

道路陥没予防ソリューションの開発

東京大学生産技術研究所
桑野玲子

道路構造及び空洞特性に適応した陥没危険度評価 と合理的路面下空洞対策についての研究開発

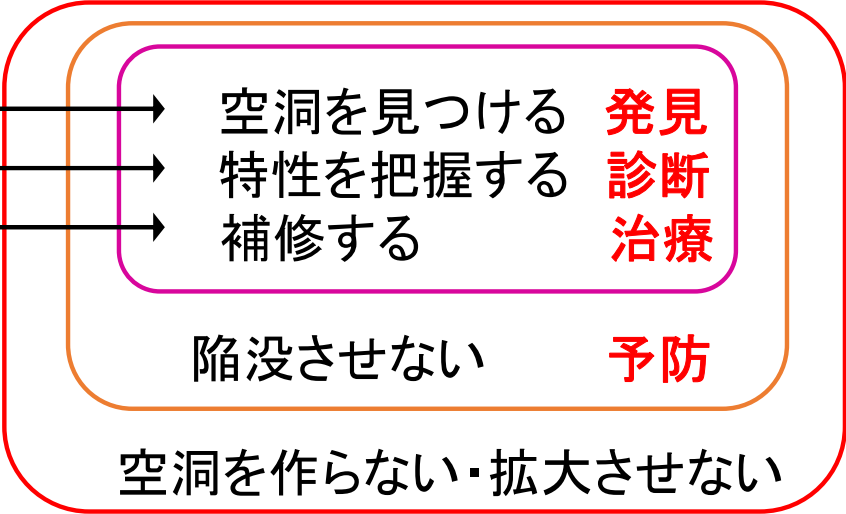
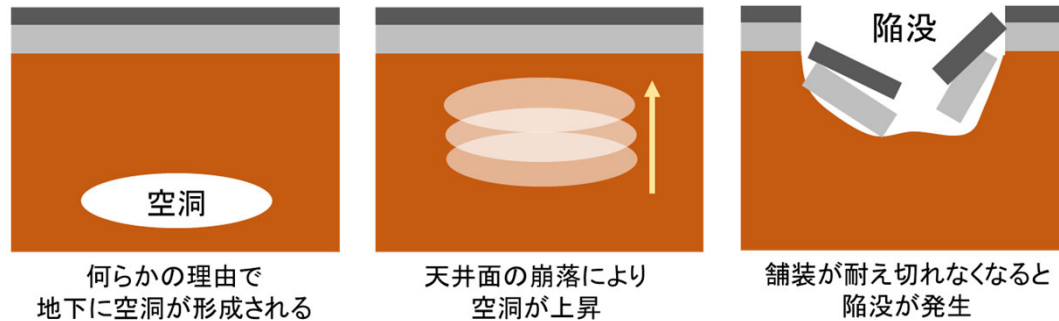
東京大学生産技術研究所
埼玉大学大学院
ジオ・サーチ（株）
（株）NIPPO
住友大阪セメント（株）

桑野玲子
桑野二郎
瀬良良子
井原務
小堺規行

目的：道路陥没予防ソリューションの開発

現状の技術的課題：

- ① 地中の状態の把握が困難
- ② 空洞の成長速度や陥没危険度が不明
- ③ 合理的な補修方法の選択肢が少ない



検討項目と具体的成果：

	検討項目	検討方法	具体的成果
発見 (調査)	空洞探査方法の高度化と精度検証 空洞生成・拡大に寄与する環境要因の分析	既存の路面下空洞データの分析 現道の空洞モニタリング 室内試験・数値解析 実物大試験道路における空洞載荷試験	空洞探査技術の適用範囲と精度検証 空洞体積・測定方法の開発 空洞ポテンシャルマップの開発
診断	空洞拡大メカニズムの解明 空洞の陥没危険度評価		陥没危険度評価指標の提案
治療・予防 (補修)	空洞補修および陥没予防方法の検討		空洞充填材の開発 路面補強・路盤補強方法の開発

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

路面下空洞探査車による計測



三次元データ化

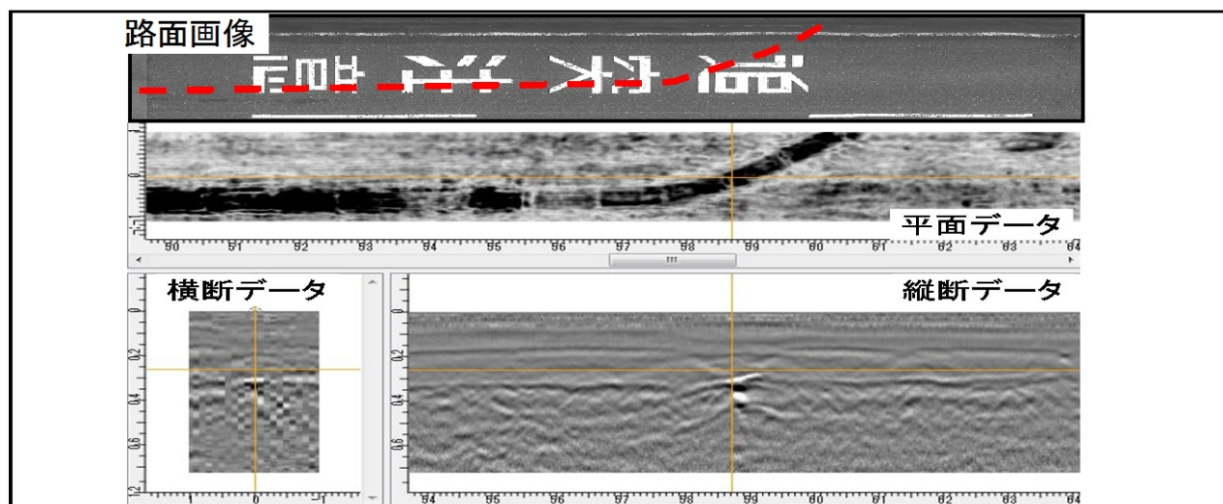
データ解析

1.5m以浅、0.5m四方以上の大きさの空洞

浅層部空洞が対象



最大100km/hで走査可能



空洞探査

二次調査(手押型地中レーダ調査+スコープ調査)

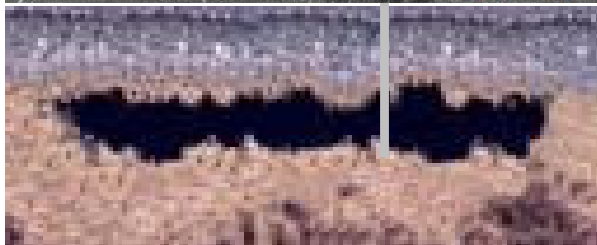
手押型地中レーダ調査

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

ドロースコブ撮影記録		
異常箇所No.1		
撮影深度0.00~0.82(m)	構成/層厚(m)	深度(m)
10	アスコン 0.22	0.22
20		
30	碎石 0.27	0.49
40		
50	空洞 0.19	0.68
60		
70	砂	
80		

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

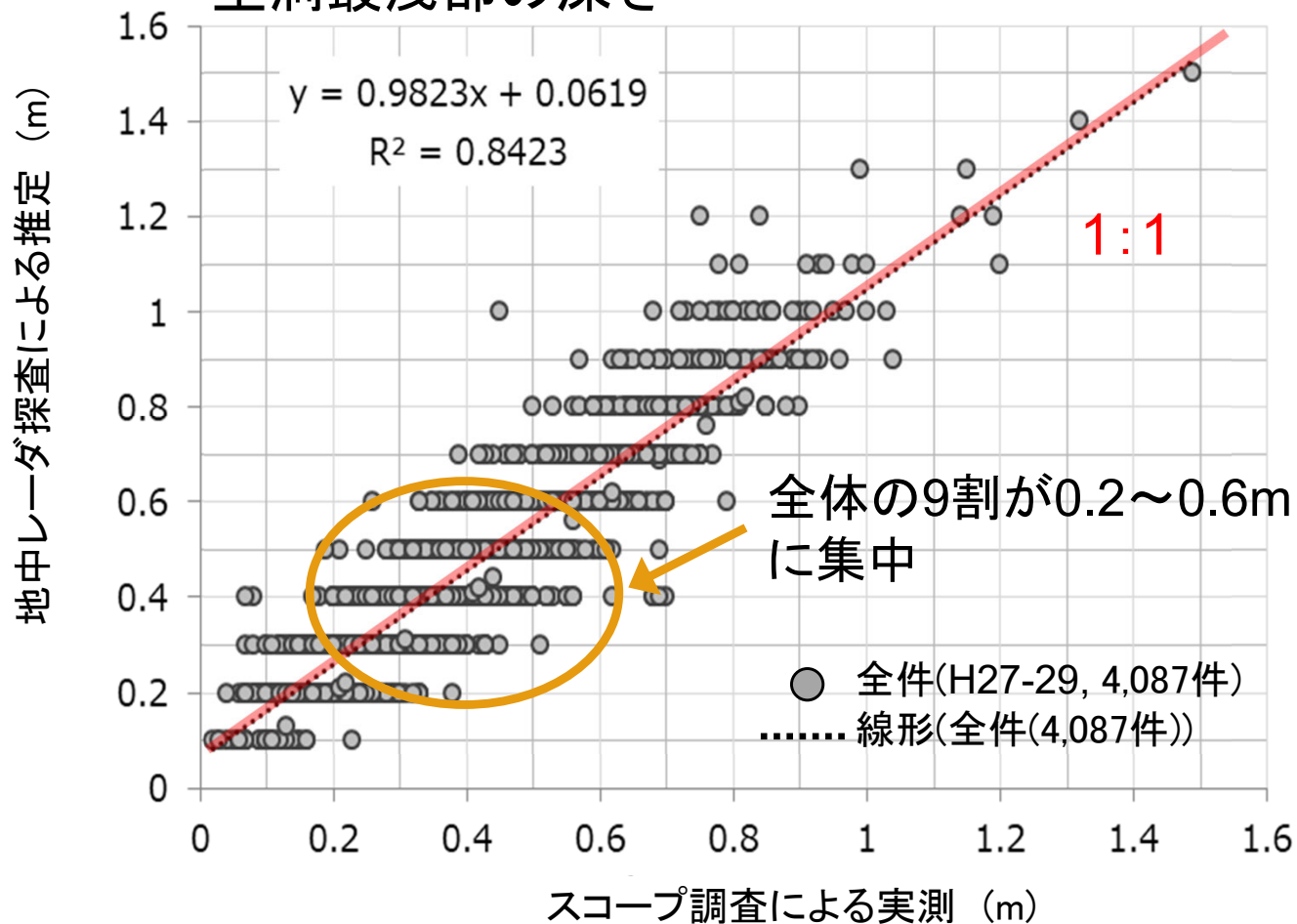
H27-29の3年間の空洞探査データのうちスコープ調査を実施し空洞の有無が明確なものについて

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

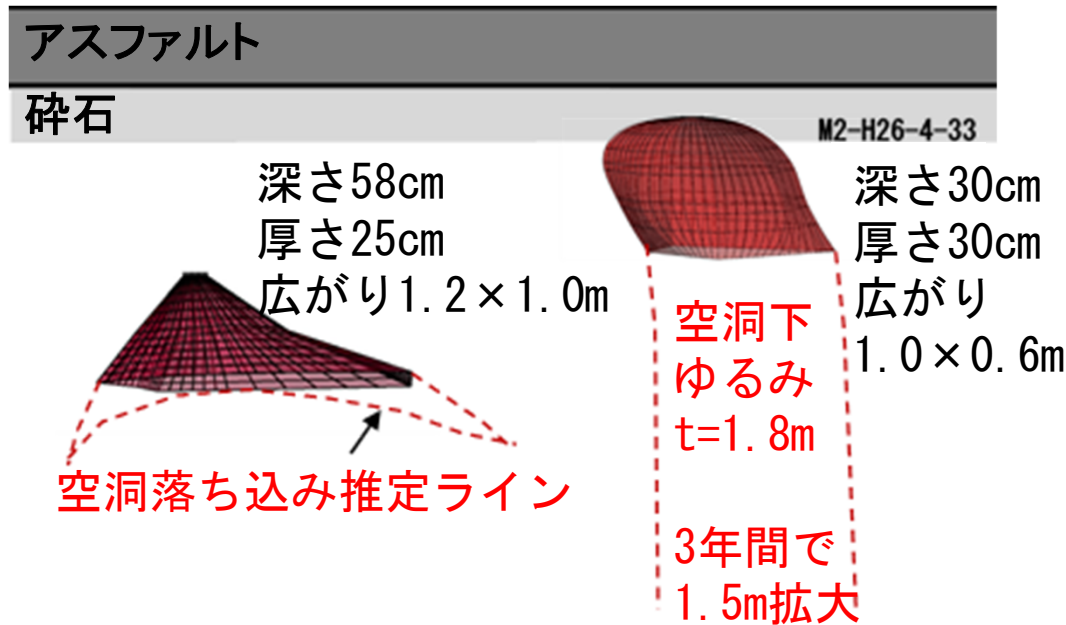
(濱也ら:2019より)

空洞の3次元計測

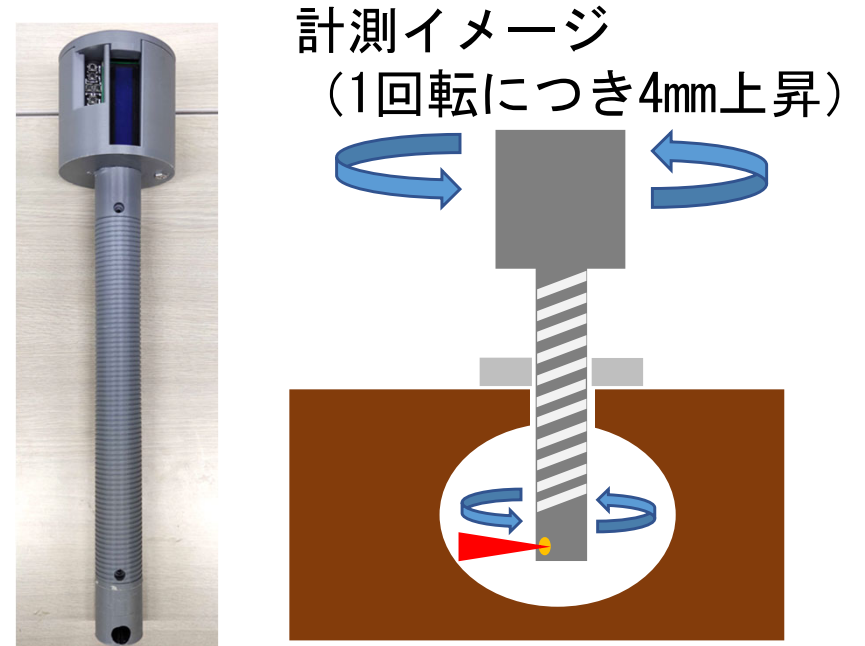
空洞形状・体積の把握

- 空洞形状から生成原因や周辺状況を推定
- 充填補修の際の充填材必要量の把握

福岡市の現道モニタリングにおける計測例



路面下空洞観測孔に挿入可能な点群観測装置の開発



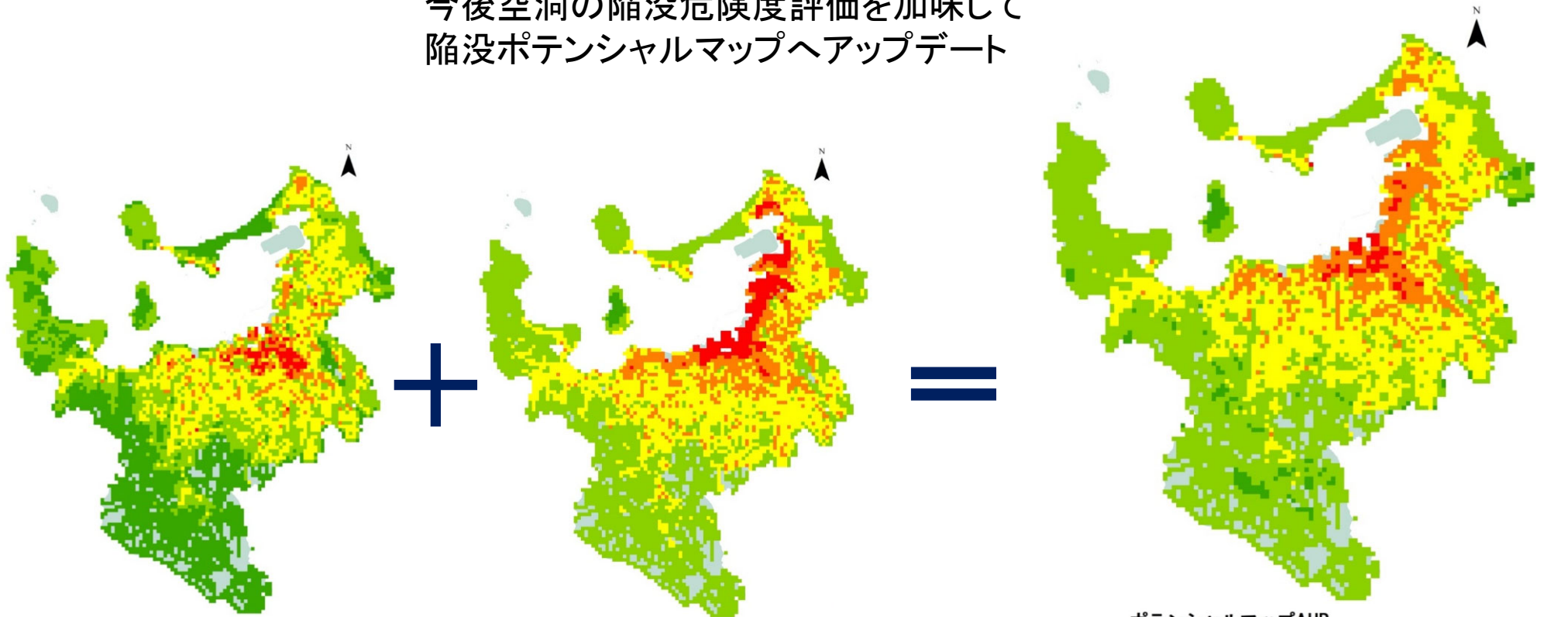
実物大試験道路に設置した空洞で実測した内空3次元形状



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

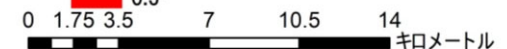
ポテンシャルマップAHP

Grade_1



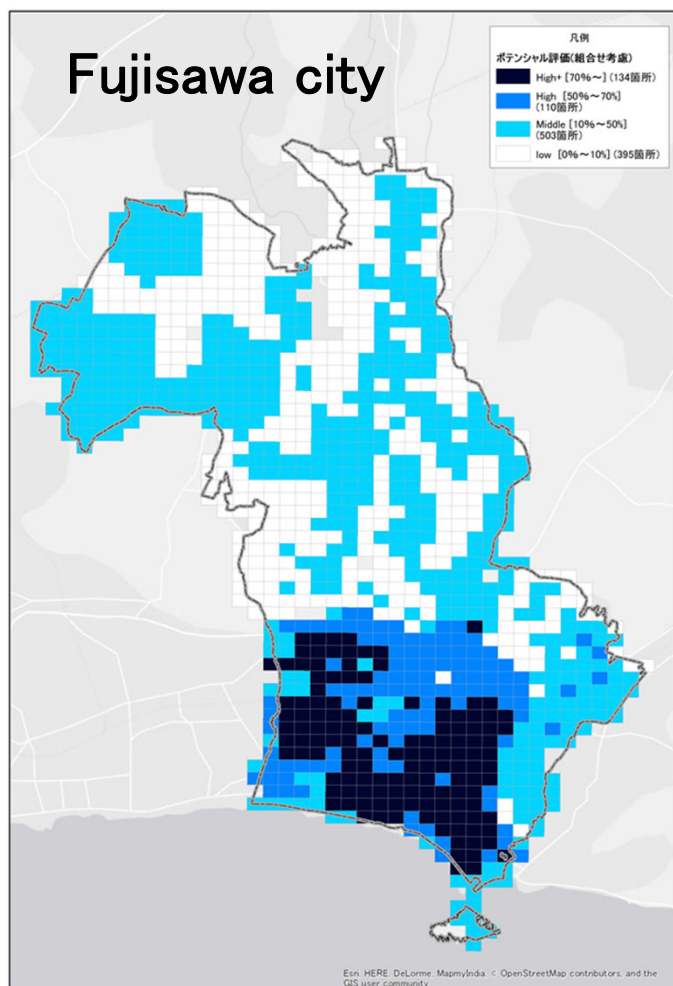
単位：

空洞頻度(個/km)



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



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

藤沢市では本マップに基づいた計画による調査を開始
 調査結果に基づいてマップのアップデート

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。

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

土砂流出による空洞生成・拡大・陥没過程

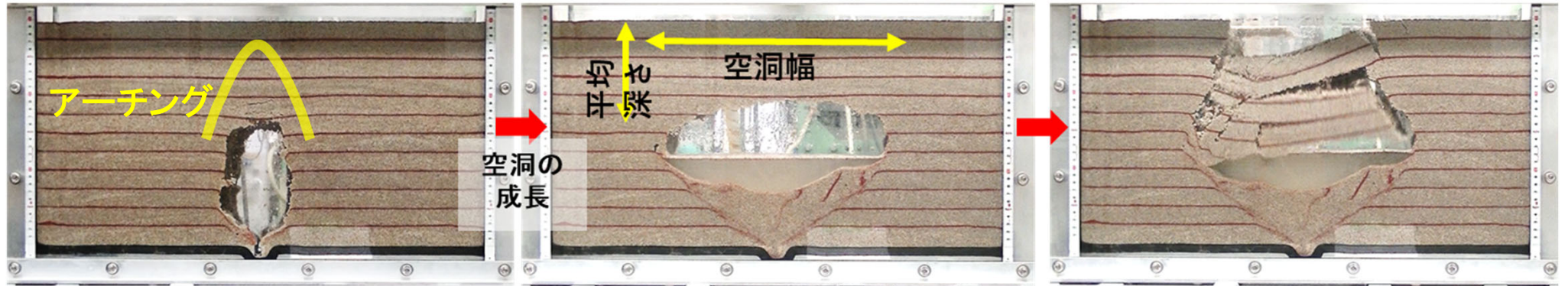
模型実験 (土槽底部の開口部より給排水繰返し)

初期水位
→



初期空洞 → 空洞の拡大・進展 → 地表面の崩壊・陥没

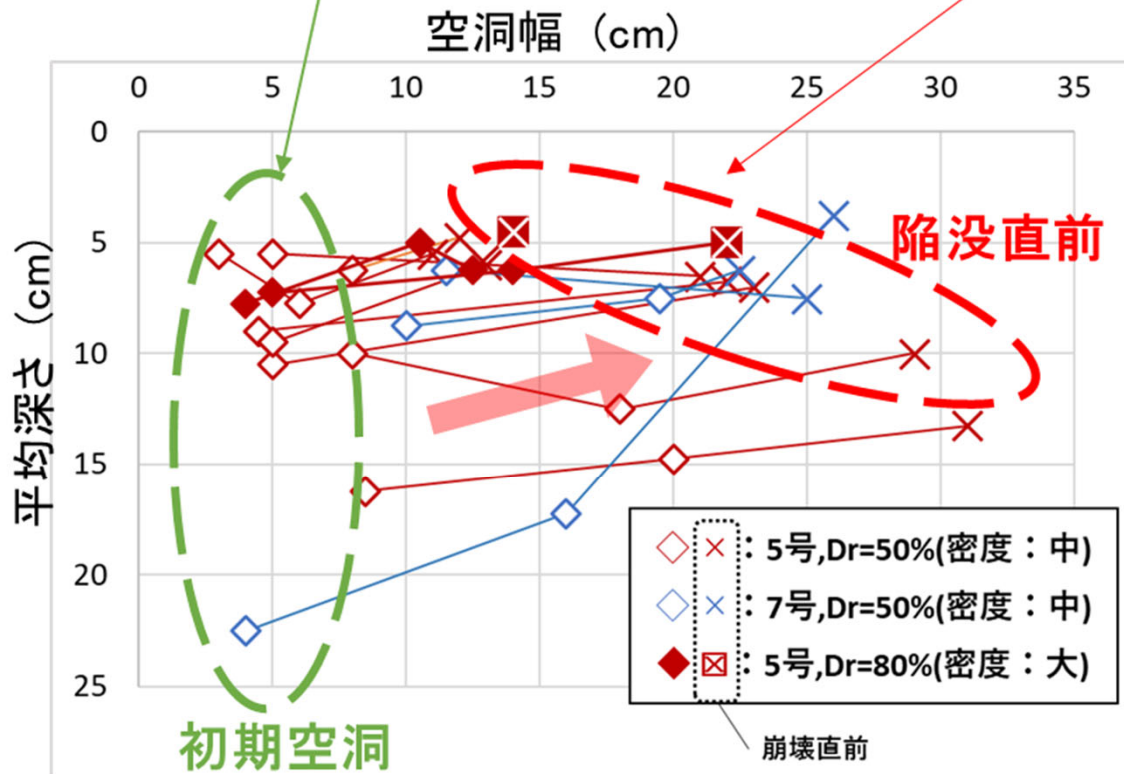
空洞拡大メカニズムと陥没危険度



初期空洞

陥没直前

陥没開始

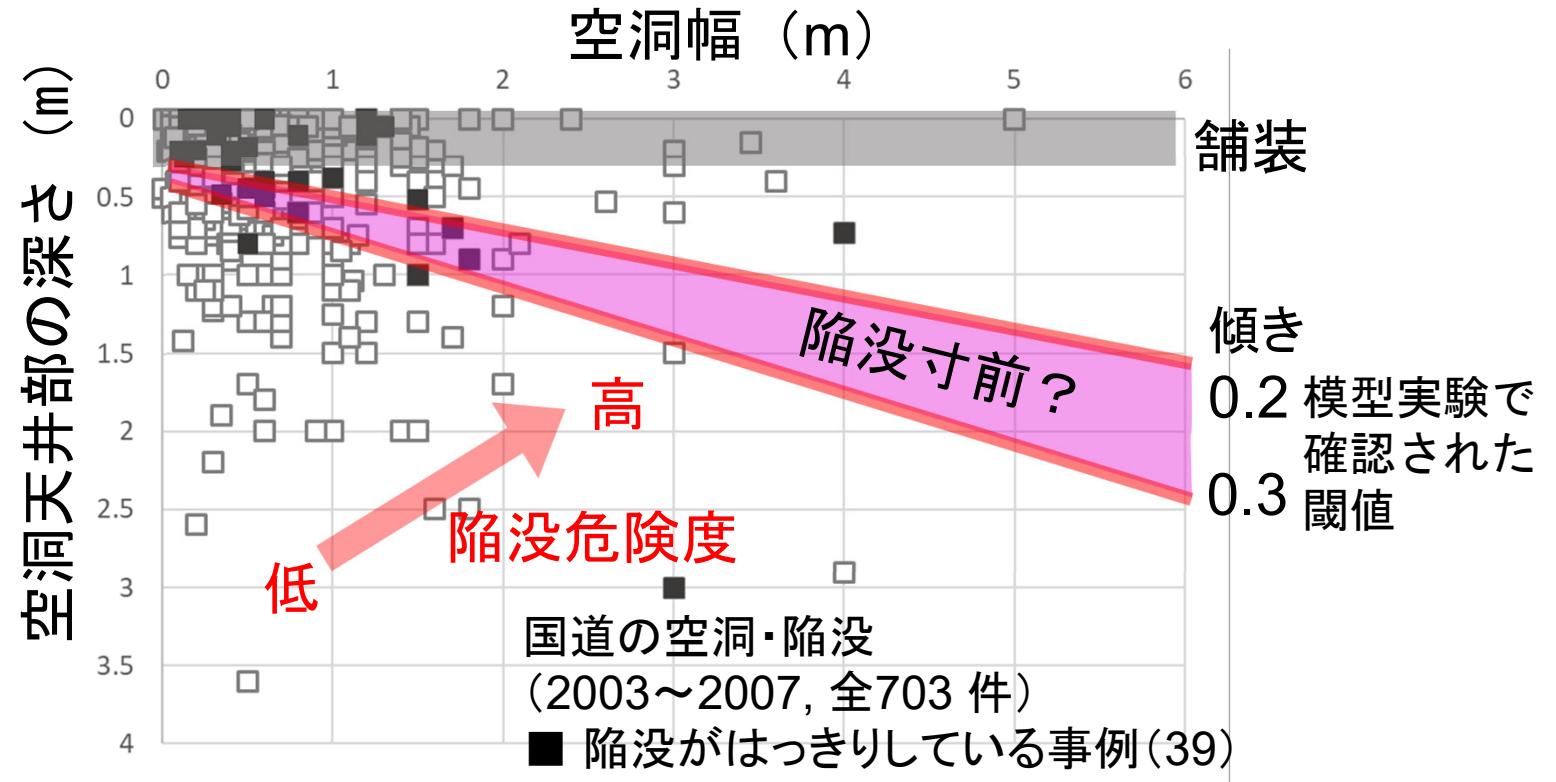


空洞は、土砂流出が継続する場合、地下水位以下で水平方向に広がり成長する

地盤の支持力喪失に関する限界状態は、空洞幅と空洞天端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と成長速度

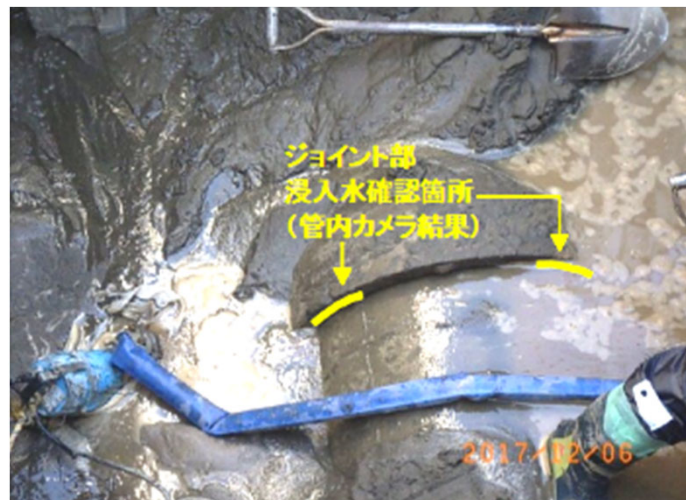
国道の
空洞・陥没事例



現道モニタリングにて
空洞生成・成長の事例取得

急激に成長した空洞を確認, 開削調査を実施

下水管内からのカメラ調査では確認できないような軽微な損傷が空洞の原因となりうる事が判明

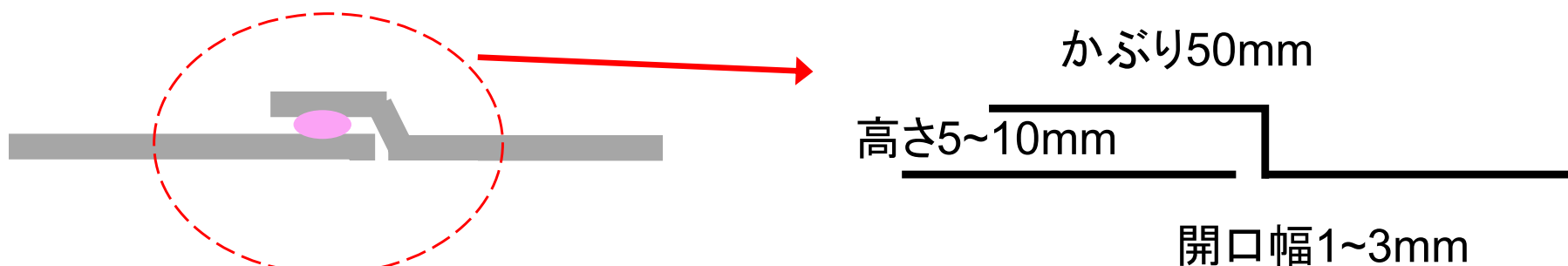


空洞の開削調査
合流管
(Φ800, GL-1.64m)

下水管への漏水による空洞形成

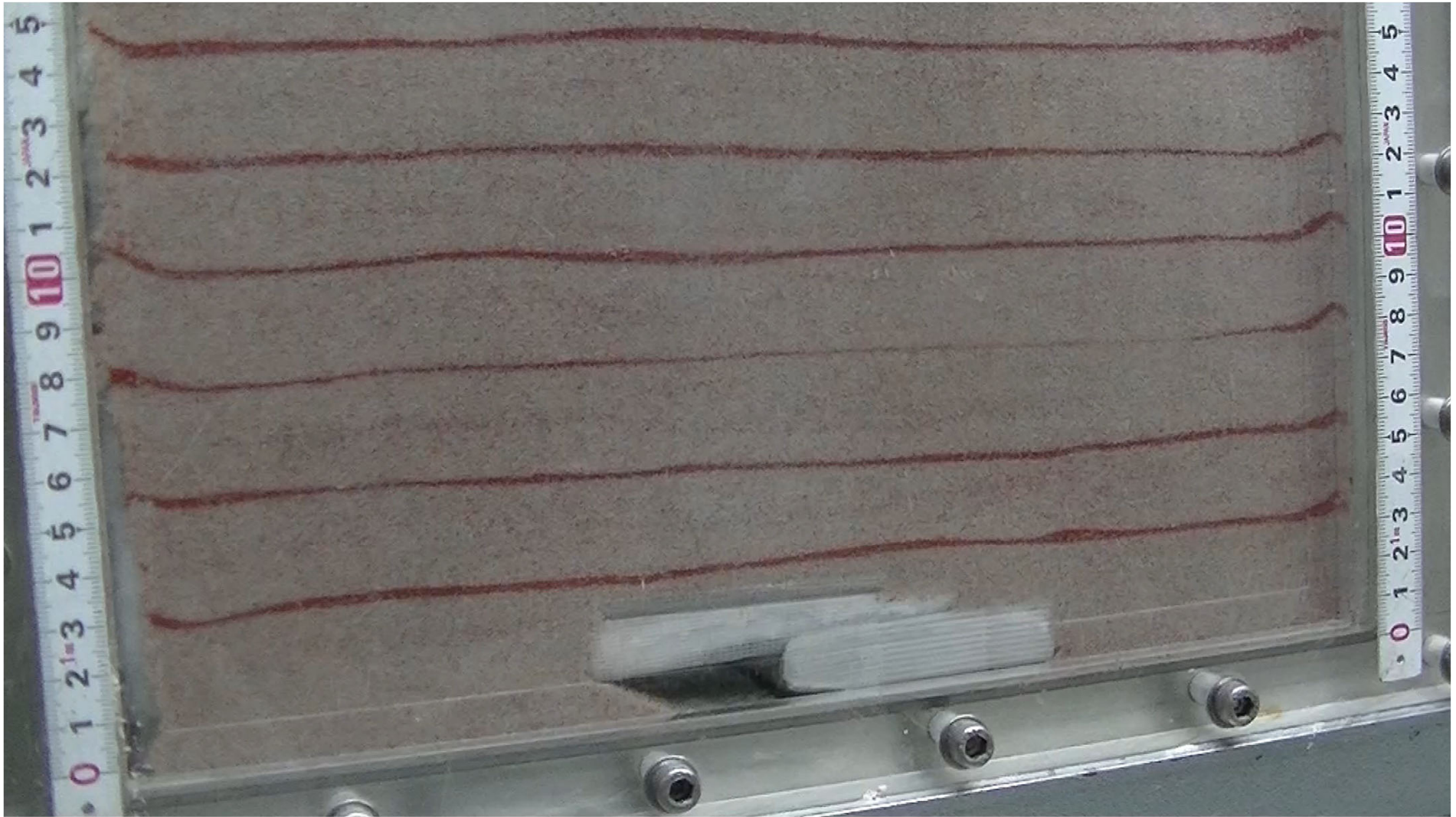
下水管内から明確な破損が確認されない場合でも空洞形成の可能性あり

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？

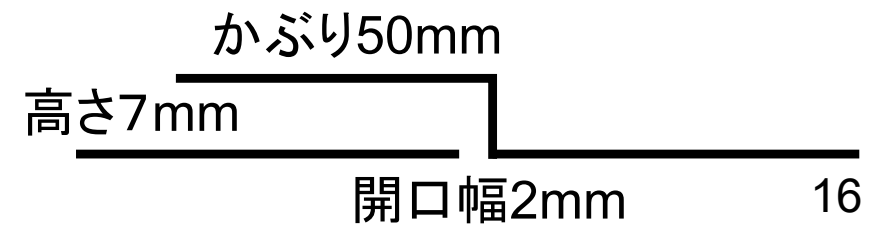


継手様の開口部を設けて
土砂流出模型実験を実施

下水管への漏水による空洞形成



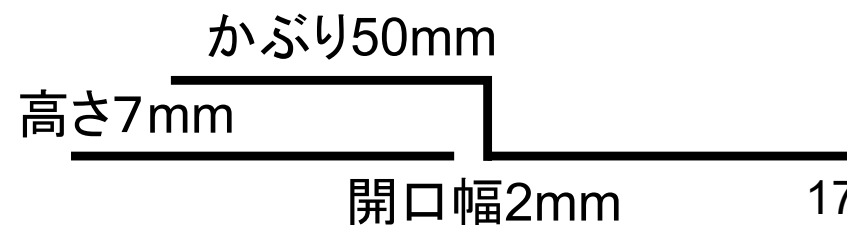
7倍速



下水管への漏水による空洞形成

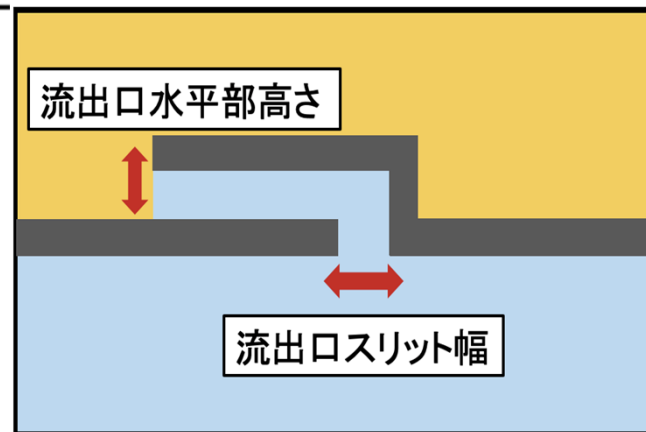
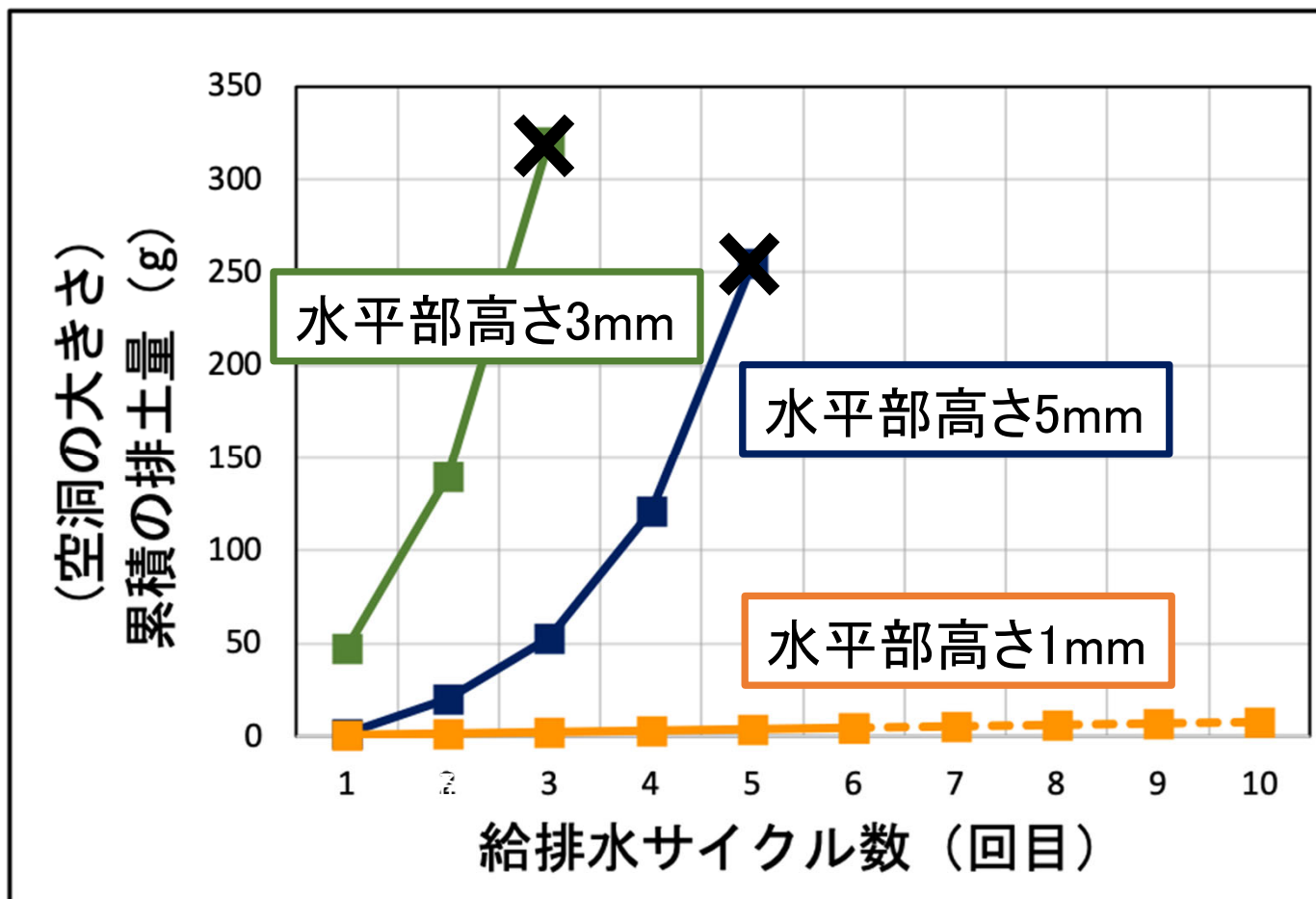


継手のかぶり部が水で満たされて、砂粒を水平に運ぶのに十分な流速があれば流出する



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



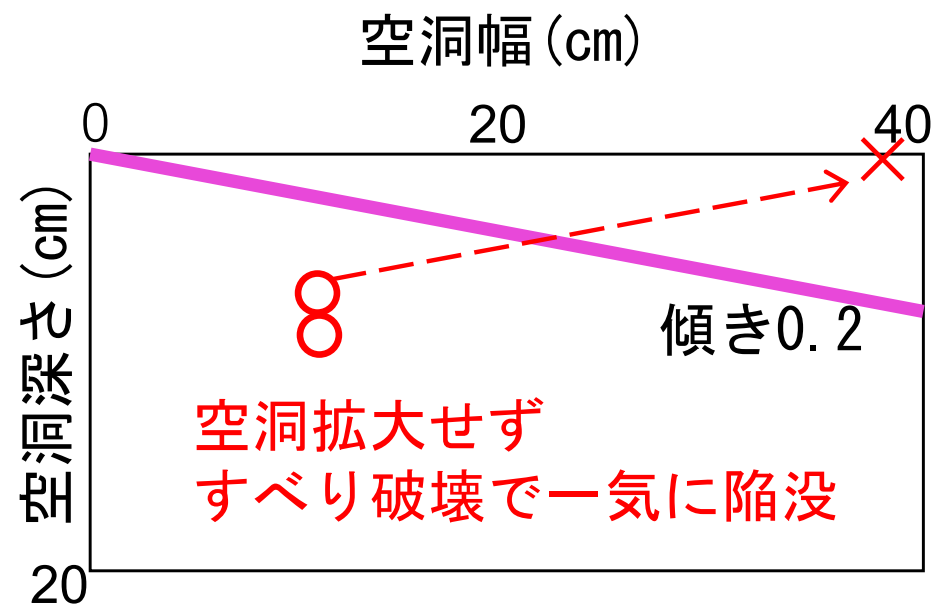
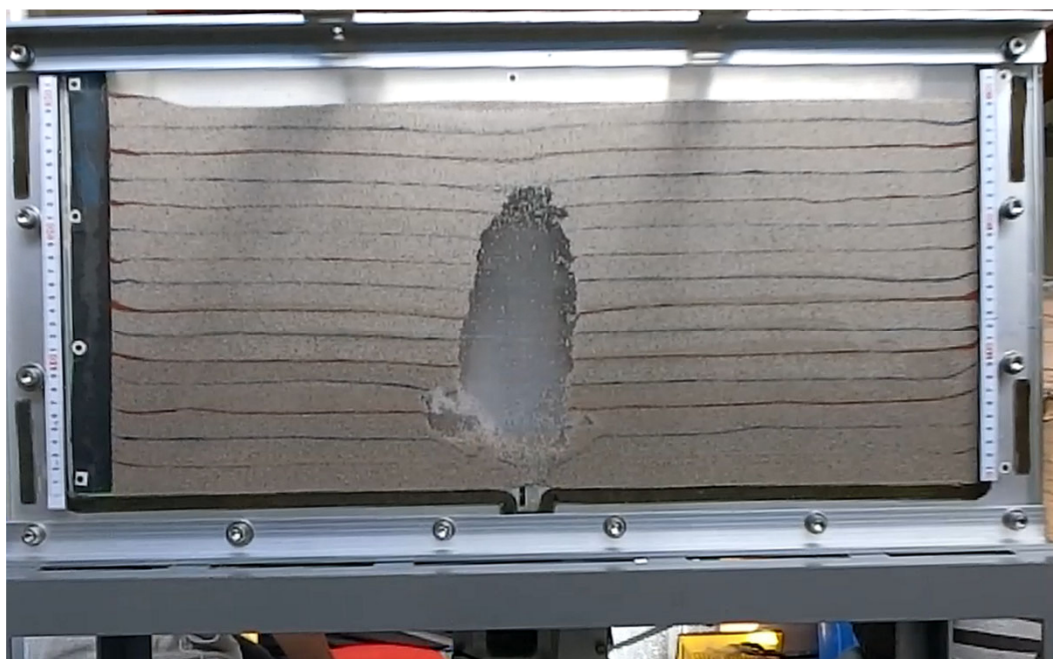
3mmほどの軽微な止水不良箇所でも空洞の生成・成長は生じる

×: 陥没発生

- ・ 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

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

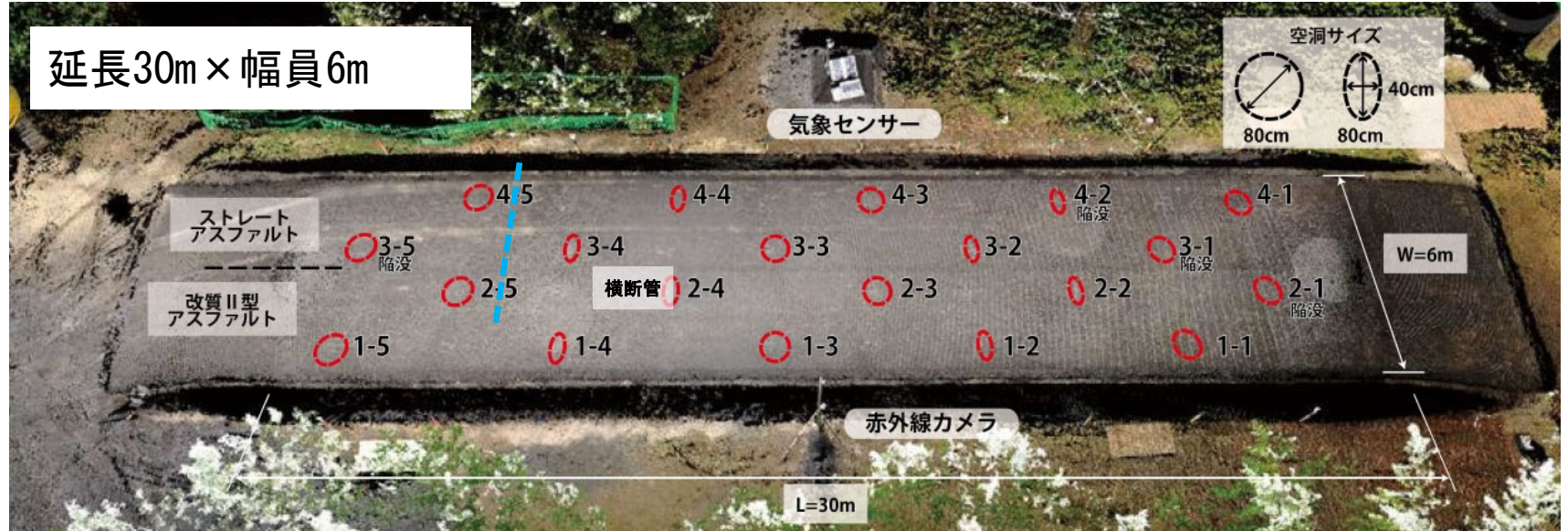


地震時に危険度ランクが高い空洞が増加する調査結果に整合

実物大試験道路の構築

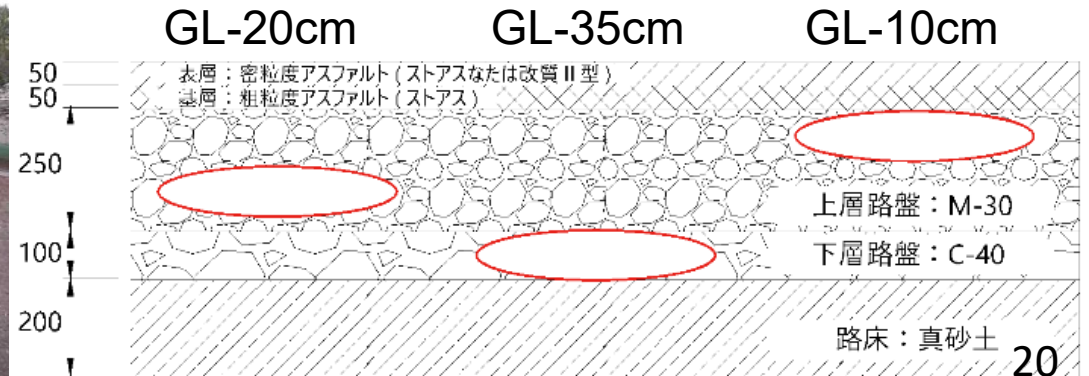
試験道路の概要

- 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
φ80 × h10cm および 80 × 40 × h10cm の空洞を天井深さ10~35cm に1~3期で計51個設置

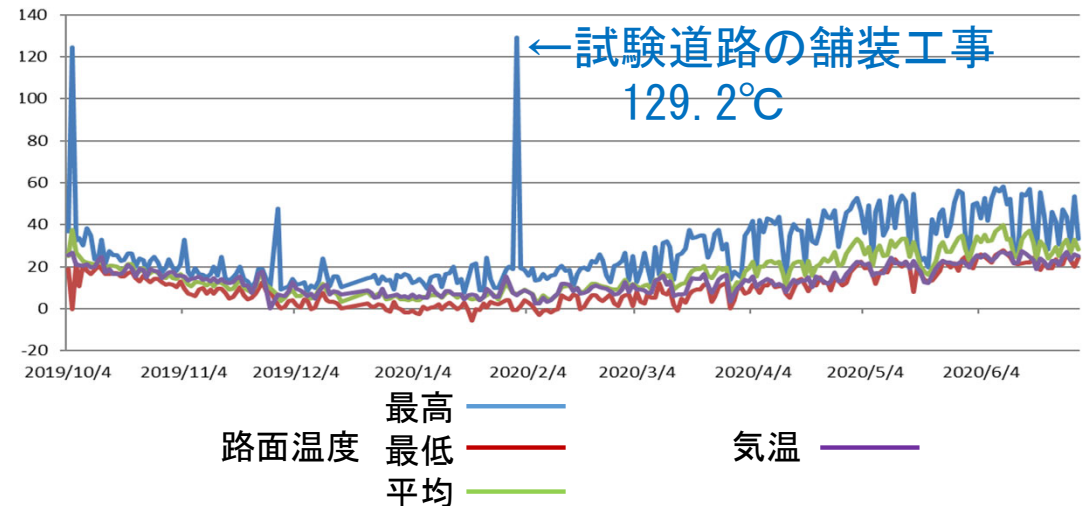


実物大試験道路

実物大試験道路の点群
+空洞三次元合成画像



気温と路面温度 (2019年10月～2020年7月)



2019年10月～2020年7月

路面観察と路面温度

2020/07/19 13:40

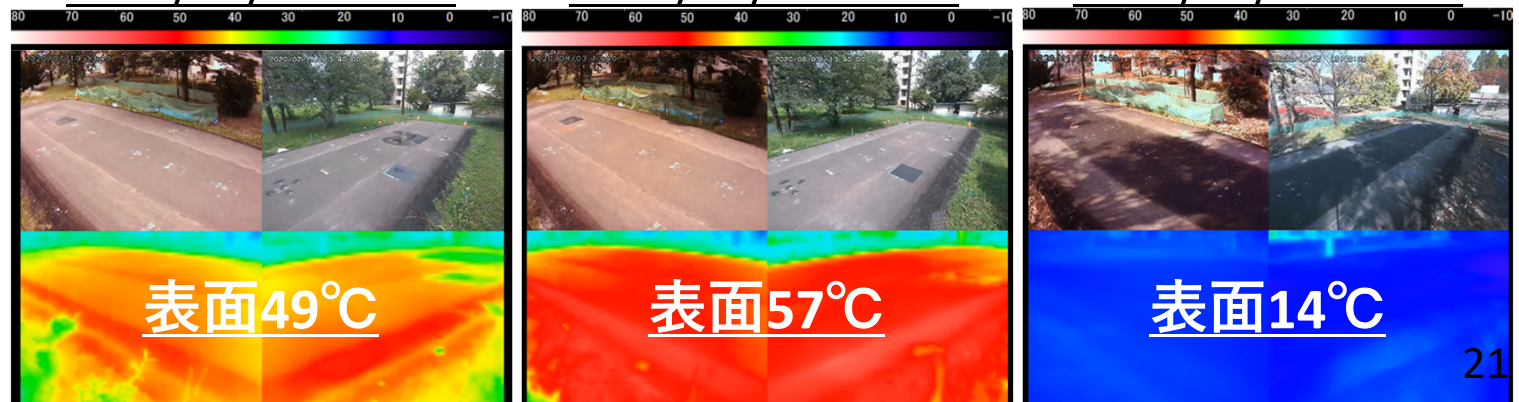
2020/08/03 13:40

2020/11/15 13:40

路面温度の記録
(2019/10/2-2020/12/1)

最高 62.0°C

最低 -5.9°C



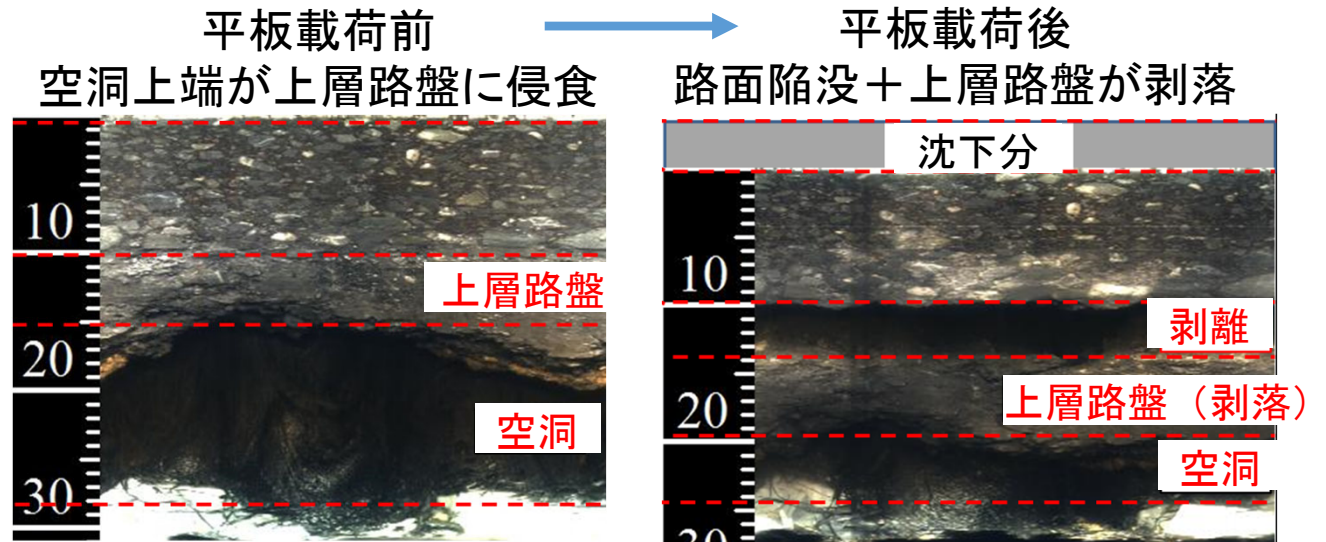
実物大試験道路における空洞載荷試験

空洞観察・載荷試験

- ・内空観察, 3D計測
- ・FWD試験
- ・小型FWD試験
- ・平板載荷試験

充填空洞, 舗装補強後の試験も実施

載荷試験前後の内空観察例



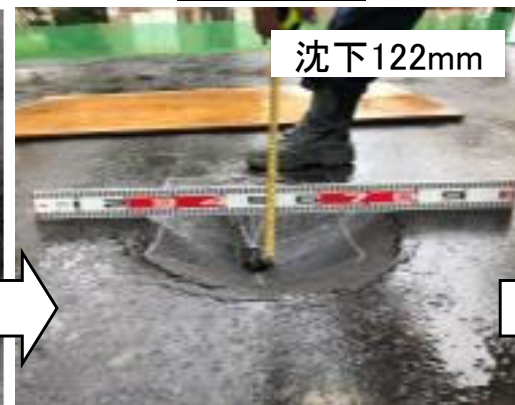
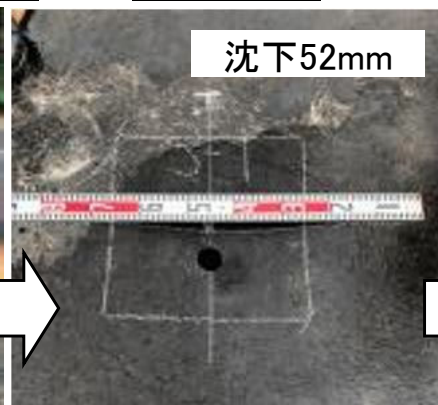
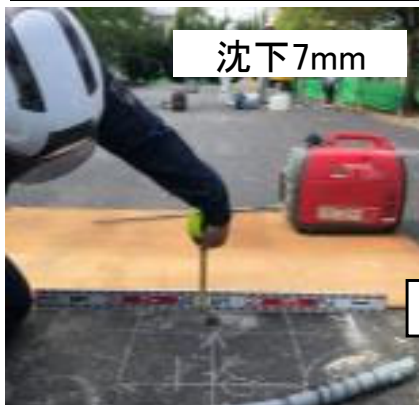
自然陥没 [ストAs ・ As直下 (Dp10cm) ・ ϕ 80cm ・ 舗装温度約40°C]

空洞作製から1時間後

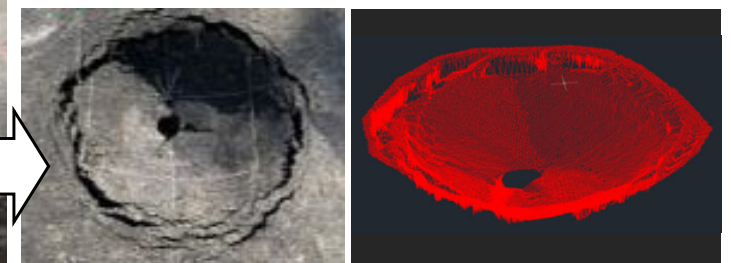
23時間後

27時間後

46時間後



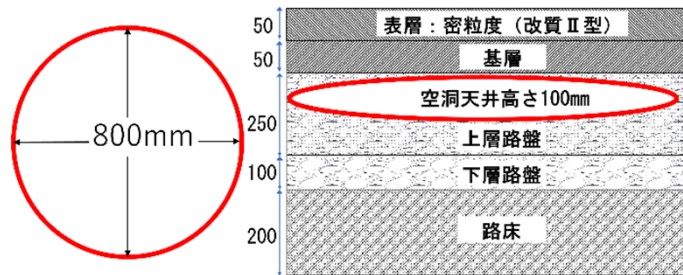
空洞形状で陥没 表層・基層が分離
陥没孔の大きさ: 55×51×深さ12cm



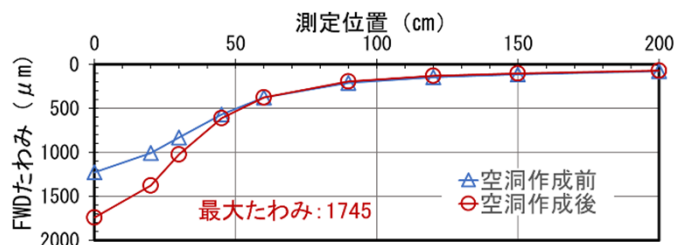
実物大試験道路における空洞載荷試験

FWDたわみ量と平板載荷試験沈下量は
空洞が深いほど変状が小さい

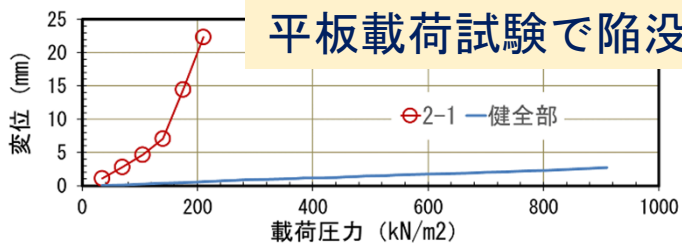
深さ10cm (As直下)



模擬空洞の形状・深さと舗装構成断面



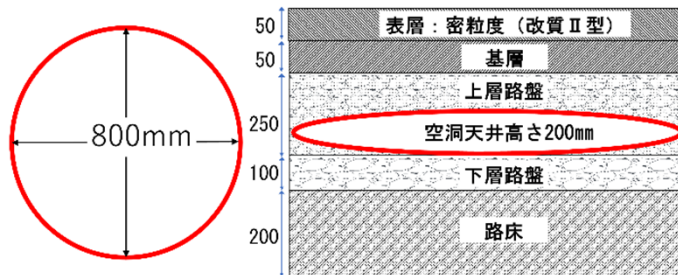
FWDたわみ



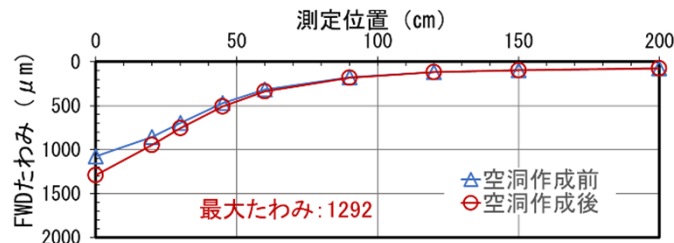
平板載荷試験で陥没

平板載荷試験の荷重-変位関係

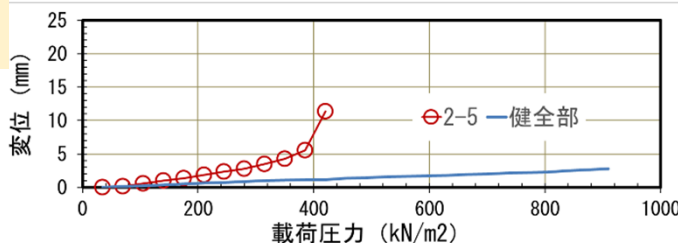
深さ20cm (路盤内)



模擬空洞の形状・深さと舗装構成断面

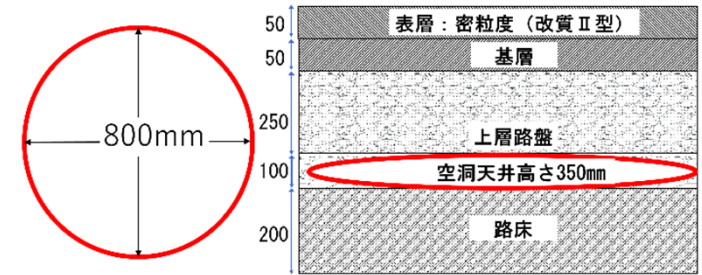


FWDたわみ

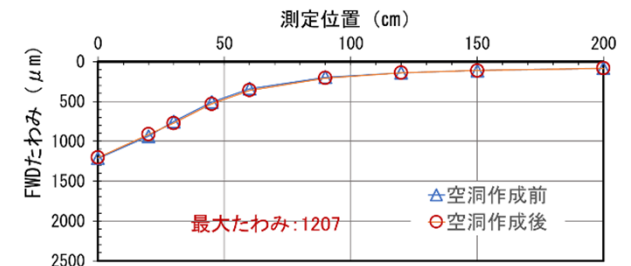


平板載荷試験の荷重-変位関係

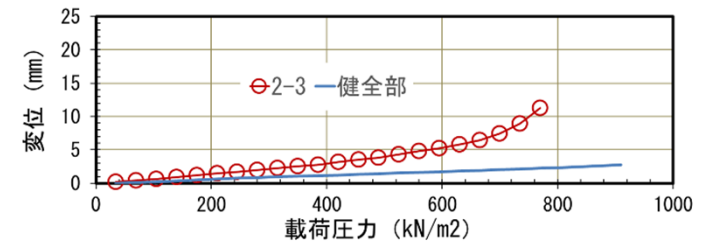
深さ35cm (路盤下)



模擬空洞の形状・深さと舗装構成断面



FWDたわみ



平板載荷試験の荷重-変位関係

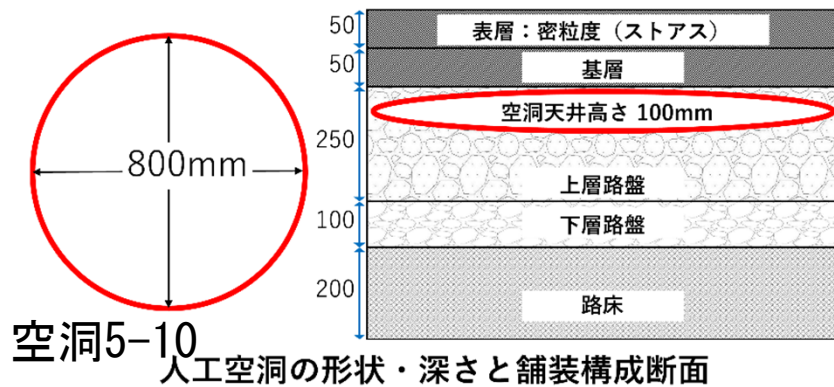
実物大試験道路における空洞載荷試験

夏季（日射・路面温度）の影響

最大たわみ量 = 2000 μm 超 ~ 陥没までの余寿命（時間）

夏場は日単位・他は月単位

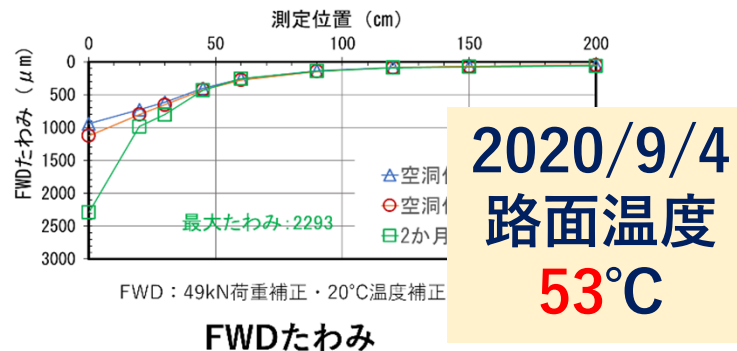
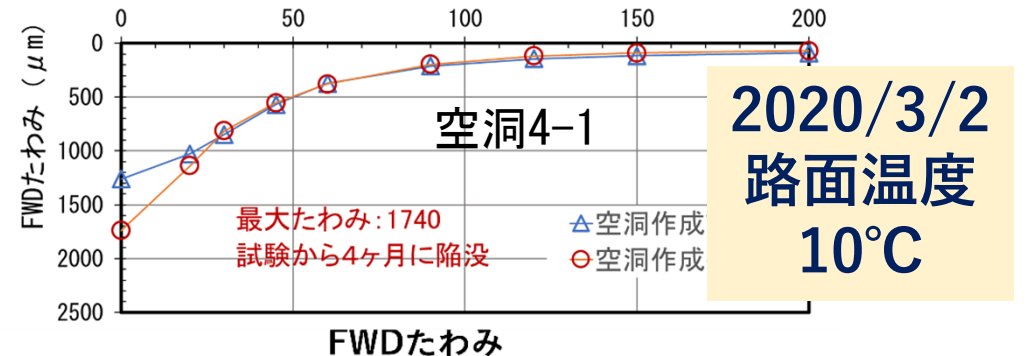
深さ10cm空洞 FWD後3日で陥没



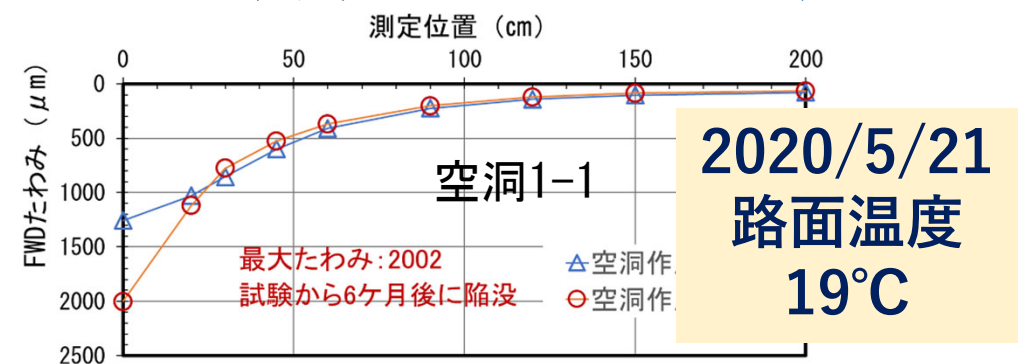
空洞5-10

同じ諸元の空洞

空洞4-1（ストアス）FWD後4ヶ月で陥没

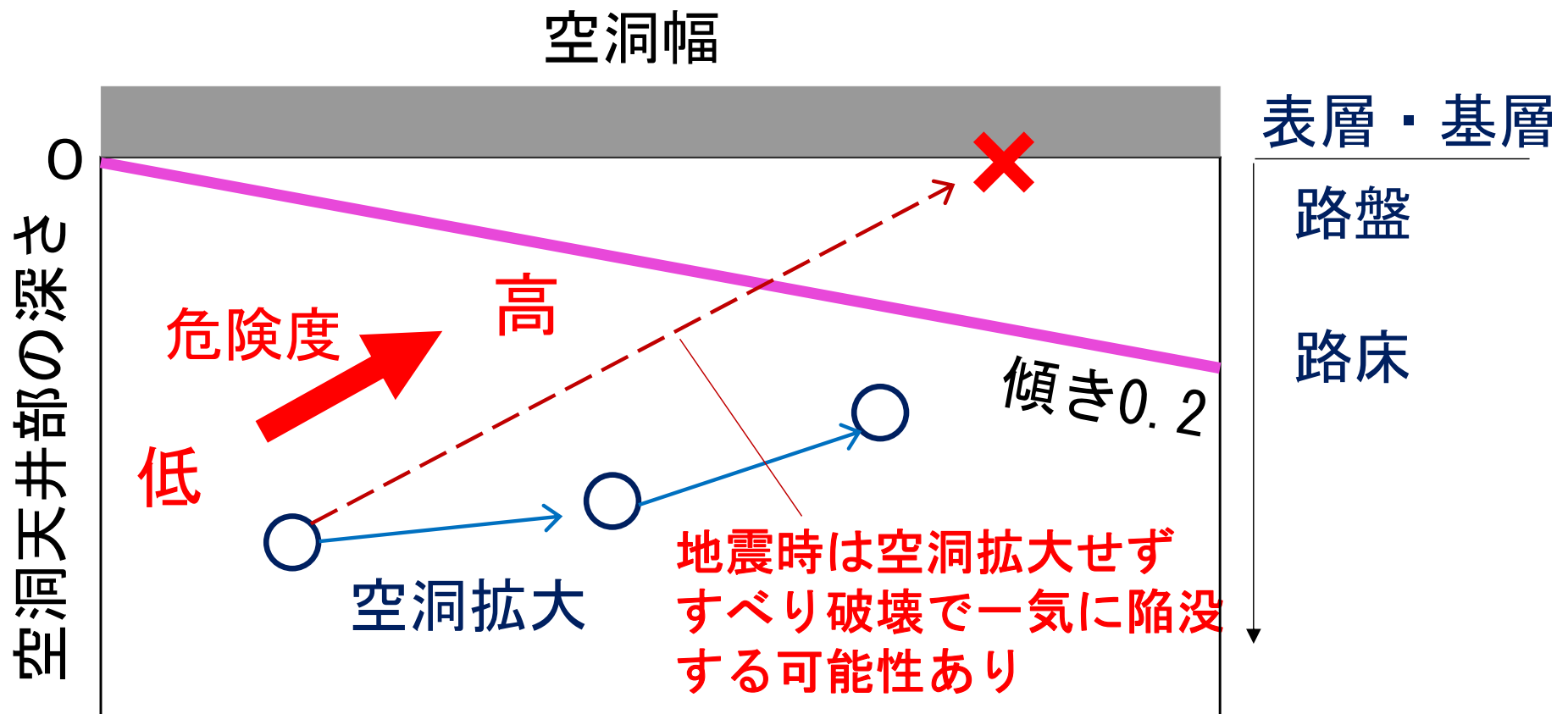


空洞1-1（改質II型）FWD後6ヶ月で陥没



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



空洞充填材の開発

- 既存の充填材の課題を整理し，要求性能や開発目標を設定
- 充填材の土中への浸透の確認実験
- モニタリング路線内の空洞充填の試行

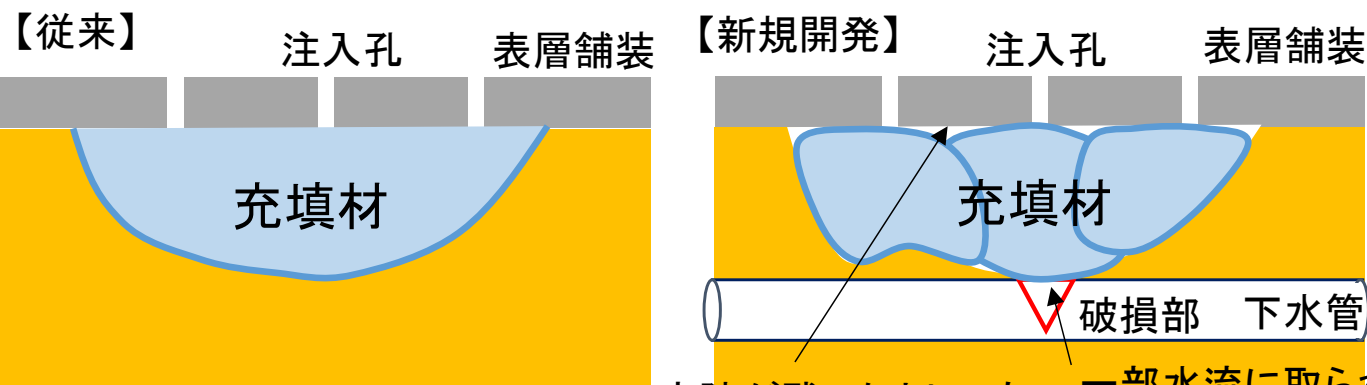


破損した下水管に漏出した事象あり

近傍に破損した下水管があっても漏出しないよう開発目標を修正

目標物性：

- ①可塑性
- ②水中不分離性
- ③分離抵抗性
- ④単位容積質量
(軽量，1.0以下)
- ⑤一軸圧縮強さ
(再掘削性を考慮)
- ⑥速硬性



空隙が残ったとしても
陥没危険度は大幅低下

一部水流に取られても
上部の充填材は損傷されず荷重伝達を保持

空洞補修用可塑性充填材を開発

水の添加率によって充填材の流動性を調整でき，周囲に破損した下水管がある場合は低流動性，無い場合は高流動性の使用が可能
再掘削性を考慮して強度を必要十分な範囲に設定

舗装の補強方法の開発

路盤補強

空洞上に地盤（路盤）が残リアーチ効果が期待できると陥没は起こりにくい。路盤内に補強材を敷設し路盤の崩落を防止。

ジオテキスタイルによる補強（路盤の崩落防止）

空洞



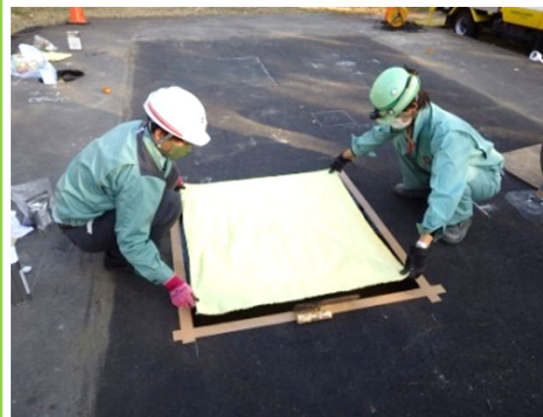
実物大試験道路における補強材（ジオテキスタイル）の敷設

路面補強

空洞を認知してもすぐに補修できない場合のために、路面に応急対策として補強材を貼り付け、強化膜を作ることにより陥没を抑制。

強化膜（応急対応）

空洞



施工状況
（アラミド繊維シート）



路面補強の外観

道路陥没予防ソリューション

調査計画：

空洞ポテンシャルマップに基づく計画

- ・素因と誘因の評価

空洞探査：

- ・1次調査（車載型地中レーダによる空洞信号の抽出）

- ・2次調査（地中レーダ，削孔による空洞確認 →状況に応じて同時補修

補修：（空洞特性や危険度に応じて）

- ・開削埋戻し
- ・充填
- ・経過観察

陥没抑止：

空洞補修までの応急対策：路面補強
空洞拡大抑止による路盤保全：路盤補強

診断：

空洞特性および陥没危険度評価

- ・生成要因
- ・広がり・深さ
- ・成長速度

空洞補修用可塑性充填材
下水管が近傍にある場合：流動性低
その他の場合：流動性高

空洞・陥没データの蓄積：
空洞・補修履歴の記録・分析

道路政策への提案および今後の課題

本研究の成果：道路陥没予防ソリューション

開発した要素技術：空洞形状測定装置，空洞ポテンシャルマップ，陥没危険度評価チャート，空洞補修用充填材，路面補強工法，路盤補強工法など

今後の課題および社会実装するにあたっての留意点：

- 空洞幅と空洞深さで評価する陥没危険度チャート上で，比較的危険度が低いと判定される空洞でも，土質や地下水・降雨条件によっては成長が早い場合がある。また特に空洞厚が大きい場合は地震時に空洞内へのすべりが発生し，陥没危険度が急上昇する場合がある。空洞の成長速度の定量評価に関しては，さらに検討を要する。
- 空洞補修の選択について，基本的な考え方を示した。個々の具体的な工法は今後のアップデートを要する。
- 空洞・陥没データは蓄積し分析することで，次年度以降の空洞調査計画に生かすことができる。また，都市間，道路管理者間で陥没対策の知見や経験を共有することが，道路陥没対策の合理化につながる。今後，道路管理者やインフラ施設管理者の連携体制の整備が望まれる。

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