

新潟空港の埋立護岸空洞化要因の 特定手法について

宮坂 義朗¹・清水 美代¹・東宮 真琴¹

¹新潟港湾・空港整備事務所 第四建設管理官室 (〒951-8011 新潟市中央区入船町4-3778)

近年、港湾・空港などの埋立護岸背後において空洞が多数発見されており、対策を検討するためには空洞発生要因の追及が重要となる。新潟空港においても2020年度から2022年度にかけて空洞化調査を実施した。2022年度に実施した調査では、従来の調査方法に加えて、3次元モデル作成システムを用いた調査を試験的に実施した。本稿では、従来の調査方法と3次元モデルシステムによる試験調査方法とその結果について報告するとともに、調査の汎用性について考察する。

キーワード 空洞化調査, 維持管理, 3次元モデル作成システム

1. はじめに

近年、港湾や空港などの埋立護岸において背後に空洞が多数発見されている。空洞の発生要因は、防砂シートや防砂目地板の破損などがあり、破損や機能低下に至る要因も護岸構造や使用材料、自然環境、施工履歴など様々である。図-1 にこれらの概念図を示す。空洞化による事故を防ぐためには、維持管理に基づく定期点検により、空洞が広がる前の小さな空洞を発見する必要がある。空洞を発見した後は再度空洞が発生しないように、空洞発生の変因を追及することが重要である。

現在、新潟空港の埋立護岸において、空洞による舗装の陥没が確認されている。新潟空港の埋立護岸は1979年～1998年にかけて空港の拡張とともに整備された施設で、最も古い区間では整備から40年以上が経過しており、要因を特定して早期の復旧対策を行うことが喫緊の課題である。さらに、新潟空港においては、航空機の運航を妨げないよう留意して調査を行う必要がある。重機の高さや調査範囲等に制限がある。そのため、調査を実施するうえでは機器の軽量化・縮小化や工期短縮などが求められている。

そこで本調査では、新潟空港において、一般的に行われている空洞化調査手法に加えて調査が困難な箇所でも容易に構造物調査を行うことができる手法として開発中の3次元モデル作成システムを試験的に用いた空洞化調査を実施し、空港における本システムの汎用性を確認したため、本稿で報告する。

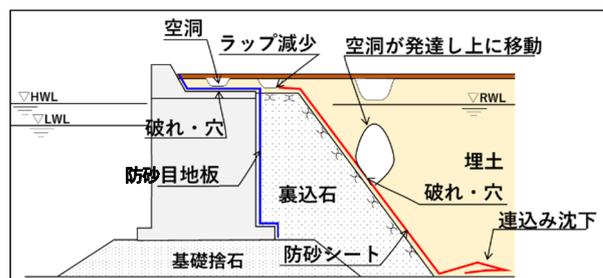


図-1 護岸空洞発生要因の概念図¹⁾

2. 空洞化調査について

(1) 空洞化調査概要

「令和4年度 新潟空港護岸構造物調査」において埋立護岸水叩き部と場周道路の空洞化調査を実施した。本調査は、過年度に空洞を確認し応急復旧した箇所の空洞化進行具合および新規空洞発生の有無について確認することにより、空洞化要因および対策工法の特定を目的としている。空洞化調査は、図-2, 3に示した調査範囲全域の深層部 (-1.5m～-3.0m) および過年度に応急復旧した箇所の浅層部 (-0m～-1.5m) についてレーダー探査を実施し、過年度調査で確認された空洞箇所についてスコープ調査および目視確認による詳細調査を行うものである。(表-1)

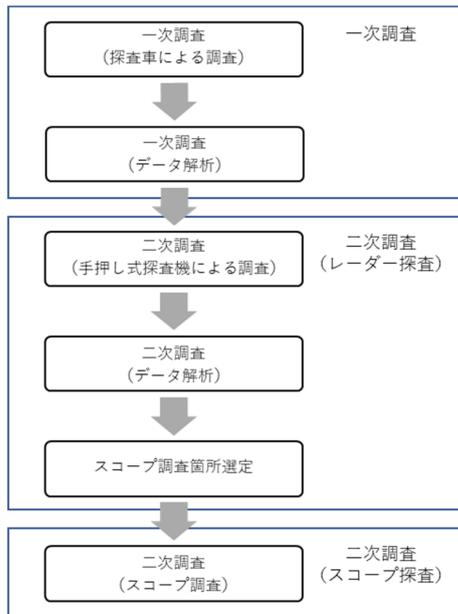


図4 路面下空洞発見・確認の標準的な調査フロー⁹⁾

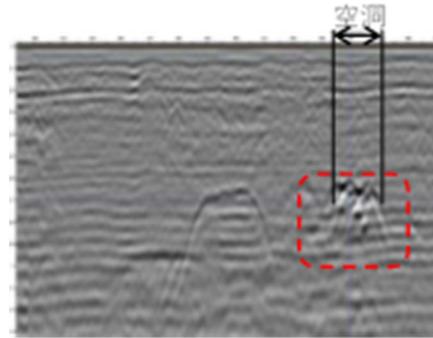


図5 レーダー探査の測定記録¹⁾



図6 レーダー探査機器

的に、一次調査として行う場合は、車両型の探査車を用いて広範囲の調査を行い、二次調査として行う場合は、手押し式の探査機を用いて狭い範囲の調査を行う。車両型と手押し式どちらにおいても、調査範囲を長手方向に平行に往復して測定を行うことが多い。図-5で示すような測定記録で異常箇所が検出された場合は、現地の異常箇所において手押し式探査機でメッシュ方向または放射状にレーダー探査を再度行うことによって、その大きさを決定する。

空洞の有無を判定する際は、一般に測定記録内に見られる典型的な反射波の形状に合致するかを基に判断する。そのため、熟練した経験を有する者が行う必要がある。また、レーダー探査は平面的にしか測定できないため、空洞内の正確な形状は把握できないとされている。

「令和4年度新潟空港護岸構造物調査」では、車両型と手押し式の2種類の探査機で計測を実施した。本調査で使用した計測機器を図-6に示す。車両型の探査車では、車両後方下面にレーダーを装備し、GPSにより自車の位置を把握しながら計測を行なった。車両に全周囲カメラを搭載し、舗装の表面状態も同時に撮影した。車両が入れないような狭窄箇所や空港の各種センサーが設置されているフェンス付近においては、手押し式の探査機を用いた。

(2) スコープ調査

スコープ調査は、レーダー探査では調査できない空洞の厚みを計測するために実施する。レーダー探査で空洞の位置を特定したのちに、空洞箇所の路面にボーリングマシンやコア抜き機で直径5cm程度の穴を開け、スコープカメラを挿入する。穴の断面を撮影することによ

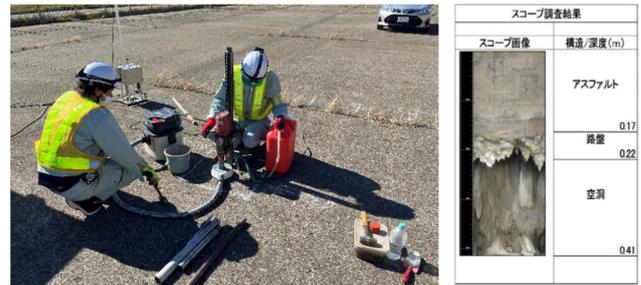


図7 スコープ調査実施状況および結果例

て、舗装厚、空洞の発生深度、空洞厚の確認を行う。ただし、スコープカメラでは空洞の横がりの距離を把握することはできない。

「令和4年度新潟空港護岸構造物調査」では、上記の標準的な方法と同様、コア抜き機で空洞に到達する深さまで直径5cmのコアを抜き、そこにスコープ調査機器を設置し、スコープカメラで深度方向の空洞厚を計測した。図-7にスコープ調査の実施状況および結果例を示す。

(3) 試験掘削

試験掘削は、舗装を撤去し空洞を直接目視する方法である。目視確認が可能のため、空洞の正確な形状や大きさを把握することができる。ただし、空洞箇所を特定しないと実施できず、かつ重機等の大型な設備を使用するためコストが比較的高い。また、広範囲に舗装を撤去する必要があるため、目視確認中は道路等を占有しなければならない。図-8に試験掘削状況を示す。

「令和4年度新潟空港護岸構造物調査」では、同時期に新潟空港護岸で施工していた別件工事で掘削を行ない、空洞の状況確認にあわせて防砂目地と防砂シートの損傷状況および損傷範囲を調査した。なお、防砂シートを



図-8 空洞調査を目的とした試験掘削の状況



図-9 防砂シートの全景写真

傷つけないために、防砂シートの50 cm手前まではバックホウで掘削し、防砂シート近くは人力で掘削を行なった。図-9に防砂シートの全景写真を示す。

4. 空洞化調査結果および要因の特定

「令和4年度 新潟空港護岸構造物調査」における空洞化調査結果および調査結果に基づいて特定した空洞化要因は以下の通りである。

(1) 調査結果

a) レーダー探査

深層部 (-1.5 m~-3.0 m) では異常箇所が検出されなかった。応急復旧箇所の浅層部 (0 m~-1.5 m) においても異常箇所は検出されず、再空洞化していないと考えられる。しかし、応急復旧箇所範囲外の浅層部で新たに9箇所の空洞が発見された。新たに空洞が検出された原因としては、①前回調査以降に新たに空洞が発生した、②前回の調査時点ではレーダーでの探査可能規模未満であった空洞が拡大した、③規模は変化していないが探査可能深度に移動・出現した等が考えられる。

b) スコープ調査

スコープ調査を行なった箇所では、過年度の調査結果とほぼ同様の位置で空洞が確認された。レーダー探査の



図-10 防砂シートの破れ

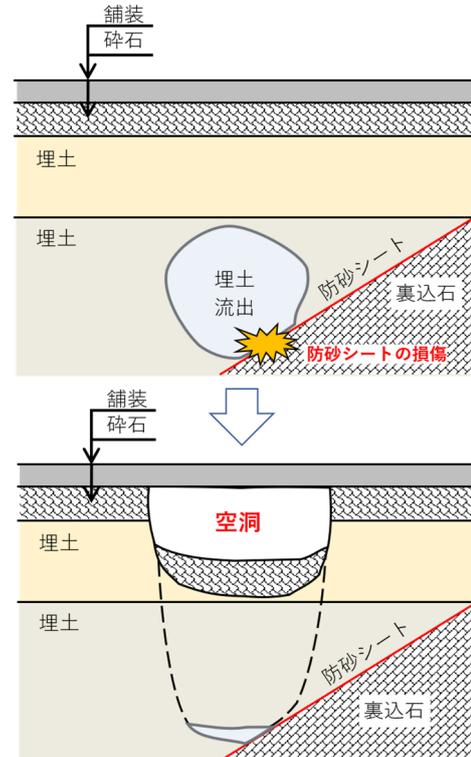


図-11 空洞化メカニズム概念図

結果と合わせると、大きいものでは8 m³程度の空洞が確認された。

c) 試験掘削

空洞は地下水位以上に位置しており、空洞の形状はほぼ円形で底部が鍋底状であった。空洞の底部に舗装の路盤材が堆積していた。また、防砂目地本体に損傷はなく、構造物に密着したままの健全な状態であった。防砂シートは一部にシートのずれや穴が確認された。

(2) 空洞化要因の特定

調査結果から空洞化要因としては、図-11のように防砂シートの損傷によって損傷部から埋土が流出して空洞が発生し、その後その空洞が時間経過につれて拡大しながら上部へ移動すると考えられる。また、防砂シートが損傷した要因としては、①防砂シート下に鋭利な裏込石があり上からの土圧によって裂けたことや、②防砂シートがずれた時に裏込石が引っかかったことなどが考えられる。

5. 3次元モデル作成システム

本調査では、前項までに示した従来の手法による調査に加えて、試験的に3次元モデル作成システムを用いた調査を実施した。システムの詳細を次に示す。

(1) システム概要

3次元モデル作成システムとは、3軸を持つジンバルカメラ（鉛直方向と水平方向に回転させることができるカメラ）を直径5 cm程度の穴から挿入して空洞内を撮影することで、撮影画像から空洞の3次元形状モデルを容易に構築するものである。専門知識が不要かつ、安価で軽量の機材を用いて目視調査と同等の成果が得られることを目標としている。目標を満たすために以下の3つの条件を設定し、これらを満足するシステムが考案されている。考案されたシステム構成を図-12に示す。

- ① スコープ調査と同じ直径5 cm孔を利用
- ② ジンバルカメラを用いて SfM で3次元モデルを作成
- ③ 移動が簡単で専門家を必要としない

空洞の3次元化は、SfM（Structure from Motion）と言われる技術を用いている。SfMとは、1900年代から実施されてきた航空ステレオ写真測量の原理を3次元に応用したものであり、複数画像から特徴点を検出して座標を算出し、3次元点群や形状を構築する技術である。概念図を以下の図-13に示す。SfMで3次元形状を作成するために必要な情報は、複数の画像のみでありカメラの座標などは不要である。

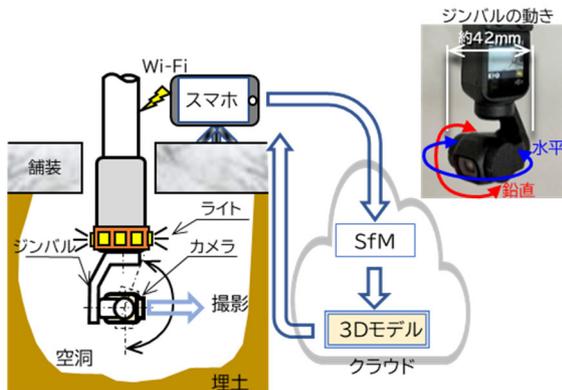


図-12 本システムの構成概念図

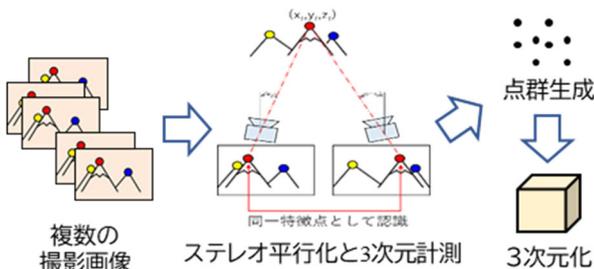


図-13 SfMの概念図

(2) システムを用いた調査

図-14に計測フロー図、図-15に計測状況写真および使用器具を示す。今回はスコープ調査で削孔した箇所計測を行なった。

(3) 従来手法との結果の比較

図-16に従来の調査方法による結果を示し、図-17に本システムで生成された結果を示す。従来、レーダー探査で平面的に得られる結果は長方形で表され、スコープ調査の結果と合わせると、空洞は直方体形状で表される。一方、本システムで生成された3次元形状では、空洞が球状で表され、空洞内部の色などを確認できた。なお、計測箇所は試験掘削していないため直接大きさの比較は行っていないが、レーダー探査との差は法線方向で0.5%程度であった。

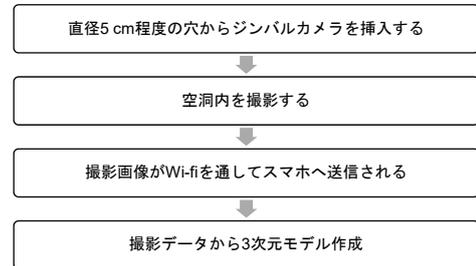


図-14 現地調査フロー図



図-15 現地計測状況と実際に使用した器具

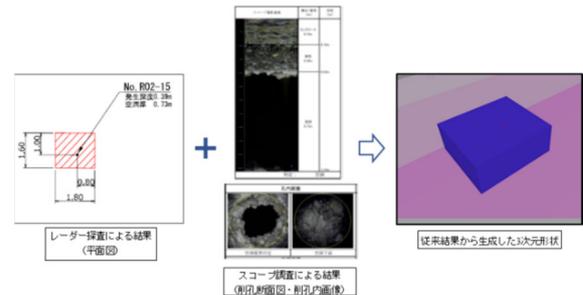


図-16 従来の調査方法による結果¹⁾

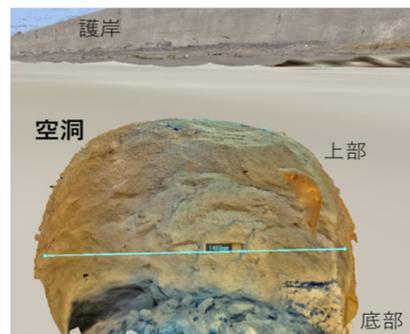


図-17 本システムで生成された結果

表2 従来の調査手法と3次元モデル作成システムを用いた手法の比較結果

調査方法		メリット	デメリット
従来の手法	レーダー探査 + スコープ調査	<ul style="list-style-type: none"> 一般的な手法のため技術を持つ業者が多数いる 比較的短時間で調査可能 微破壊のため路面開放が早い 試験掘削より安価 	<ul style="list-style-type: none"> 専門的な知識および技術が必要 空洞の正確な形状が不明 直方体で表現される
	試験掘削	<ul style="list-style-type: none"> 直接目視が可能 空洞の形状・状態を把握可能 	<ul style="list-style-type: none"> 空洞箇所を特定しないといけない コストが比較的高い 広範囲の路面規制が必要
新技術	3次元モデル 作成システム	<ul style="list-style-type: none"> 専門的な知識や技術が不要 3次元で空洞の広がり把握可能 遠隔地で確認可能 人力(1kg程度)で機材運搬可能 BIM/CIMとの統合が容易 	<ul style="list-style-type: none"> まだ開発段階である 空洞箇所を特定しないといけない 試験掘削と比較すると精度が劣る

6. 従来の手法との比較

従来の調査手法と3次元モデル作成システムを用いた手法の比較結果を次頁の表-2にまとめた。

本システムは、レーダー探査とスコープ調査をあわせて実施した場合と比較すると、平面規模については同等の精度を発揮でき、さらに空洞の形状や3次元の広がりを計測することができる。本調査においても、従来、直方体で表現されていた空洞を実際の形状により近い球状の空洞として表現することができた。また、試験掘削と比較した場合、小規模な装備で調査が可能となり調査期間が短くコストも安価となる。装備が小規模であるため、新潟空港のような制限のある場所でも容易に用いることができる。

以上の点から、本システムの汎用性としては、栈橋構造下面の点検や天井裏・壁の中の状況確認等、多様な分野での利用が可能であると考えられるほか、3次元データが取得できることでBIM/CIMとの統合が可能となり、維持管理の高度化に資すると考えられる。

一方で、本システムは開発中のため、課題も残っている。本調査で得られた課題として、①直径5cm程度の穴に入るほどの小型カメラは大型カメラに比べて精度が劣る、②3次元で認識するためにはドローンのように広く移動することが望ましいが穴の中では移動範囲に制限がある、③路面下空洞内は太陽光が入らないため照度の確保が困難といった点が挙げられる。

7. まとめ

本稿では、従来の手法であるレーダー探査、スコープ調査、試験掘削による空洞化調査を行うと同時に、3次元モデル作成システムによる計測を試験的に実施し、双方の結果を比較することで、空港における本システムの汎用性を確認した。前述したように開発中のシステムであるものの、維持管理分野への汎用性が期待され、従来の調査手法と併用しつつ効率的かつ効果的な要因特定手法の一つとしての利用が期待される。

謝辞：本稿を執筆するにあたり、パシフィックコンサルタンツ株式会社様には多くのデータとご助言を提供いただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中嶋道雄, 田中美帆, 高見澤拓哉, 松本裕樹, 清水利浩, 清水美代, 宮崎賢治, 東宮真琴: 路面化空洞や狭小場所の3次元形状・状態確認システムの開発, 第48回海洋開発シンポジウム, 2023
- 2) 路面下空洞探査車の探査技術・解析の品質確保コンソーシアム: 路面下空洞探査技術マニュアル(案)平成29年9月, p10, 2017. [Consortium for Quality Assurance of Exploration Technology and Analysis for Under-Road Exploration Vehicles: Technical Manual for Exploration of Under-Road Cavities (Draft), p 10, 2017.]