

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
- 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

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"> 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/Ziems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	<ul style="list-style-type: none"> 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/Ziems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	<ul style="list-style-type: none"> 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

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

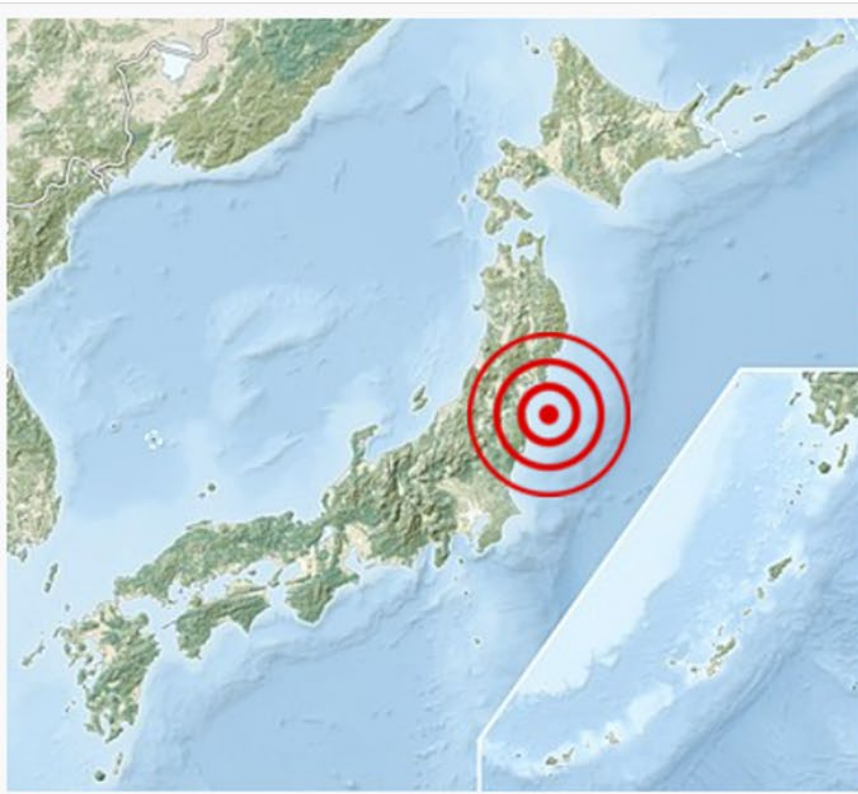


茨城、2017



国内外の吸い出し・陥没事例

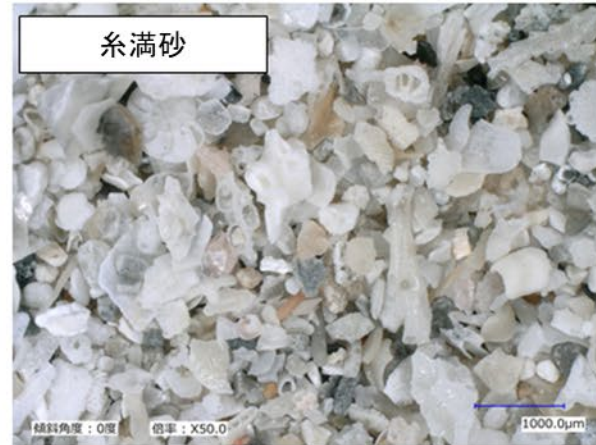
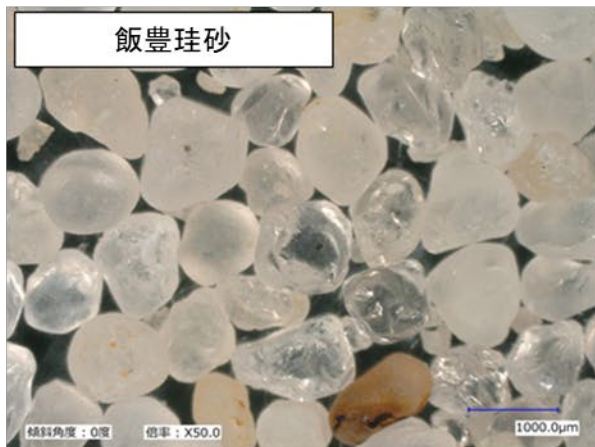
地震による大規模な吸い出し・陥没事例



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

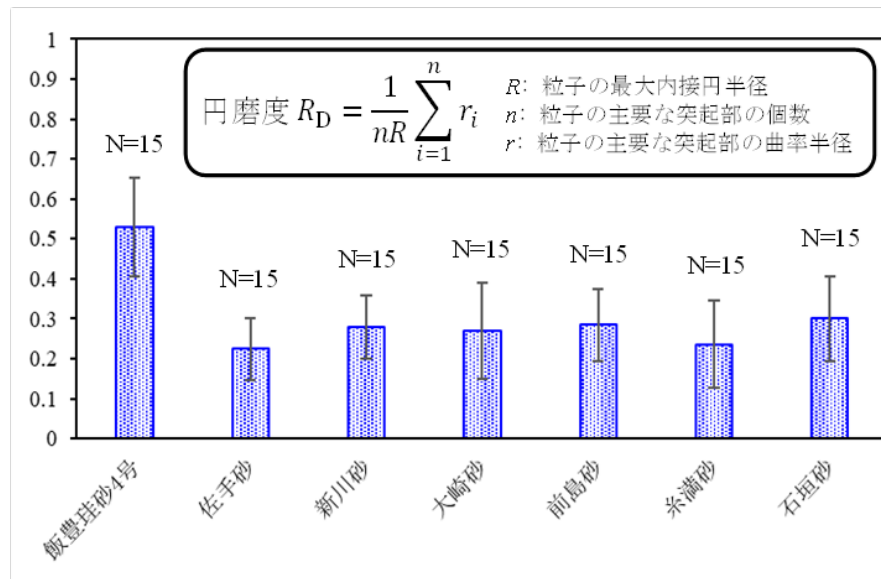
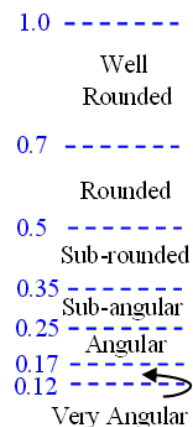
砂の粒子形状の影響



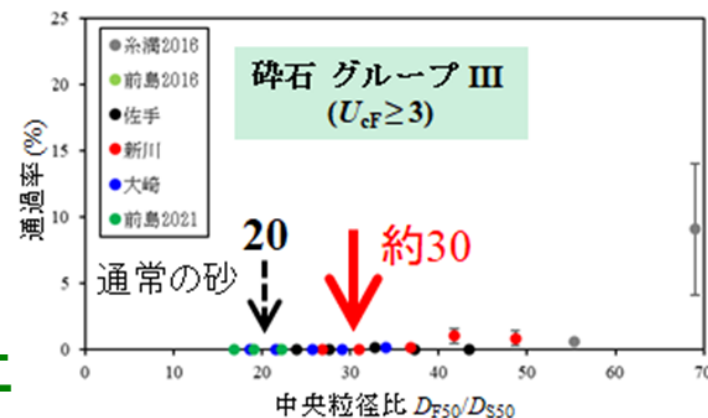
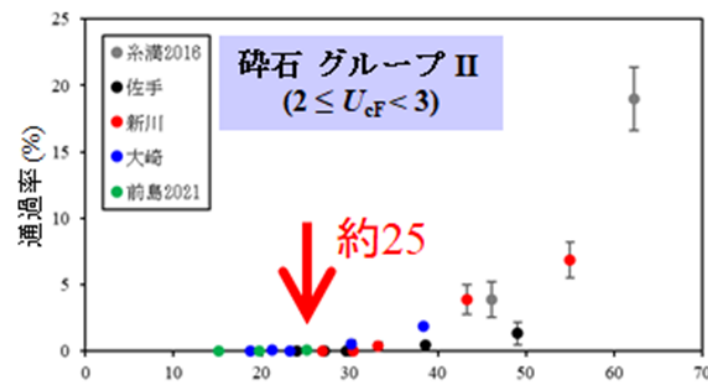
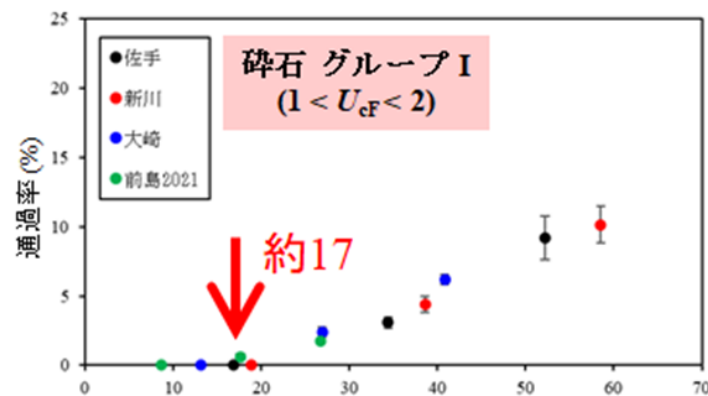
海砂は貝殻及び珊瑚礫成分を多く含有する

吸い出し抑止性能に及ぼす粒子形状の影響

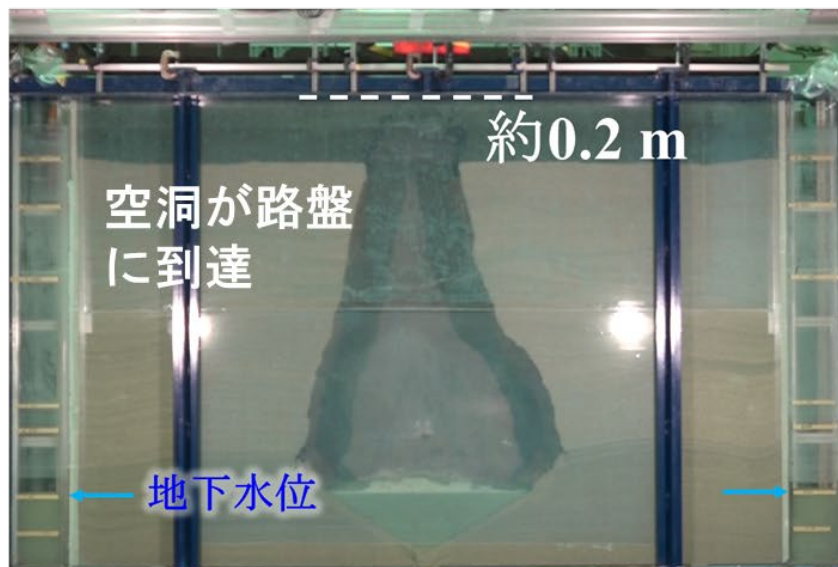
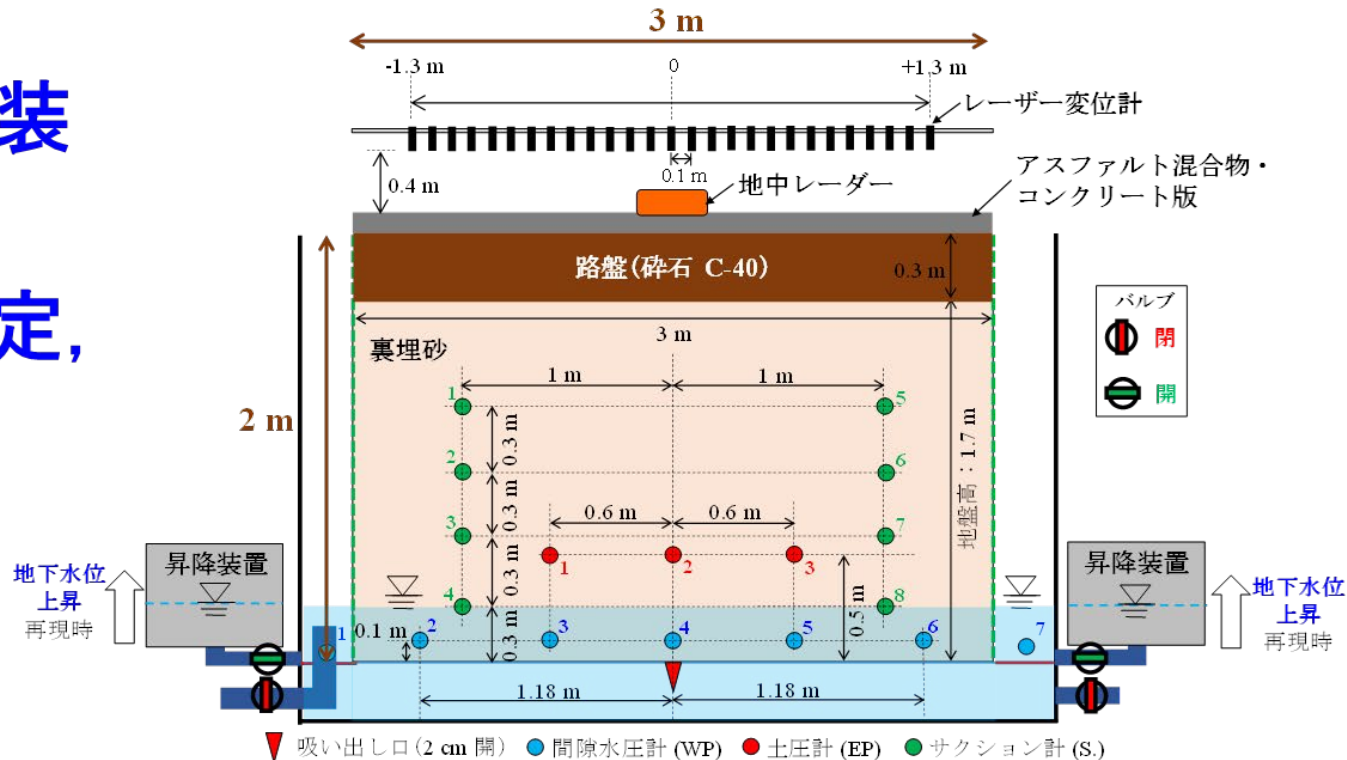
円磨度 (Powers, 1953)



- 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
- 吸い出し抑止性能は、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

A
(実験前)

B
(実験開始から940秒後)

C
(実験開始から4570秒後)

D
(実験開始から5790秒後)

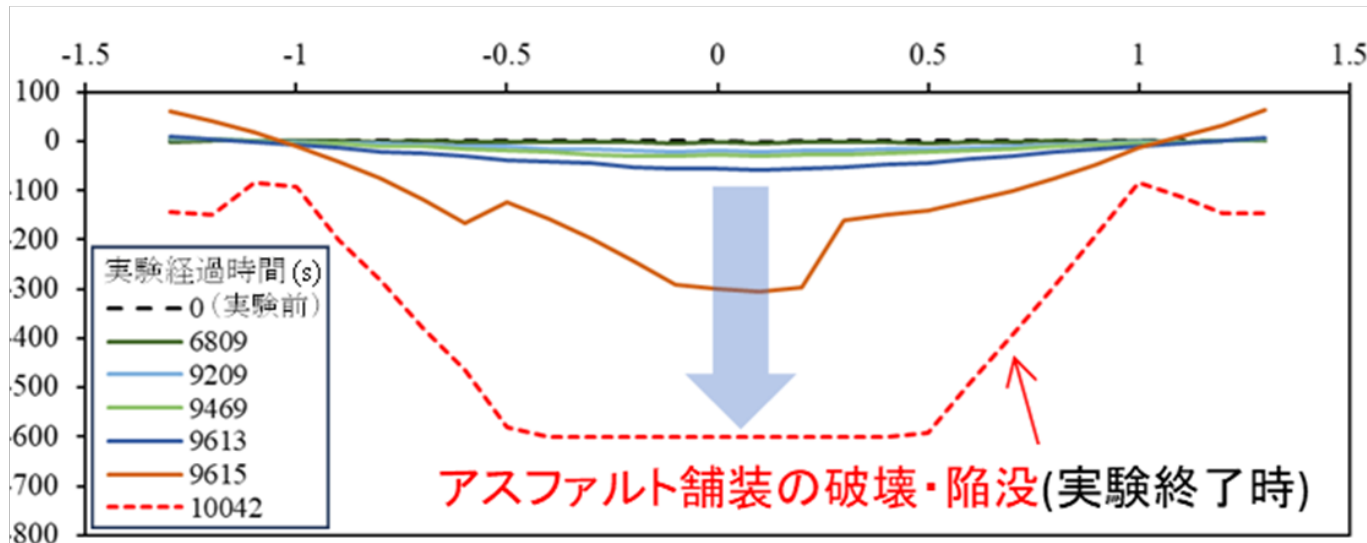
E
(実験終了時)



アスファルト舗装陥没

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

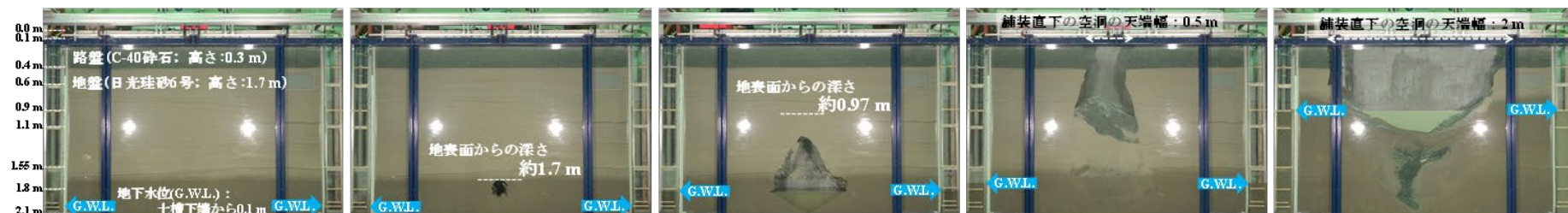
A (実験前)

B

C

D

E (実験終了後)



アスファルト混合物厚0.2 m

A (実験前)

B

C

D

E (実験終了後)



コンクリート版厚0.2 m

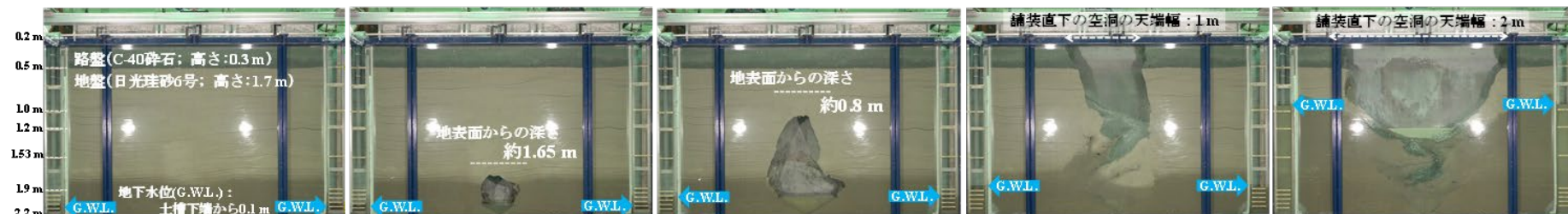
A (実験前)

B

C

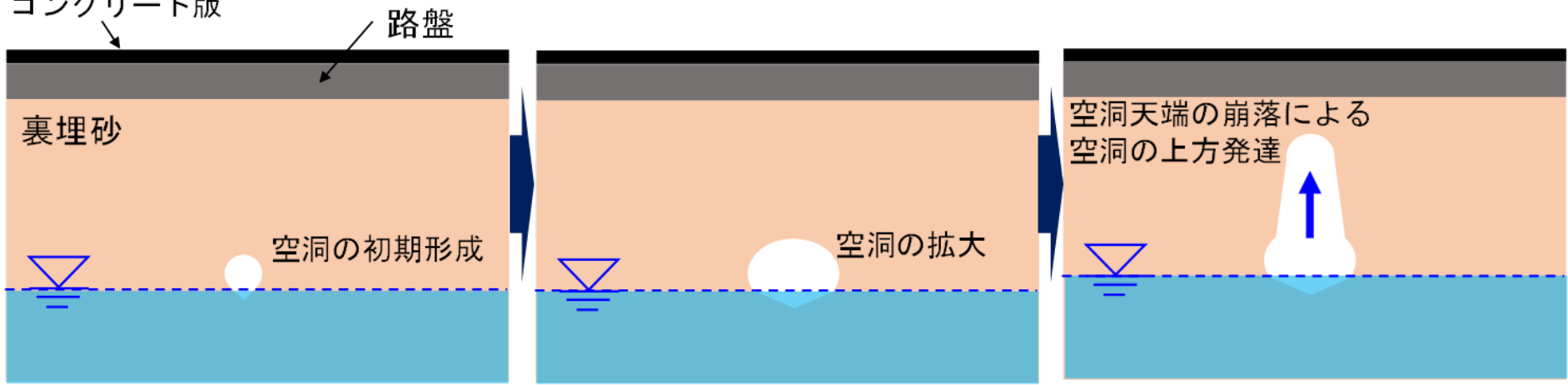
D

E (実験終了後)

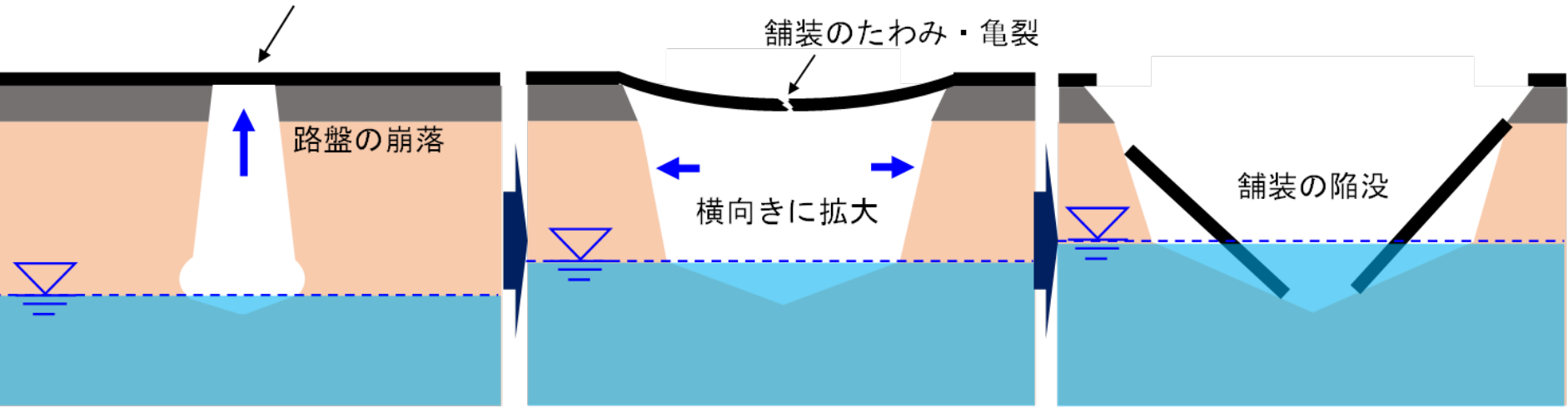


舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程

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

A
(実験前)

B
(実験開始から940秒後)

C
(実験開始から4570秒後)

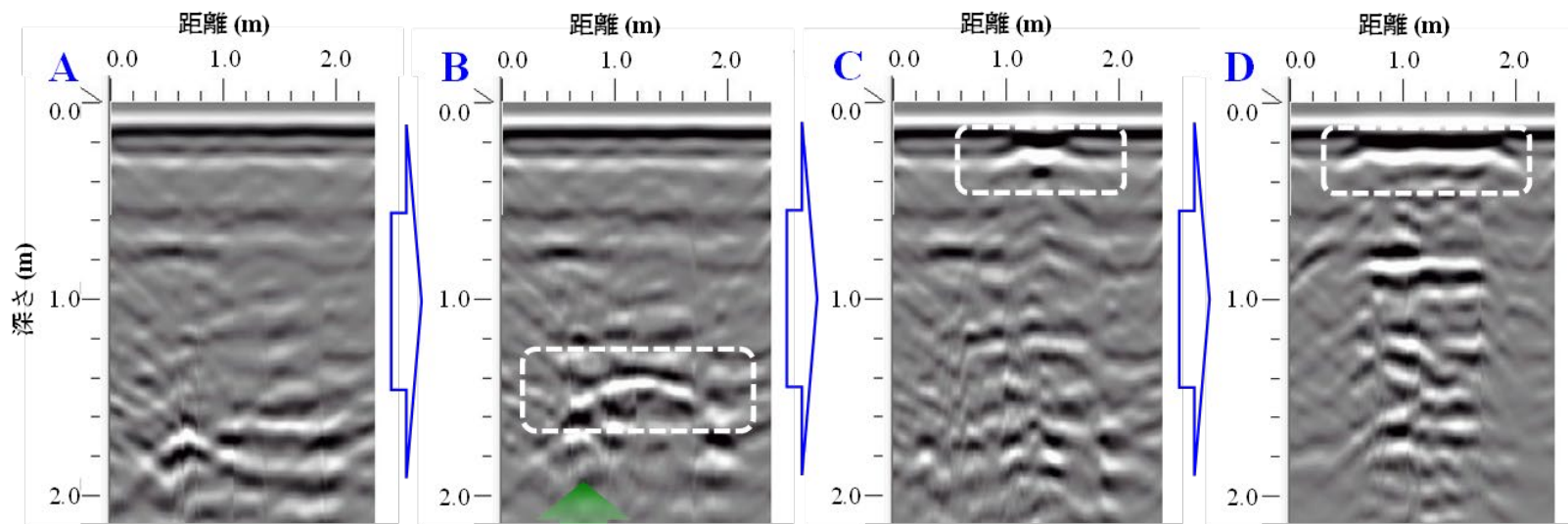
D
(実験開始から5790秒後)

E
(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

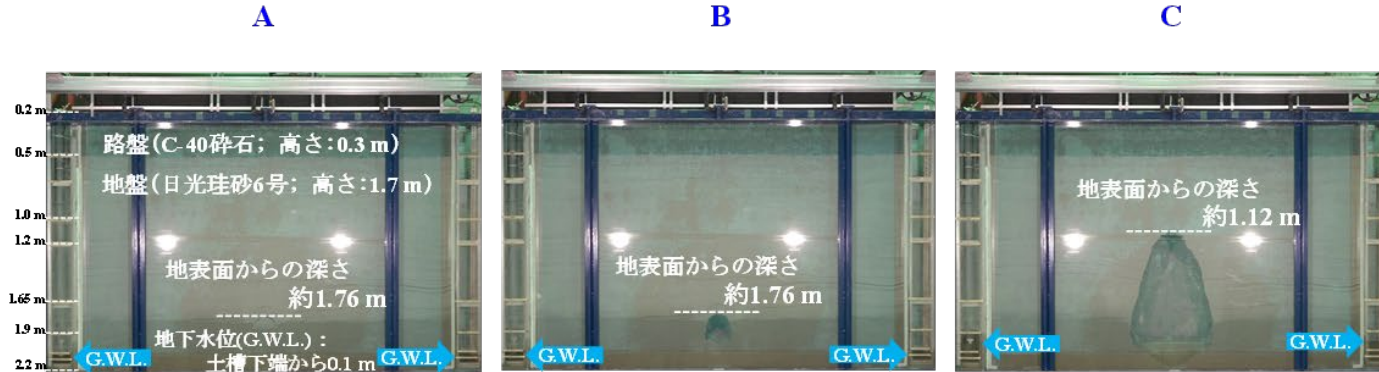


空洞の天端の深さが地表面から約1.4 mの時点で、
初めて空洞を表す**双曲線状**の信号検出

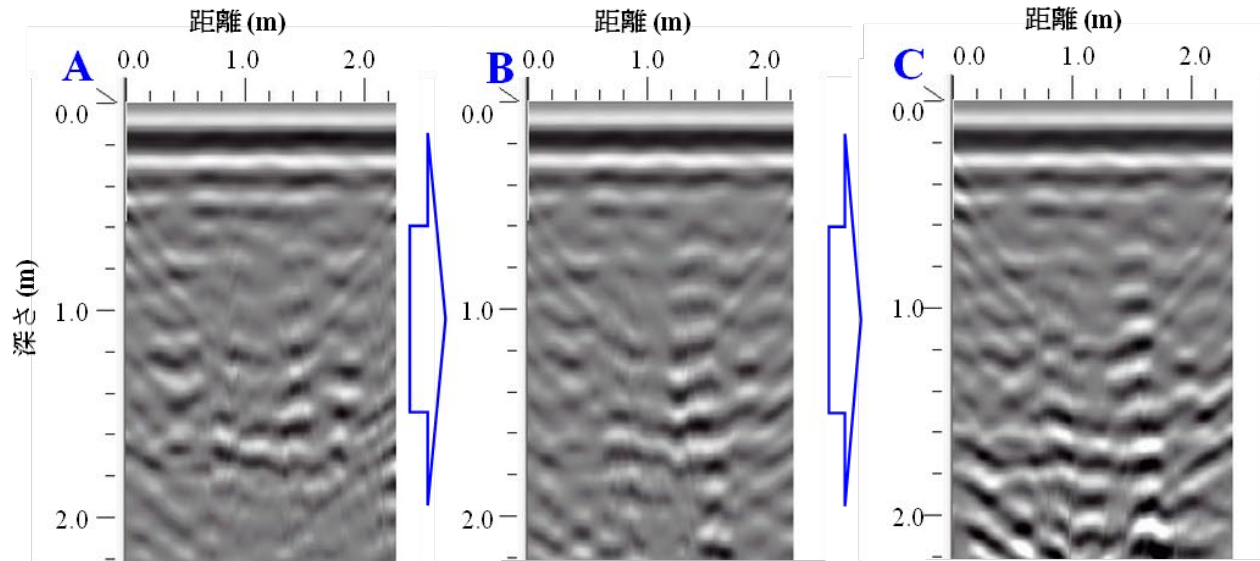
舗装直下の空洞が**左右に拡大した際**、
空洞天端の位置・範囲同定可能

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

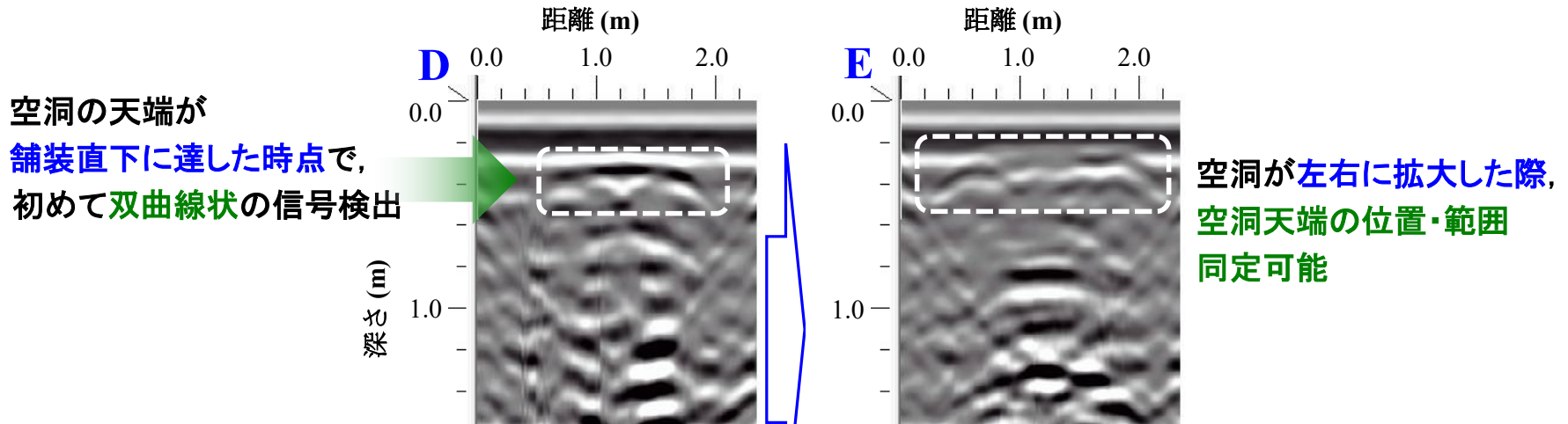
D

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

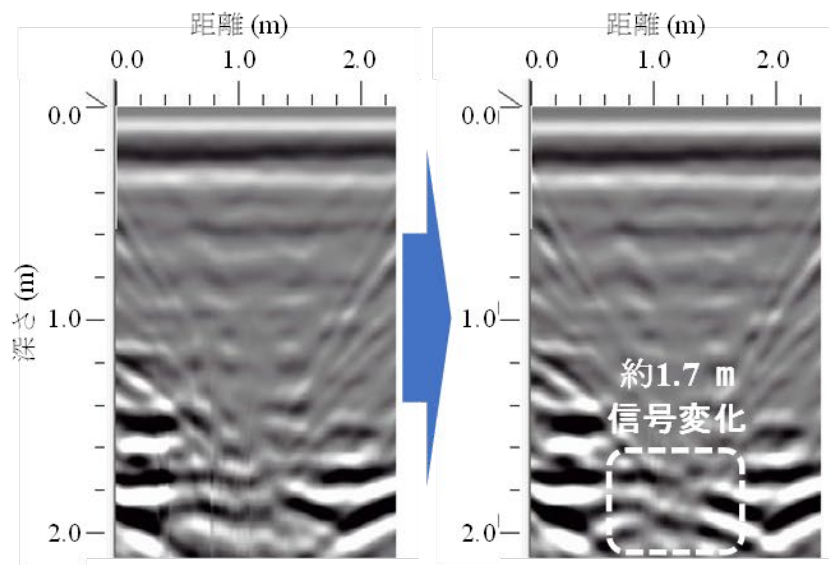
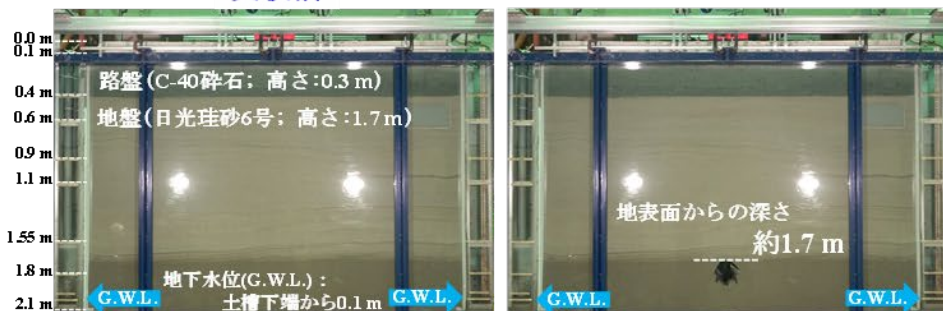


舗装の種類や舗装厚によっては、
地表から1 m以深で空洞が形成・発達した際、その時点の地中レーダーによる空間測定では
空洞の存在を示す双曲線状の信号が現れず、空洞の探知が困難である

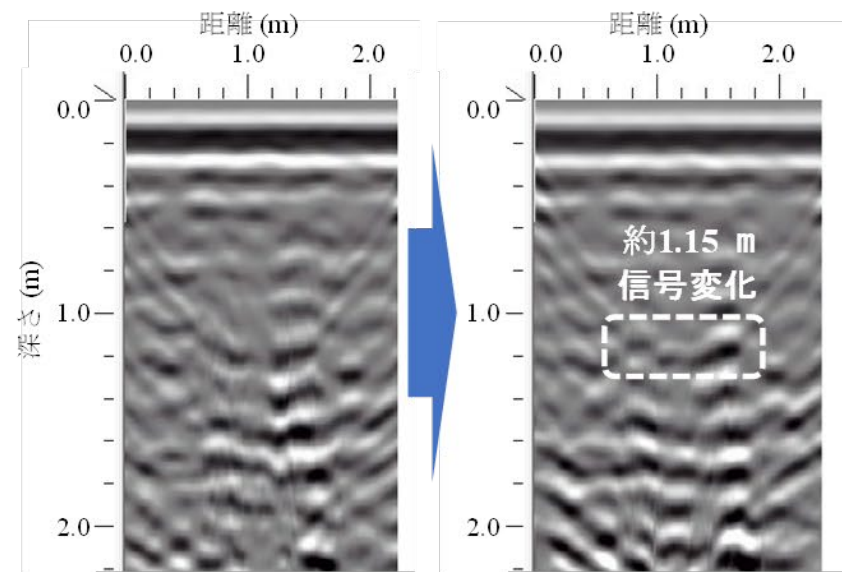
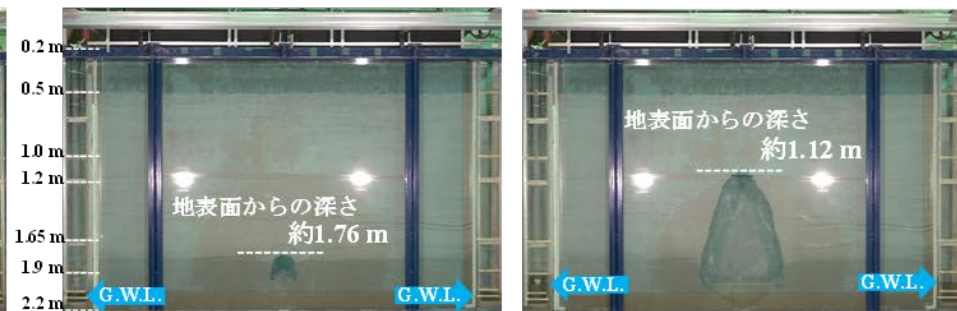
空洞発達の早期評価・同定手法に関する知見

コンクリート版厚 0.1 m

実験前



アスファルト混合物厚 0.2 m

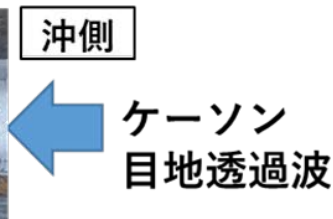
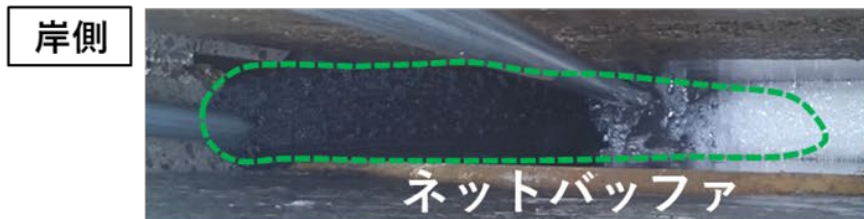
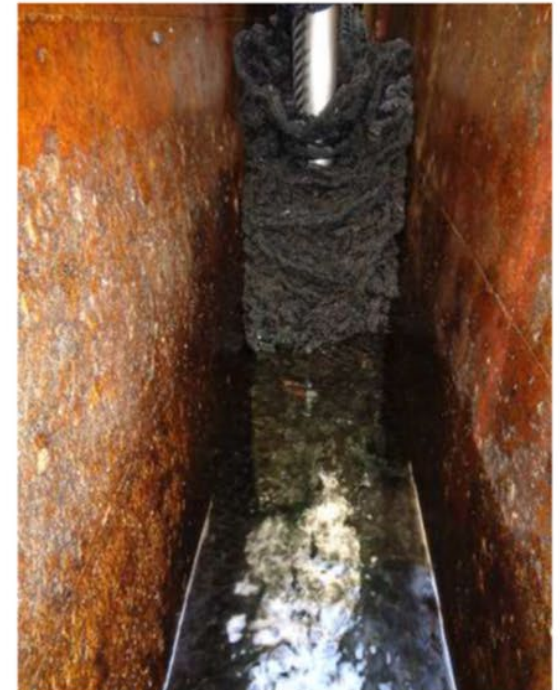
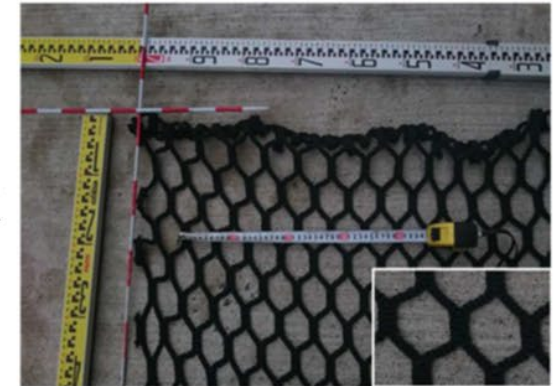
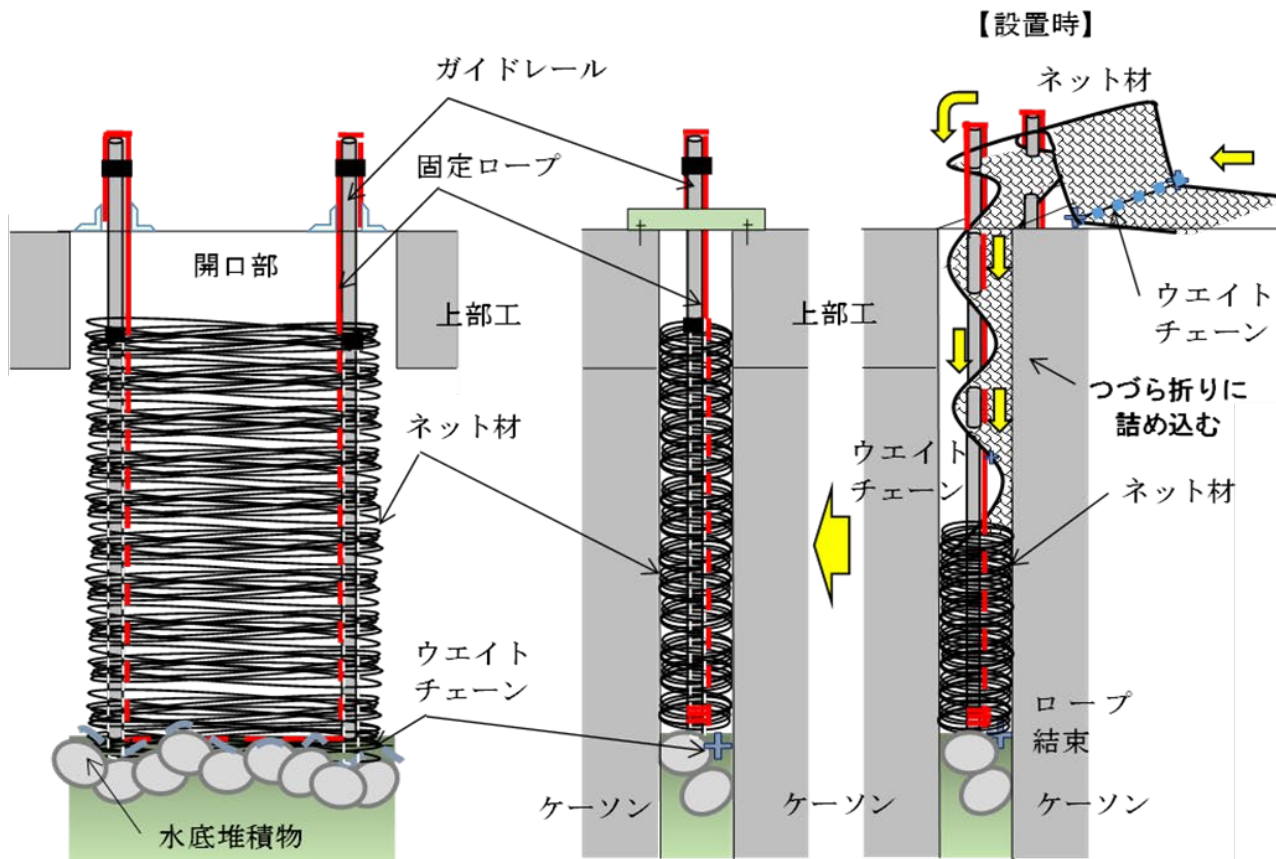


地中レーダー探査結果を時系列的に比較し、信号の変化を捉えることで、
一般に、空洞の同定が困難となる地下1 m以深で空洞発達を早期に探知評価しうる

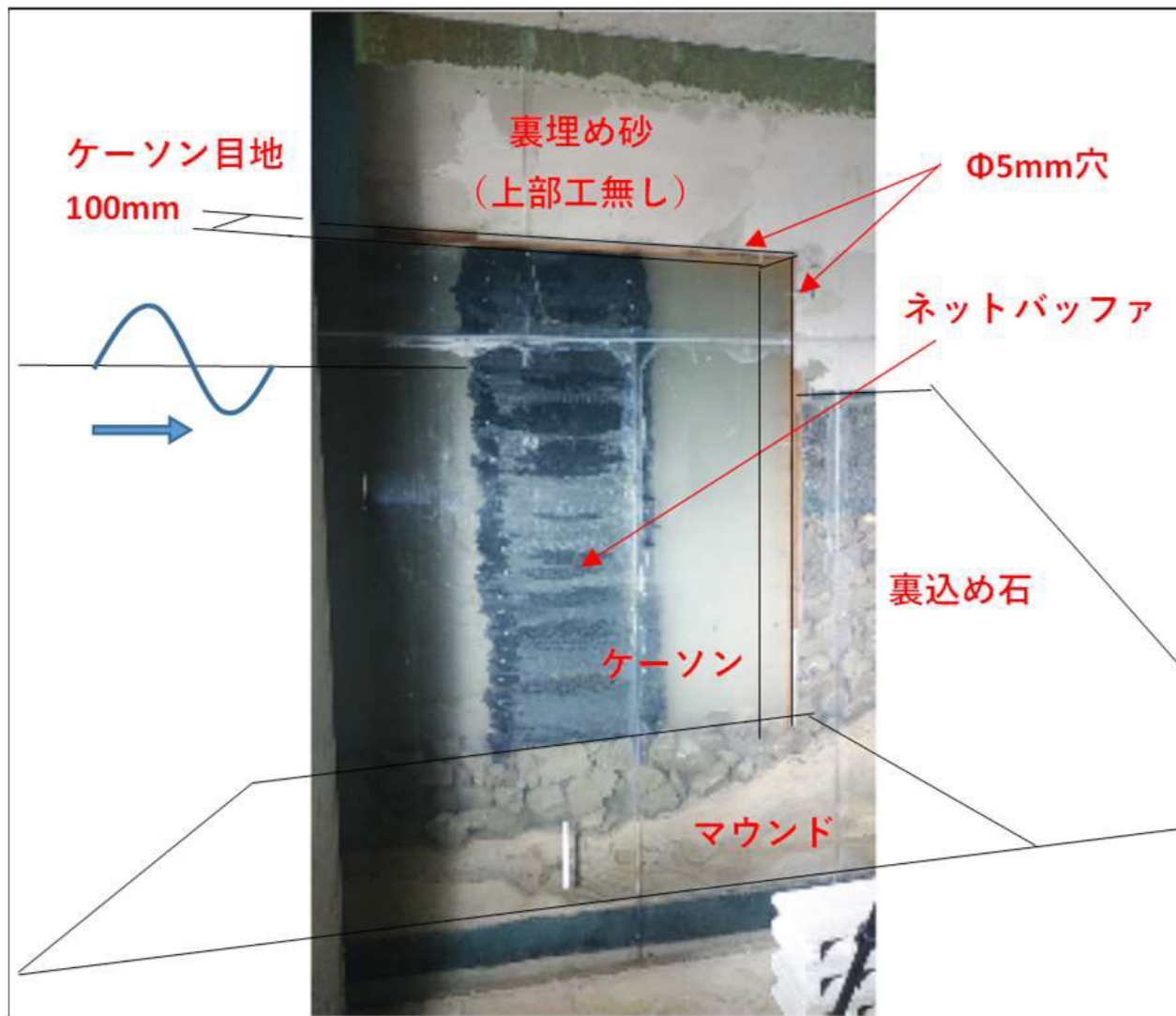
ケーソン目地透過波低減法（ネットバッファ工法）



「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



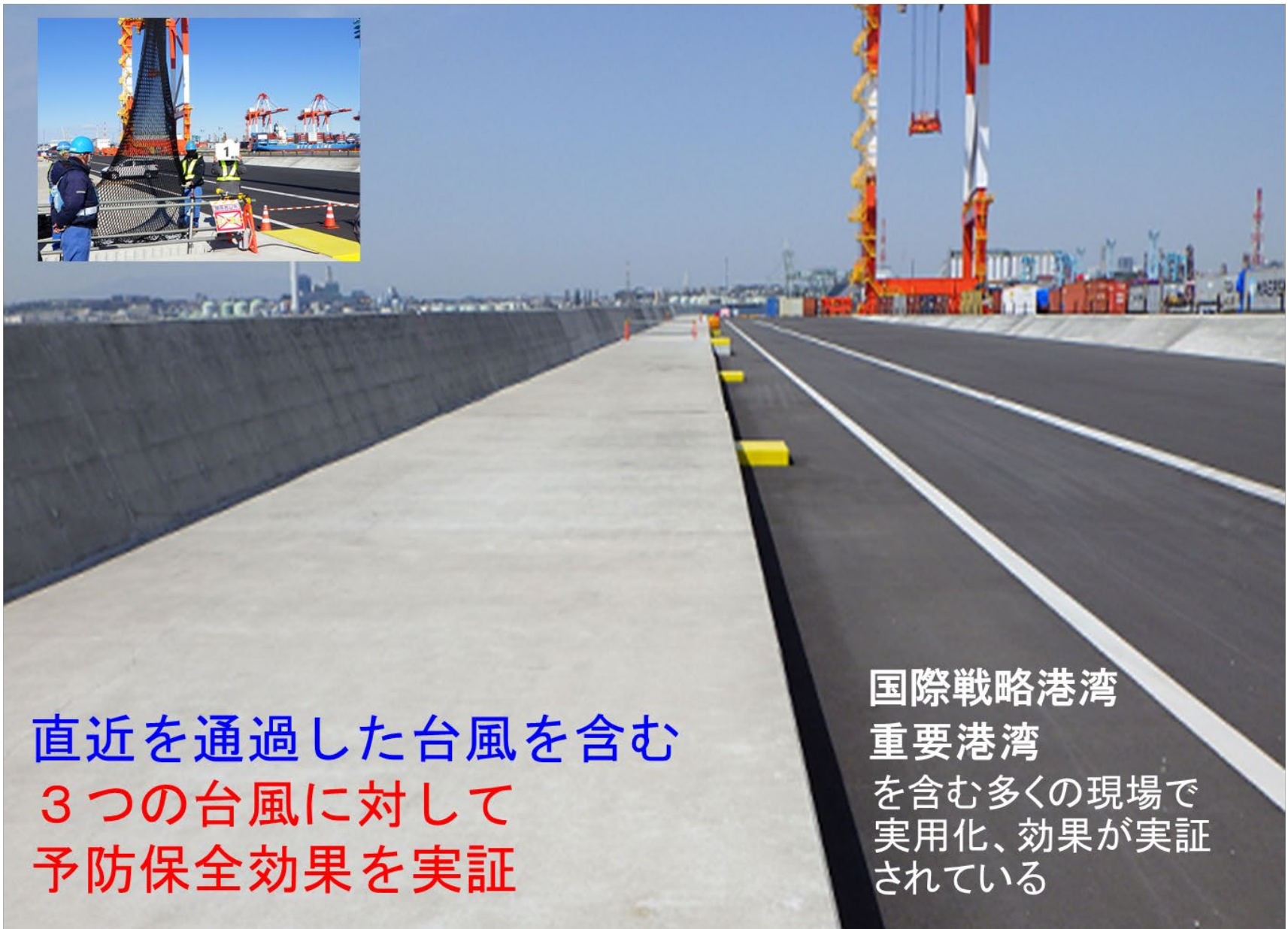
現地の1/4 実験模型による ケーソン目地透過波抑制状況の動画

経年的な陥没抑止効果

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 防砂シート設置 埋戻し	補修後3か月 最大有義波高 5.40m 有義波周期 16.0sec	ネット材設置・波力測定 埋戻し	本技術適用後 84か月 最大有義波高 7.80m 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 防砂シート設置 埋戻し	補修後3か月 最大有義波高 5.40m 有義波周期 16.0sec	ネット材設置 埋戻し	本技術適用後 84か月 最大有義波高 7.80m 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 防砂シート設置 埋戻し	補修後3か月 最大有義波高 5.40m 有義波周期 16.0sec	ネット材設置 埋戻し	本技術適用後 84か月 最大有義波高 7.80m 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