



吸い出し・陥没抑止に向けた 予防保全・維持管理・復旧対策 に関する最近の知見

佐々 真志

港湾空港技術研究所 動土質研究グループ長
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所





- 吸い出し・陥没抑止対策の基準:要求性能
- 臨海部の多様な外力:地震・高潮・流れ・越流・降雨下の吸い出し・陥没抑止対策の体系化
- 空洞陥没の復旧手法
- 舓装直下地盤の空洞発達同定, 破壊過程, 維持管理に関する知見
- 老朽化施設の長寿命化対策に関する知見

吸い出し・陥没抑止技術

臨海部における地震・波・流れなどの
多様な外力下で安定的に吸い出し・陥没を
抑止する技術: 全国で普及・展開

- 二層構造のフィルター層
- 目地透過波低減法



技術基準改訂

令和4年4月1日施行

吸い出し抑制の
要求性能
「変形追随性」

フィルター材設計の国際基準に照らした裏埋砂の吸い出し抑止基準

敷設目的	外力	基準
アースダムの内部侵食防止	・ 浸透流 ・ 水頭差	<ul style="list-style-type: none">General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams $D_{F15}/D_{S85} \leq 4 \text{ to } 5, D_{F15}/D_{S15} \geq 3 \text{ to } 5$Design Standards No. 13: Embankment Dams $D_{F15}/D_{S85} \leq 4, D_{F15}/D_{S15} \geq 5$Cistin/Ziemssによる基準
沿岸構造物周辺における海底砂の洗掘と侵食の防止	・ 波 ・ 浸透流	<ul style="list-style-type: none">Coastal Engineering Manual – Part VI $U_{cF} < 10, D_{F15}/D_{S85} < 4 \text{ to } 5, D_{F15}/D_{S15} > 4 \text{ to } 5$Cistin/Ziemssによる基準
護岸・岸壁など構造物背後の土砂の吸い出し抑止	・ 潮汐 ・ 浸透 ・ 波 ・ 降雨 ・ 越波 ・ 地震	$D_{F50}/D_{S50} \leq 20$ または $D_{F15}/D_{S85} \leq 5$ (ただし, $U_{cF} \geq 3$) $U_{cS} \geq 3$ かつ $U_{cF} \geq 3$ の場合, $D_{F50}/D_{S50} \leq 25$ $U_{cF} < 3$ の場合でも $U_{cS} \geq 3$ の際, $D_{F50}/D_{S50} \leq 22$  港湾技術基準(R4施行)

U_{cF} : フィルター材の均等係数 ; U_{cS} : 裏埋砂の均等係数 ; D_{F50} : フィルター材の中央粒径 ; D_{S50} : 埋立砂の中央粒径 ;

D_{F15} : フィルター材の15%粒径 ; D_{S85} : 埋立砂の85%粒径

吸い出し・空洞形成・発達・陥没
抑止に対する
予防保全対策
及び
復旧対策

フィルター層

海岸工学論文
賞 3 度受賞

(2021, 2023, 2024)
Coastal Engineering

国際洗掘侵食会議
オープニング基調講演
Sassa (2023)

カナダ、バンクーバー 2012



2012

英国、リバプール 2017



2017

大蔵海岸、2001



2001

茨城、2017



2017

新潟、2018



2018

国内外の吸い出し・陥没事例

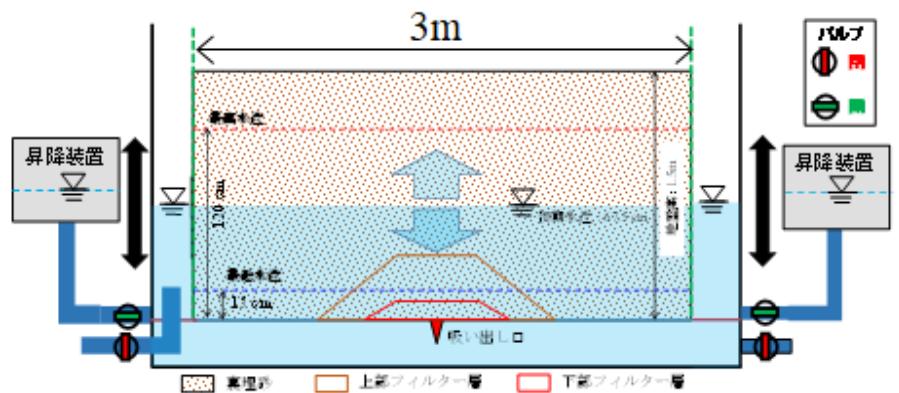
地震による大規模な吸い出し・陥没事例



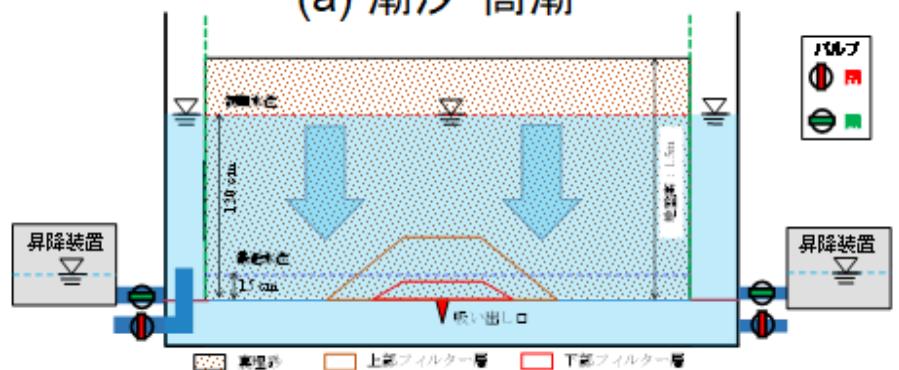
2022年福島県沖地震
モーメントマグニチュード
 M_w 7.3



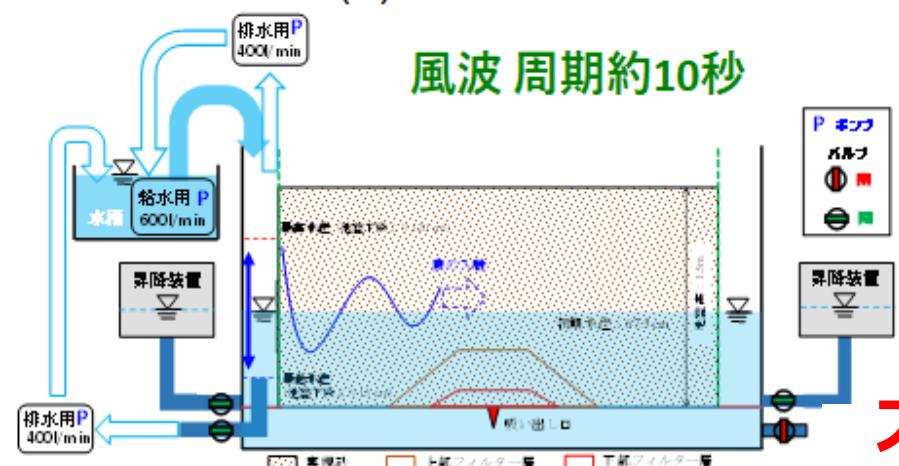
高波・高潮・流れなどの水理外力とともに、
地震動などの多様な動的外力下で大規模な
陥没が発生する



(a) 潮汐·高潮

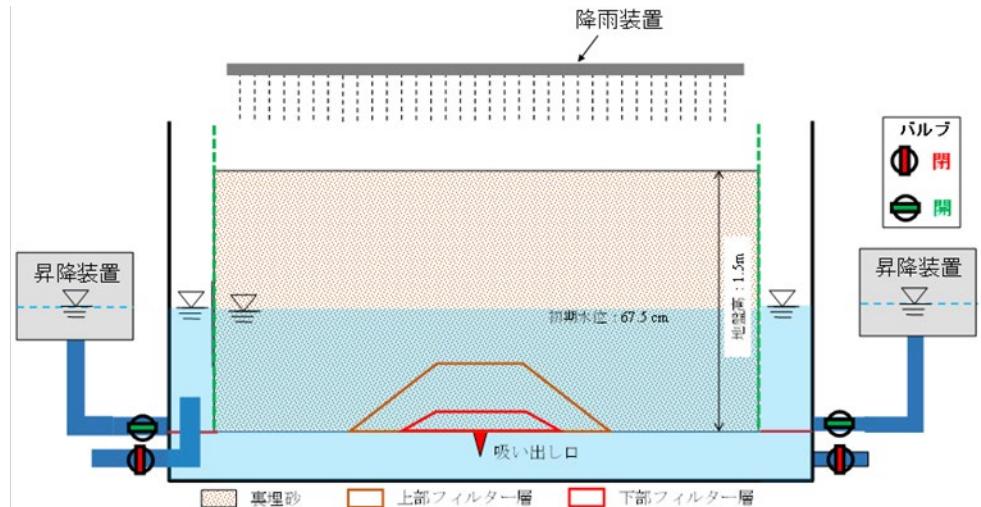


(b) 引き波

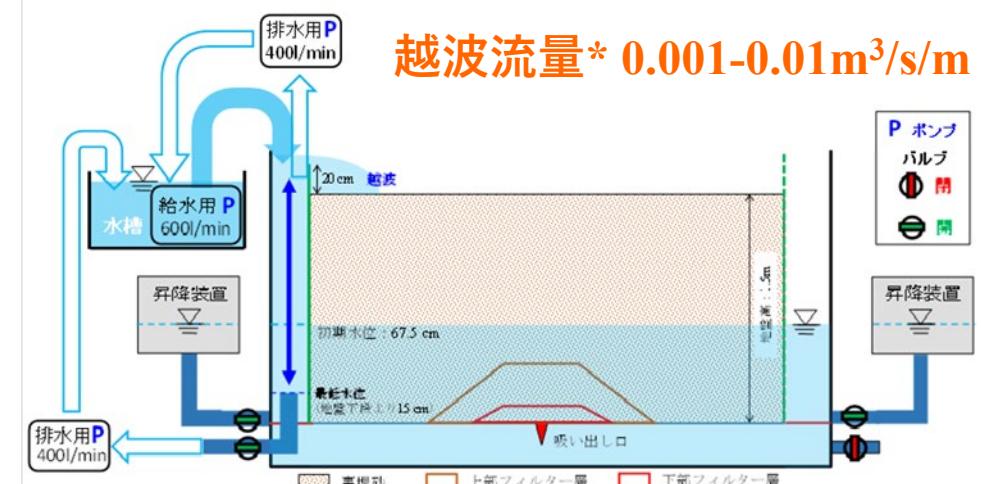


c) 風波

降雨強度 10~80mm/h



(d) 降雨

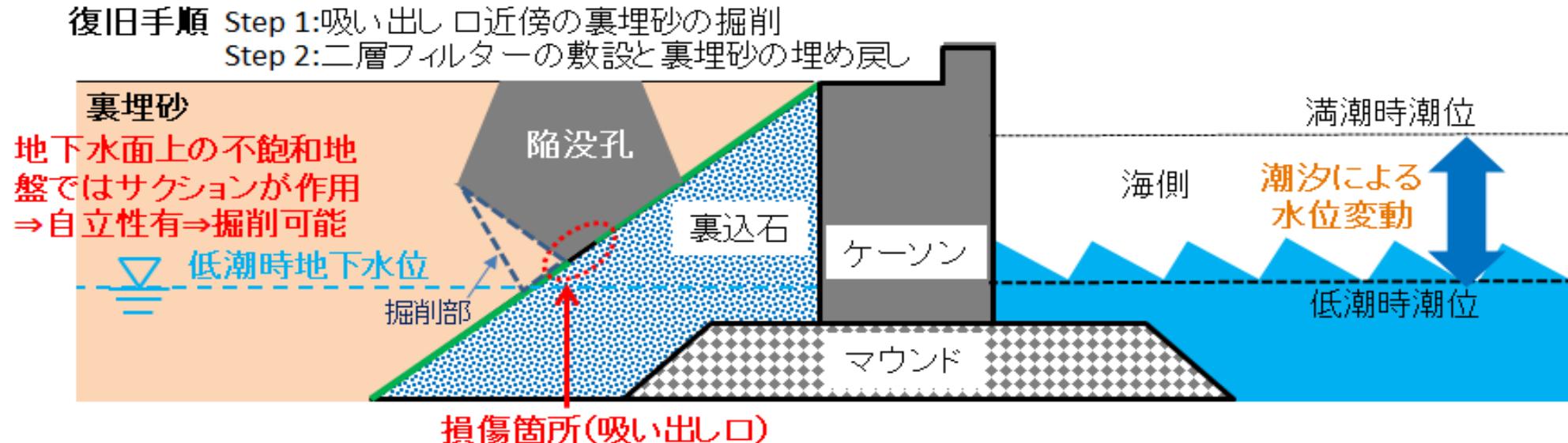


(e) 越波

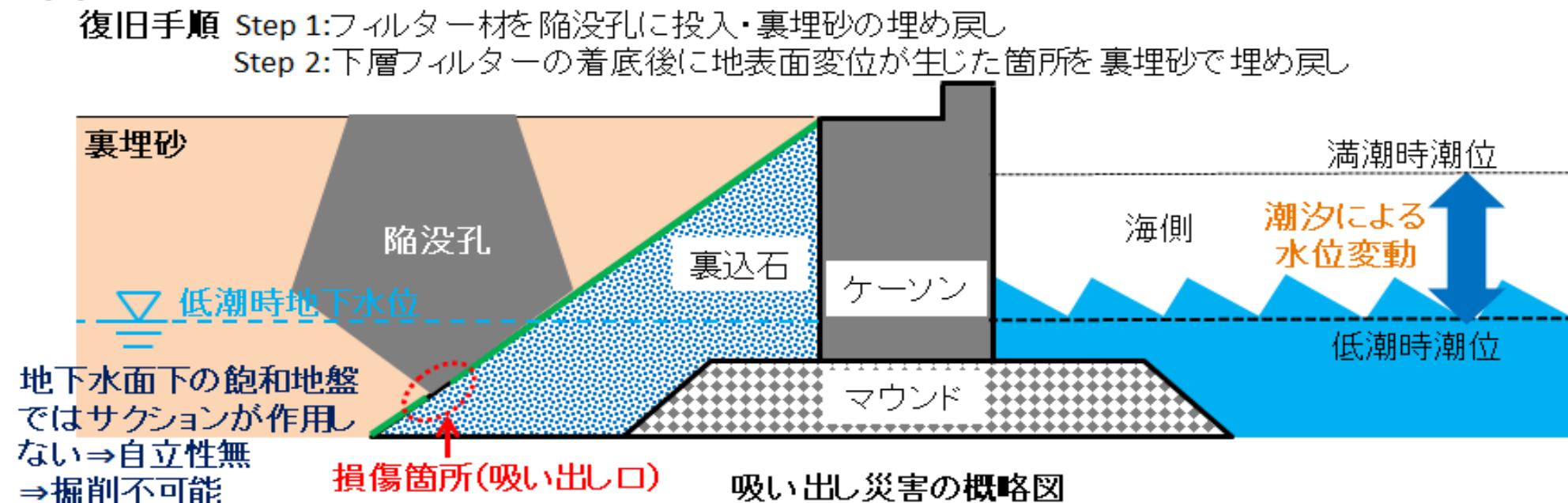
大型吸い出し可視化・抑止試験における各外力 (潮汐・高潮・風波・引き波・降雨・越波)

二層フィルターを用いた空洞陥没復旧手法の構築と適用

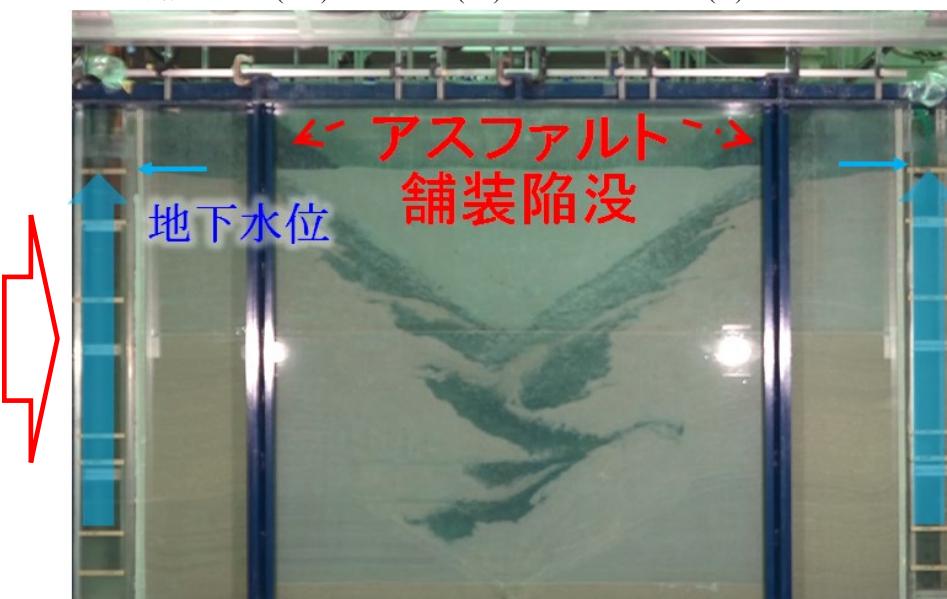
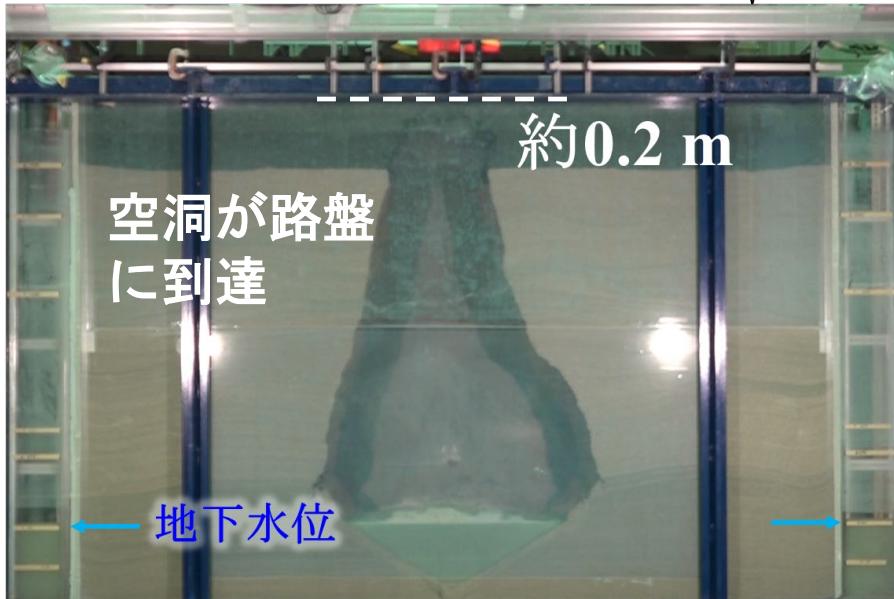
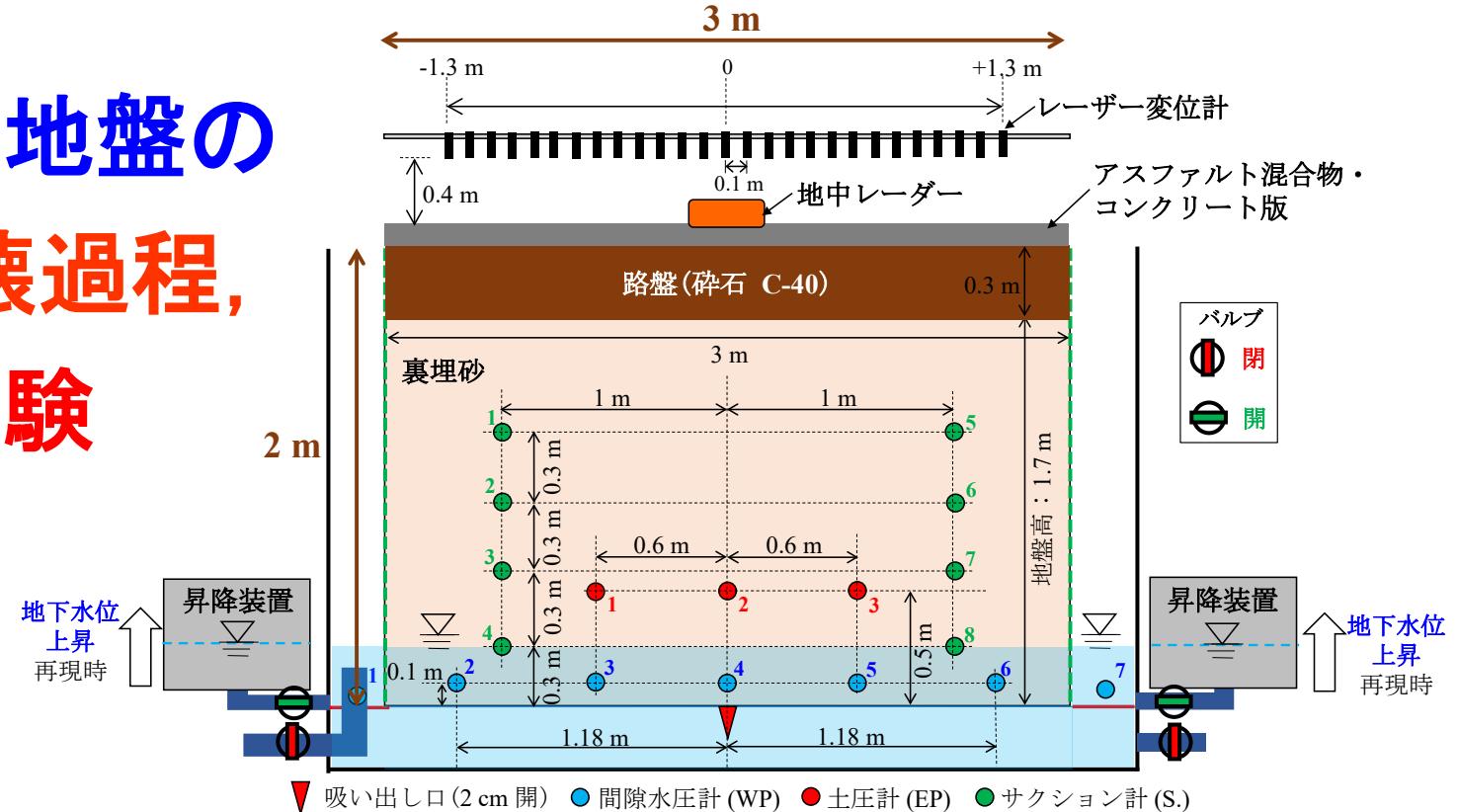
(a) 吸い出し口が低潮時地下水位上に位置する場合→掘削有りの復旧



(b) 吸い出し口が低潮時地下水位下に位置する場合の復旧→掘削無しの復旧

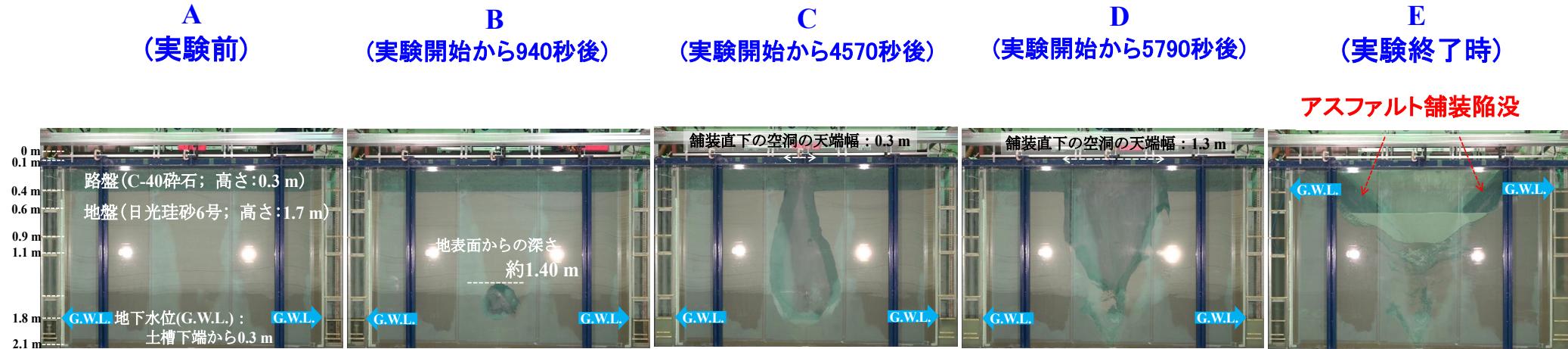


臨海部の舗装直下地盤の 空洞発達同定, 破壊過程, 維持管理の実大実験

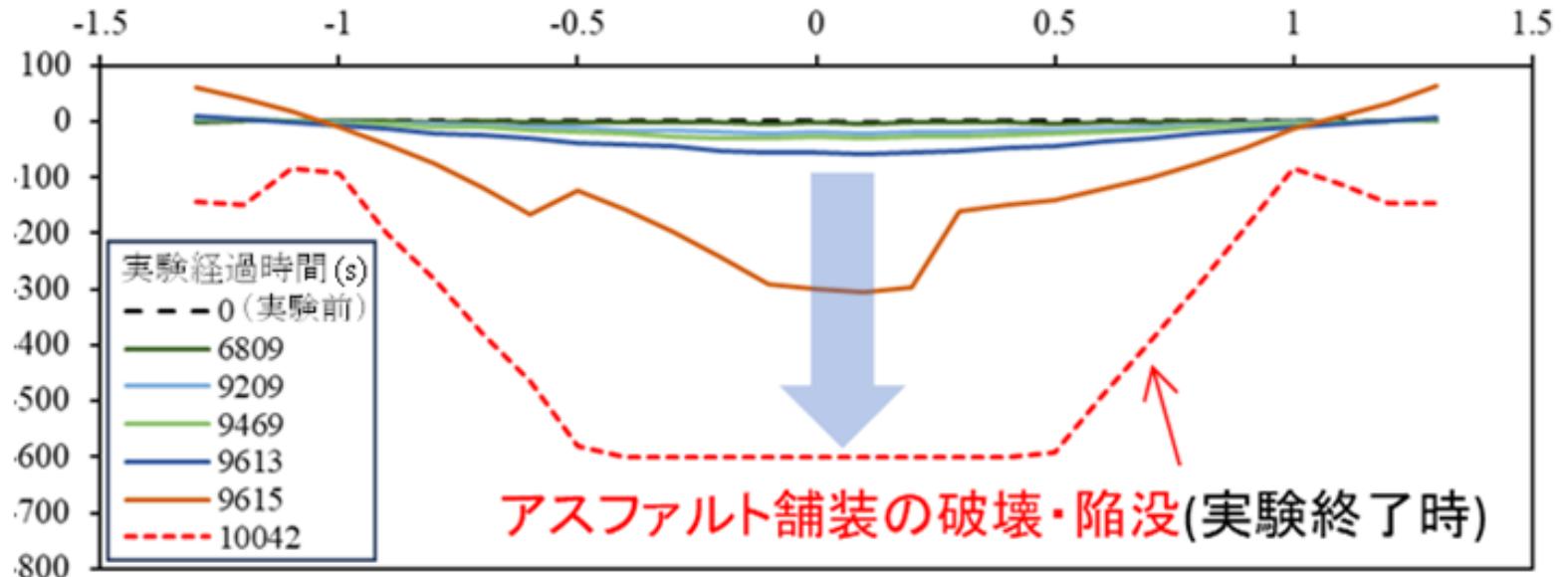


舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程

アスファルト舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び舗装の破壊過程



アスファルト舗装の
変位 (mm)



吸い出しによる
舗装変位は、
路盤材が崩落し
空洞の天端が
舗装直下に達する
前の時点では、
実質的にゼロ

舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程

アスファルト混合物
コンクリート版

路盤

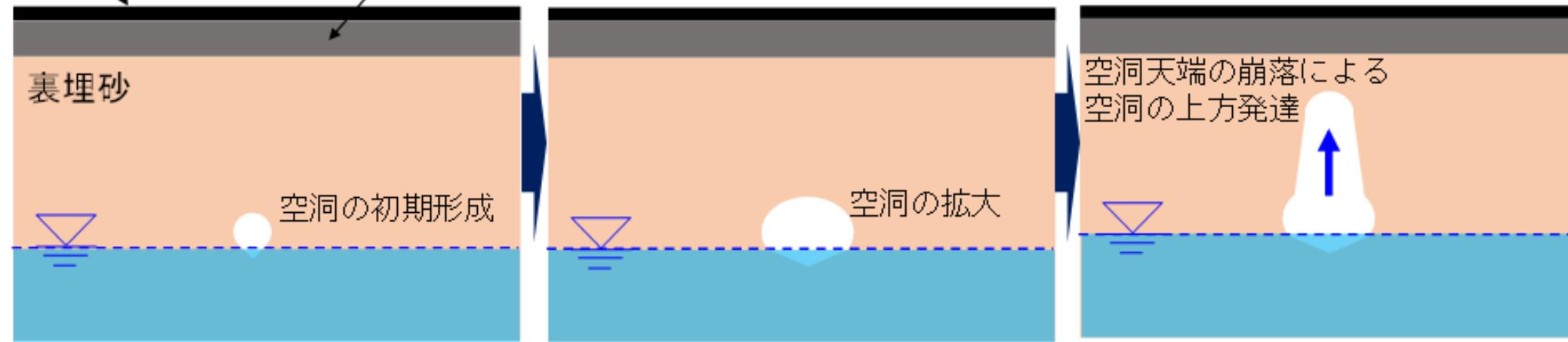
裏埋砂

空洞の初期形成

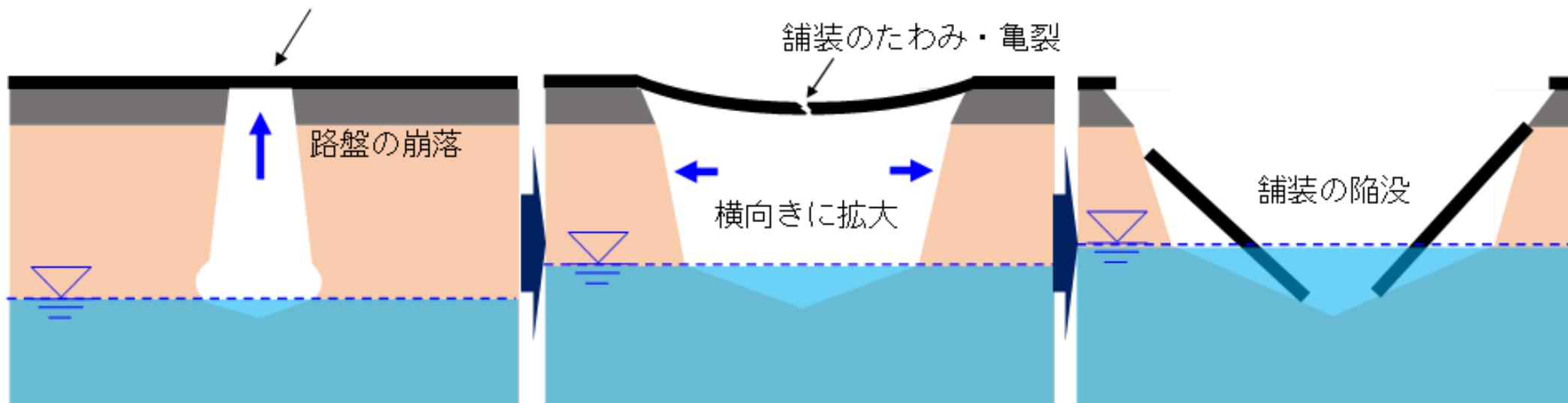
空洞の拡大

空洞天端の崩落による
空洞の上方発達

梁・佐々ら (2024)
港空研資料 1419

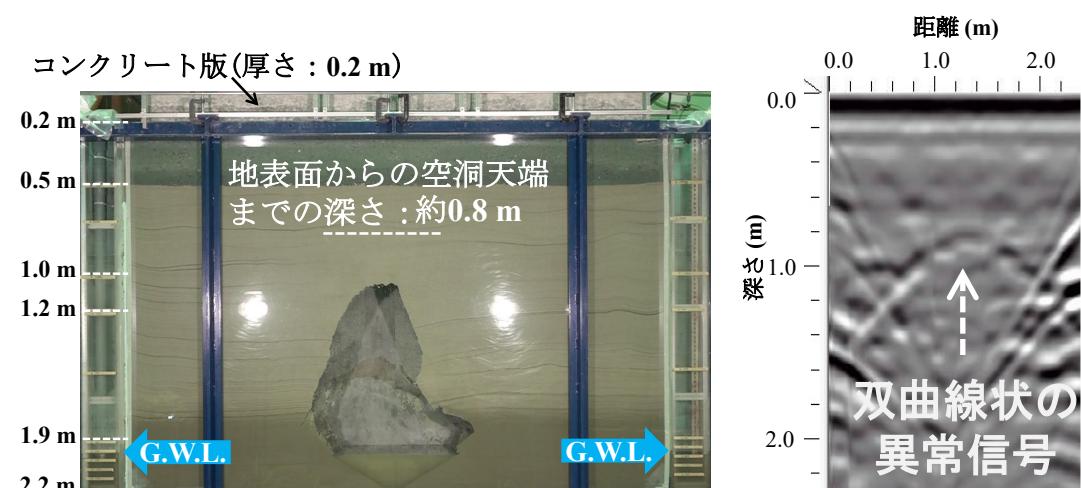


路盤材が崩落し、空洞の天端が舗装直下に達する前の時点において、
舗装の種類や舗装厚に関わらず舗装の変位は、実質的にゼロ



地中レーダー探査の原理と早期空洞探知における課題及び解決策

- 地中レーダー探査は、電磁波を放射・受信するアンテナ装置から地中にパルス状の電磁波を周期的に放射し、その電磁波が地中のどこで反射するかを測定し、地中の埋設物・空洞などの異常箇所を探知する非破壊探査方法である。
- 電磁波は、比誘電率の違う媒質との境界面で反射・透過する性質を持っており、反射波を受信することで異常信号を抽出することができる。
- 比誘電率は、媒質の種類・特性等によって変化する。実際、地中レーダーを用い地盤内の空洞を探査する際、空洞中の空気の比誘電率は地盤を構成する土砂より低いため、空洞の天端からの反射波は地表面からの反射波と逆位相を持つ特性(負極性)を有する。一般的に、空洞の天端では双曲線状の異常信号が現れる。
- しかし、舗装・地盤の特性及び地下水の影響等によって、地下1m以深では空洞の探知精度が低下する！



吸い出しによる空洞形成・発達の同定が困難



臨海部・沿岸域における空洞の早期探知手法の開発

地中レーダー探査結果を用いた空洞の早期探知手法

梁・佐々ら (2024, 2025)

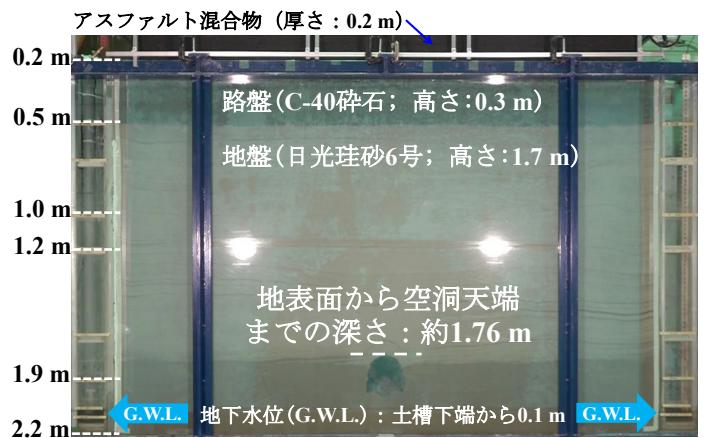
1. 地中レーダー探査画像を用いる方法：地中レーダー探査画像*を経時的に比較し、画像上の信号変化を捉えることで、地下1 m以深に存在する空洞天端を早期に探知しうる。
2. 地中レーダー探査波形を用いる方法：地中レーダー探査波形**を経時的に比較し、地表面からの反射波位相を基準とした位相反転を捉えることで、空洞及び空洞により地盤の緩みが生じた領域を早期に探知しうる。

*地中レーダー探査画像：地中レーダーのアンテナで受信した地中からの反射波の振幅の大きさを白黒の濃淡に変換した画像。

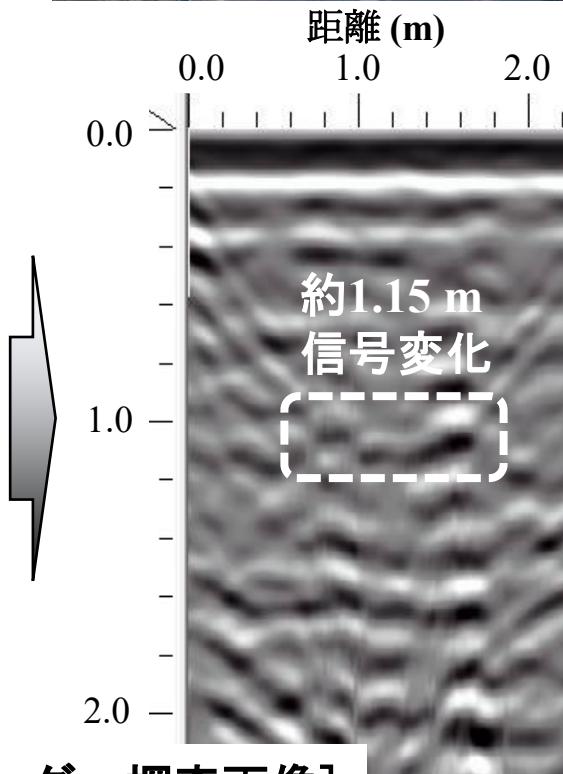
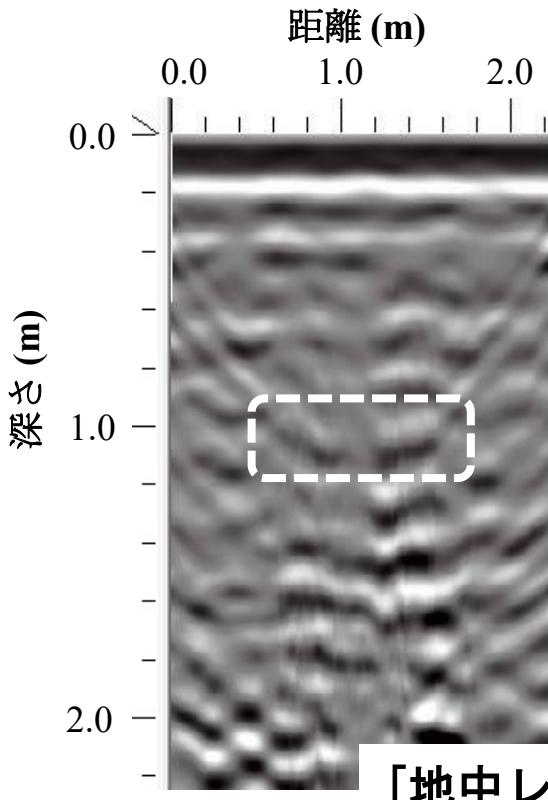
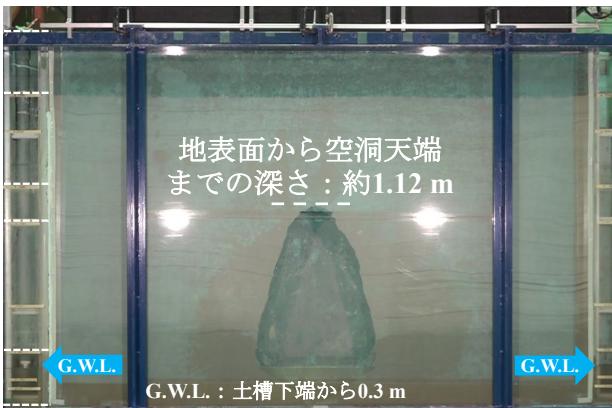
**地中レーダー探査波形：上述の反射波振幅の深度分布。

地中レーダー探査画像を用いた空洞の早期探知方法

空洞の初期形成



空洞の発達



- 空洞天端の深度で白黒の信号パターンが変化し、黒色模様が新たに出現する。
- 地中レーダー探査画像を時系列的に比較し、上述の信号の変化を捉えることで、地下1m以深の空洞天端を早期に探知しうる。

地中レーダー探査波形を用いた空洞の早期探知方法

A (吸い出し前)

コンクリート版(厚さ : 0.2 m)

路盤(C-40 碎石; 厚さ : 0.3 m)

地盤(日光珪砂6号; 高さ : 1.7 m)

1.0 m
1.2 m

0.7 m
0.5 m

1.9 m
2.2 m

地下水位(G.W.L.) :
土槽下段から 0.1 m



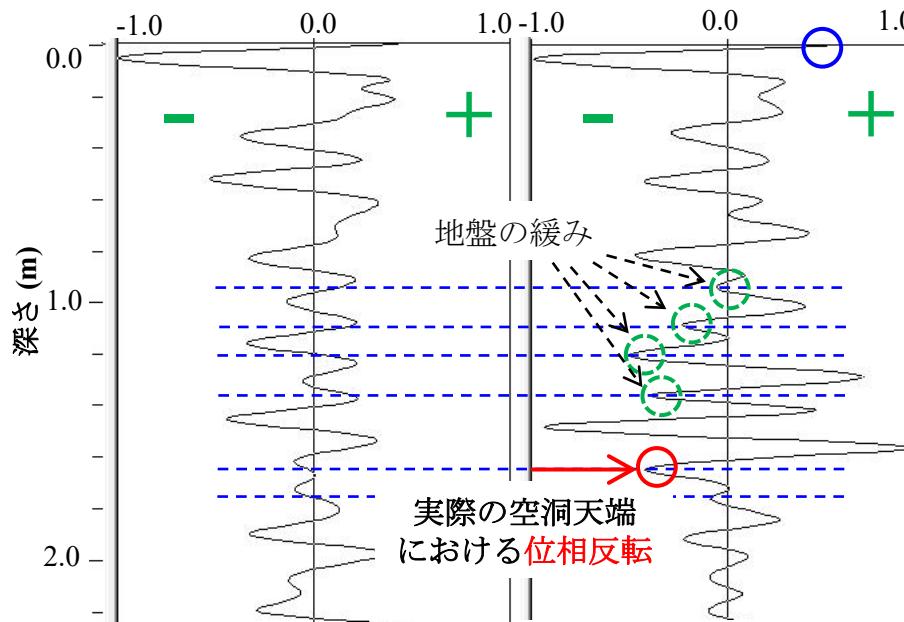
B (空洞の形成)

地表面から空洞天端
までの深さ : 約 1.65 m

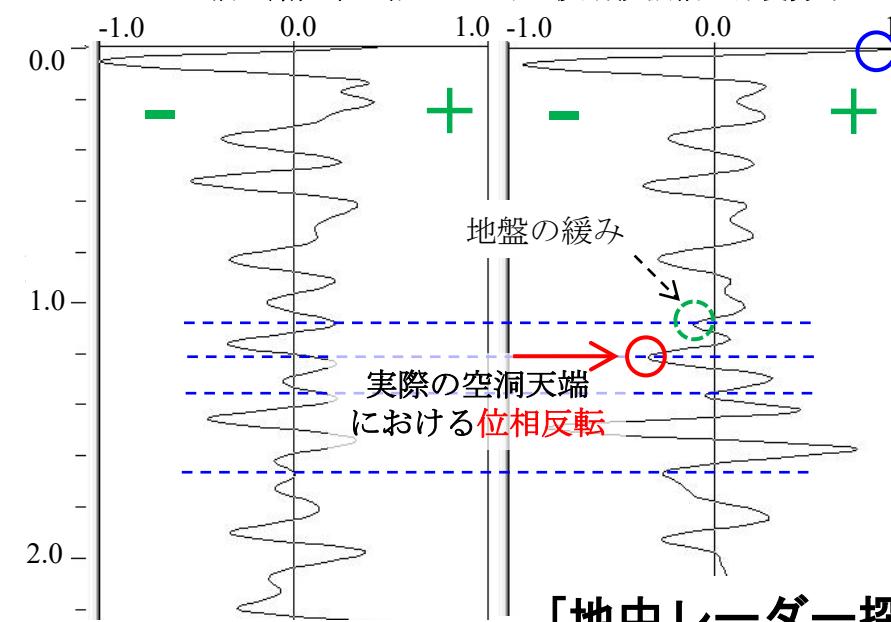
C (空洞の発達)

地表面から空洞天端
までの深さ : 約 1.2 m

A
B
空洞の鉛直中心軸上における反射波振幅の深度分布



A
C
空洞の鉛直中心軸上における反射波振幅の深度分布



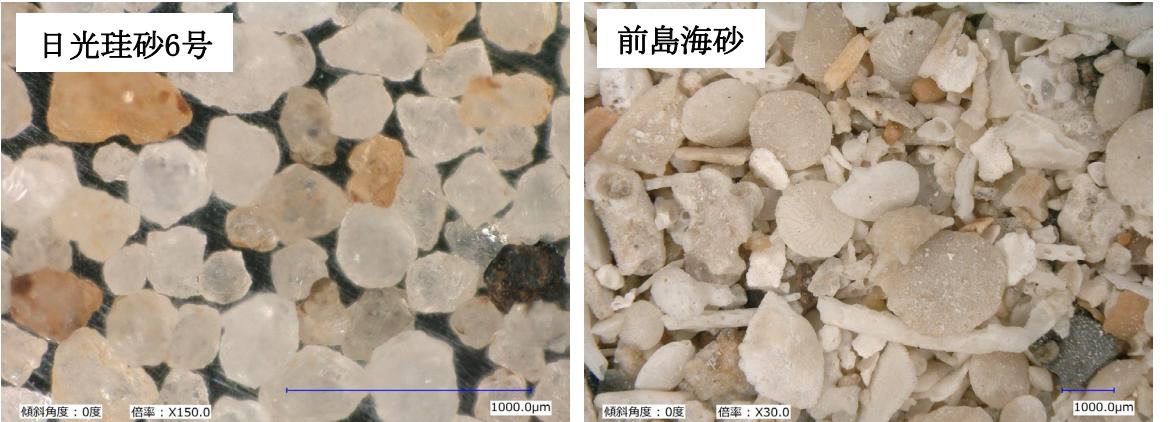
[地中レーダー探査波形]

※空洞形成・発達した際、空洞及び空洞による地盤の緩みが生じた深度では、反射波の位相が0又は正(+)から負(-)に新たに反転する(青破線)。

地中レーダー探査波形を時系列的に比較し、地表面からの反射波位相を基準とした位相反転を捉えることで、空洞及び空洞により地盤の緩みが生じた領域を早期に探知しうる。

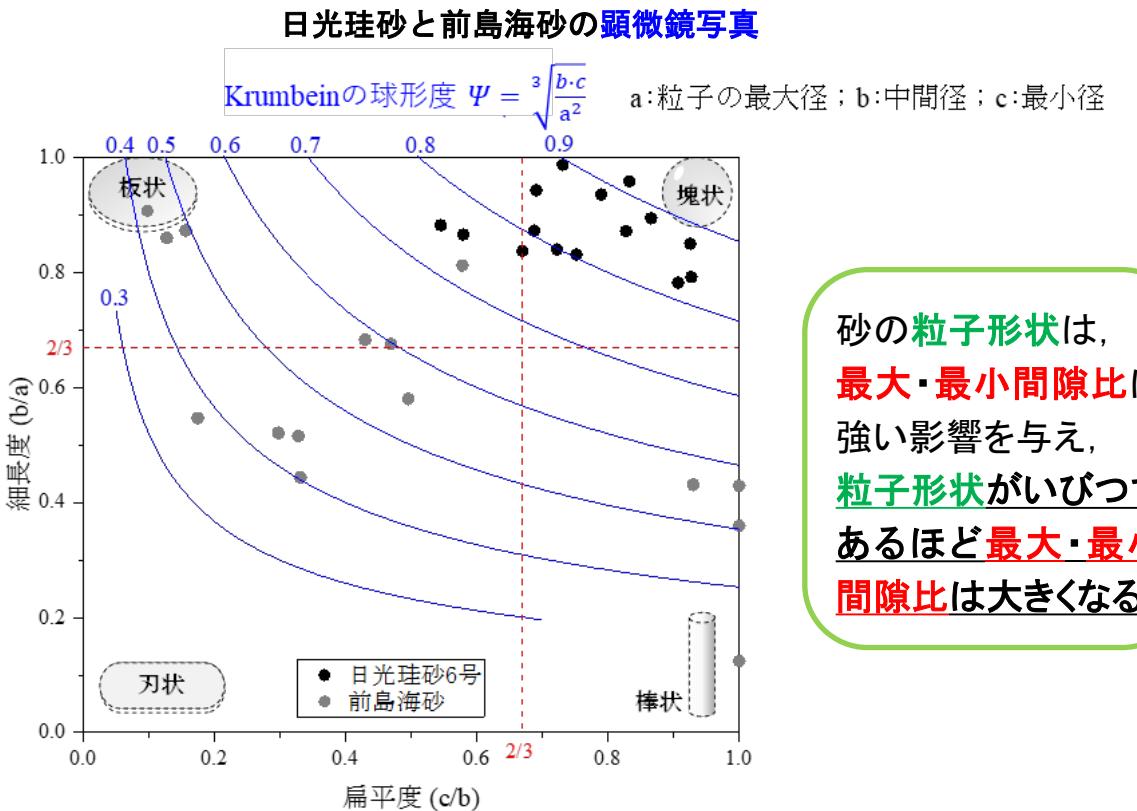
地中レーダー探査手法を用いた吸い出しによる空洞形成・発達・舗装破壊過程の経時変化の同定

珪砂・海砂の粒子形状の特性

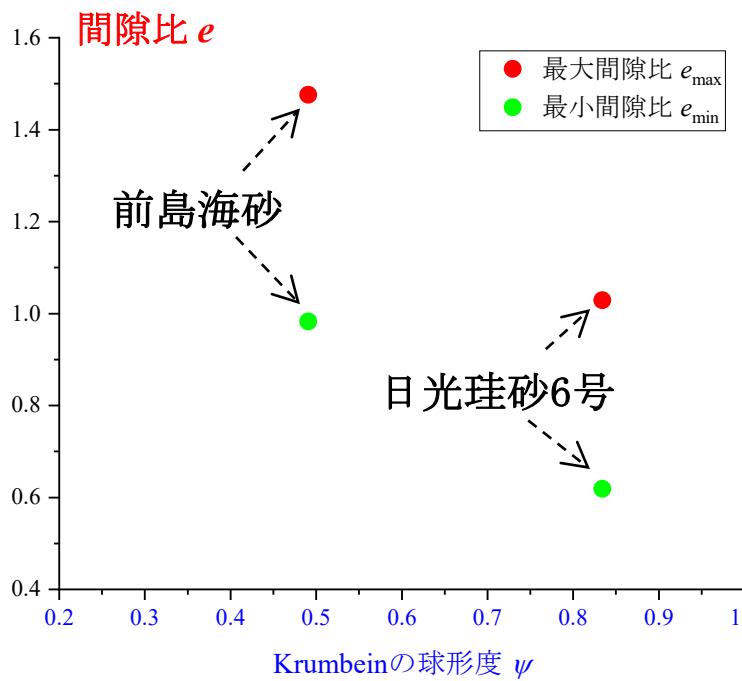
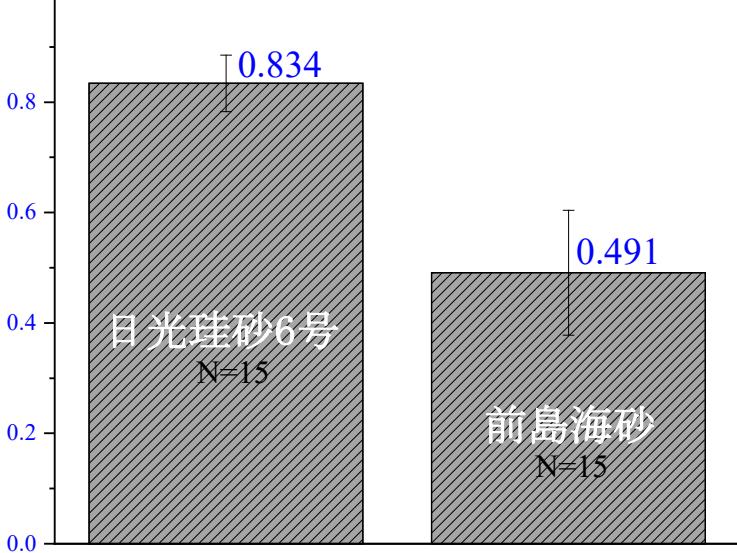


-裏埋砂の粒子形状の影響-

日光珪砂と前島海砂の 細長度・扁平度及び Krumbeinの球形度

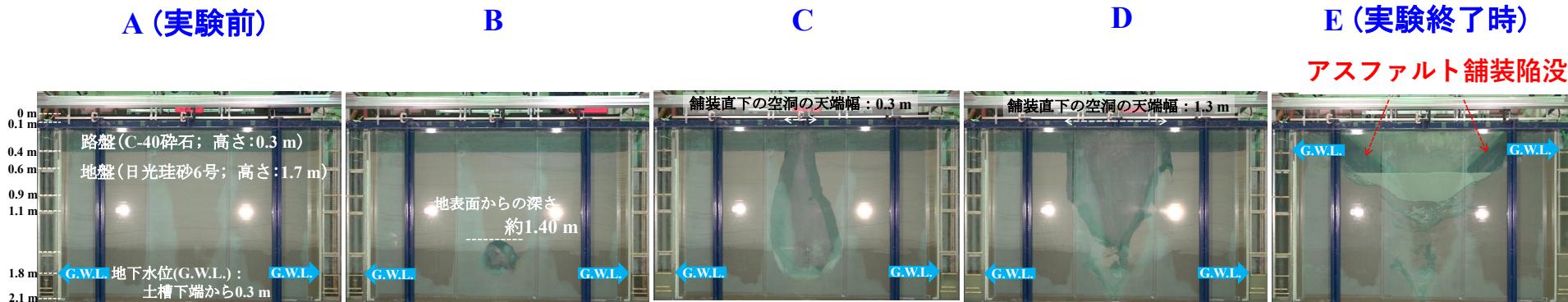


Krumbeinの球形度 Ψ (平均土標準偏差)

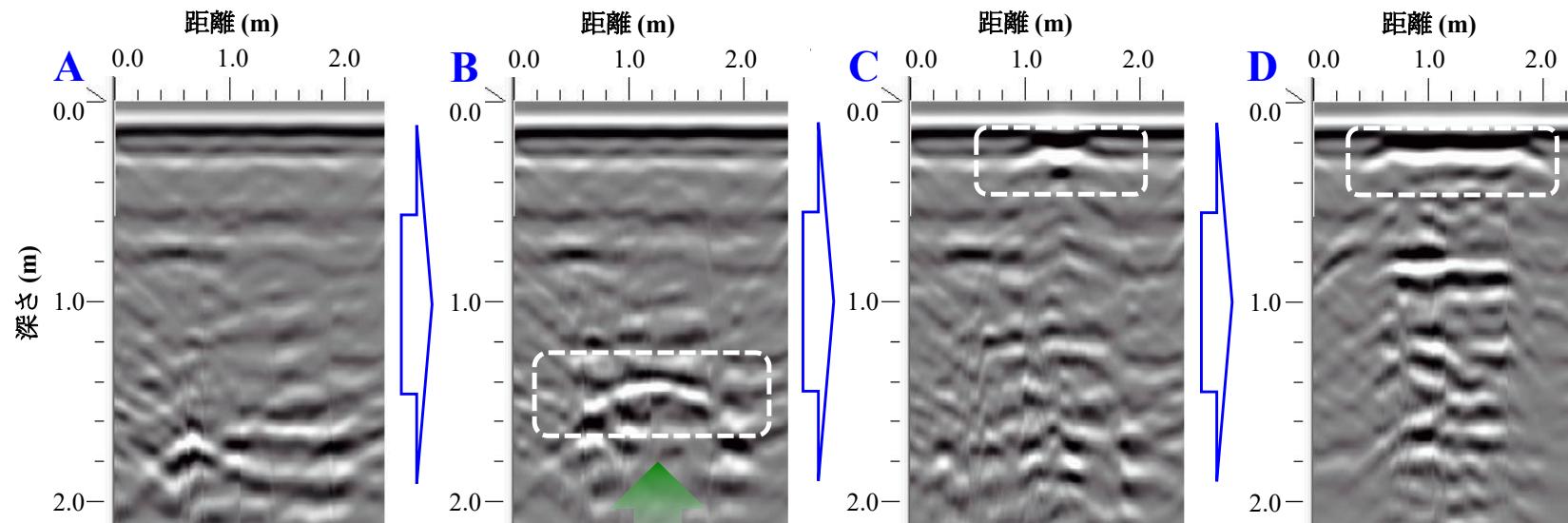


地中レーダー探査手法を用いた 吸い出しによる空洞形成・発達・舗装破壊過程の経時変化の同定

珪砂(アスファルト混合物厚 0.1 m)



各段階における地中レーダーの空間測定結果

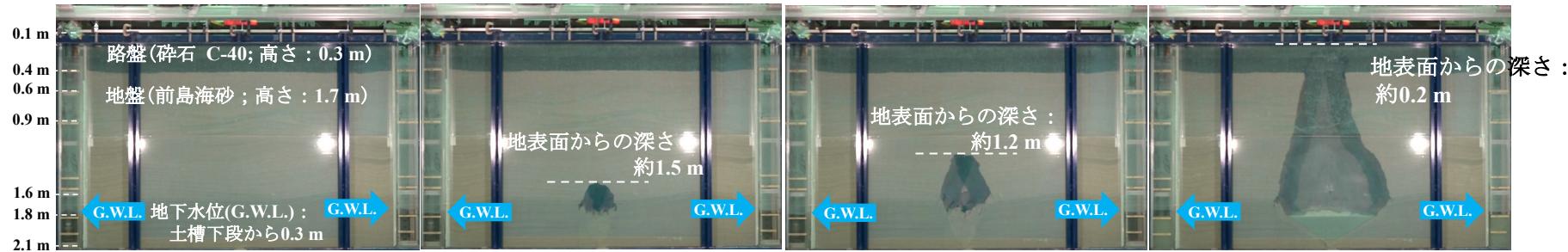


空洞の天端の深さが地表面から約1.4 mの時点で、初めて空洞を表す双曲線状の信号検出

舗装直下の空洞が左右に拡大した際、
空洞天端の位置・範囲同定可能

海砂(アスファルト混合物厚 0.1m)

A (実験前)



B

C

D

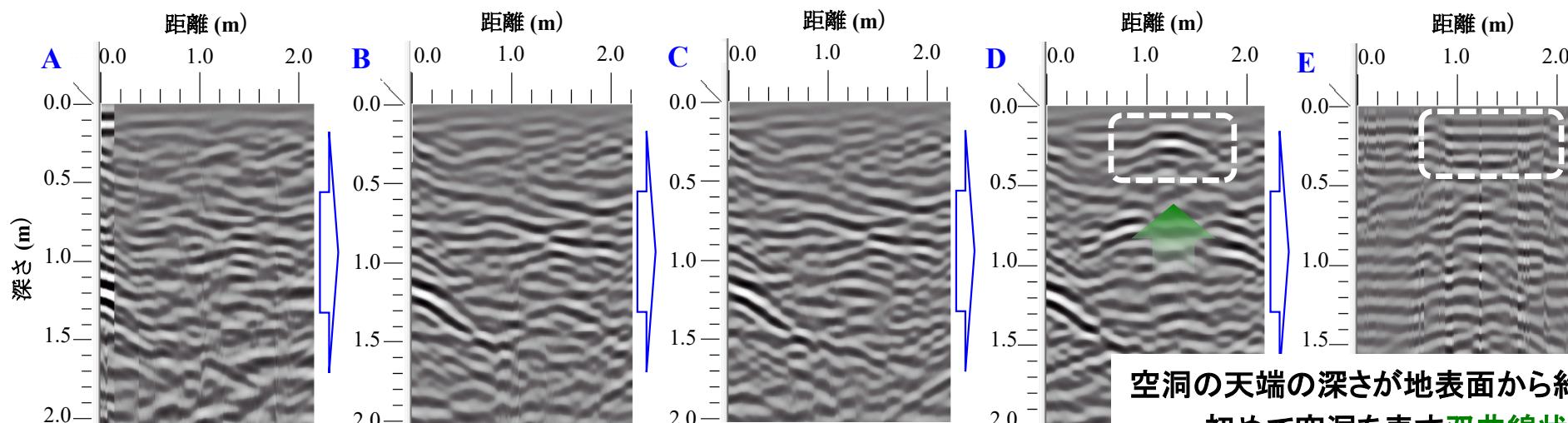
E

F

G (実験終了時)
アスファルト舗装陥没



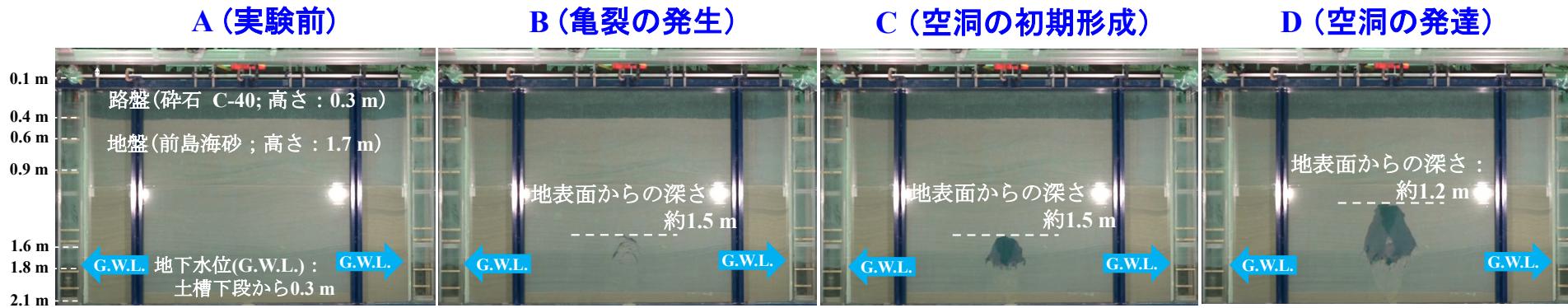
各段階における地中レーダーの空間測定結果



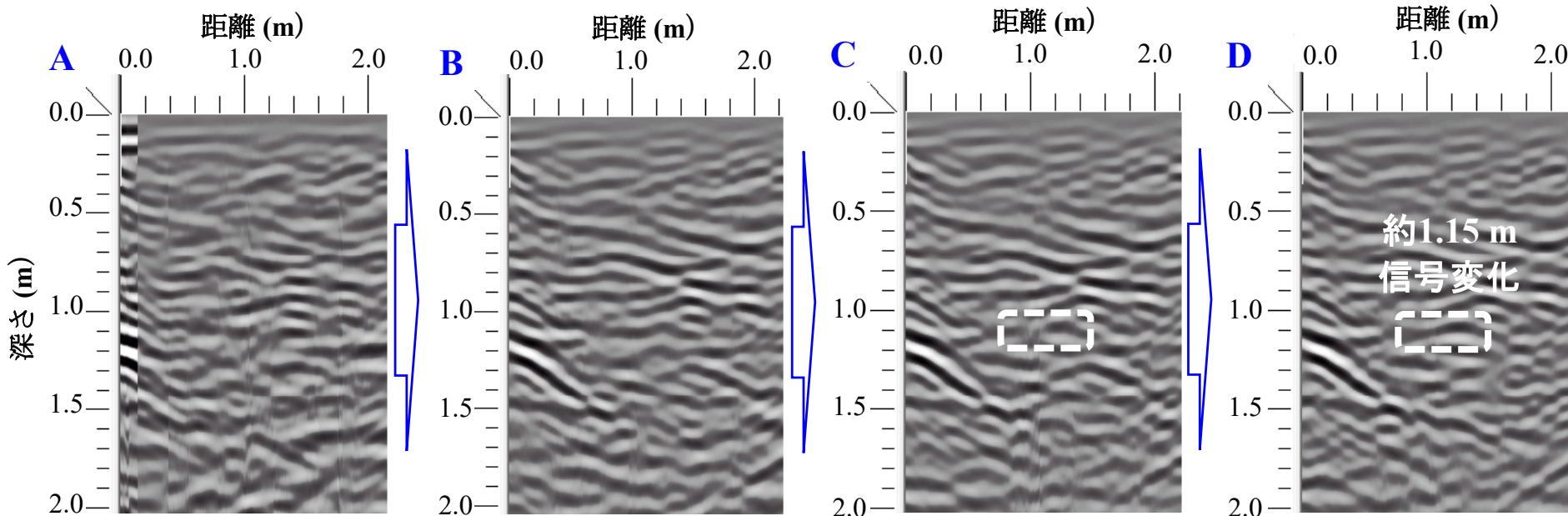
空洞の天端の深さが地表面から約0.2 mの時点で、
初めて空洞を表す双曲線状の信号検出

地中レーダー探査画像を用いた空洞の早期探知方法：沖縄海域海砂

海砂(アスファルト混合物厚 0.1m)



空洞発達の各段階において、双曲線状の異常信号が検出されなかった地中レーダーの空間測定結果

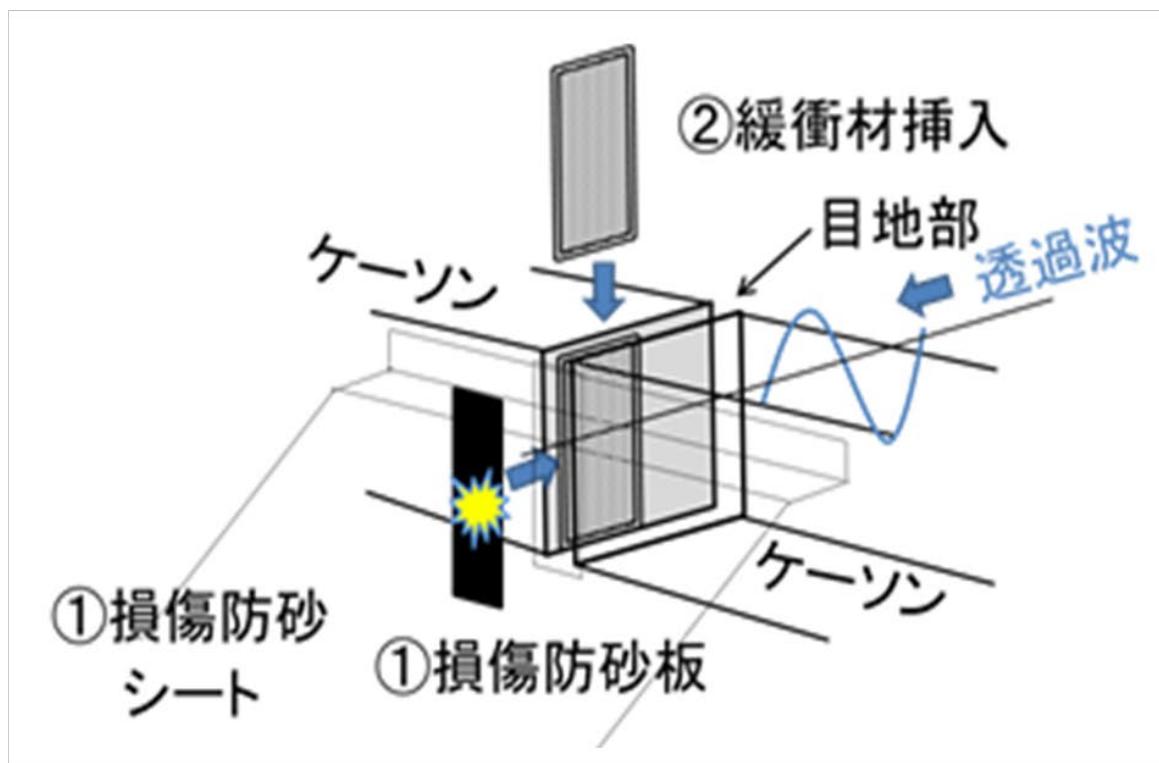


- Stage C ⇒ D : 空洞天端の周辺で白黒の信号パターンが変化し、黒色模様が新たに出現する。

地中レーダー探査画像を時系列的に比較し、上述の信号の変化を捉えることで、地下 1m以深の空洞天端を早期に探知しうる。

既設・老朽化施設の長寿命化対策に関する知見

ケーソン目地透過波低減法(ネットバッファ工法)



ケーソン目地透過波低減法の概念図(右写真は適用事例)



土木学会技術開発賞・国土技術開発賞・インフラメンテナンス大賞: 基準施行

「全国の老朽化施設を含む護岸・岸壁背後のケーソン目地部に容易に設置が可能であり、新設・既設・老朽化施設の予防保全・災害復旧・長寿命化対策として、地震や高波浪等の多様な外力作用下で安定的に吸い出し・陥没を抑止できる有効な新技術」

経年の陥没抑制効果

2021年と2022年の2度の福島県沖地震
作用後も、当技術の安全性を実証

陥没発生箇所 No.1						
	陥没現象	陥没箇所の補修	陥没再発生 (2m × 5m)	目地透過波低減法適用 埋戻し	変状無し	
	時 期	2017.09	2017.12	2018.02	2025.08	
		鉄板 + コンクリート被覆	補修後3か月	ネット材設置 ・ 波力測定	本技術適用後 90か月	
		防砂シート設置	最大有義波高 5.40m	埋戻し	最大有義波高 7.80m	
		埋戻し	有義波周期 16.0sec		有義波周期 18.5sec	
陥没発生箇所 No.2						
	陥没現象	陥没箇所の補修	陥没再発生	目地透過波低減法適用 埋戻し	変状無し	
	時 期	2017.09	2017.12	2018.02	2025.08	
		鉄板 + コンクリート被覆	補修後3か月	ネット材設置	本技術適用後 90か月	
		防砂シート設置	最大有義波高 5.40m	埋戻し	最大有義波高 7.80m	
		埋戻し	有義波周期 16.0sec		有義波周期 18.5sec	
陥没想定箇所 No.3						
	陥没無し・目地開き有り	目地開き箇所の補修	陥没無し	目地透過波低減法適用 埋戻し	変状無し	
	時 期	2017.09	2017.12	2018.02	2025.08	
	将来的な陥没可能性	鉄板 + コンクリート被覆	補修後3か月	ネット材設置	本技術適用後 90か月	
		防砂シート設置	最大有義波高 5.40m	埋戻し	最大有義波高 7.80m	
		埋戻し	有義波周期 16.0sec		有義波周期 18.5sec	

既設・老朽化施設の長寿命化対策



直近を通過した台風を含む
3つの台風に対して
予防保全効果を実証

国際戦略港湾
重要港湾
を含む多くの現場で
実用化、効果が実証
されている



- 吸い出し・陥没抑止対策の基準:要求性能
- 臨海部の多様な外力:地震・高潮・流れ・越流・降雨下の吸い出し・陥没抑止対策の体系化
- 空洞陥没の復旧手法
- 舓装直下地盤の空洞発達同定, 破壊過程, 維持管理に関する知見
- 老朽化施設の長寿命化対策に関する知見