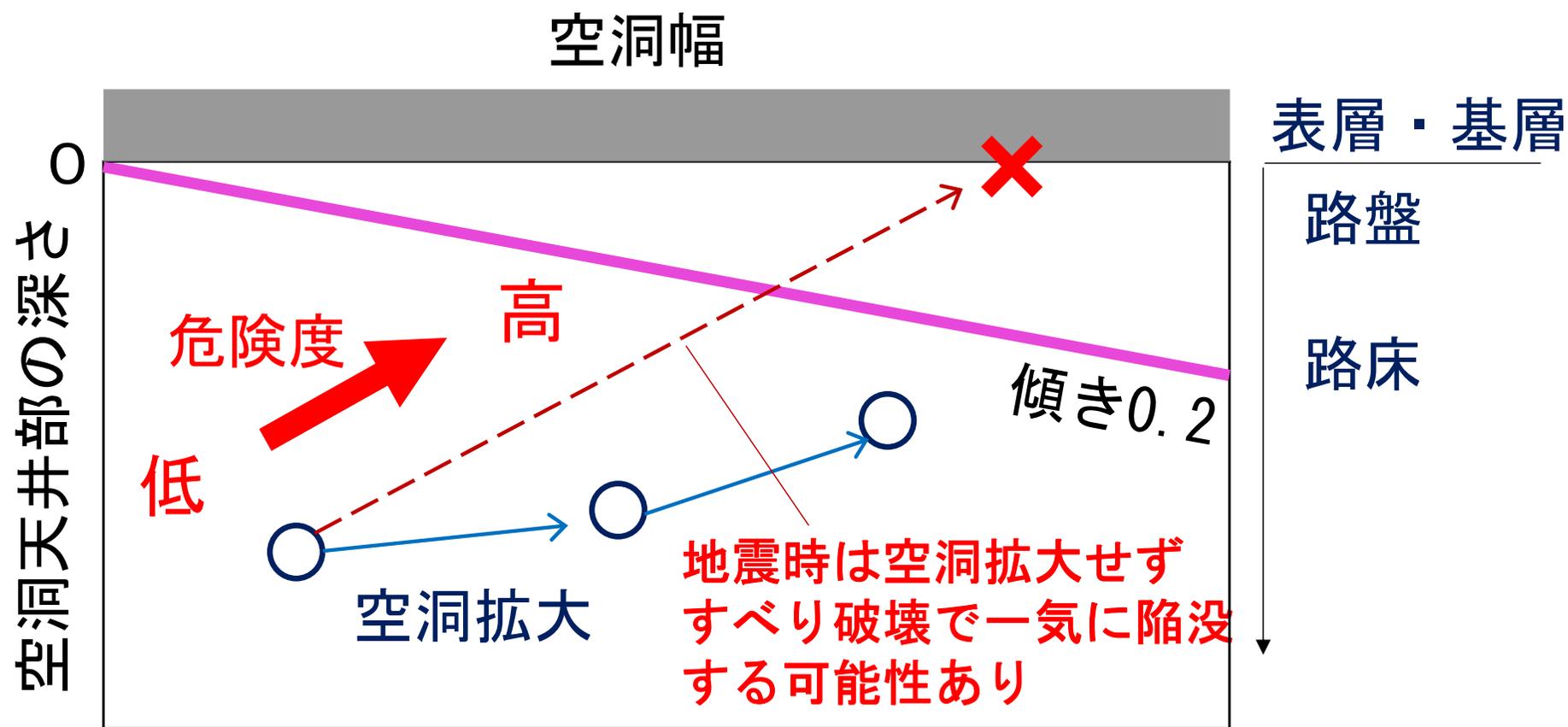
試験体の構築

細礫詰め土嚢を路盤内に設置し舗装を敷設し、その後細礫を吸引し空洞生成
 $\phi 80 \times h10\text{cm}$ および $80 \times 40 \times h10\text{cm}$ の空洞を天井深さ10~35cmに1~3期で計51個設置



舗装構造を考慮した陥没危険度評価

舗装構造によらず，路面下空洞により路盤が侵食されると，路面陥没は時間の問題
陥没危険度は路盤以下からの空洞深さで評価



道路陥没対策と安全・安心な都市インフラ

現状

- 道路陥没問題は都市の成熟および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
空洞/陥没ポテンシャルの把握による、効率的な調査
- 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
- 道路陥没防止のためには路盤の保全が重要
- 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・分析および施設管理者間の情報共有・連携により、効率的・合理的な道路・インフラ管理へ

しかしながら、道路陥没対策はこれで万全 というわけではなかった

八潮市の大陥没

日時：2025年1月28日9時49分頃

場所：主要地方道松戸草加線（県道54号）中央一丁目交差点内

陥没の規模： 1つ目 幅約8m、深さ約5m トラックが転落

2つ目 幅約11m、深さ約8m（1月29日1時3分頃）

2つの陥没穴が一つに結合して幅約30m深さ約10mに拡大（1月30日2時37分頃）



八潮市で発生した道路陥没事故に関する原因究明委員会中間とりまとめ（2025.9/4）より

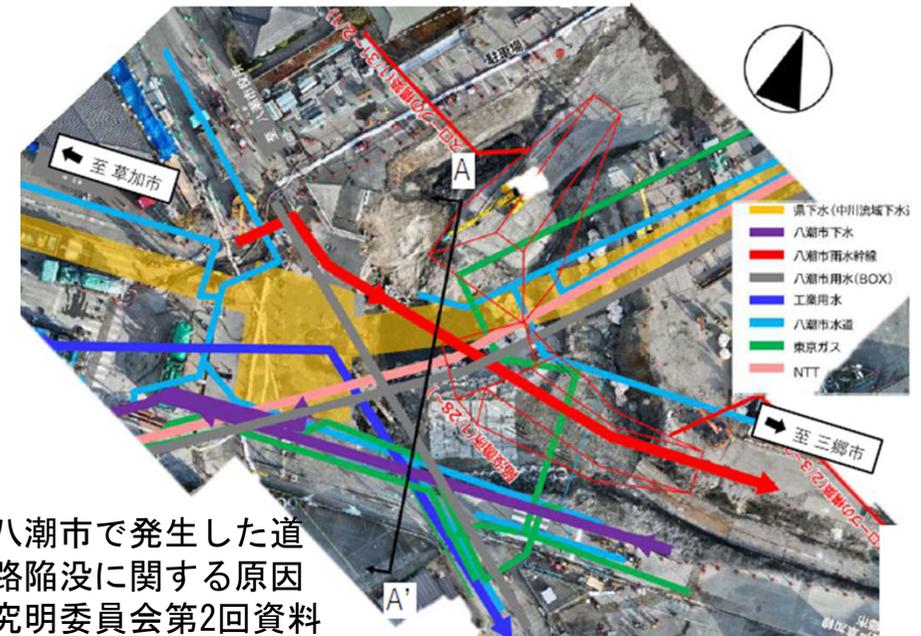
八潮陥没からの教訓

八潮陥没の不運：

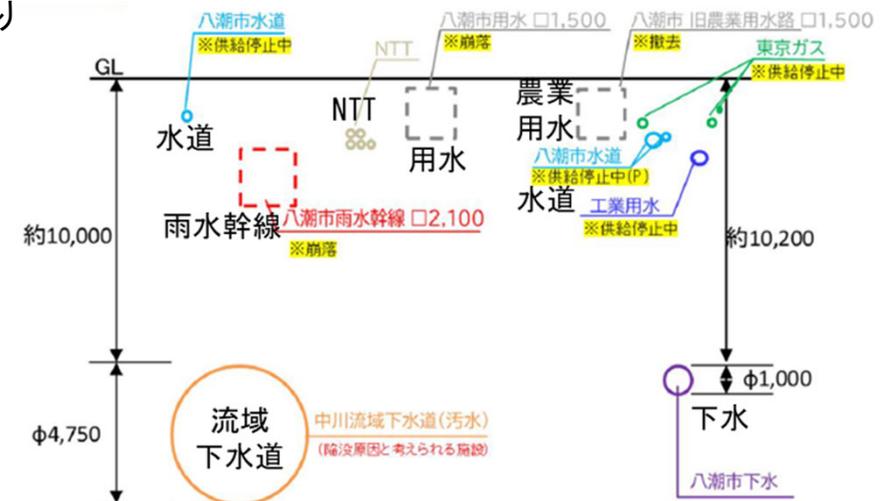
- ・ 深層空洞起因
原因となる管渠はGL-10mで、既存の地上からの空洞探査の範囲を超えている
- ・ 下水道管渠
シールド工法による大規模管渠
腐食促進環境 点検しづらい状況
下水管内から背後の空洞を見つけるのはそもそも難しい
- ・ 周辺環境
軟弱なシルト・細砂層 高い地下水

下水道起因の陥没は従来ほとんど小規模で、
深層空洞起因の大規模陥没は想定外

輻輳する埋設インフラ



八潮市で発生した道路陥没に関する原因
究明委員会第2回資料
より



地下10m地点から土砂流出が継続した場合には大陥没になりうる

細粒土の空洞形成

細粒土：底部開口部から土粒子と水が一体となって流出し、流出分の体積が上端に空洞として残る。空洞周辺部は水の流出により不飽和化してサクシオンにより自立性が発揮される。その後の空洞への水の供給によりサクシオンが解放されるが、細粒土では透水性が低いため、水に接する空洞内面から徐々にサクシオン解放が起きて、壁が溶けるように空洞が拡大する。



砂：砂も水と一緒に重力によって開口部から流出し、残置部はサクシオンが働き煙突状の初期空洞ができる。空洞内に給水されると、砂の透水性は高いため広範囲のサクシオンが解放され、水面下では安息角で空洞幅が広がる。

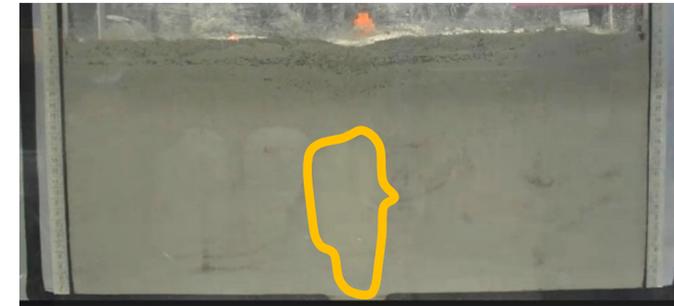


空洞の陥没危険度

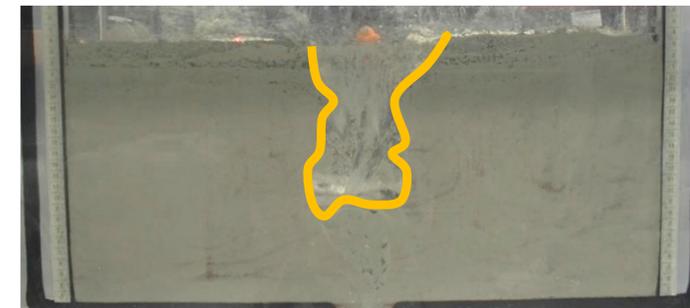
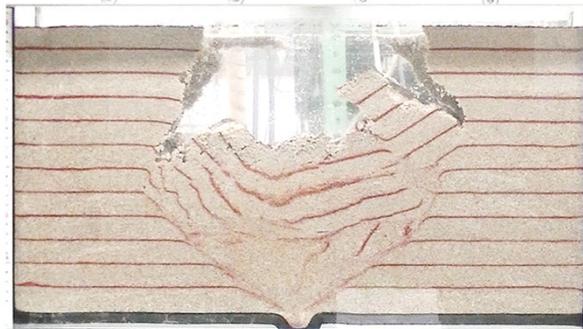
砂

砂混じりシルト

陥没直前



陥没孔



天井深さと幅の比 $1 : 3 \sim 5$

$1 : 1$

- ・ 浅層空洞に対して適用している空洞危険度評価の指標があてはまらない。
- ・ 細粒土の空洞は横に広がりにくく煙突状に成長し、末期空洞の高さと陥没孔の深さがほぼ同じ。
- ・ 八潮の陥没ケースでは幅5~6m、高さ5mの末期空洞と推定できる。

都市に潜む落とし穴

Q. 八潮のような大陥没はどこでも起こりうるのか？

Ans. どこでも起こるというわけではない

- ・ 陥没現象は前兆が捉えにくく突然おこるように見えるが地中に何らかの原因で空洞が発達した結果
 - ・ 地中深くに土砂の流出原因があり、流出が継続すると大規模空洞・大規模陥没につながる
 - ・ 空洞の生成元は、地下埋設インフラの損傷部
 - ・ 空洞が成長・拡大しやすいのは、砂地盤・高い地下水
- したがって、地下水位の高い砂地盤に埋設された大口径下水管が老朽化や腐食等により損傷しやすい状況にある場合、起こる可能性がある

埋設インフラは私達の生活を影で支えてくれるライフラインだが、適切に維持管理しないと負の遺産となりかねない

深層空洞起因の陥没対策

口径2m以上の古い下水道管（敷設後30年超）は全国で5000km
2025年9月末時点で優先実施箇所のうち813km実施
緊急度1の要対策箇所は75km

- ・従来通りの点検方法による損傷度判定と管背後の空洞生成は必ずしもリンクしない。
- ・そもそも点検しづらい箇所、補修しづらい箇所がある。

・ 深層空洞探査

最近の開発によりGL-3mまでは地中レーダ探査で対応可能
それ以深の空洞の探査技術の開発

- ・ 下水管渠の腐食対策、きめ細かな点検・維持管理
- ・ 空洞ポテンシャルが高い箇所の多重対策
万一下水管が損傷しても周囲の地盤条件によっては空洞は広がりにくい。空洞が拡大しにくいような地盤対策

個々のインフラのみならず周辺の地盤空間を含めた維持管理

深層埋設インフラ管理における課題

埋設インフラを地盤中で3次元的に配置できるのは、
周りに土があり周囲から支えるから→ 地盤の健全性の保持が前提

インフラは基本的には人工物
人工物は、その材料・構造・設計方法・損傷条件が既知
(浅埋設のインフラも開削工法で設置しているので周りの裏込材は人工的埋戻し)

深層埋設インフラは、シールドや推進
工法などで設置され、周辺は自然地盤
→ 自然地盤のマネジメントが必要

今後インフラの老朽化に伴って起こりうる
想定外の事態に対して
それぞれの技術者・管理者が
従来の守備範囲を超えた想像力が必要



これからの埋設インフラ管理

下水道等に起因する大規模な道路陥没事故を踏まえた対策検討委員会

第1次提言（2025年3月） 全国特別重点調査の実施について

第2次提言（2025年5月）

下水道を中心とした地下インフラのマネジメントのあり方について
安全性確保を最優先する管路マネジメント、点検・調査の技術化とコストダウン、
地下空間情報のデジタル化・統合化、メンテナビリティ・リダンダンシー

第3次提言（2025年12月）

新たなインフラマネジメントに向けた5つの道すじ

- ・ 管理者や担い手にとっての見える化と市民への見える化の徹底
- ・ 重点化と軽量化の2つのメリハリ
- ・ インフラを支えている現場の担い手等、現場（リアルワールド）にもっと光を
- ・ 計画・設計・整備・修繕・改築など全てを一体的に考える統合的マネジメント
の構築
- ・ 管理者と利用者、産学官民が一丸となって取り組む改革推進のためのモーメンタム