

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1419 September 2024

臨海部舗装直下地盤の吸い出し・空洞形成・陥没過程の実大
実験と地中レーダーによる空洞発達の早期評価・同定手法

梁 順普, 佐々 真志, 工代 健太, 和田 優希

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	2
1. 序論	4
2. 臨海部の舗装直下地盤における吸い出し被害の事例	4
3. 地中レーダー探査の測定原理	5
4. 大型吸い出し可視化実験	6
4.1 はじめに	6
4.2 大型吸い出し可視化実験装置の概要	6
4.3 大型吸い出し可視化実験の概要	7
4.4 大型吸い出し可視化実験における地中レーダー探査方法	8
5. 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	15
5.1 はじめに	15
5.2 大型吸い出し可視化実験結果及び考察	15
5.3 まとめ	22
6. 舗装直下地盤の空洞形成・発達・陥没過程の地中レーダーによる同定	22
6.1 はじめに	22
6.2 地中レーダーによる空洞探知精度	22
6.3 地中レーダーによる空洞の早期評価・同定手法	23
6.4 まとめ	27
7. 結論	27
7.1 舗装直下地盤の吸い出し，空洞形成・発達及び地盤の陥没過程	27
7.2 地中レーダーによる舗装直下地盤の空洞発達の探知精度及び早期評価・同定手法	28
8. あとがき	28
謝辞	28
参考文献	28

Prototype-scale experiments on the processes of internal erosion, cavity formation, and collapse under pavement at the waterfront and a method for evaluating and identifying cavity development at an early stage using ground-penetrating radar

Soonbo YANG*
Shinji SASSA**
Kenta KUDAI***
Yuki WADA****

Synopsis

Cavity collapse caused by internal erosion of backfilling sand has frequently occurred at the backsides of coastal structures such as seawalls and quaywalls worldwide. To prevent such internal erosion-induced damage, it is crucial to detect cavities under the pavement at an early stage. In this study, based on the above background, a series of prototype-scale experiments were conducted to clarify the processes related to the internal erosion-induced damage under asphalt and concrete pavements, to investigate the effects of both pavement types and thickness on the accuracy of cavity detection using ground-penetrating radar (GPR), and to establish an early evaluation and identification method for cavities under the pavement using GPR. The principal findings and conclusions obtained through this study are as follows:

1) The processes and mechanisms related to internal erosion-induced damage, including cavity formation, development, and collapse under asphalt and concrete pavements, were clarified. 2) The processes of internal erosion-induced cavity formation and development and roadbed collapse are mainly influenced by the groundwater level and are not affected by the type or thickness of the pavement. However, the displacement and destruction of the pavement accompanying cavity development varies significantly with the type and thickness of the pavement. 3) The type and thickness of the pavement greatly affected the detectable depth of the cavity using GPR. It was difficult to detect cavities when they were formed and developed deeper than 1 m below the pavement surface, depending on the type and thickness of the pavement. 4) It was possible to accurately detect and identify the depth of cavity development at an early stage, specifically from 1.0 m or deeper below the pavement, by comparing and verifying the obtained GPR signal patterns at a certain periodic interval under the pavement.

Key Words: internal erosion, cavity, collapse, pavement, ground-penetrating radar

* Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

** Head of Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

*** Senior Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

**** Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5054 Fax : +81-46-844-4577 e-mail : yan-s2@p.mpat.go.jp

臨海部舗装直下地盤の吸い出し・空洞形成・陥没過程の実大 実験と地中レーダーによる空洞発達の早期評価・同定手法

梁 順普*・佐々 真志**・工代 健太***・和田 優希****

要 旨

護岸や岸壁等の港湾施設の背後地盤において、水理外力の継続的な作用により裏埋砂が吸い出され、それに伴う地盤内の空洞形成・発達及び陥没に代表される吸い出し被害が全国的な問題となっている。臨海部の舗装直下における吸い出しによる地盤の陥没を未然に防止するには、舗装直下の空洞を早期に探知することが重要である。そのためには、吸い出しによる空洞の生成・発達過程並びに地盤の陥没過程を、舗装を考慮した上で明らかにすると共に、舗装直下の空洞を早期に評価・同定しうる方法が必要である。本資料では、上述を背景として、アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤において、吸い出しによる空洞形成・発達及び地盤の陥没過程を再現し、舗装の種類や舗装厚が吸い出し災害の発生機序ならびに地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす影響を明らかにすると共に、地中レーダー探査による空洞の早期評価・同定手法を構築することを目的として、大型吸い出し可視化装置を用い、一連の実大規模の模型実験・分析を実施した。本研究において得られた主要な知見は、以下の通りである。

- 1) アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤における吸い出し、空洞形成・発達及び陥没過程並びにその機構を明らかにした。
- 2) 舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程は、主に地下水位に左右され、舗装の種類や舗装厚の影響を受けない。一方、舗装の種類や舗装厚により空洞発達に伴う舗装の破壊過程には大きな違いがある。
- 3) 舗装の種類や舗装厚は、地中レーダーの空洞可探深度に大きく影響し、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、その時点の測定では空洞の探知が困難になる。
- 4) 吸い出しがまだ生じていない又は進んでいない時点の地中レーダー探査結果との比較により、吸い出しによる空洞発達深度の早期評価・同定が可能である。

キーワード：吸い出し，空洞，陥没，舗装，地中レーダー

* 地盤研究領域 動土質研究グループ 専任研究員

** 地盤研究領域 動土質研究グループ長

*** 地盤研究領域 動土質研究グループ 主任研究官

**** 地盤研究領域 動土質研究グループ 研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5054 Fax：046-844-4577 e-mail：yan-s2@p.mpat.go.jp

1. 序論

護岸や岸壁などの港湾施設の背後地盤において、水理外力の継続的な作用により、防砂シートや防砂板の損傷などによる防砂機能の消失によって裏埋砂が吸い出され、地盤内に形成される空洞に起因する地盤の陥没（以下、吸い出し災害）が頻発し、全国的な問題となっている¹⁾。特に2001年には兵庫県明石市の大蔵海岸で同災害により尊い人命が失われており²⁾、その後も同様な被害が報告されていること³⁾から予防保全に資する吸い出し災害対策の重要性が高まっており⁴⁾⁻⁷⁾、実際、有効な対策技術が実用化されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。

これまでに多様な形式の護岸や岸壁を対象とした水理外力による裏埋砂の吸い出し機序を解明するための研究が活発になされてきており^{4), 11)-14)}、潮汐、風波等による様々な水理外力下において、吸い出し災害に至る空洞形成及び陥没は、地盤内に発達するサクションと密接な関係があることが筆者らの既往研究より明らかになってきている¹⁵⁾⁻²⁴⁾。また、サクションの動態が、水理外力を受ける飽和・不飽和地盤の間隙、剛性、硬さ等の力学的挙動に顕著な影響を及ぼしていることが知られている^{25), 26)}。

一方、臨海部の港湾施設周辺の吸い出しに関する既往の研究において、舗装を考慮した例はほぼ無く、臨海部の舗装直下地盤における吸い出し災害を未然に防止するには、舗装直下の空洞を早期に探知することが重要である。そのためには、吸い出しによる空洞の生成・発達並びに地盤の陥没過程を、舗装を考慮した上で明らかにする必要がある。

この際、空洞の探手法として、異なる比誘電率の媒質との境界面で反射・透過する性質を持つ電磁波を利用する地中レーダー探査法²⁷⁾が一般に用いられている。しかし、舗装及び裏埋め土砂の均質性、粒度組成、粒子形状、間隙率、含水状態及び間隙水の塩分濃度などによって電磁波が散乱、又は、著しく減衰するため、地下1 m以深で形成された空洞の探知が困難とされており^{28), 29)}、吸い出しによる空洞の形成・発達を見落とす可能性がある。

本研究では、アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤において吸い出しによる空洞形成・発達及び地盤の陥没過程を一連の大型実験手法³⁰⁾により再現し、同過程及び機構を明らかにするとともに、舗装の種類や舗装厚が吸い出し災害の発生機序及び地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。さらに、これらの知見に基づき、地中レーダー探査による空洞の早期評価・同定手法を構築することを目的としている。

本資料の構成は、以下の通りである。2章では臨海部の舗装直下地盤における吸い出し災害の事例を取り上げ、舗装直下で生じる空洞の危険性及び舗装を考慮した吸い出しによる空洞の形成・発達過程及び地盤の陥没過程解明の必要性について述べる。3章では、地中レーダー探査の測定原理について説明する。4章では、本研究で行った大型吸い出し可視化実験の概要について記す。5章及び6章では大型吸い出し可視化実験から得られた結果について記述・考察する。具体的には、5章では、アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤の吸い出しによる空洞の形成・発達過程及び地盤の陥没過程を提示する。6章では、アスファルト及びコンクリート舗装の種類や舗装厚が地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす影響ならびに地中レーダー探査による空洞の早期評価・同定手法について記す。7章では、本資料で得られた主な知見とその有効性についてまとめる。

2. 臨海部の舗装直下地盤における吸い出し災害の事例

本章では、臨海部の舗装直下地盤における吸い出し災害の事例を取り上げて、舗装を考慮した上で吸い出しによる空洞の形成・発達及び地盤の陥没過程を明らかにする必要性について説明する。

図-2.1(a)は、2010年茨城県鹿島港の南公共埠頭のA岸壁の背後地盤のアスファルト舗装に、直径約4 m、深さ約1 mの陥没が発生した例である³¹⁾。同図の(b)は、2018年新潟県聖籠町の新潟東港で、臨港道路が長さ約12 m、幅約5 m、深さ約3.5 mにわたって陥没し、トレーラーの荷台が落ちる事故が発生した例である³²⁾。次に、同図の(c)は、2023年兵庫県南あわじ市で県道が長さ約5 m、幅約4 m、深さ約3.5 mにわたって陥没した例であり、この際、走行中だった軽自動車転落した³³⁾。最後に、同図の(d)は、防波護岸背後のアスファルト舗装に直径45 cmの陥没が出来た例であり、舗装の下には直径が約3~5 m、深さが約1.5 mの大きな空洞が発生していた¹⁾。

上述の事例から、舗装の陥没が生じた際には、舗装直下地盤で空洞の巨大化が著しく進んでおり、それに伴って陥没の規模も大きく、車の転落など事故をもたらしていることが分かる。舗装は、裏埋め土砂より剛性が高いことから、地表面では舗装直下の空洞がある以上の規模に発達するまで空洞の存在を認知することが困難であり、さらに、アスファルト舗装より剛性が高いコンクリート舗装では、当該舗装の陥没に至るまで空洞の巨大化が著しく進行する可能性が高いことから多大な被害をもたらす



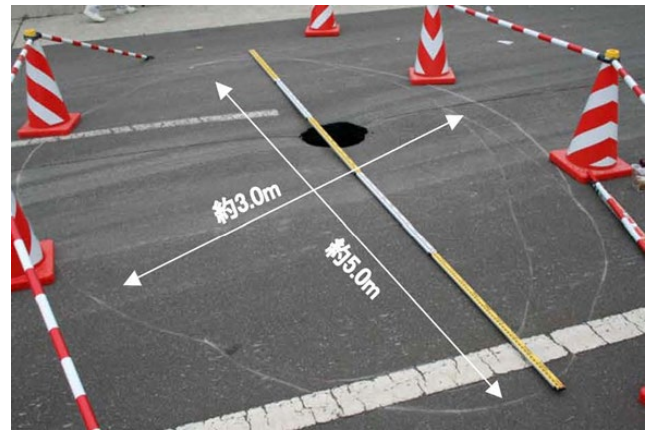
(a) 茨城県鹿島港(2010年)³¹⁾



(b) 新潟県新潟東港(2018年)³²⁾



(c) 兵庫県南あわじ市(2023年)³³⁾



(d) 菅原ら¹⁾

図-2.1 臨海部の舗装直下地盤における吸い出し災害の事例

可能性が高いと考えられる。

このような背景から、アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤における吸い出し・空洞形成・発達及び地盤の陥没過程並びにその機構を解明するとともに、舗装の種類や舗装厚が吸い出し災害の発生機序及び地中レーダー探査法の空洞探知精度に及ぼす影響を明らかにする必要がある。さらに、地中レーダーによる空洞発達の早期評価・同定手法を構築する必要がある。

3. 地中レーダー探査の測定原理

地中レーダー探査は、図-3.1 に示すように電磁波を放射・受信するアンテナ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、地中の空洞・埋設物などの異常個所を探知する非破壊探査方法である^{27), 34)}。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。

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²⁷⁾ため(表-3.1)、空洞の天端からの反射波は放射した電磁波と同位相を持つ特性(正極性)を有し²⁷⁾、アンテナを移動させながら上述の反射波を受信することで空洞の存在を示す双曲線状の信号を抽出することが可能である³⁴⁾。

媒質の中を進行する電磁波の速度は、その媒質の電気的性質、即ち誘電率、導電率及び透磁率によって決まる²⁷⁾。しかし、地中レーダー探査では10 MHz以上の高い周波数領域で計測が行われるため³⁵⁾、電磁波の速度は媒質の比誘電率と透磁率によって次式で表される^{27), 34)}。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで、 V ：媒質中の電磁波伝播速度(m/s)、 C ：真空中の電磁波伝播速度(3×10^8 m/s)、 μ ：媒質の透磁率、 ϵ_r ：媒質の比誘電率である。土のような非磁性体では、透磁率はほぼ1であるので、地中の電磁波伝播速度は媒質の比誘電率に支配される。そして、地中の異常箇所までの距離は次の式で求められる^{27), 34)}。

$$D = \frac{T \cdot V}{2} = \frac{T \cdot C}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

ここで、 D ：異常箇所までの距離(m)、 T ：放射した電磁波が異常箇所まで反射して戻ってくる時間(s)である。

主な物質の比誘電率と導電率を表-3.1に示す。同表から分かるように、比誘電率と導電率は、物質の種類及び当該物質の密度、含水比、周波数、温度、塩分濃度、圧力、共用期間などによって変わり、地盤内の空洞・埋設物などの異常箇所までの距離を高精度で推定するためには、地中レーダー探査を行う際、地盤の比誘電率を現地の状況に応じて慎重に決める必要がある。

地中レーダーの探査可能深度は、式(3)で表される²⁷⁾。

$$D_p = \begin{cases} 1510 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} & \text{for } \omega\epsilon \ll \sigma \\ 0.0159 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} & \text{for } \omega\epsilon \gg \sigma \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 D_p ：探査可能深度、 σ ：媒質の導電率、 f ：電磁波の周波数(Hz)、 ω ：角周波数である。式(3)から分かるように、地中レーダーの探査可能深度は電磁波の周波数の影響を強く受け、当該周波数が高くなるほど探査可能深度は浅くなる。上述のように、地中レーダー探査では高い周波数領域で計測が行われるため³⁵⁾、地中レーダーの探査可能深度は一般的に浅く、媒質の導電率が低い場合は($\omega\epsilon \gg \sigma$)、媒質の導電率及び比誘電率の影響を強く受ける。

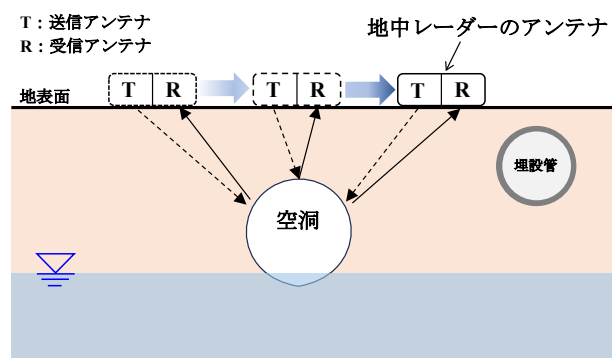


図-3.1 地中レーダー探査の模式図

4. 大型吸い出し可視化実験

4.1 はじめに

本章では、本研究で行った大型吸い出し可視化実験について述べる。具体的には、当該実験で用いた大型吸い出し可視化装置及び材料と共に、当該実験の条件、手順及び当該実験で行った地中レーダー探査方法について説明する。

4.2 大型吸い出し可視化実験装置の概要

アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤の吸い出しによる空洞の形成・発達及び陥没過程の経時的変化を同定するために用いた大型吸い出し可視化装置の前面写真を図-4.1(a)に示す。当該装置の大きさは、高さ2.8 m、幅3.5 m、奥行き0.4 mである。土槽の前面はガラス製になっており、吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程を実大規模で観察することが可能である。土槽内部の架台には、最大8 cmまで開放可能なスリット(以下、吸い出

表-3.1 主な物質の比誘電率と導電率³⁶⁾

物質	比誘電率 ϵ_r	導電率 σ (mS/m)
空気	1	0
淡水 (f, t)	81	0.1 ~ 30
海水 (f, t, s)	70	400
砂(乾燥) (d)	4 ~ 6	0.0001 ~ 1
砂(飽和) (d, w, f)	25	0.1 ~ 1
シルト(飽和) (d, w, f)	10	1 ~ 10
粘土(飽和) (d, w, f)	8 ~ 12	100 ~ 1000
永久凍土 (d, t, p)	4 ~ 8	0.01 ~ 10
花崗岩(乾燥)	5	0.00001
石灰岩(乾燥)	7 ~ 9	0.000001
石英	4	0.15
石炭 (d, w, f, ash content)	4 ~ 5	0.15 ~ 0.134
コンクリート (d, f, age)	5 ~ 10	
アスファルト	3 ~ 5	
氷(淡水) (f, t)	4	0.1 ~ 10
氷(海水) (f, t, s)	4 ~ 12	
PVC, エポキシ, ポリエステル	3	0.173

d: 密度による関数

w: 含水比による関数

f: 周波数による関数

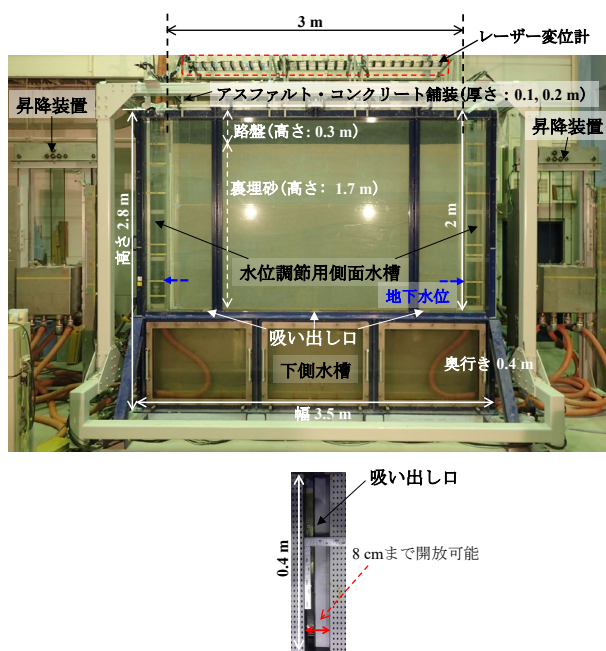
t: 温度による関数

s: 塩分濃度による関数

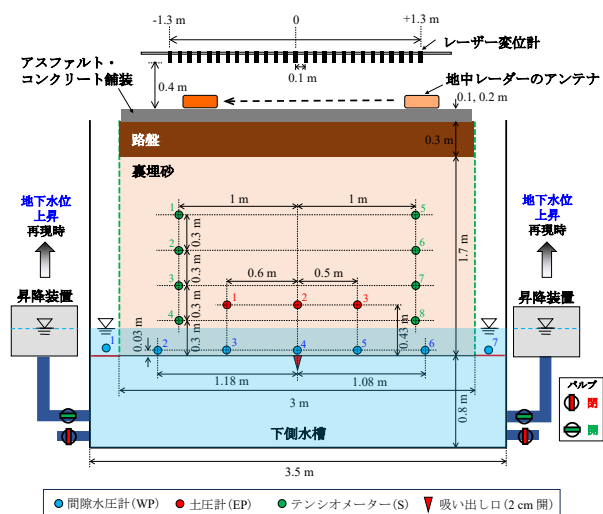
p: 圧力による関数

age: 共用期間による関数

し口)が3ヶ所に設けられており(図-4.1(a)), 任意の幅若しくは地点で吸い出しを発生させることができる。また, 架台の下側には吸い出された裏埋砂を貯めるための下側水槽があり, 土層の左右両側には地盤内の水位を調節するために設けられた幅0.25 mの側面水槽がある。土槽と左右両側の側面水槽及び下側水槽との間は透過境界となっており, 装置本体の左右に位置し, 側面・下側水槽と接続している2機の升降装置を昇降させることで土槽内の水位をコントロールし, 地盤に様々な水理外力(潮汐, 風波, 流れ, 越波, 地下水位の上昇等)を作用させること



(a) 大型吸い出し可視化装置の前面写真及び吸い出し口の平面写真



(b) 各計測器の位置及び地下水位上昇の再現方法

図-4.1 大型吸い出し可視化実験のレイアウト

ができる仕組みとなっている。

舗装上面から0.4 m上側には, 計45台のレーザー変位計(KEYENCE社, IL-600)を奥行方向に2列, 舗装中央から横方向に0.1 mごとに設置しており(図-4.1), 吸い出しによる空洞の発達に伴う舗装面の変位分布を多点同時観測することが可能である。

4.3 大型吸い出し可視化実験の概要

(1) 実験材料

本研究で行った大型可視化実験で用いた各材料について説明する。裏埋砂として日光珪砂6号, 路盤材としてC-40 砕石を用い, 裏埋砂, 路盤材の各層の高さは1.7 m, 0.3 mに設定した(図-4.1)。当該材料の粒径加積曲線と物性を図-4.2と表-4.1に各々示す。そして, 舗装材は, アスファルトとコンクリートを用い, 舗装(路盤層を除く)の厚さを0.1 m, 0.2 mに設定した(図-4.1; 表-4.2)。

(2) 実験条件

本研究で行った大型可視化実験の条件について説明する。図-4.1と表-4.2に各々示す当該実験のレイアウト及び実験ケースから分かるように, 本研究では, アスファ

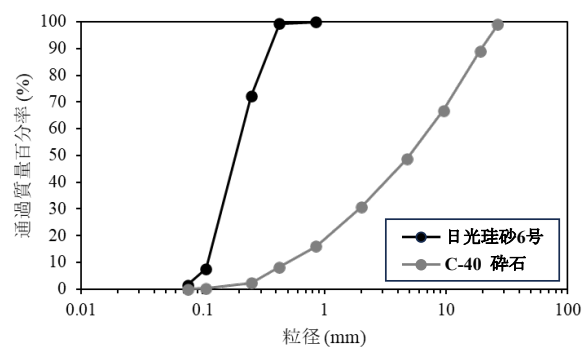


図-4.2 裏埋砂及び路盤材として用いた日光珪砂6号とC-40 砕石の粒径加積曲線

表-4.1 日光珪砂6号及びC-40 砕石の物性

実験材料	中央粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c
C-40 砕石(路盤材)	5.08	14.872
日光珪砂6号(裏埋砂)	0.201	2.002

表-4.2 大型吸い出し可視化実験ケース

ケース No.	舗装材	舗装厚(路盤層を除く) (m)	初期水位
Case 1	アスファルト	0.1 (基層0.05 m; 表層0.05 m)	地盤下端から0.3 m上
Case 2	コンクリート	0.1	地盤下端から0.1 m上
Case 3	アスファルト	0.2 (基層0.15 m; 表層0.05 m)	地盤下端から0.1 m上
Case 4	コンクリート	0.2	地盤下端から0.1 m上

ルト及びコンクリート舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程の大型可視化模型実験を行い、舗装材や舗装厚の違いが空洞の発達・陥没過程に及ぼす影響を詳細に検討した。さらに、地中レーダー探査法を用いて、吸い出しによる空洞発達・陥没過程の経時的変化を同定し、地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす舗装の種類や舗装厚の影響を詳しく検討した。尚、本資料に記した舗装厚は、路盤層を除くコンクリート板、又は、アスファルト混合物層の厚さを表す。

(3) 模型地盤の作製方法

大型吸い出し可視化実験における模型地盤の作製方法について説明する。表 - 4.2 に示す各実験ケースにおいて、間隙水圧・土圧計測用のセンサー(KYOWA 社, PGM-02XG)及びサクシオン計測用のテンシオメーター(mol 社, HG-2100AEL)などの各計測器の設置位置(図-4.1(b))と地盤・路盤層の作製方法は同様である。具体的には、図 - 4.1(b)に示す位置に、間隙水圧計及び土圧計を大型吸い

出し可視化装置の裏側から設置し、テンシオメーターは当該装置の内側に設置した。その後、裏埋砂(日光珪砂 6号)を水中落下法で投入し、地盤層を作製した。路盤層は、地盤層の上部に路盤材(C-40 碎石)を空中で落下させた後、締め固めて作製した。以下では、アスファルト及びコンクリート舗装の作製方法について説明する。アスファルト舗装の作製においては、路盤を作製した後、路盤上部に舗装の型枠を設置し、アスファルト混合物を表 - 4.2 に示すように基層と表層に分けて枠内に打設した上で、転圧を行った。その後、4 日間の養生を経て、型枠を外し、当該舗装を作製した。一方、コンクリート舗装の作製においては、曲げ強度が 1.5 N/mm^2 (舗装厚: 0.1 m)、 2.5 N/mm^2 (舗装厚: 0.2 m)になるように³⁷⁾、セメント、水、粗・細骨材などの配合を決め、予め制作した型枠への打設及び 30 日間養生を行い、コンクリート板を作製した。その後、クレーンを用い、当該コンクリート板を大型吸い出し可視化実験装置に敷設された路盤の上に設置し、模型地盤を完成した。

(4) 実験手順

本研究で行った大型吸い出し可視化実験の手順について説明する。表 - 4.2 に示す各実験ケースとも、地下水位を表 - 4.2 に示す初期水位(土槽の下端を基準とした水位)に設定し、地盤中にサクシオンが働く状態を再現した。次に土槽の下端中央に位置する吸い出し口を幅 2 cm 開き(図-4.1(b))、吸い出しを誘起し、空洞を形成・発達させた。空洞の発達が止まった時点で、図-4.1(b)に示すように、大型吸い出し可視化装置の左右に位置する昇降装置を同じ速度で上げることで地盤内の地下水位を 5 cm/min の速度で上昇させて、空洞の規模をさらに発達させると共に、それに伴う舗装の破壊過程を詳細に検討した。また、空洞発達の各段階で、上述のレーザー変位計を用い、舗装面の変位分布を計測すると共に、地中レーダーによる空洞の空間測定(詳細は後述)を行った。

4.4 大型吸い出し可視化実験における地中レーダー探査方法

本研究で行った大型可視化実験における地中レーダー探査方法について説明する。本研究では、図-4.3 に示す地中レーダーアンテナ(GSSI 社, 350HS, 中心周波数: 350 MHz)及びデータ収録装置(SIR 4000)を用いて、地中レーダー探査を行った。次章で実験ケースごとに示す空洞発達の各段階で、図-4.1(b)に示すように地中レーダーアンテナを舗装の右端から左端に移動させることで空洞の空間測定を行った。この際、本研究で設定した比誘電率は、地中レーダーによる空間測定によって空洞を表す双曲線



(a) 350HS デジタルアンテナ (GSSI 社)

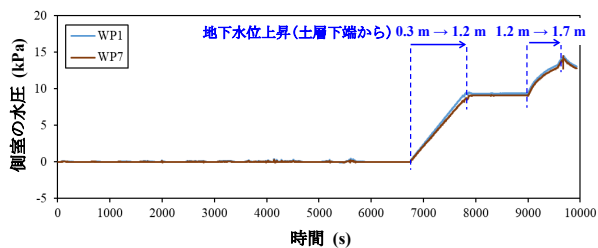


(b) SIR4000 地中レーダーデータ収録装置

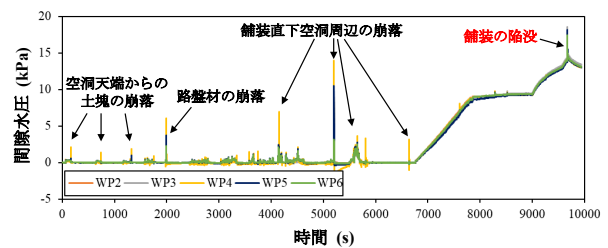
図-4.3 地中レーダーアンテナとデータ収録装置

状の異常信号が得られた深さと大型吸い出し可視化装置の前面から確認できる空洞の天端の深さがほぼ等しくな

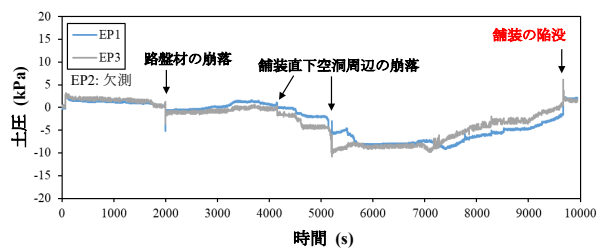
る値である 6.5 に設定した。



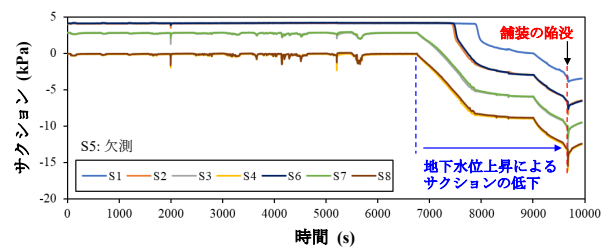
(a) 側室の水圧



(b) 間隙水圧



(c) 土圧



(d) サクション

図-5.1 Case 1 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達過程の(a)側室の水圧、(b)間隙水圧、(c)土圧、(d)サクションの経時的変動(凡例の数字は計測器番号、位置は図-4.1(b)参照)

アスファルト舗装(層厚:0.1 m)



(a) 実験開始前

(b) 実験開始 940 秒後

(c) 実験開始 4570 秒後



(d) 実験開始 5150 秒後

(e) 実験開始 5790 秒後

(f) 実験終了後

図-5.2 Case 1 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達及び舗装の崩壊過程

5. 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

5.1 はじめに

本章では、舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程の実大実験手法³⁰⁾を基に、本研究で行った4ケース(表-4.2)の大型可視化実験結果を比較・分析し、アスファルト及びコンクリート舗装直下地盤の吸い出し、空洞形成・発達及び陥没過程を明らかにすると共に、同過程に及ぼす舗装の種類や舗装厚の影響について述べる。

5.2 大型吸い出し可視化実験結果及び考察

(1) Case 1

図-5.1にCase1の大型吸い出し可視化実験(アスファルト舗装; 舗装厚: 0.1 m)で得られた側面水槽の水圧, 間隙水圧, 土圧及びサクシジョンの経時的変動を示す。また, 当該実験の吸い出しによる舗装直下地盤の空洞形成・発達及び陥没過程において, 各段階で撮影した写真を図-5.2に示す(図中の白破線は, 空洞の天端位置を示す)。さらに, 図-5.3に吸い出しによる空洞形成・発達過程下におけるアスファルト舗装面変位の経時変化を示す。実験開始から940秒後に地表から約1.4 m深さで空洞が形成された後(図-5.2(b)), 上向きに進展・発達し, 約2000秒後には, 当該空洞の天端が路盤層に達した(図-5.1)。その後, 実験開始から約4570秒後には当該空洞の天端が舗装直下に達し, 当該空洞の高さは約1.7 mになった(図-5.2(c))。この際, 空

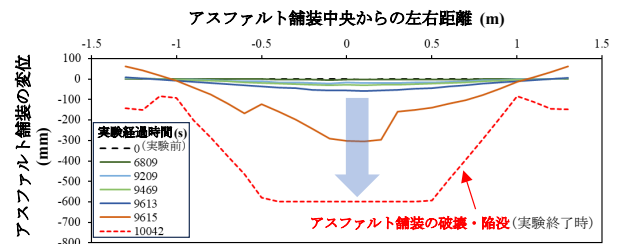
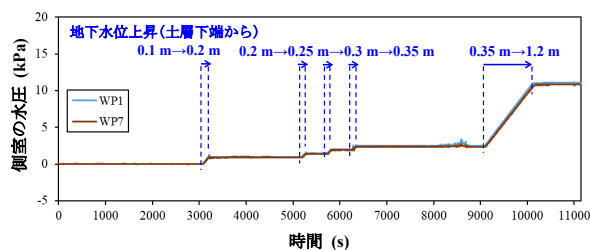


図-5.3 Case 1 の大型吸い出し可視化実験において, 吸い出しによる空洞形成・発達過程の舗装変位の経時変化

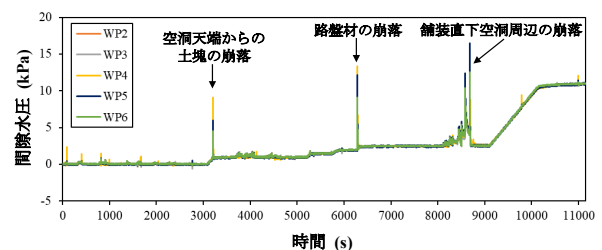
洞の天端幅は約0.3 mに達している(図-5.2(c))。引き続き空洞は路盤の崩落と共に左右に拡大し(図-5.2(d)), 実験開始から5790秒後には舗装直下の空洞の天端幅は約1.3 mに達した(図-5.2(e))。この際, 空洞の形成・発達過程において, 空洞天端からの土塊, 又は, 路盤材の崩落による間隙水圧の瞬間的な変動が見られる(図-5.1(b))。一方, 吸い出し口直上の左右に位置する土圧計(EP1, EP3)の値は, 空洞の水平方向及び上方への拡大に伴って徐々に減少していることが分かる(図-5.1(c); 図-5.2(a)~(d))。その後, 地下水位上昇に伴うサクシジョンの低下によって(図-5.1(a), (b)), 空洞はさらに左右に拡大し続け, 空洞の天端幅は最終的に約2 mまで達した後, アスファルト舗装は崩壊し陥没した(図-5.2(f); 図-5.3)。

(2) Case 2

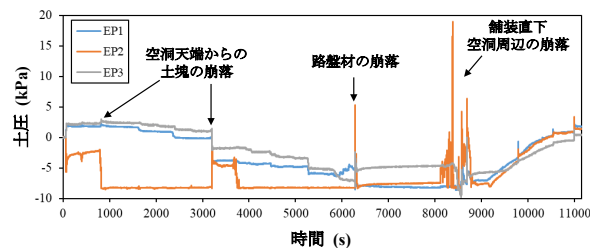
図-5.4にCase2の大型吸い出し可視化実験(コンクリート



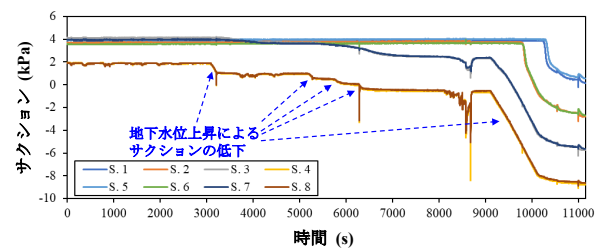
(a) 側室の水圧



(b) 間隙水圧



(c) 土圧



(d) サクシジョン

図-5.4 Case 2 の大型吸い出し可視化実験において, 吸い出しによる空洞形成・発達過程の(a)側室の水圧, (b)間隙水圧, (c)土圧, (d)サクシジョンの経時的変動(凡例の数字は計測器番号, 位置は図-4.1(b)参照)

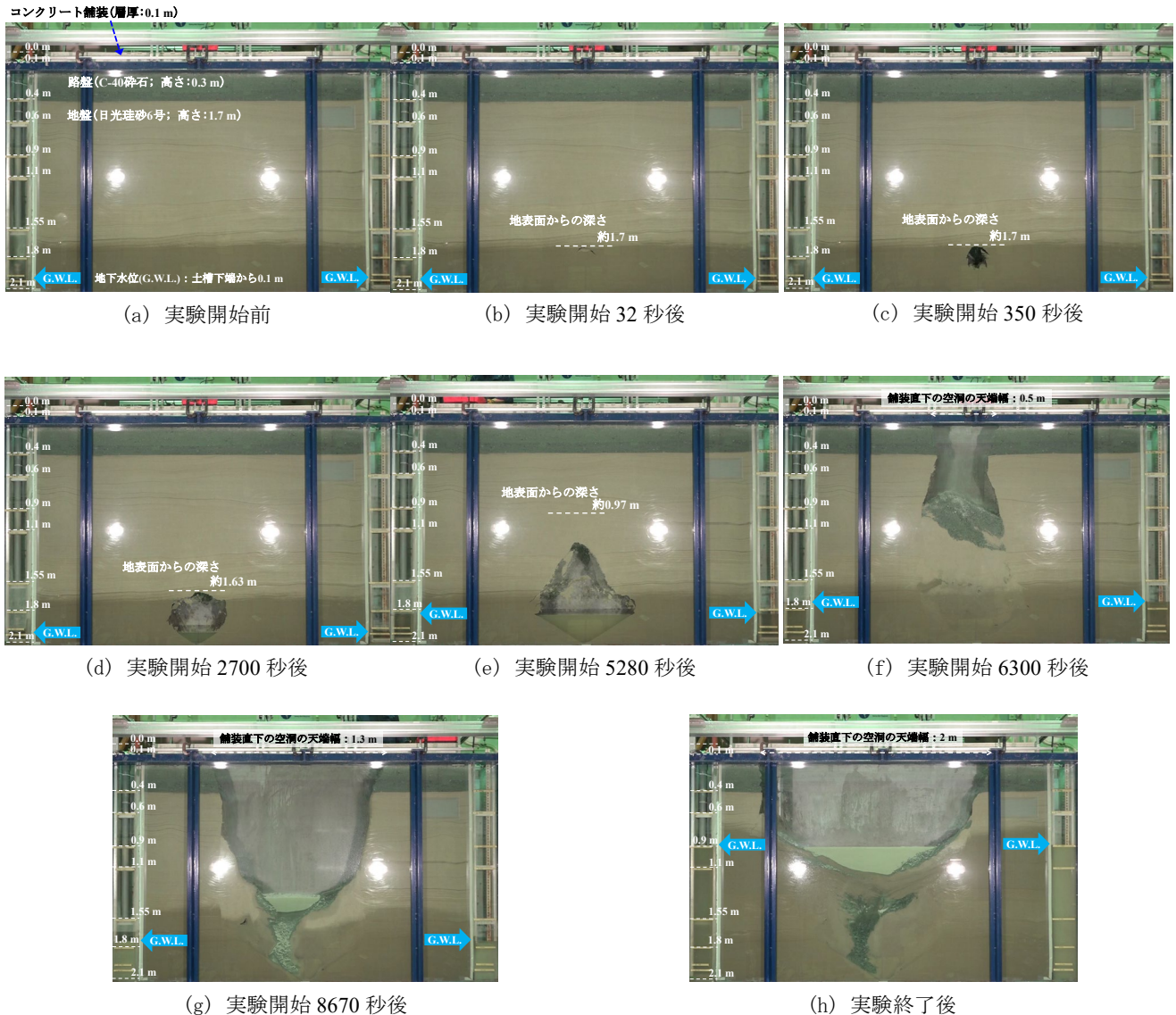


図-5.5 Case 2 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程

ト舗装; 舗装厚: 0.1 m) で得られた側面水槽の水圧, 間隙水圧, 土圧及びサクシンの経時的な変動を示す. また, 当該実験において, 吸い出しによる舗装直下地盤の空洞形成・

発達及び陥没過程の各段階で撮影した写真を図-5.5 に示す (図中の白破線は, 空洞の天端位置を示す). さらに, 図-5.6 に当該実験の吸い出しによる空洞形成・発達過程下におけるコンクリート舗装面変位の経時変化を示す. 実験開始直後, 吸い出し口直上の地表から約 1.7 m の深さで, 上に凸の放物線状のひび割れが生じた (図-5.5(b)). その後, 当該放物線状のひびの内側の砂が吸い出され, 実験開始から 350 秒後に地表面からの約 1.7 m の深さで空洞が形成された (図-5.5(c)). 引き続き当該空洞は主に左右に拡大し続け, 空洞の高さの変化は 0.07 m 程度でかなり小さい一方, 空洞の幅が拡大していることが分かる (図-5.5(d)). その後, 2 度の地下水位の上昇 (土層下端から 0.1 m $\rightarrow$ 0.2 m $\rightarrow$ 0.25 m; 図-5.4(a), (b)) に伴うサクシンの低下 (図-5.4(d)) によって空洞がさらに拡大し, 実験開始から 5280 秒後には空

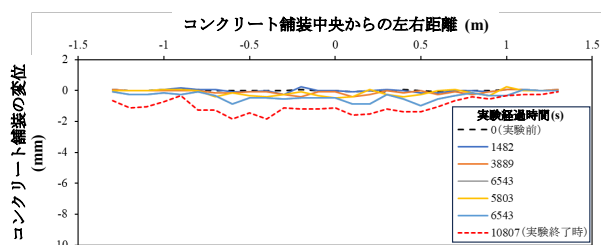
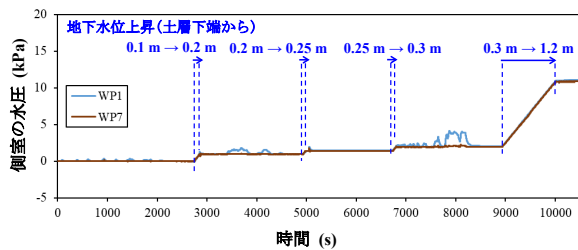
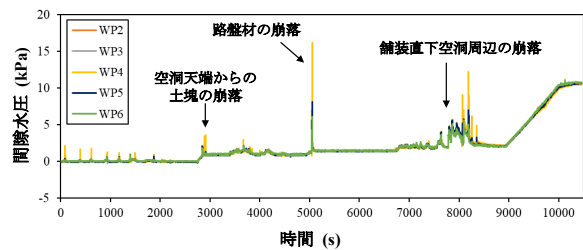


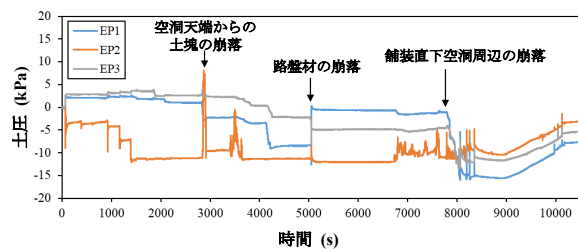
図-5.6 Case 2 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達過程の舗装変位の経時変化



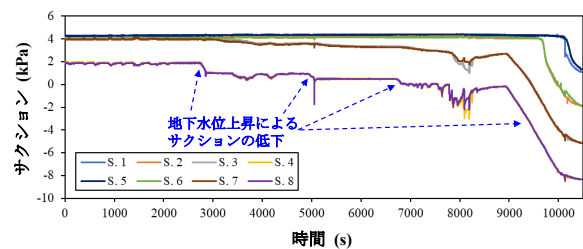
(a) 側室の水圧



(b) 間隙水圧



(c) 土圧



(d) サクション

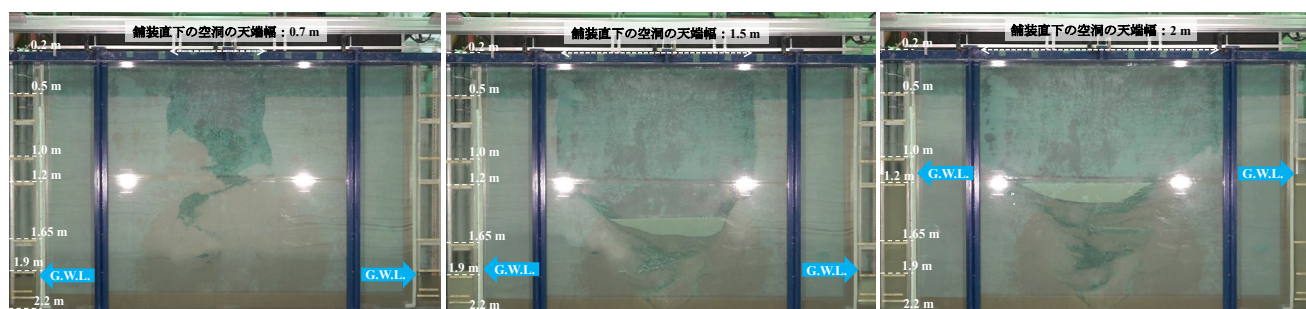
図-5.7 Case 3 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達過程の(a)側室の水圧、(b)間隙水圧、(c)土圧、(d)サクションの経時的変動(凡例の数字は計測器番号、位置は図-4.1(b)参照)



(a) 実験開始直後

(b) 実験開始 880 秒後

(c) 実験開始 4530 秒後



(d) 実験開始 5010 秒後

(e) 実験開始 8190 秒後

(f) 実験終了後

図-5.8 Case 3 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程

洞の天端が地表面から約 0.97 m の深さまで達した(図-5.5(e)).以後、地下水位の上昇(土層下端から 0.3 m → 0.35 m; 図-5.4(a), (b))に伴うサクションの低下(図-5.4(d))に

よって、当該空洞は上向き進展し、実験開始から 6300 秒後に、空洞の天端が舗装直下に到達した(図-5.4(a), (b), (c); 図-5.5(f)). この際、空洞の形成・発達過程において、間

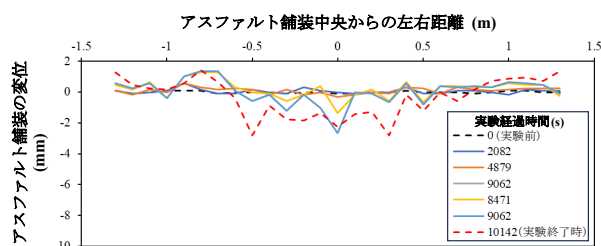
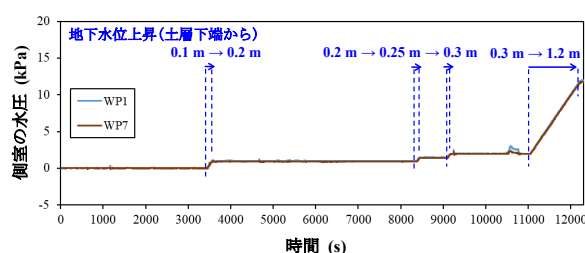
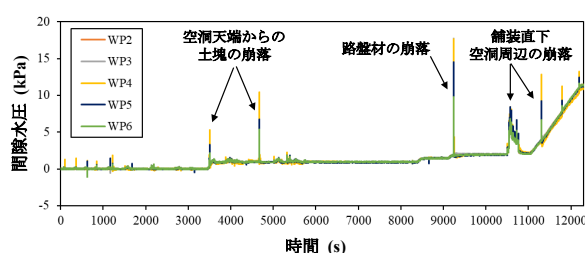


図-5.9 Case3の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達過程の舗装変位の経時的変化

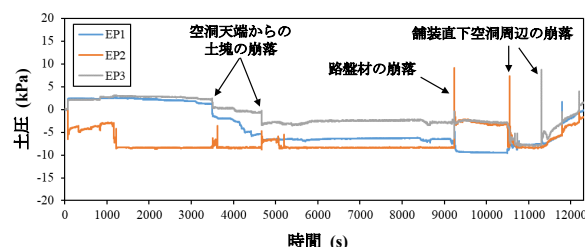
隙水圧は、上述の Case 1 と同様に、空洞天端からの土塊、又は、路盤材の崩落の度に瞬間的な変動を示している(図-5.4(b))。一方、上述の同過程における土圧の挙動は以下の通りである。空洞の初期形成過程において、吸い出し口直上の土圧(EP2)は減少し、実験開始から約 900 秒後に当該土圧計の空洞内への露出によってある一定値を示している(図-5.4(c))。実験開始から 3000 ~ 4000 秒の間には、空洞天端からの土塊の崩落による土圧の瞬間的な上昇が見られたのち、当該土圧計の周辺に堆積した土砂が吸い出されると共に土圧は低下し、一定値に戻る(図-5.4(c))。その後、実験開始から 6300 秒頃には、路盤材の崩落による土圧の瞬間的な変動が見られる(図-5.4(c))。吸い出し口直上の左右に位置する土圧計(EP1, EP3)の値は、Case 1 と同様に、空洞の水平方向及び上方への拡大に伴って徐々に減少してい



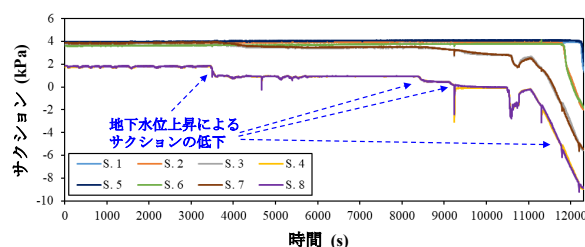
(a) 側室の水圧



(b) 間隙水圧



(c) 土圧



(d) サクション

図-5.10 Case4の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達過程の(a)側室の水圧、(b)間隙水圧、(c)土圧、(d)サクションの経時的変動(凡例の数字は計測器番号、位置は図-4.1(b)参照)

ることが分かる(図-5.4(c);図-5.5(a)~(e))。引き続き当該空洞は左右に拡大し、実験開始から 8670 秒後には舗装直下の空洞の天端幅が約 1.3 m まで達した(図-5.5(g))。その後、地下水位上昇(土層下端から 0.35m → 1.2 m;図-5.4(a), (b))に伴うサクシヨンの低下(図-5.4(d))によって、当該空洞はさらに左右に拡大し、舗装直下の空洞の天端幅が 2 m を超えた時点で当該実験を終了した(図-5.5(h))。当該実験におけるコンクリート舗装の変位を示す図-5.6によると、実験開始から 6543 秒後の空洞の天端が舗装直下に達している時点では当該舗装の変位が 1 mm 以下であり、舗装直下の空洞の天端幅が 2 m を超える実験終了間際の 10807 秒後においても当該舗装の変位は 2 mm 未満に留まっていることが分かる。

(3) Case 3

図-5.7にCase3の大型吸い出し可視化実験(アスファルト舗装;舗装厚:0.2 m)で得られた側面水槽の水圧、間隙水圧、土圧及びサクシヨンの経時的な変動を示す。また、当該実験の吸い出しによる舗装直下地盤の空洞形成・発達及び陥没過程において、各段階で撮影した写真を図-5.8に示す(図中の白破線は、空洞の天端位置を示す)。さらに、図-5.9に吸い出しによる空洞形成・発達過程下におけるアスファルト舗装変位の経時的変化を示す。実験開始直後、吸い出し口直上の地表から約1.76 mの深さで、上に凸の放物線状のひび割れが生じた(図-5.8(a))。その後、当該放物線状のひびの内側の砂が吸い出され、実験開始から880秒後に地表面から約1.76 mの深さで空洞が形成された(図-5.8(b))。

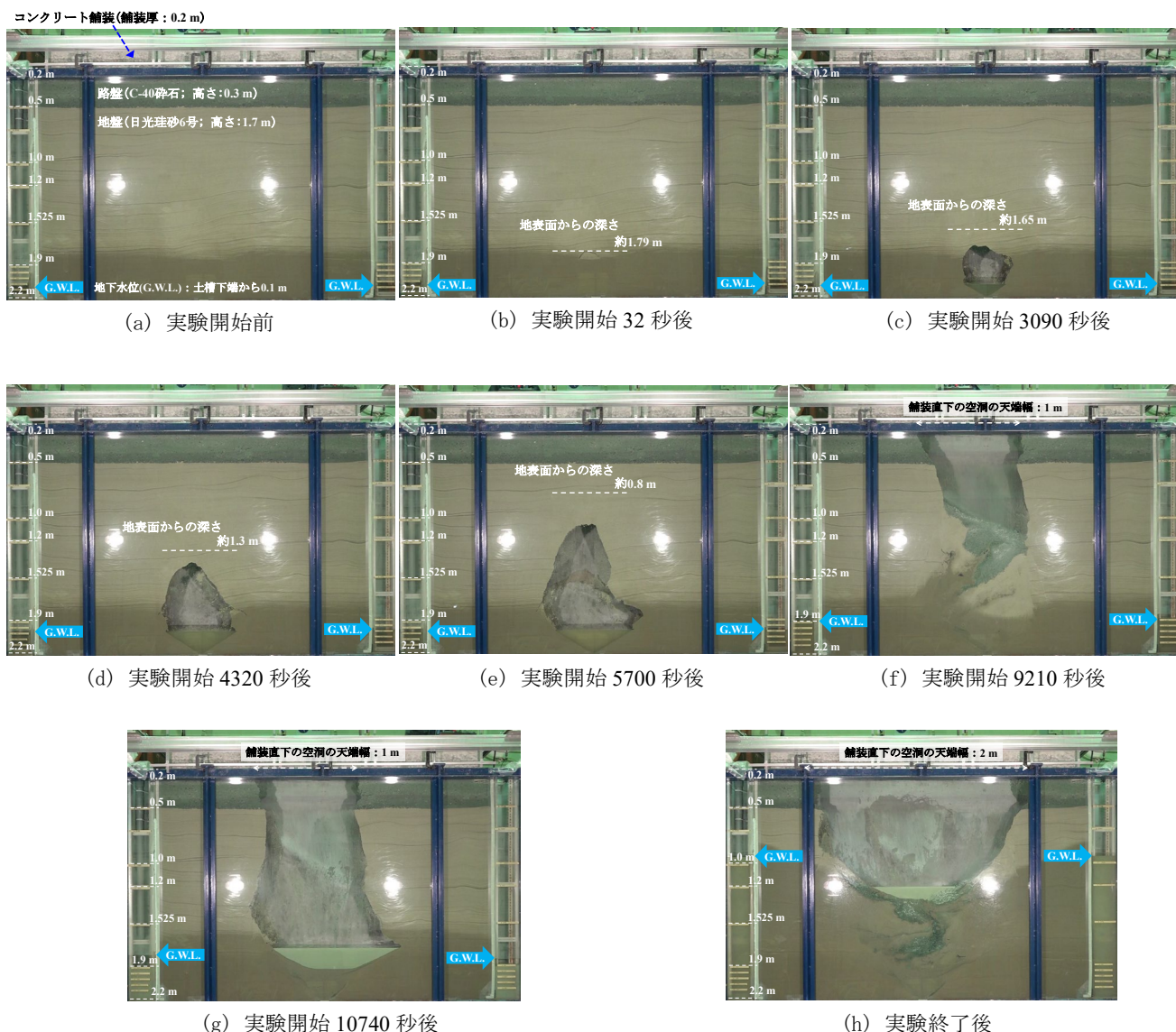


図-5.11 Case 4 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程

引き続き地下水位の上昇(土層下端から0.1 m → 0.2 m ; 図-5.7(a), (b))に伴うサクシンの低下(図-5.7(d))によって、当該空洞の天端の崩落と共に、当該空洞は上向きに進展・拡大し続け、実験開始から4530秒後には空洞の天端が地表から深さ約1.12 mに達した(図-5.8(c))。その後、2度目の地下水位の上昇(土層下端から0.2 m → 0.25 m ; 図-5.7(a), (b))に伴うサクシンの低下(図-5.7(d))中の実験開始から5100秒後に空洞の天端が舗装直下に到達した(図-5.8(d))。この際、空洞の形成・発達過程における間隙水圧及び土圧の変動特性は、上述のCase 2と同様である(図-5.7(b), (c))。引き続き地下水位の更なる上昇(土層下端から0.25 m → 0.3 m ; 図-5.7(a), (b))に伴うサクシンの低下(図-5.7(d))によって、空洞は左右に拡大し、実験開始から8190秒後には舗装直下の空洞の天端幅が約1.5 mまで拡

大した(図-5.8(e))。その後の地下水位上昇(土層下端から0.3 m → 1.2 m ; 図-5.7(a), (b))に伴うサクシンの低下(図-5.7(d))により、舗装直下の空洞の天端幅が2 mを超えた時点で当該実験を終了した(図-5.8(f))。当該実験におけるアスファルト舗装の変位を示す図-5.9によると、当該舗装の変位は舗装直下の空洞の天端幅が約1.5 mである実験開始から8471秒後において1 mm程度、空洞の天端幅が2 mを超えた実験終了間際の10142秒後においても3 mm未満に留まっていることが分かる。

(4) Case 4

Case 4 の大型吸い出し可視化実験(コンクリート舗装 ; 舗装厚 : 0.2 m)で得られた側面水槽の水圧、間隙水圧、土圧及びサクシンの経時的な変動を図-5.10 に示す。また、当該実験において、吸い出しによる舗装直下地盤の空洞形成・

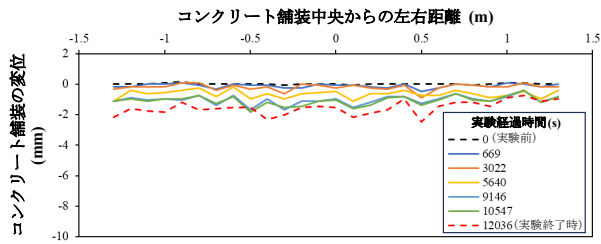


図-5.12 Case 4 の大型吸い出し可視化実験において、吸い出しによる空洞形成・発達過程の舗装変位の経時的変化

発達及び・陥没過程の各段階で撮影した写真を図-5.11 に示す(図中の白破線は、空洞の天端位置を示す)。さらに、図-5.12 に吸い出しによる空洞形成・発達過程下におけるアスファルト舗装(舗装厚:0.2 m)の変位の経時的変化を示す。実験開始直後に地表面から約 1.79 m の深さで上に凸の放物線状のひび割れが生じ(図-5.11(b))、当該放物線状のひびの内側の砂が吸い出され、実験開始から 3090 秒後に、地表面から約 1.65 m の深さで空洞が形成された(図-5.11(c))。引き続き地下水位の上昇(土層下端から 0.1 m → 0.2 m; 図-5.10(a), (b))に伴うサクシンの低下により(図-5.10(d))、空洞幅の拡大と共に天端の崩落が 2 度発生し、実験開始から 4320 秒後には空洞の天端が地表面から深さ約 1.3 m に達し(図-5.11(d))、実験開始から 5700 秒後には地表面から深さ約 0.8 m に達した(図-5.11(e))。この際、空洞の形成・発達過程における間隙水圧及び土圧の変動特性は、上述の 3 ケースと共通している(図-5.10(b), (c))。その後、地下水位の 2 段階の上昇(土層下端から 0.2 m → 0.25 m → 0.3 m; 図-5.10(a), (b))に伴ってサクシンが低下し(図-5.10(d))、地下水位が土層下端から 0.3 m に達した実験開始から 9210 秒後に空洞の天端が舗装直下に到達した(図-5.10(a), (b), (c); 図-5.11(f))。この時点から実験開始 10740 秒後にかけて崩落した路盤材と裏埋砂が吸い出され、空洞の高さが約 1.7 m に達する間、舗装直下の空洞の天端幅は約 1 m で一定であった(図-5.11(g))。その後の地下水位の上昇(土層下端から 0.3 m → 1.2 m; 図-5.10(a), (b))に伴うサクシンの低下(図-5.10(d))によって、当該空洞は左右にさらに拡大し、舗装直下の空洞の天端幅が 2 m を超えた時点で当該実験を終了した(図-5.11(h))。当該実験におけるコンクリート舗装の変位を示す図-5.12 によると、当該舗装の変位は空洞の拡大と共に徐々に大きくなっているが舗装直下の空洞天端幅が 2 m を超えた実験終了間際の 12036 秒後においても 2.5 mm 未満に留まっていることが分かる。

(5) 大型吸い出し可視化実験結果の比較

ここでは、上記 4 ケースの大型吸い出し可視化実験結果の比較を行い、舗装の種類・舗装厚が舗装直下地盤の吸い出し、空洞発達、舗装変位の発生及び陥没の有無に及ぼす影響について詳細に考察する。

a) 舗装直下地盤におけるの吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程

以下では、舗装の種類及び舗装厚が舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程に及ぼす影響について比較・考察する。地下水位の設定条件(初期水位:0.1 m、地下水位の上昇幅)が同じである Case 2 ~ Case 4 の大型吸い出し可視化実験では、舗装直下地盤の吸い出し、空洞形成・発達過程に大きな違いは見られないことが上記の(2)~(4)から分かる。具体的には、吸い出しによって地盤内に空洞が形成された後、地下水位上昇に伴うサクシンの低下によって、当該空洞は上向きに進展・拡大し、路盤の崩落と共に左右に拡大した。一方、Case 1 の大型吸い出し可視化実験(初期水位:0.3 m)では、上記の 3 ケースに比べ初期水位が 0.2 m 高いことから、空洞の初期形成時の地表面から空洞の天端までの深さが 0.2 ~ 0.4 m 浅く、初期水位一定の条件下で比較的早期に路盤材の崩落が生じている(図-5.1(a), (b), (c))。以上の 4 ケースの実験結果の比較から、舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程は地下水位に左右され、舗装の種類や舗装厚の影響は受けないことが分かる。

b) 舗装のたわみ発生・陥没過程に及ぼす舗装の種類の影響

以下では、舗装の種類が舗装のたわみ発生・陥没過程に及ぼす影響について比較・考察する。まず、舗装厚が 0.1 m であり、舗装材が異なる Case 1 (アスファルト舗装) と Case 2 (コンクリート舗装) から得られた結果を比較する。Case 1 では、舗装直下の空洞の天端幅が約 2 m に達した時点で舗装のたわみが目視可能なレベルまで発達し、その直後に当該舗装の陥没が生じた(図-5.3)。一方、Case 2 では、当該実験終了時の舗装直下の空洞の天端幅が約 2 m に達した時点において、舗装の最大変位が 2 mm 未満に留まっていることが分かる(図-5.6)。次に、舗装厚が 0.2 m であり、舗装材が異なる Case 3 (アスファルト舗装) と Case 4 (コンクリート舗装) から得られた結果を比較する。Case 3 では、当該実験終了時の舗装直下の空洞の天端幅が約 2 m に達した時点において、舗装の最大変位が 3 mm 程度である(図-5.9)一方、Case 4 では、当該実験終了時の舗装直下の空洞の天端幅が約 2 m に達した時点において、舗装の最大変位が 2.5 mm 未満に留まった(図-5.12)。以上の実験結果の比較から、アスファルト舗装に比べ剛性が高いコンクリート舗装は、舗装直下の空洞の発達による舗装の変位が生じにくく、同規模の

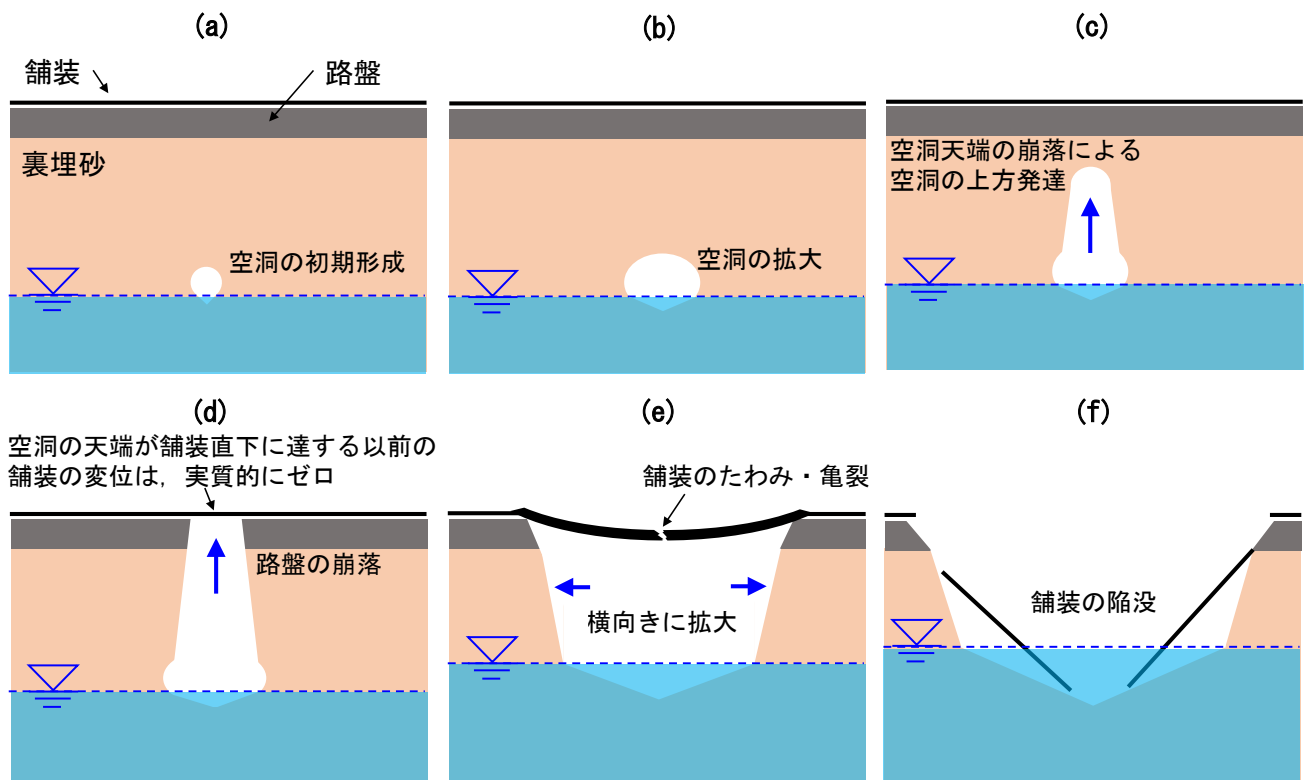


図-5.13 舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程の模式図

空洞において舗装の陥没の可能性が相対的に低いことが分かる。

一方、空洞の天端が舗装直下に達し、左右に拡大する過程において、Case 1、Case 2及びCase 3では、舗装の中央部の変位が端部に対し大きい(図-5.3；図-5.6；図-5.9)のに対し、Case 4では舗装全体で変位が見られる(図-5.12)。以上の結果から、Case 1、Case 2及びCase 3で見られた舗装の変位は、舗装直下の空洞の拡大に伴う舗装のたわみによって生じたものである一方、剛性が高く重量が大きいコンクリート舗装(Case 4)の変位は、地下水位の上昇に伴うサクシジョンの低下によって地盤の支持力が低減した状況下において、当該舗装が自重により沈下することにより生じたと考えられる。

c) 舗装のたわみ発生・陥没過程に及ぼす舗装厚の影響

以下では、舗装厚が舗装のたわみ発生・陥没過程に及ぼす影響について比較・考察する。まず、舗装材としてアスファルトを用い、舗装厚を変化させたCase 1(舗装厚：0.1 m)とCase 3(舗装厚：0.2 m)から得られた結果を比較する。実験終了時の舗装直下の空洞の天端幅が約2 mに達した時点において、舗装の陥没が生じたCase 1(図-5.3)と比較し、Case 3では最大変位が3 mm程度に留まっており(図-5.9)、舗装厚の増加に伴う当該舗装の剛性の増加によって当該舗装の変位が低く抑えられていることが分かる。次に、舗装

材としてコンクリートを用い、舗装厚を変化させたCase 2(舗装厚：0.1 m)とCase 4(舗装厚：0.2 m)から得られた結果を比較する。実験終了時の舗装直下の空洞の天端幅が約2 mに達した時点において、Case 2では、舗装の最大変位が2 mm未満に留まっている(図-5.6)一方、Case 4では舗装の最大変位が2.5 mm未満であり、舗装全体で変位が見られることが分かる(図-5.12)。これは、上述のように、舗装厚の増加に伴うコンクリート板の重量の増加が当該舗装の変位に影響を及ぼしていることが分かる。

上述の4ケースの大型吸い出し可視化実験結果を反映した模式図(図-5.13)を用い、舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程について説明する。吸い出しによって空洞が形成された後(図-5.13(a), (b))、地下水位上昇に伴うサクシジョンの低下によって当該空洞は上向きに進展・拡大する(図-5.13(c))。その後、地下水位の更なる上昇に伴うサクシジョンの低下によって路盤の崩落と共に当該空洞の天端が舗装の直下に達し(図-5.13(d))、左右に拡大し続け(図-5.13(e))、舗装の破壊・陥没に至る(図-5.13(f))。この際、路盤が崩落し、空洞の天端が舗装直下に達する前の時点では、全ケースとも舗装のたわみによる変位は実質的にゼロであり、舗装の変位から裏埋め土砂内に形成された空洞を探知することは困難であると考えられる。また、アスファルト舗装に比べ、剛性が高いコンクリ

ート舗装ではその直下で空洞が幅 2 m 程度に拡大した場合でも舗装の変位が小さく、2 章で記述したように空洞がさらに拡大した段階で大規模な陥没を引き起こす危険性があると考えられる。

5.3 まとめ

本章では、一連の大型吸い出し可視化実験から得られた結果を通じて、アスファルト及び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・陥没過程及びその機構ならびに同過程に及ぼす舗装の種類や舗装厚の影響について詳しく記載した。

舗装直下地盤における吸い出し、空洞形成・発達及び地盤の陥没過程及びその機構が明らかとなった。具体的には、吸い出しによって空洞が地盤内に形成された後、地下水位上昇などの水理外力に伴うサクシジョンの低下によって当該空洞は上向きに進展・拡大し、路盤の崩落と共に当該空洞の天端が舗装の直下に到達する。その後、水理外力の更なる変化に伴うサクシジョンの消滅によって、当該空洞は左右に拡大し続け、舗装の破壊・陥没に至る。この際、舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程は主に地下水位に左右され、舗装の種類や舗装厚の影響を受けないことが明らかとなった。

一方、空洞が舗装直下に達し、左右に拡大する際の舗装のたわみによる変位量及び舗装の陥没有無は、舗装の種類や舗装厚の影響を強く受けることが明らかとなった。具体的には、アスファルト舗装の場合、剛性が比較的低いアスファルト舗装(舗装厚：0.1 m)では、当該舗装直下で空洞の天端が 2 m 規模に発達した際、当該舗装のたわみが目視可能なレベルまで発達した後、当該舗装は破壊し陥没が生じた。アスファルト舗装(舗装厚 0.2 m)では、上記と同規模の空洞が発達した際、舗装厚の増加に伴うアスファルト舗装の剛性の増加により、当該舗装の変位は大きく低減した。一方、アスファルト舗装に比べ剛性が高いコンクリート舗装では、上記と同規模の空洞が発達した際、コンクリート舗装の変位はアスファルト舗装に比べ小さく、さらに空洞が拡大した段階で大規模な陥没を引き起こす危険性があると考えられる。

そして、舗装のたわみによる変位は、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において、舗装の種類や舗装厚に拘わらず実質的にゼロであり、舗装の変位から地盤内に形成された空洞を探知することは困難であることが分かった。以上の結果から、適切な維持管理により、舗装直下の空洞を早期に探知することが重要であることが明らかとなった。

6. 舗装直下地盤の空洞形成・発達・陥没過程の地中レーダーによる同定

6.1 はじめに

本章では、舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び陥没過程の実大実験手法³⁰⁾を基に、上述の諸過程における地中レーダーの空間測定結果を比較・分析し、舗装の種類や舗装厚が地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす影響について述べる。さらに、現地の舗装の種類や舗装厚により空洞の探知が困難な深度においても空洞の存在を早期に評価・同定しうる手法について記載する。

6.2 地中レーダーによる空洞探知精度

表-4.2 に示す Case 1～4 の大型吸い出し可視化実験において、空洞形成・発達及び路盤の崩落過程ならびにその各過程の時点で得られた地中レーダーによる空間測定の経時的探査結果を図-6.1、図-6.2、図-6.3 及び図-6.4 に各々示す。これらの図中の地中レーダー探査結果は、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、2 次元的に示したものである。

(1) 地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす舗装厚の影響
舗装材としてアスファルトを用い、舗装厚を変化させた Case 1(舗装厚：0.1 m)と Case 3(舗装厚：0.2 m)から得られた結果を比較する。Case 1では、空洞の天端の深さが地表面から 1.4 m の時点(図-6.1(a)B)で空洞の存在を示す双曲線状の異常信号が初めて見られる(図-6.1(b)B)。一方、Case 3では、舗装直下付近まで空洞の天端が達した時点(図-6.3(a)D)で初めて双曲線状の異常信号を捉えていることが分かる(図-6.3(b)D)。これらの結果は、アスファルト舗装の厚さは、地中レーダーの空洞可探深度に大きく影響することを示している。次に、コンクリートを舗装材として用いた Case 2(舗装厚：0.1 m)と Case 4(舗装厚：0.2 m)から得られた結果を比較する。Case 2では、空洞の天端が地表面から約 1.63 m の深さまで発達した時点(図-6.2(a)C)で双曲線状の異常信号が見られており(図-6.2(b)C)、Case 4では、空洞の天端が地表面から約 1.65 m の深さの時点(図-6.4(a)B)で双曲線状の異常信号が現れており(図-6.4(b)B)、双曲線状の異常信号が得られた時点の空洞の天端の深度には、その差が殆どないことが分かる。以上の結果から、コンクリート舗装では、舗装厚の違いが空洞の可探深度に及ぼす影響は相対的に小さいと考えられる。

(2) 地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす舗装種類の影響

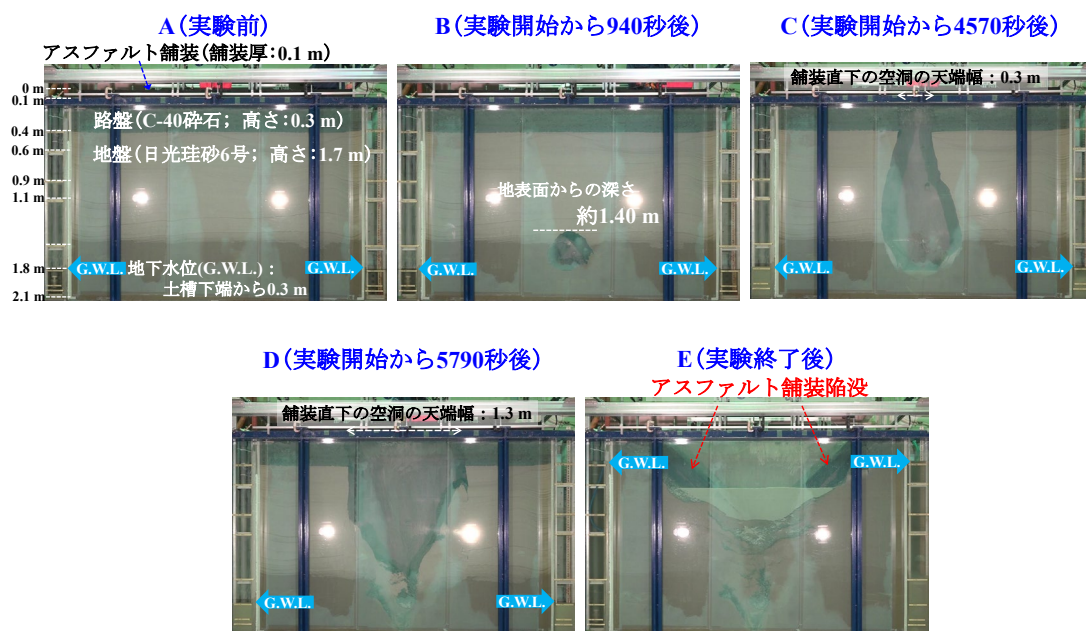
同一舗装厚で舗装材が異なる Case 1(アスファルト舗装、舗装厚：0.1 m)と Case 2(コンクリート舗装、舗装厚：0.1 m)

及び Case 3(アスファルト舗装, 舗装厚: 0.2 m)と Case 4(コンクリート舗装, 舗装厚: 0.2 m)から得られた結果を各々比較する(図-6.1 と図-6.2 及び図-6.3 と図-6.4)。アスファルトを舗装材として用いたケース(Case 1 及び Case 3)に比べ, コンクリートを舗装材として用いたケース(Case 2 及び Case 4)の方が, 空洞の可探深度が深く(図-6.1(b)B と図-6.2(b)C 及び図-6.3(b)D と図-6.4(b)B), 舗装の種類が地中レーダーの空洞可探深度に影響を及ぼしていることが分かる。地中レーダーの探査深度は, 3章で説明したように, 電磁波の周波数, 当該電磁波が通る媒質の比誘電率と導電率

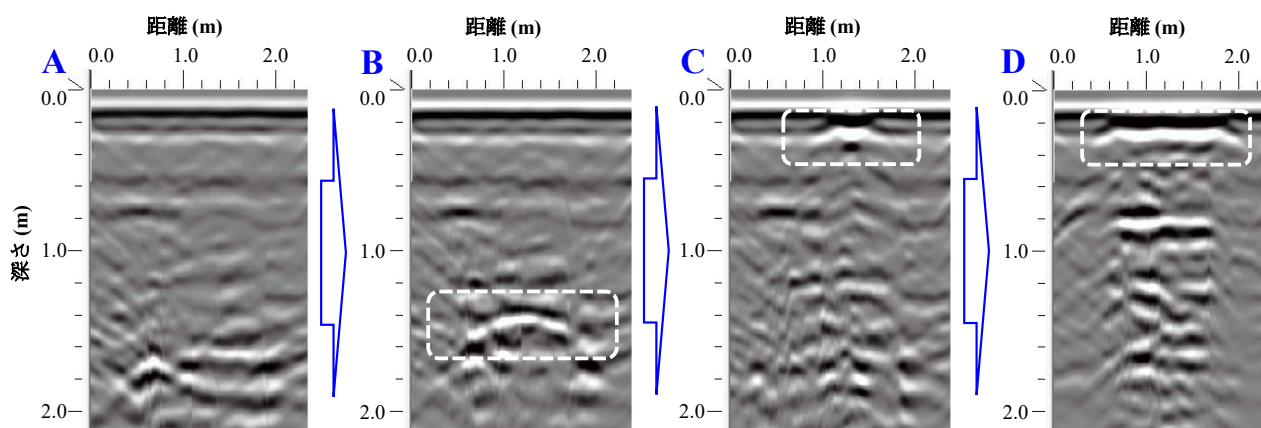
の影響を強く受けるため²⁷⁾, 地中レーダー探査に用いるアンテナの仕様を含め, 舗装, 路盤及び裏埋め土砂として用いる材料の種類, 又, 当該材料の間隙, 含水状態, 並びに, 海水の作用を受ける臨海部では, 間隙水の塩分濃度などの影響によって大きく変わりと考えられる。

6.3 地中レーダーによる空洞の早期評価・同定手法

上記の4ケースの大型可視化実験の内, 地盤内に空洞が形成・発達した際, その時点の地中レーダーによる空間測定で空洞の存在を示す双曲線状の異常信号が現れなかった

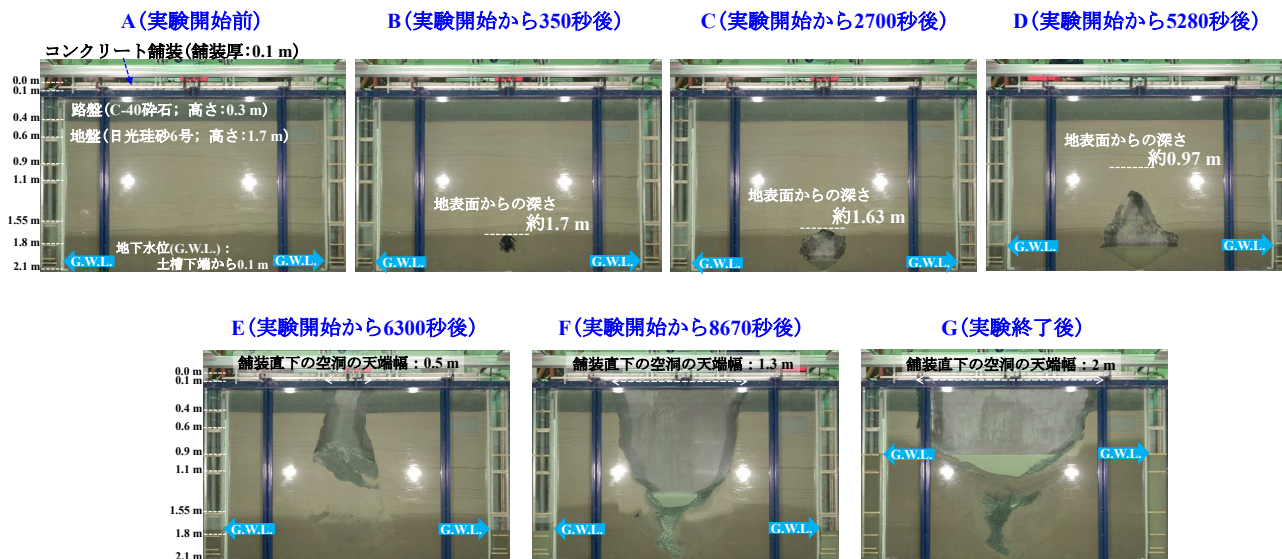


(a) アスファルト舗装(舗装厚: 0.1 m)直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び舗装の崩壊過程

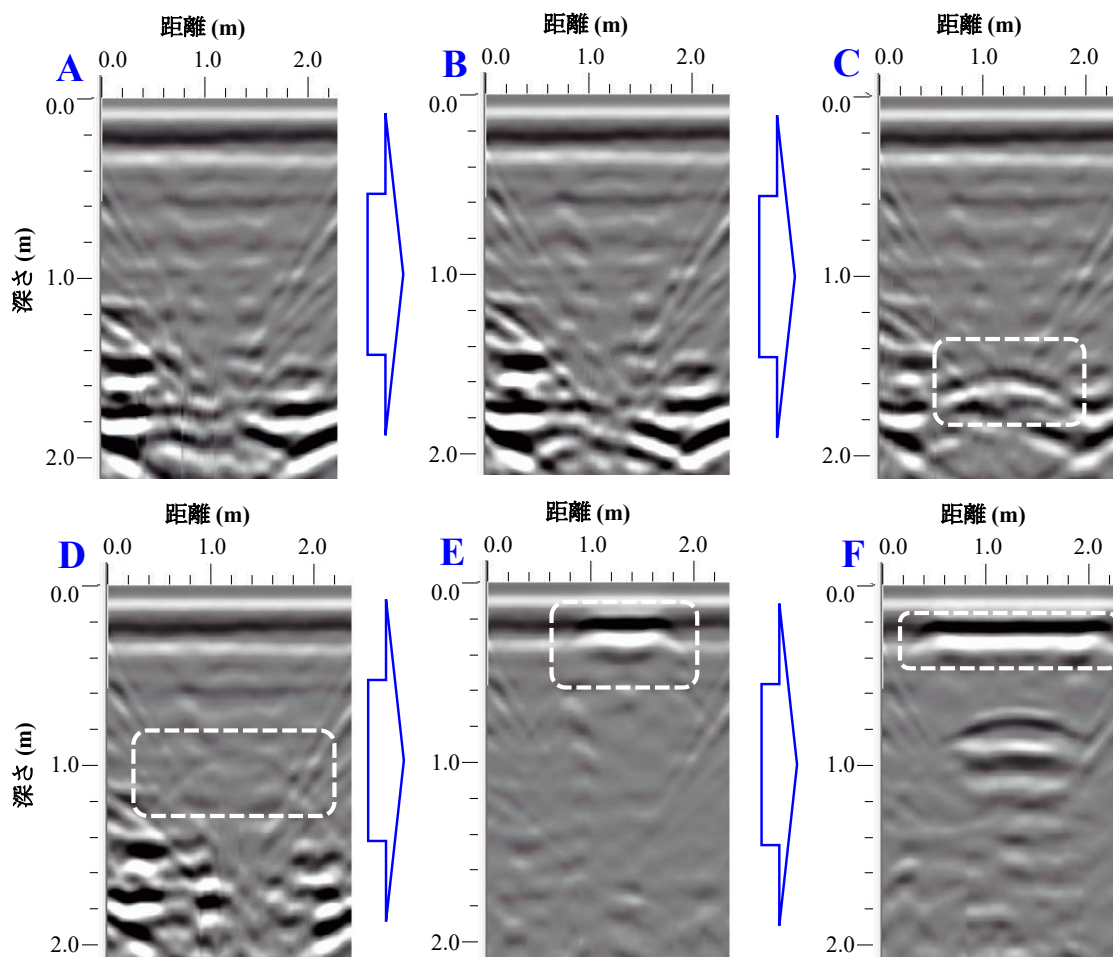


(b) アスファルト舗装(舗装厚: 0.1 m)直下地盤の空洞形成・発達及び路盤の崩落過程における地中レーダーの空間測定による経時的探査結果

図-6.1 Case 1 の大型吸い出し可視化実験における空洞形成・発達及び路盤の崩落過程の地中レーダー探査による同定

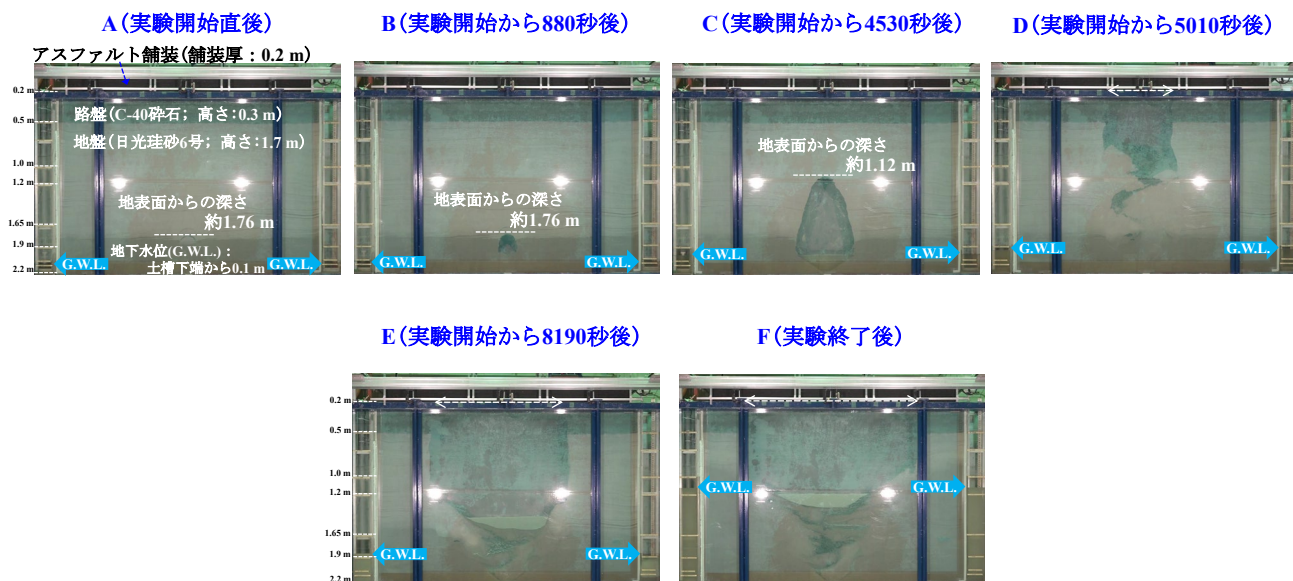


(a) コンクリート舗装(舗装厚:0.1 m)直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び舗装の崩壊過程

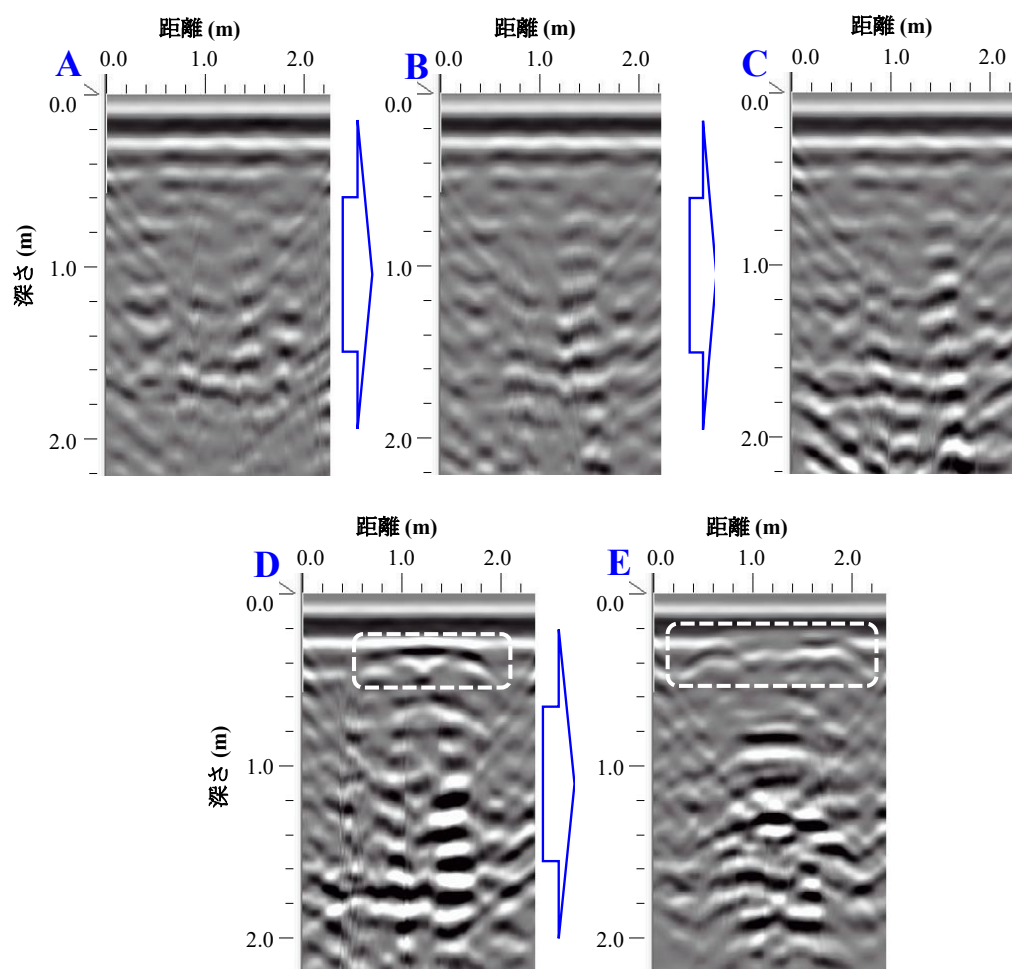


(b) コンクリート舗装(舗装厚:0.1 m)直下地盤の空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程における地中レーダーの空間測定による経時的探査結果

図-6.2 Case 2 の大型吸い出し可視化実験における空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程の地中レーダー探査による同定

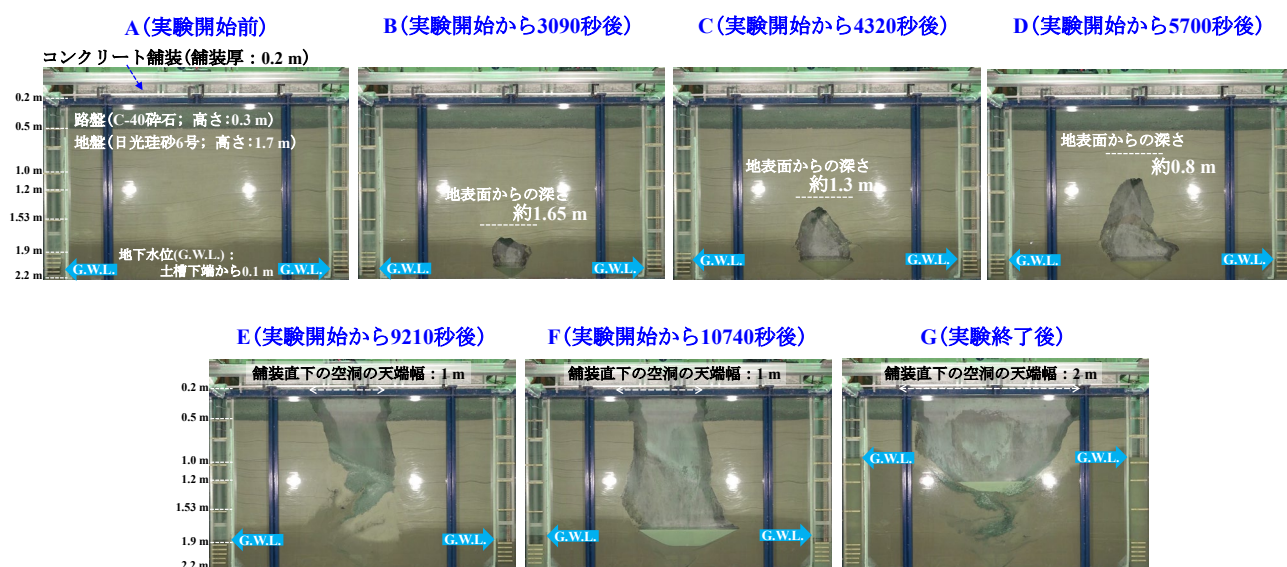


(a) アスファルト舗装(舗装厚: 0.2 m)直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び舗装の崩壊過程

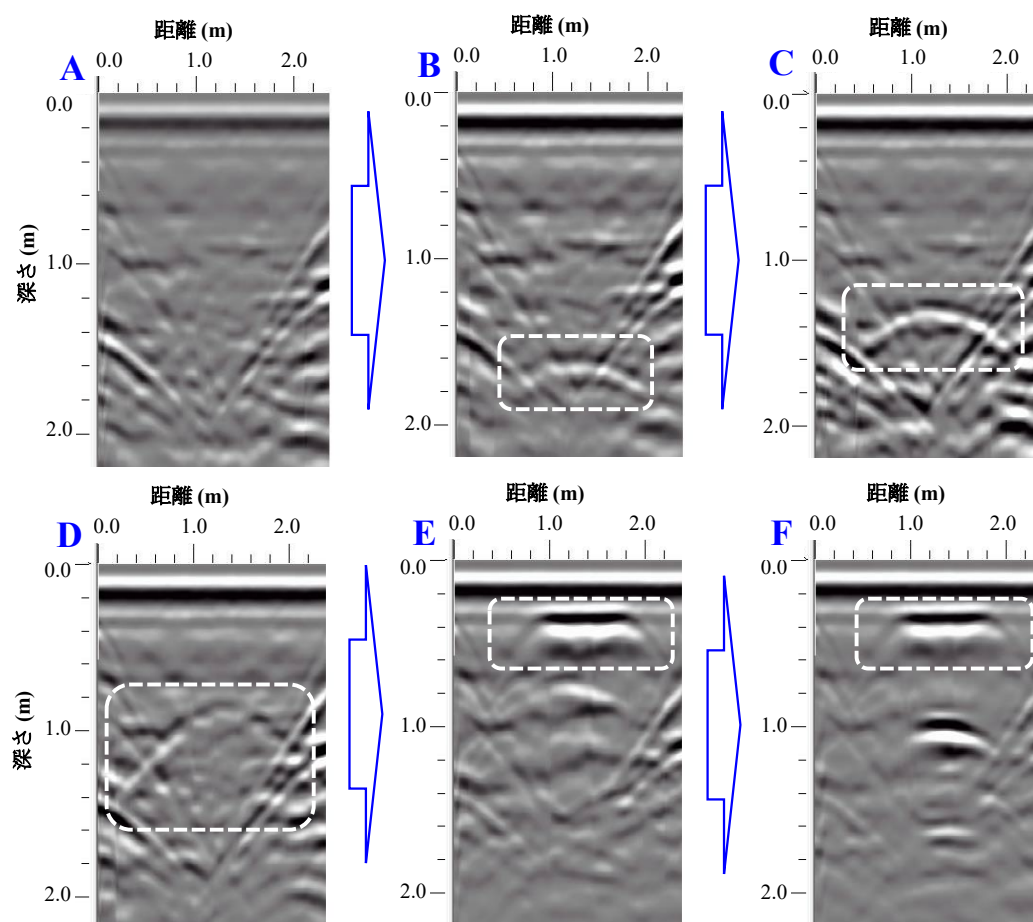


(b) アスファルト舗装(舗装厚: 0.2 m)直下地盤の空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程における地中レーダーの空間測定による経時的探査結果

図-6.3 Case 3 の大型吸い出し可視化実験における空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程の地中レーダー探査による同定



(a) コンクリート舗装(舗装厚：0.2 m)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



(b) コンクリート舗装(舗装厚：0.2 m)直下地盤の空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程における地中レーダーの空間測定による経時的探査結果

図-6.4 Case 4 の大型吸い出し可視化実験における空洞形成・発達及び路盤の崩壊過程の地中レーダー探査による同定

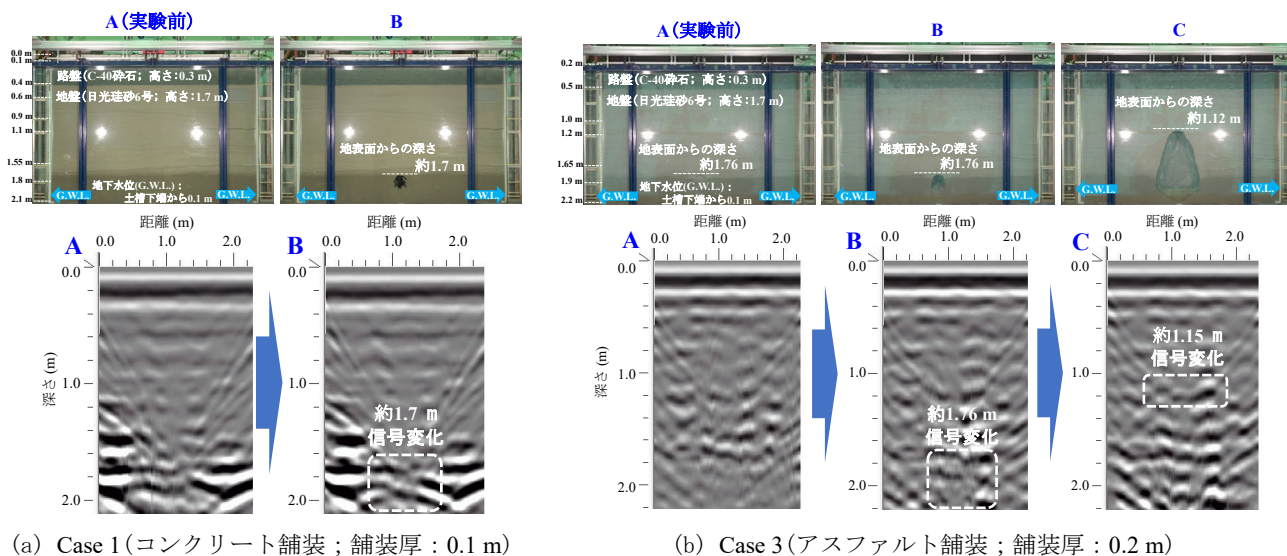


図-6.5 地中レーダーによる空洞の空間測定において、空洞の存在を表す双曲線状の異常信号が現れなかった実験ケース

実験ケースを図-6.5に示す。同図から舗装の種類や舗装厚によって、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探査では空洞の存在を示す双曲線状の異常信号が現れず、空洞の探知が困難であることが分かる(図-6.5(a)B及び図-6.5(b)B,C)。しかし、吸い出しが生じていない初期地盤、又は吸い出しが進んでいない時点の地中レーダー探査結果(図-6.5(a)A及び図-6.5(b)A,B)と比較すると、地表から1 m以深に形成・発達していた空洞の天端付近(白点線部)で信号の変化が生じていることが分かる。具体的には、空洞の形成及び発達によって、地盤と空洞の境界で電磁波の反射が生じ、それに伴う白黒の信号が新たに現れることから、当該空洞発達の前段階の地中レーダー探査結果と異なる信号可視化画像になる。このことは、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以深で空洞の発達を早期に探知しうることを示している。

6.4 まとめ

本章では、一連の大型吸い出し可視化実験の空洞の形成・発達の諸過程において、地中レーダーによる空間測定から得られた結果を比較・分析し、当該手法の空洞探知精度に及ぼす舗装の種類及び舗装厚の影響について記載した。さらに、上述の空洞形成・発達の諸過程において、空洞を早期に評価・同定しうる手法を提示した。

地中レーダーの空洞探知精度は、舗装の種類や舗装厚の影響を強く受け、舗装の種類や舗装厚によって地下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の

測定では空洞の探知が困難な場合があることが分かった。また、吸い出しがまだ生じていない又は進んでいない時点の地中レーダー探査結果との比較を通じ、信号の変化を捉えることで、空洞の同定が困難となる地下1 m以深で形成された空洞の天端位置を精度よく評価・同定できることが分かった。

7. 結論

本資料では、一連の実大規模の大型吸い出し可視化実験を通じて、舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び地盤の陥没に代表される吸い出し被害の過程を再現し、同過程及びその機構を明らかにすると共に、アスファルト及びコンクリート舗装の種類や舗装厚が吸い出し災害の発生機序及び地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす影響について記載した。さらに、地盤内に空洞が形成・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な深度においても、空洞を早期に評価・同定しうる手法を提示した。本資料で得られた主な知見を以下に示す。

7.1 舗装直下地盤の吸い出し、空洞形成・発達及び地盤の陥没過程

- 舗装直下地盤における吸い出し、空洞形成・発達及び地盤の陥没過程並びにその機構が明らかとなった。具体的には、吸い出しによって空洞が地盤内に形成された後、水理外力の変化に伴うサクシンの低下によって当該空洞は上向きに進展・拡大し、路盤の崩落と共に当該空洞の天端は舗装の直下に到達する。その後、水理外力の

更なる変化に伴うサクシンの消滅によって、当該空洞は左右に拡大し続け、舗装の破壊・陥没に至る。

- 舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び路盤の崩落過程は、主に地下水位に左右され、舗装の種類や舗装厚の影響を受けない。
- 空洞が舗装直下に達し、左右に拡大する際の舗装のたわみによる変位量及び舗装の陥没有無は、舗装の種類や舗装厚の影響を強く受ける。
- アスファルト舗装に比べ剛性が高いコンクリート舗装では、空洞の天端幅が2 m 規模に発達した際、コンクリート舗装の変位はアスファルト舗装に比べ小さく、さらに空洞が拡大した段階で大規模な陥没を引き起こす危険性がある。
- 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、舗装のたわみによる変位は舗装の種類や舗装厚に拘わらず実質的にゼロであり、舗装の変位から裏埋砂内に形成された空洞を探知することは困難である。したがって、適切な維持管理により、舗装直下の空洞を早期に探知することが重要である。

7.2 地中レーダーによる舗装直下地盤の空洞発達の探知精度及び早期評価・同定手法

- 舗装の種類や舗装厚は、地中レーダーの空洞探知精度に大きく影響し、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探査では空洞の探知が困難である。
- 地中レーダー探査を定期的に行い、吸い出しがまだ生じていない又は進んでいない時点の地中レーダー探査結果との比較に基づく、吸い出しによる空洞発達深度の早期評価・同定手法を提示した。

8. あとがき

本資料では、一連の実大規模の大型吸い出し可視化実験を通じて、臨海部舗装直下地盤の吸い出しによる空洞形成・発達及び地盤の陥没に代表される吸い出し被害の諸過程並びにその機構を明らかにした。また、アスファルト及びコンクリート舗装の種類や舗装厚が吸い出し災害の発生機序及び地中レーダーの空洞探知精度に及ぼす影響を明らかにし、適切な維持管理による空洞の早期評価・同定が重要であることを示した。さらに、本資料では、地中レーダー探査による空洞発達の早期評価・同定手法を提示しており、本手法は護岸や岸壁などの港湾施設の背後地盤における維持管理手法として幅広い活用が期待される。

臨海部の舗装直下において、空洞の生成から舗装の陥没

に至るまでの時間は、現場ごとの気象・海象特性や水理・地盤条件及び交通量などの利用状況等によって変化する。基本的に、地中レーダー探査は数年に1回程度の頻度で行うことが推奨されるが、上述の自然条件・施設の重要度などの現場の状況を考慮し、実際の空洞発生頻度に鑑み、調査を行うことが重要である。

(2024年8月8日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、国土交通省港湾局のご協力を得ている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 菅原吉浩, 山本泰司, 上久保勝美, 大井啓司, 時田恵生: 護岸の吸い出し被災事例調査と被災要因の検討, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 867-872, 2010.
- 2) 土木学会海岸工学委員会: 大蔵海岸陥没事故調査報告書, 125p., 2002.
- 3) <https://mainichi.jp/articles/20240414/ddl/k45/040/107000c>.
- 4) 高橋重雄, 鈴木高二郎, 徳淵克正, 岡村知光, 下迫健一郎, 善功企, 山崎浩之: 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, 第35巻, 2号, pp. 3-63, 1995.
- 5) 菅原吉浩, 山之内順, 上久保勝美, 山本泰司, 岩田真: 防波護岸における防砂シートの損傷条件と対策工に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_667-I_672, 2011.
- 6) 堀井一樹, 鈴木高二郎, 西野好生: 埋立前の護岸における防砂シートの耐久性に関する検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 74, No. 2, pp. I_1117-I_1122, 2018.
- 7) 赤司有三, 根木貴史, 樋口晃, 春日井康夫, 片桐雅明, 谷山健二, 田中睦, 平松敏和: カルシア改質土の法面勾配制御技術, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I_893-I_898, 2019.
- 8) 佐々真志, 石坂修: 吸い出し・陥没抑止に向けたケーソン目地透過波低減法, 港湾空港技術研究所資料, No. 1393, 2021.
- 9) Sassa S. and Ishizaka, O.: Net buffer method for suppressing internal erosion and collapse behind seawalls and quaywalls through caisson joint wave reduction, *Coastal Engineering*, Vol. 172, 104061, 2022.
- 10) 日本港湾協会: 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」部分改訂, 吸い出し, pp. 289-290, 2022.
- 11) 野口賢二, 田中茂信, 鳥居謙一, 佐藤慎司: 大型模型実験による緩傾斜ブロック堤の被災機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 756-760, 2000.
- 12) 小谷裕司, 吉村知恵, 前野詩朗, 名合宏之: 変動水圧による護岸周辺地盤の流動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 712, pp. 97-106, 2002.
- 13) Hur, D.S., Nakamura, T., and Mizutani, N.: Sand suction mechanism in artificial beach composed of rubble mound breakwater and reclaimed sand area, *Ocean Engineering*,

- Vol. 34, pp. 1104-1119, 2007.
- 14) Nakamura, T., Hur, D.S., and Mizutani, N.: Mechanism of backfilling sand discharge from a gap under vertical revetment, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 134, pp. 178-186, 2008.
 - 15) Sassa, S., Li, F., and Sekiguchi, H.: Response of saturated/unsaturated gravelly sand to tidal fluctuations, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No. 143, pp. 174-186, 2005.
 - 16) 小林孝彰, 佐々真志, 鈴木高二朗, 渡辺啓太, 具志良太, 前里尚, 平野年洋: フィルター層による吸い出し防止と防砂シート損傷リスク低減効果に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 73, No. 2, pp. I 354-I 359, 2017.
 - 17) 小林孝彰, 佐々真志, 梁順普, 後藤翔矢: 吸い出しと空洞形成及び陥没過程の可視化と防止対策としてのフィルター層の有効性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 74, No. 2, pp. I 264-I 269, 2018.
 - 18) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 後藤翔矢: 様々な水理外力下における地盤内の空洞形成・陥没の進行過程および吸い出し抑止法の研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I 937-I 942, 2019.
 - 19) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平: 地表面変位観測による地盤内の空洞陥没の予知および吸い出し抑止法の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I 859-I 864, 2020.
 - 20) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平, 鈴木高二朗: 地盤及び水理外力の特性を考慮した吸い出し・空洞形成・陥没機構とフィルター材による抑止法の研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 59, No. 3, pp. 1-20, 2020.
 - 21) 工代健太, 佐々真志, 梁順普, 高田康平: マウンド透過波による吸い出しの機序・影響範囲及びフィルター材を用いた抑止法の研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I 781-I 786, 2021.
 - 22) Kudai, K., Sassa, S., Yang, S., and Takada, K.: Influence of soil and hydraulic conditions on the processes of internal erosion, cavity formation and collapse behind coastal structures, *Coastal Engineering*, Vol. 170, 104013, 2021.
 - 23) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 村田一城, 小林千紘: 降雨や越波等の継続作用下における地盤内の吸い出し・空洞形成・陥没過程, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 78, No. 2, pp. I 727-I 732, 2022.
 - 24) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 村田一城, 小林千紘: 砂の粒子形状・間隙物性の違いによる風波・降雨・越波作用下の吸い出し・空洞形成・陥没特性, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 18, 23-18132, 2023.
 - 25) Sassa, S. and Watabe, Y.: Role of suction in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, F01003, <https://doi.org/10.1029/2006JF000575>, 2007.
 - 26) Sassa, S. and Yang, S.: Suction dynamics-induced bubbly sand under groundwater table fluctuations, *Sedimentology*, Vol. 70, pp. 280-288, <https://doi.org/10.1111/sed.13039>, 2023.
 - 27) Geophysics for practicing Geoscientists: Ground Penetrating Radar, <http://gpg.geosci.xyz/content/GPR/index.html>.
 - 28) 佐伯公康, 佐藤伸哉, 藤田士郎, 坪田幸雄: レーダーを用いた海岸堤防の空洞探査事例, 水産工学研究所技報, Vol. 25, pp. 33-55, 2003.
 - 29) 小池豊, 三木偉信: 三次元地中レーダを活用した鋼矢板岸壁エプロン部の補修履歴と吸出し空洞の評価, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp. 171-176, 2010.
 - 30) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 村田一城, 小林千紘: 臨海部の舗装直下地盤における空洞発達の時間同定と破壊過程に関する実大実験, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 17, 23-17132, 2023.
 - 31) <https://xtech.nikkei.com/kn/article/const/news/20100901/543141/>.
 - 32) <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/00137>
 - 33) <https://www.kobe-np.co.jp/news/backnumber2/202309/0016802247.shtml>.
 - 34) 森充広, 長束勇, 畑山元晴: 地下レーダー法の測定原理と適用事例, 農業土木学会誌, 第 67 巻, 第 11 号, pp. 65-72, 1999.
 - 35) 総務省: 地中レーダーの現状. https://www.soumu.go.jp/main_content/000477175.pdf
 - 36) ASTM: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, D6432-11.
 - 37) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, エプロン, pp. 1310-1328, 2018.

港湾空港技術研究所資料 No.1419

2024. 9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2024) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。