



# 吸い出し・陥没抑止に関する 効果的な維持管理に向けて

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



# 内容

- ・ 吸い出し・陥没抑止対策の基準(R4施行)
- ・ 臨海部の多様な外力:地震・高波・高潮・流れ・越流・降雨下の吸い出し・陥没抑止対策の体系化
- ・ 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
- ・ 既設・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・陥没を抑止する新技術の開発・実用化

- 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

# 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	<ul style="list-style-type: none"><li>浸透流</li><li>水頭差</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><b>General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams</b> <math>D_{F15}/D_{S85} \leq 4 \text{ to } 5, D_{F15}/D_{S15} \geq 3 \text{ to } 5</math></li><li><b>Design Standards No. 13: Embankment Dams</b> <math>D_{F15}/D_{S85} \leq 4, D_{F15}/D_{S15} \geq 5</math></li><li><b>Cistin/Ziemss</b>による基準</li></ul>
沿岸構造物周辺における海底砂の洗掘と侵食の防止	<ul style="list-style-type: none"><li>波</li><li>浸透流</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><b>Coastal Engineering Manual – Part VI</b> <math>U_{cF} &lt; 10, D_{F15}/D_{S85} &lt; 4 \text{ to } 5, D_{F15}/D_{S15} &gt; 4 \text{ to } 5</math></li><li><b>Cistin/Ziemss</b>による基準</li></ul>
<b>護岸・岸壁など構造物背後の土砂の吸い出し抑止</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>潮汐</li><li>浸透</li><li>波</li><li>降雨</li><li>越波</li><li>地震</li></ul>	$D_{F50}/D_{S50} \leq 20$ 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

**フィルター層：海岸工学論文賞 3度受賞(2021, 2023, 2024), Coastal Engineering**

カナダ、バンクーバー 2012



英国、リバプール 2017



新潟、2018



茨城、2017



## 国内外の吸い出し・陥没事例

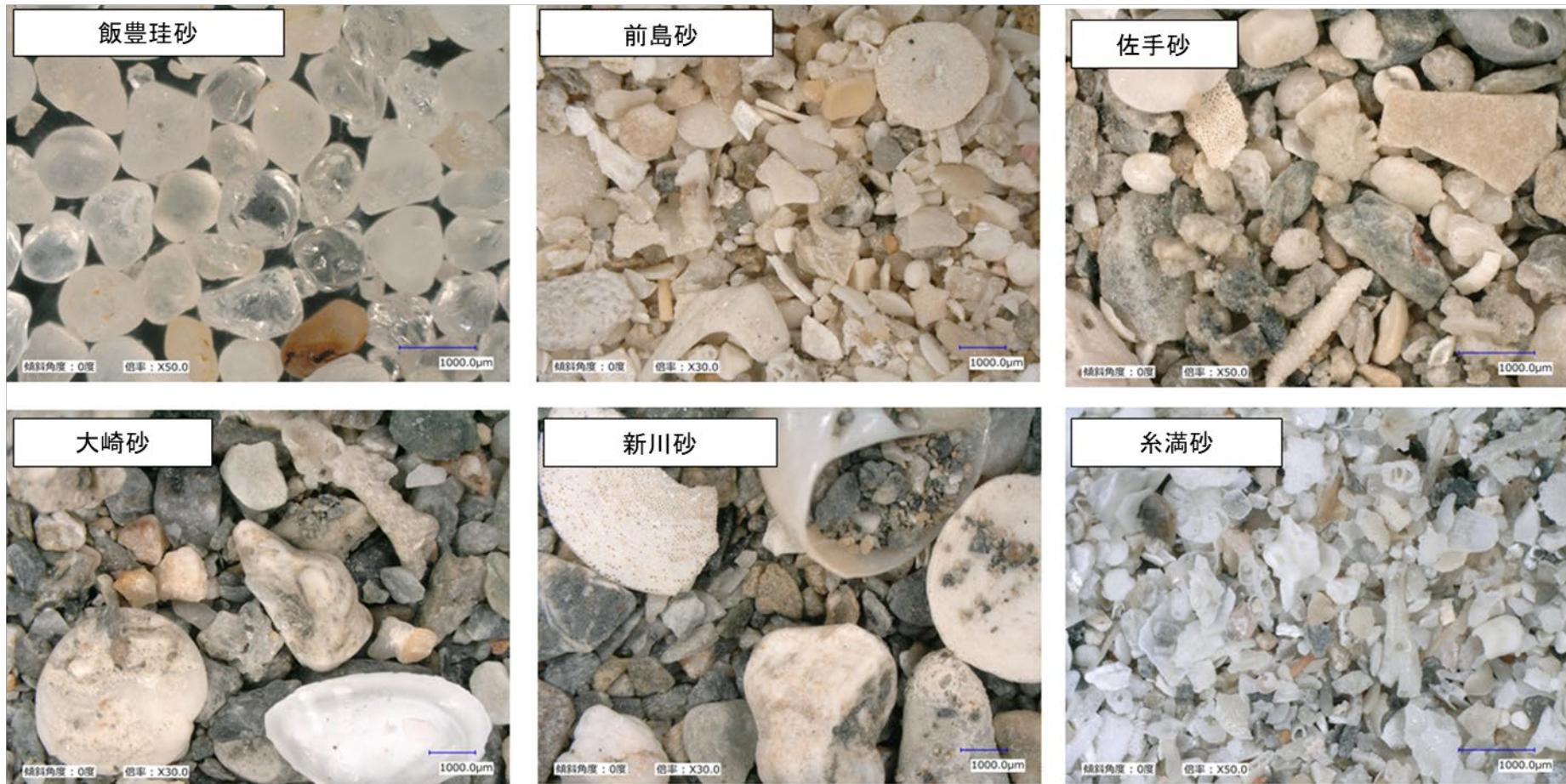
# 地震による大規模な吸い出し・陥没事例



2022年福島県沖地震  
モーメントマグニチュード  
Mw 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

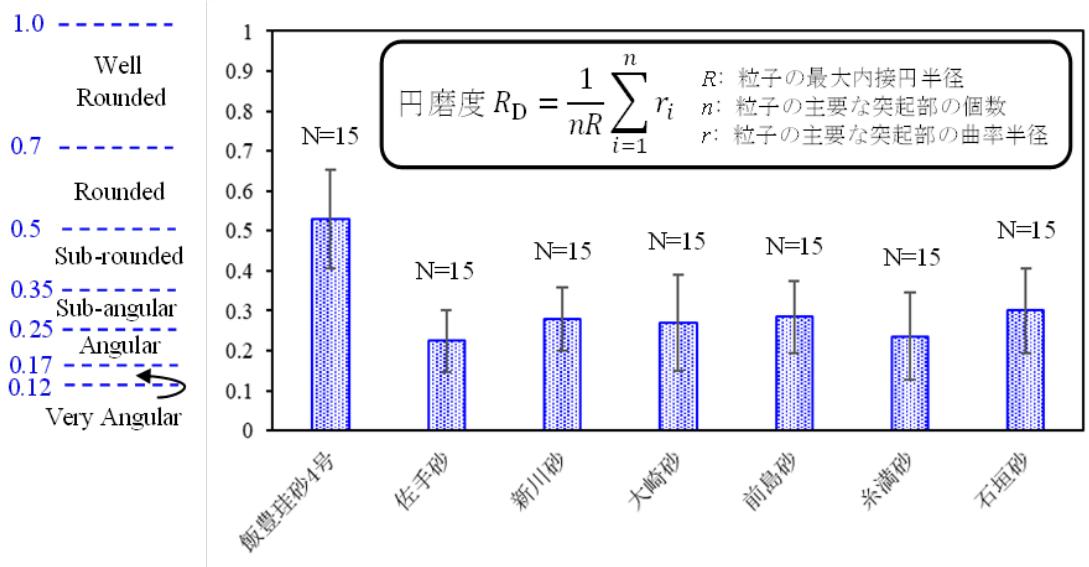
# 砂の粒子形状の影響



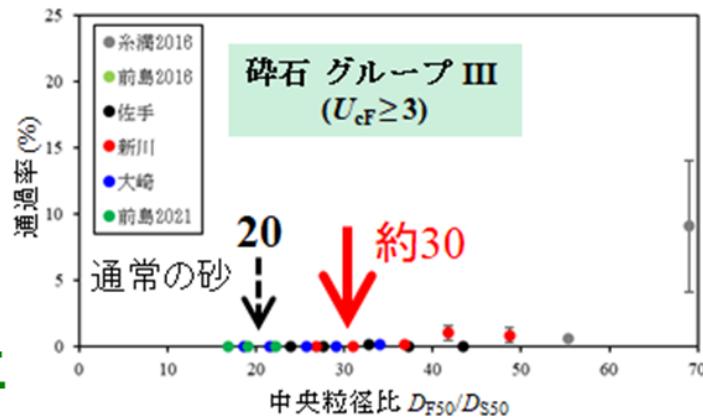
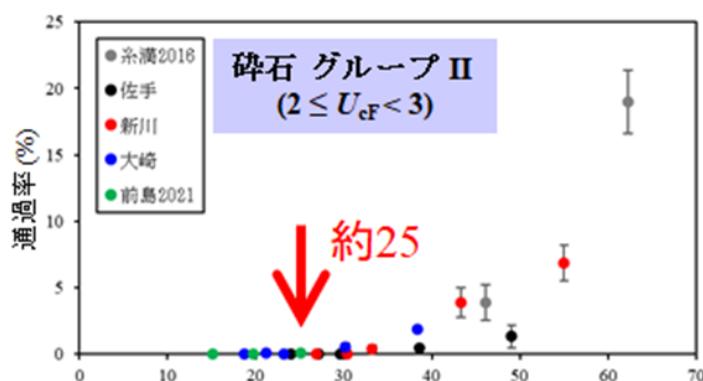
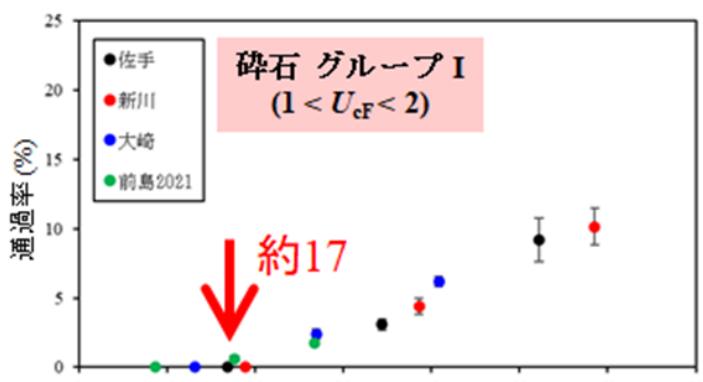
海砂は貝殻及び珊瑚礁成分を多く含有しうる

# 吸い出し抑制性能に及ぼす粒子形状の影響

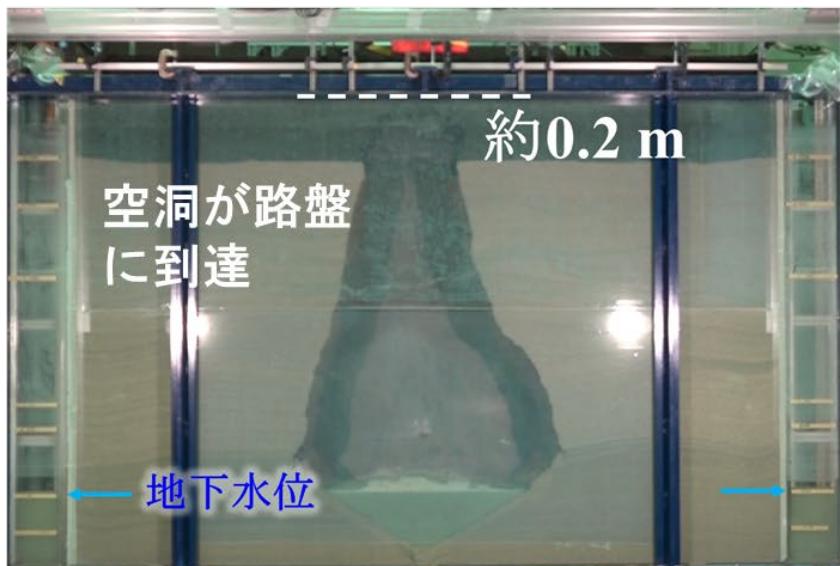
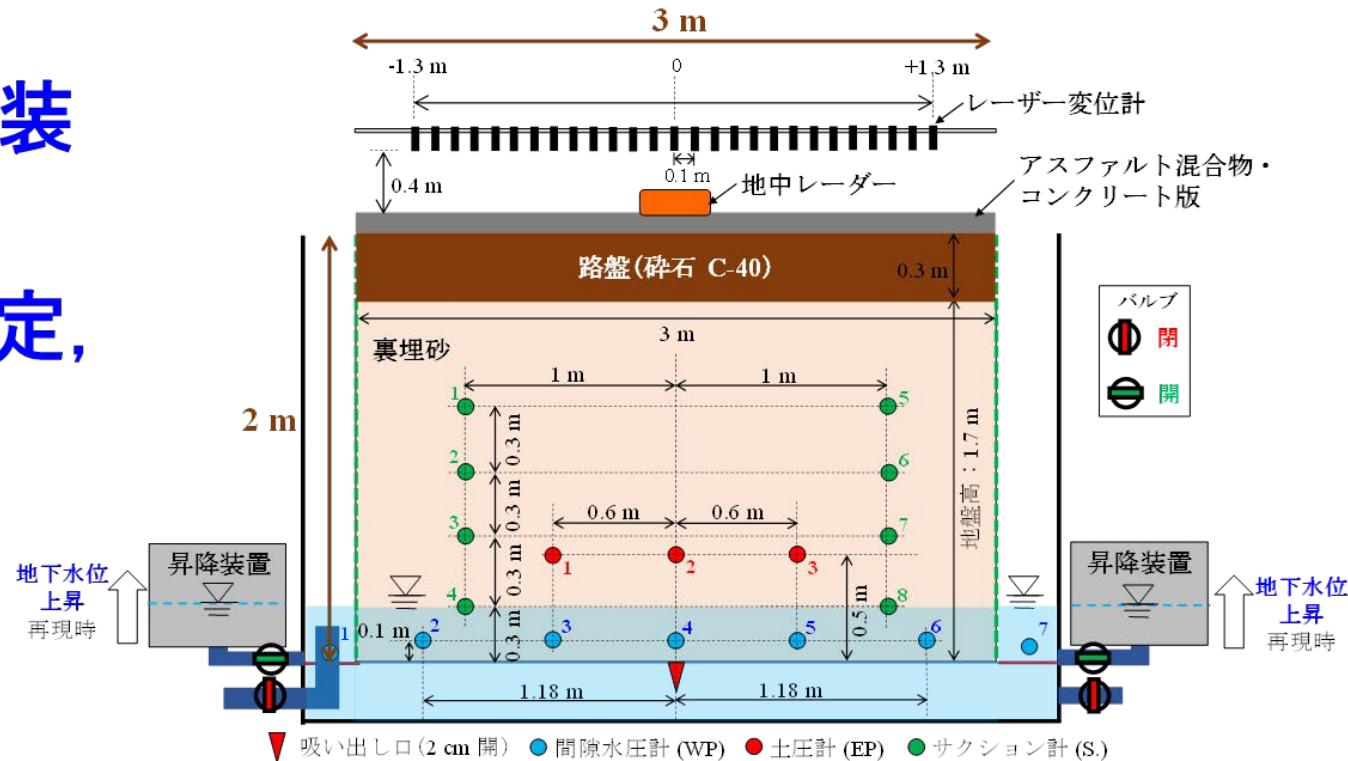
円磨度 (Powers, 1953)



- 粒子形状はフィルター性能に影響する
- いびつな粒子形状の裏埋砂は、動的外力下でより吸い出されにくい
- 吸い出し抑制性能は、粒子形状・サイズによらず、均等係数の影響を強く受ける

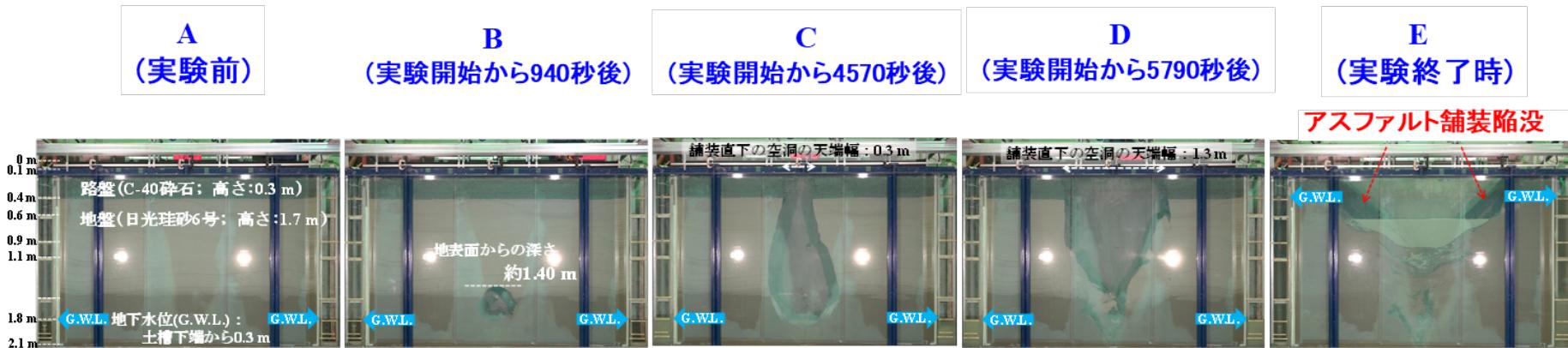


# 臨海部の舗装 直下地盤の 空洞発達同定, 破壊過程, 維持管理の 実大実験



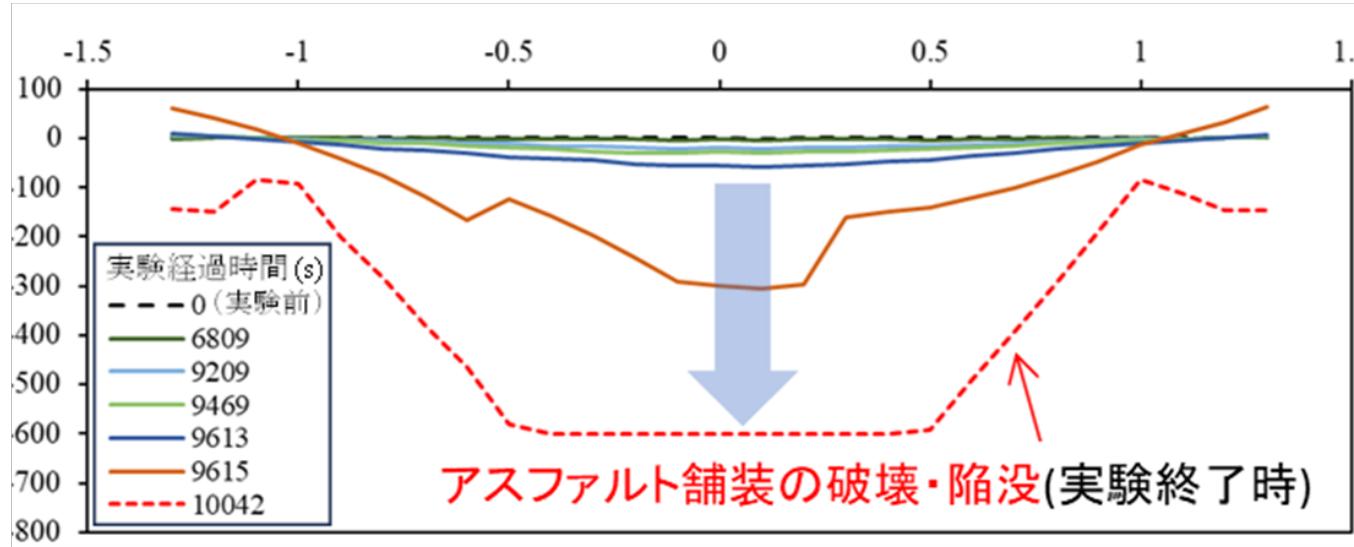
# 舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程

## アスファルト舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び舗装の崩壊過程



アスファルト舗装の  
変位 (mm)

アスファルト舗装中央からの左右距離 (m)



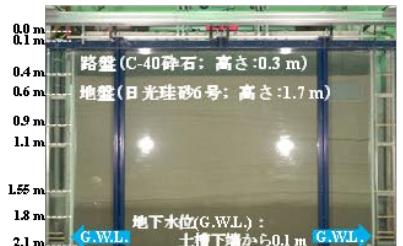
吸い出しによる  
舗装変位は、  
路盤材が崩落し  
空洞の天端が  
舗装直下に達す  
る前の時点では、  
実質的にゼロ

# 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

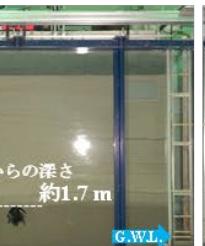
アスファルト・コンクリート舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程

コンクリート版厚 0.1 m

A(実験前)



B



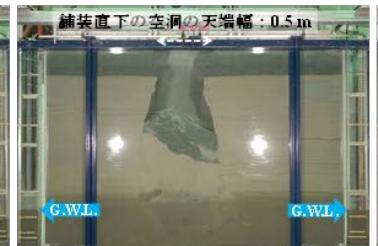
地表面からの深さ  
約1.7 m

C



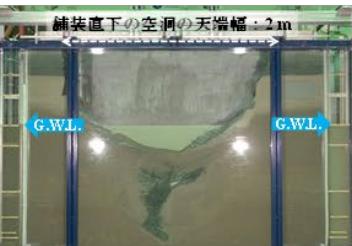
地表面からの深さ  
約0.97 m

D



舗装直下の空洞の天端幅: 0.5 m

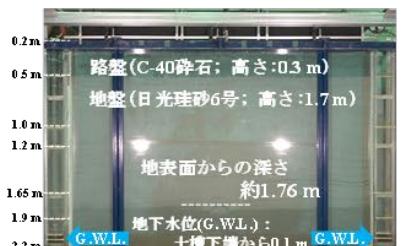
E(実験終了後)



舗装直下の空洞の天端幅: 2 m

アスファルト混合物厚 0.2 m

A(実験前)



B



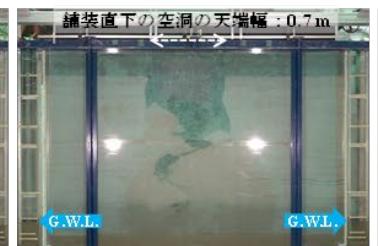
地表面からの深さ  
約1.76 m

C



地表面からの深さ  
約1.12 m

D



舗装直下の空洞の天端幅: 0.7 m

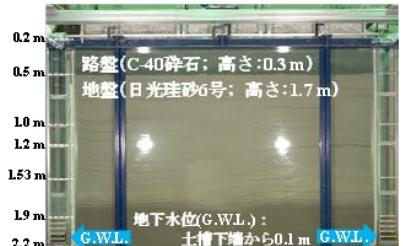
E(実験終了後)



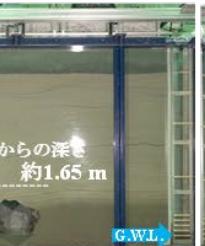
舗装直下の空洞の天端幅: 2 m

コンクリート版厚 0.2 m

A(実験前)



B



地表面からの深さ  
約1.65 m

C



地表面からの深さ  
約0.8 m

D



舗装直下の空洞の天端幅: 1 m

E(実験終了後)



舗装直下の空洞の天端幅: 2 m

# 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

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

路盤の崩落

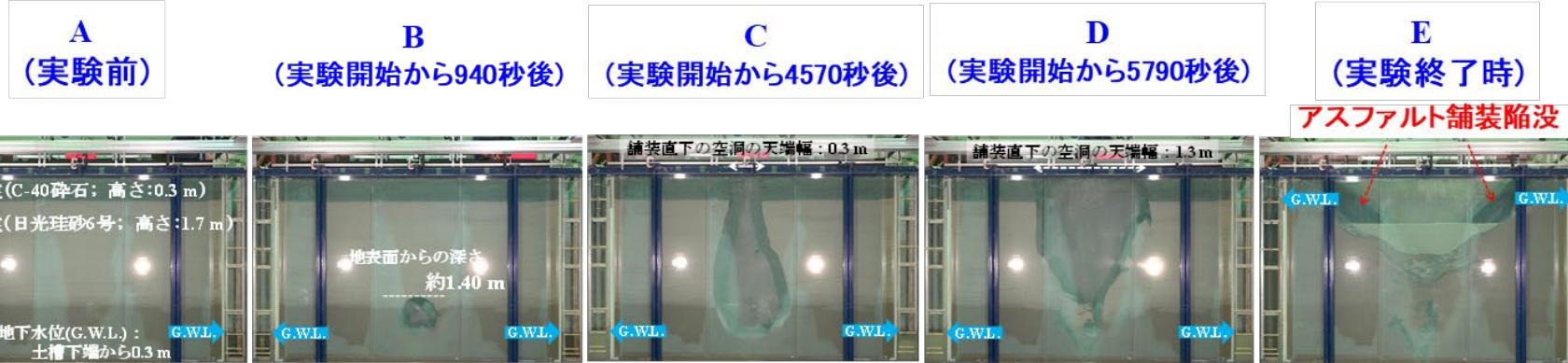
舗装のたわみ・亀裂

横向きに拡大

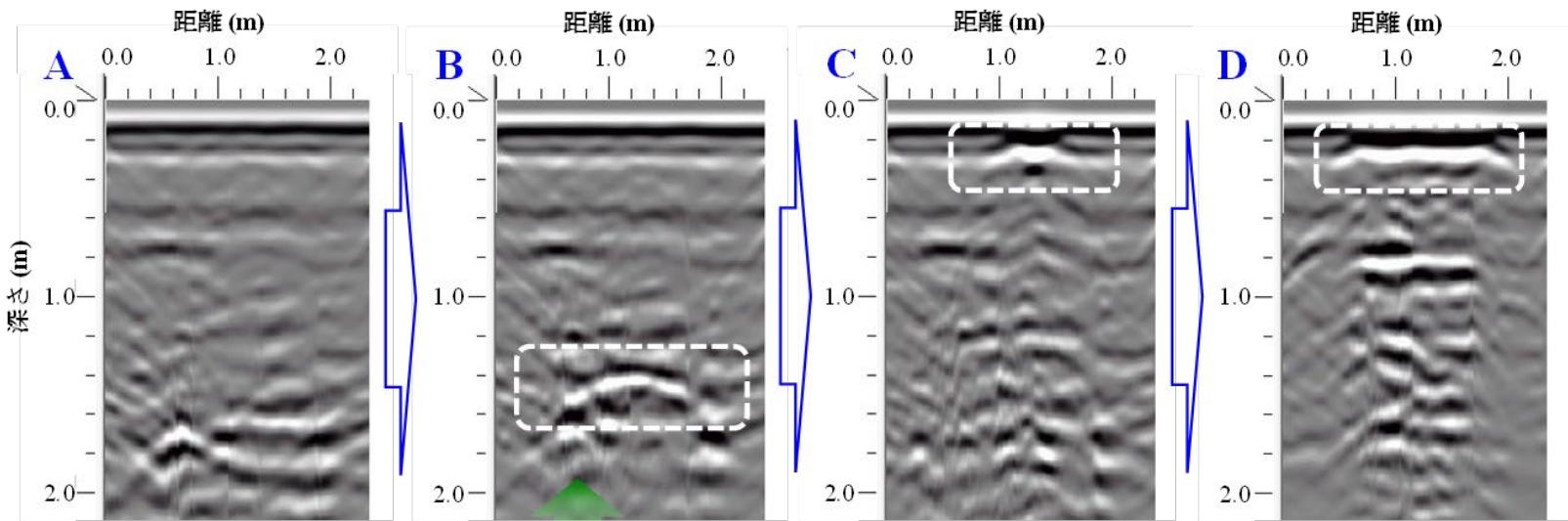
舗装の陥没

# 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

アスファルト混合物厚 0.1m



## 各段階における地中レーダーの空間測定結果

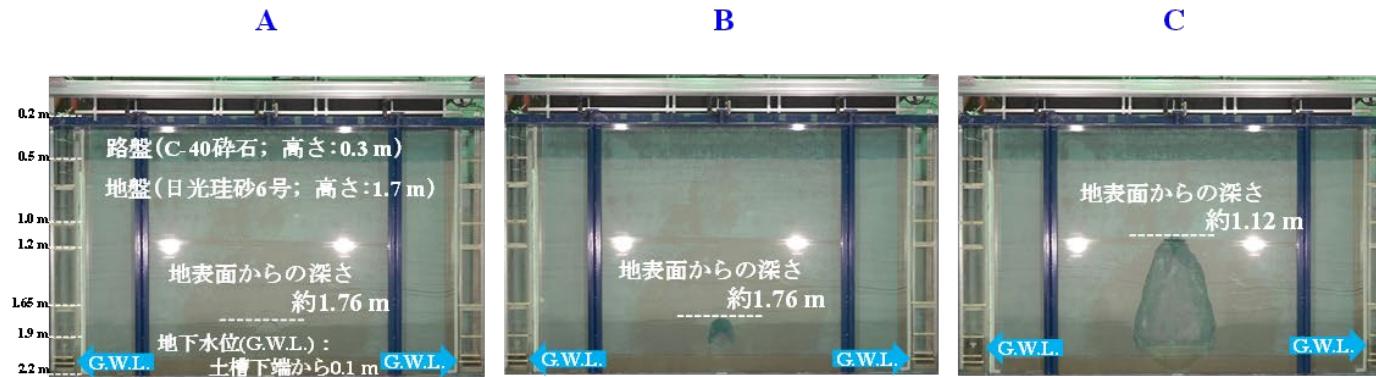


空洞の天端の深さが地表面から約1.4mの時点で、  
初めて空洞を表す双曲線状の信号検出

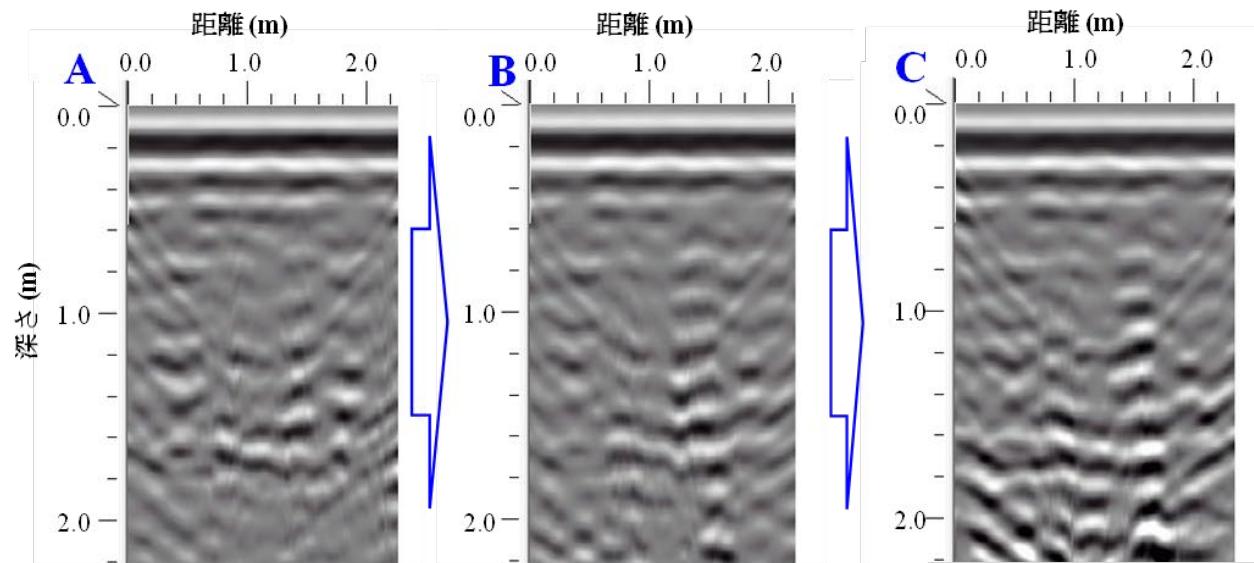
舗装直下の空洞が左右に拡大した際、  
空洞天端の位置・範囲同定可能

# 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

アスファルト混合物厚 0.2 m



## 各段階における地中レーダーの空間測定結果



空洞が地下1 m以深で形成・発達した際、  
その時点の地中レーダー探査では、空洞の探知が困難

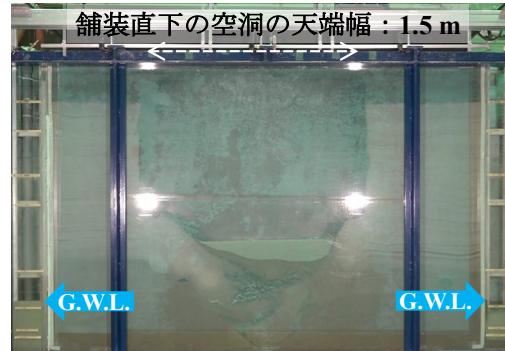
# 吸い出しによる空洞形成・発達・舗装破壊過程の経時変化の同定

アスファルト混合物厚 0.2 m

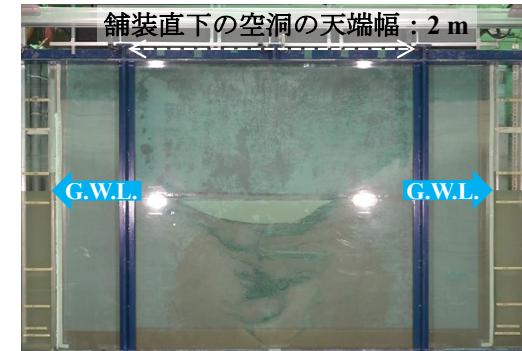
D



E

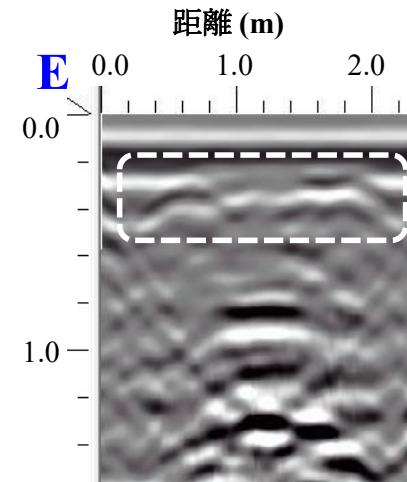
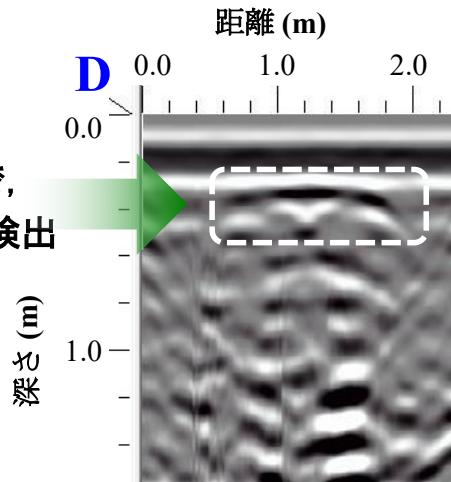


F(実験終了後)



## 各段階における地中レーダーの空間測定結果

空洞の天端が  
舗装直下に達した時点で、  
初めて双曲線状の信号検出



空洞が左右に拡大した際、  
空洞天端の位置・範囲  
同定可能

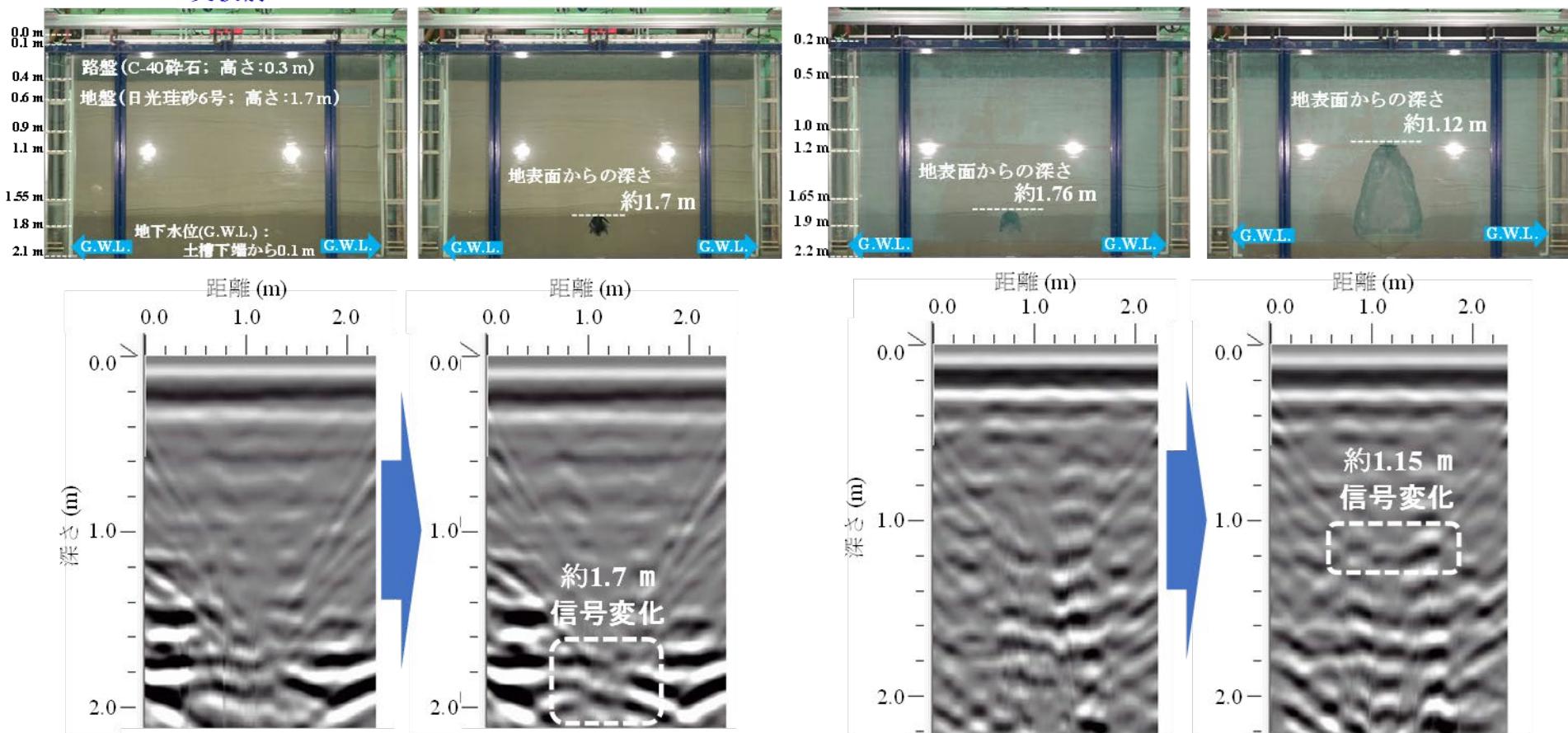
舗装の種類や舗装厚によっては、  
地表から1 m以深で空洞が形成・発達した際、その時点の地中レーダーによる空間測定では  
空洞の存在を示す双曲線状の信号が現れず、空洞の探知が困難である

# 空洞発達の早期評価・同定手法に関する知見

コンクリート版厚 0.1 m

アスファルト混合物厚 0.2 m

実験前

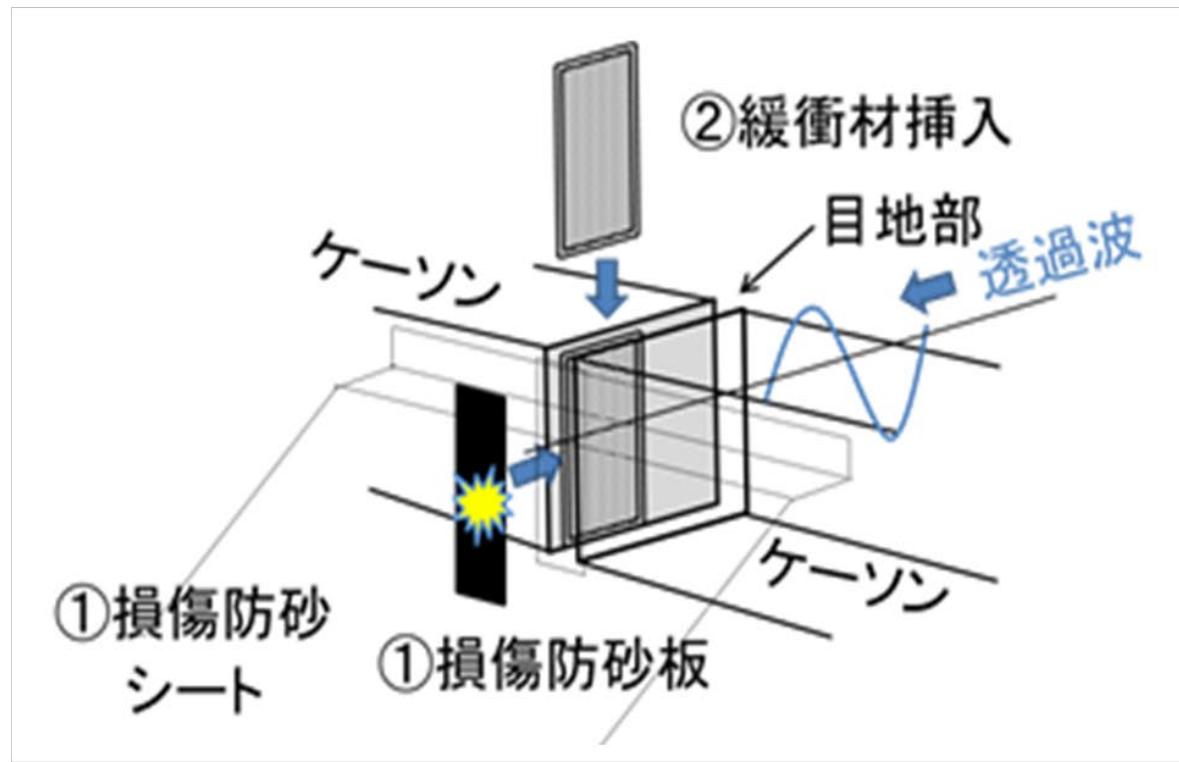


地中レーダー探査結果を時系列的に比較し、信号の変化を捉えることで、

一般に、空洞の同定が困難となる地下1 m以深で空洞発達を早期に探知評価しうる

# 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)

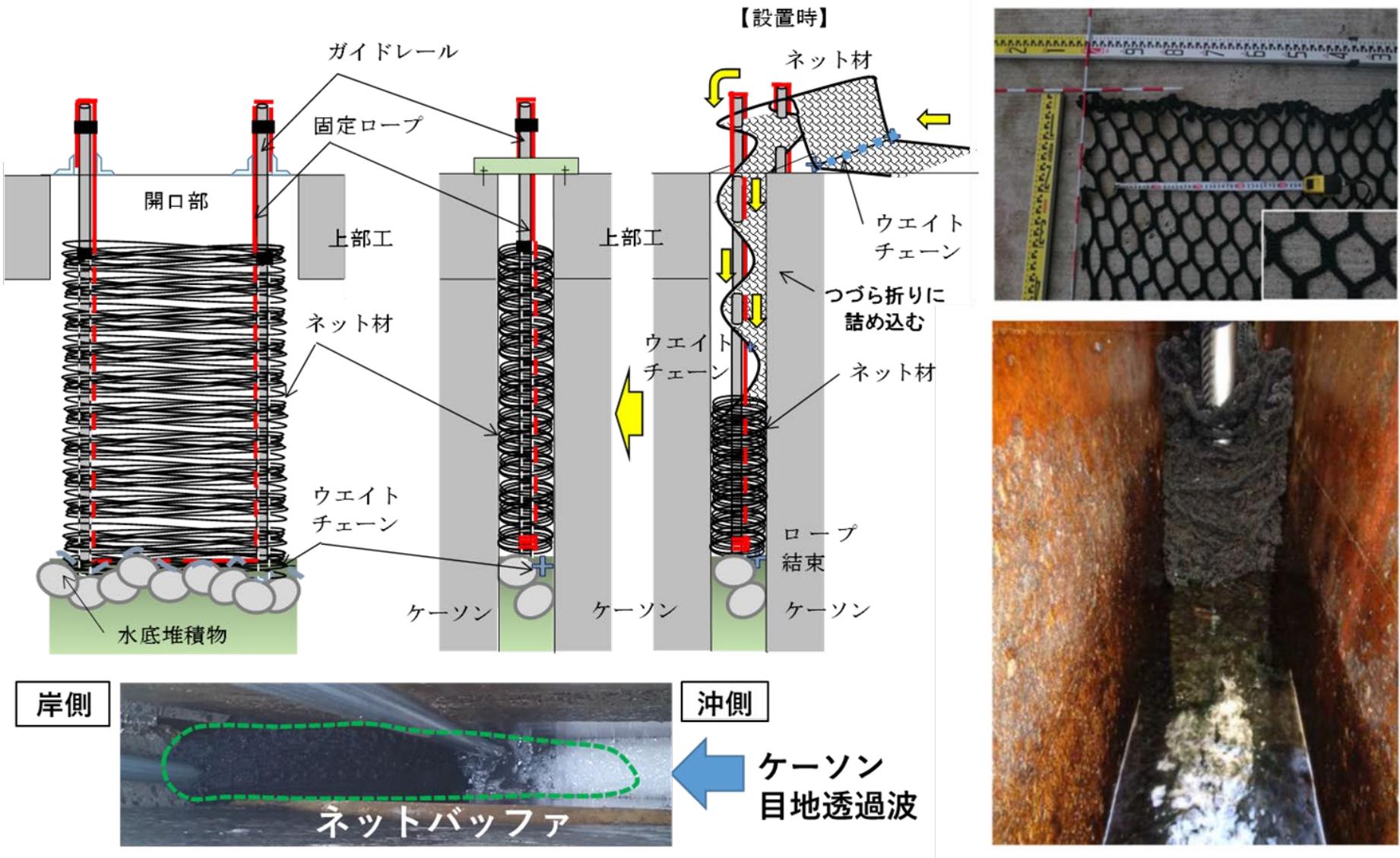


ケーソン目地透過波低減法の概念図(右写真は適用事例)

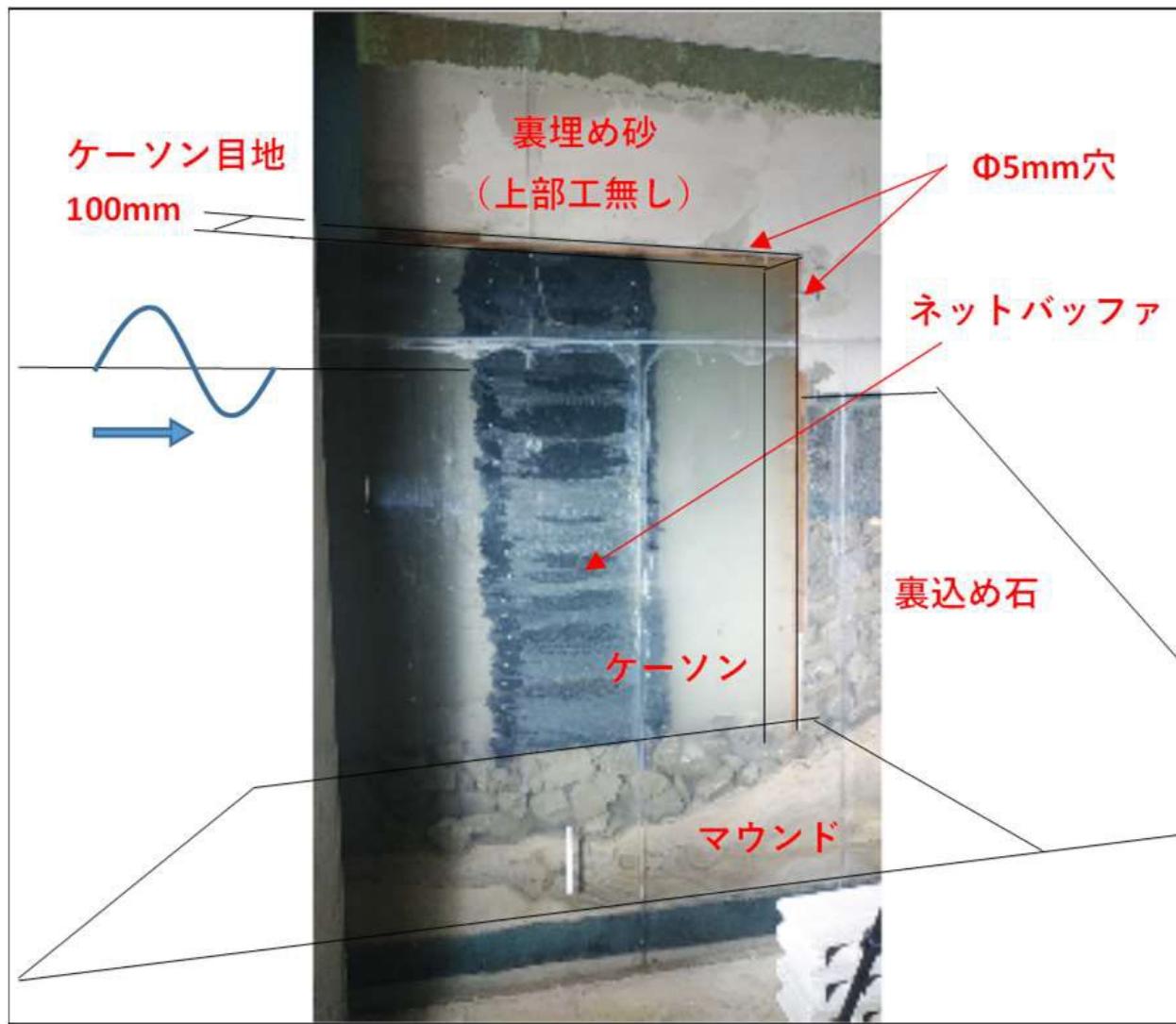


## 土木学会技術開発賞・国土技術開発賞・インフラメンテナンス大賞: 基準施行

「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」



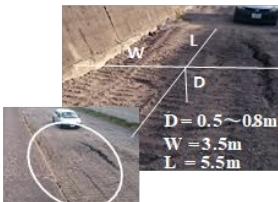
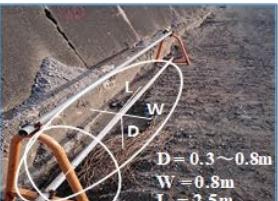
# 土木学会ホームページより



# 現地の1/4 実験模型による ケーソン目地透過波抑制状況の動画

# 経年的な陥没抑制効果

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	2025.01	
		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84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	2025.01	
		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84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	2025.01	
	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84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

# 内容

- ・ 吸い出し・陥没抑止対策の基準(R4施行)
- ・ 臨海部の多様な外力:地震・高波・高潮・流れ・越流・降雨下の吸い出し・陥没抑止対策の体系化
- ・ 舗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
- ・ 既設・老朽化施設の長寿命化対策に関する知見