

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04228

研究課題名（和文）ロボットセンシングによるRC構造物の内部診断：品質や状態のバラツキの把握と活用

研究課題名（英文）Durability Assessment of Concrete Structures by Using Non-Destructive Sensing Robot

研究代表者

蔵重 勲（Kurashige, Isao）

一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・主任研究員

研究者番号：20371461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリート構造物の合理的な予防保全型維持管理技術の確立やその体系への転換には、多くのストックを有する実構造物の品質や状態のバラツキを定量的かつ効率的に把握することが肝要であり、それらを解決可能な高度ロボットセンシングシステムの構築を意図し、その基礎的な技術を開発することを目指した。

鉄筋コンクリートの耐久性を左右する主たる因子は鉄筋のかぶり厚さや水分等の供給性であり、これらの情報を同時かつ広範囲連続的に取得可能な非破壊試験法の調査分析から電磁波レーダ法を抽出し、これを搭載可能なコンクリート壁面移動ロボットを開発して、その有用性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膨大なインフラストックを外観変状の定期点検によって維持管理する事後保全体系では、人口減少や経費削減が避けられない今後、行き詰まりが懸念される。これに対し、経年劣化のリスクを予め把握できれば、点検の合理化が可能となる上、予防保全体系への転換にもつながる。一方、電磁波レーダ法は専ら鉄筋かぶりの評価に用いられてきたが、原理的にコンクリートの含水率と強い相関を持つ比誘電率の推定も可能である。これら鉄筋コンクリートの劣化リスクを左右する因子情報を同時評価可能な非破壊試験法として電磁波レーダ法を位置付け、ロボット技術との融合によりその効果的な活用法を見出した。以上の点が、社会的かつ学術的な意義と見る。

研究成果の概要（英文）：To establish a rational preventive maintenance management technology for reinforced concrete structures and to move toward such a system, it is essential to quantitatively and efficiently identify variations in the quality and condition of actual structures with large stock volumes. We aimed to develop fundamental technologies to solve these problems. The main factors affecting the durability of reinforced concrete are the cover thickness of reinforcing steel bars and the presence of moisture which is responsible for the corrosion of the steel bar. From the investigation and analysis of nondestructive inspection methods, we extracted the electromagnetic radar method that can simultaneously and continuously acquire such information over a wide area, developed a concrete wall-moving robot that can be equipped with this nondestructive testing method, and confirmed its usefulness.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：鉄筋コンクリート構造物 予防保全型維持管理 劣化リスク 非破壊試験 ロボットセンシング 電磁波レーダ かぶり 含水率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

予防保全型の維持管理がインフラの長期供用化とライフサイクルコストの縮減に有効であることが国土交通省から示され、持続可能な構造物の維持管理・更新体系へのパラダイム転換が期待されている。ただ、コンクリート構造物の品質や状態に関する情報に基づかない限り劣化リスクの定量評価は不可能であり、点検の合理化（リスクの低い構造物や部位の点検の方法・頻度の簡素化）や効果的な予防措置（リスクが高い構造物や部位の点検の方法・頻度の厳密化、あるいは補修処置）にはつながらない。このように、実効的な予防保全型の維持管理システムを実現するためには、莫大な量を抱えるインフラストックに対して、構造物間ならびに構造物中の品質・状態に応じた“劣化リスクの差異（バラツキ）”を効率的かつ定量的に把握する工学技術の整備・確立が求められている。労働人口の急激な減少下にある我が国においては、そのような技術開発は、従前同様に計測足場や高所作業車を利用した人手に頼る方法を意図するのではなく、非破壊試験技術とロボット技術の融合による高度に自動化されたセンシングシステムが効果的であり、近い将来に必須の技術となることが予想された。

一方、従来の一般的なインフラ定期点検は、鉄筋腐食やひび割れ等の外観変状の目視観察などを主体とした事後保全的対応によるものであり、これを予防保全型に転換させるには、劣化リスクをどのような情報に基づいて評価することが可能か整理する必要が課題としてあった。コンクリート標準示方書〔維持管理編〕には、現状の知見や技術に照らしたその方法論が概念として記載されているが、予防保全型維持管理への転換・普及を促すには、大量・広範な構造物の劣化リスクを簡素・効率的に評価可能な社会実装型の具体的方法論を整理することが必要である。この際、劣化リスクの評価に必要な情報と、現状の試験技術あるいは今後の技術開発によって取得可能な情報の対比分析から、まずは可能な限りシンプルな考え方に基づいた初期導入型の体系として提示することが重要と考えられた。

以上のように、予防保全型維持管理体系の転換に向け、非破壊ロボットセンシング技術を活用したコンクリート構造物の劣化リスク評価方法論の構築が社会的要求として高まっている。

2. 研究の目的

研究の最終目標は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を左右する品質や状態の非破壊評価に基づいた劣化リスクの判定技術を開発し、それによって得られる情報を点検の合理化や対策措置の要否判断に反映させる方法論を提示することである。これが達成されれば、予防保全型の維持管理システムの効果的な運用が可能となり、経済合理性や効率性が伴った持続可能なインフラの維持管理・更新の実現につながるものと考えられる。また、実構造物の品質・状態がデータベースとして整理されれば、コンクリート構造物の設計や施工に対しても有用な情報としてフィードバックが期待される（図1）。

このような視点から、本研究では下記項目を個別の目的として設定し研究を実施した。

(1) ロボット技術との融合が見込まれる非破壊試験方法の抽出

鉄筋コンクリートの劣化リスク評価に必要な情報因子の項目整理、ならびに各因子情報の非破壊ロボットセンシングによる取得可能性の調査分析から、壁面移動ロボットに搭載する非破壊試験装置を抽出する。

(2) 非破壊試験装置搭載型コンクリート壁面移動ロボットの開発

上記検討により選定した非破壊試験装置を搭載可能かつコンクリート構造物表面の広範囲を移動可能なロボットを開発する。

3. 研究の方法

(1) ロボット技術との融合が見込まれる非破壊試験方法の抽出

鉄筋コンクリートの主たる劣化原因である鉄筋腐食を対象に影響因子を整理し、各因子情報を評価可能な非破壊試験技術を調査した。具体的には、土木学会の示方書改訂委員会維持管理編部会の活動、ならびに日本非破壊検査協会の含水率試験研究委員会、電磁波レーダ研究委員会、透気試験研究委員会の活動における有識者との議論や調査により情報を取得した。

また、それらの非破壊試験方法を壁面移動ロボットに組み込んだ場合の利点や課題等を分析し、ロボットセンシング技術が有効かつ活用が見込まれる非破壊試験方法を選定した。

(2) 非破壊試験装置搭載型コンクリート壁面移動ロボットの開発

まず、コンクリート壁面を広範囲連続的に移動可能なロボットの駆動機構の整理と開発事例を調査して、ブロー吸着機構の壁面移動ロボットを試作した。その後、ロボットとの融合が見込まれる非破壊試験装置を対象にその搭載方法を検討し、壁面移動型非破壊試験ロボットを開発した。

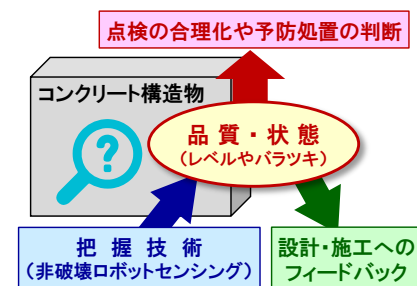


図1 予防保全型維持管理体系の構築に向けた研究のねらい

4. 研究成果

(1) ロボット技術との融合が見込まれる非破壊試験方法の抽出

コンクリート構造物の鉄筋腐食リスクを左右する最も支配的な要因は鉄筋のかぶり厚さであり、その重要性は認識されているものの、特に既設構造物においてはその情報取得に多大な労力や費用を要することから、ほとんど把握されていない実状がある。設計で想定した耐用期間よりも早期に鉄筋腐食が顕在化する多くの場合は、実際のかぶり厚さが設計値よりも不足していることによる。このかぶり厚さが、構造物間あるいは構造物内でどの程度の差異やバラツキを持っているものなのか把握できれば、かぶり厚さ不足による腐食リスクが高い構造物や部位の選別が可能となる。このような考え方を整理し、まず壁面移動ロボットに搭載すべき非破壊試験装置として、電磁波レーダ法鉄筋探査機を抽出した。

かぶり厚さが小さな条件でも、乾燥雰囲気や曝されたり、緻密性の高いコンクリートで保護されたりするものは、鉄筋腐食のリスクは無視し得る場合もあり、鉄筋に対する水分供給性の把握も維持管理を行う上で効果的と考えられた。しかし、コンクリート含水率の非破壊評価は、電気抵抗や静電容量を測定する押当て式の装置によるマニュアル操作によって実施されており、広範囲の効率的把握を志向する壁面移動ロボットとの親和性に乏しく、現段階での適用は難しいと判断された。対して上述の電磁波レーダ法は、コンクリートの含水率と強い相関を持つ比誘電率の推定にも原理的に活用でき、電磁波レーダ搭載型壁面移動ロボットの開発が鉄筋腐食リスク分布の把握に有効と判断した。

ただ、コンクリートの比誘電率の推定方法は日本非破壊検査協会規格 NDIS3429:2021 にていくつかの方法が示されているものの、電磁誘導法鉄筋探査による実かぶりの測定を必要とするものや、それを必要としない方法でも推定精度が十分に検証されていないものなどがあり、これらの点については今後の検討課題として残る。

(2) 非破壊試験装置搭載型コンクリート壁面移動ロボットの開発

図2は、非破壊試験装置の実装に際し、コンクリート壁面を広範囲に連続移動可能なロボットとして試作したものである。コンクリートの壁面に持続的に吸着し、任意の方向で移動が可能となるよう、ブロワーの到達圧力と排気流量、ならびにロボットの吸着面積と重量等に基づき設計と改良を繰り返し、バッテリー駆動・遠隔操作が可能な壁面移動ロボットのプロトタイプを開発した。

また、図3のとおり、この原型機を重量約1kgの市販電磁波レーダ装置を搭載できるように各部の仕様変更やグレードアップを行い、電磁波レーダ搭載コンクリート壁面移動ロボットを開発した。

(3) 今後の展望

コンクリート構造物の予防保全型維持管理システムの確立に向けた技術開発の一つとして非破壊ロボットセンシング技術について検討した。鉄筋のかぶり厚さのみならずコンクリート含水率の同時測定も意図したこの様な試みは、国内外で見当たらない挑戦的な研究開発ではあったが、コンクリート、ロボット、非破壊試験の各分野の技術融合によりその可能性を見出すことができた。今後は、図4に示すような本研究で得られた成果と課題に対して、引き続き検討を深めたいと考える。

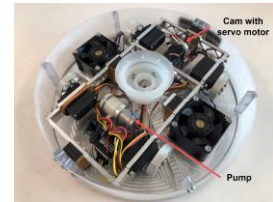


図2 真空チャンバー内蔵ブロワー吸着型壁面移動ロボットの試作機と壁面移動の軌跡（赤線）



図3 新たに開発した電磁波レーダ搭載ブロワー吸着型壁面移動ロボット

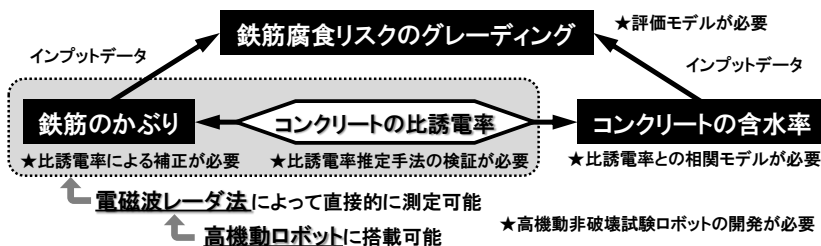


図4 研究成果に基づいた今後の展開と解決すべき課題

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 M. Mizuta, T. Takanashi, Y. Otake, A. Ueno, I. Kurashige, H. Ueda, Y. Kubo
2. 発表標題 Nondestructive test for visualization of water movement in concrete using neutron imaging
3. 学会等名 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 下澤和幸、湯浅昇、蔵重勲、佐藤大輔、野中英、山崎順二、澤本武博
2. 発表標題 既存RC構造物の表層品質評価に向けた透気性と含水率に関する共通試験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西渡、蔵重勲、米田完
2. 発表標題 コンクリート壁面の鉄筋探査を行うフロア式壁面走行ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 菅野巨、蔵重勲、米田完
2. 発表標題 天井走行ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 安達壮紀、蔵重勲、米田完
2. 発表標題 ワイヤーを用いた周長可変式柱検査ロボットの開発 - 検査機搭載における動作検証 -
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岸利治, 上田洋, 上野敦, 蔵重勲
2. 発表標題 コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する 研究小委員会 (362委員会) の活動
3. 学会等名 理化学研究所2022年度RANSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 蔵重勲
2. 発表標題 実構造物を対象としたコンクリートの水分浸透性評価の考え方と検討課題について
3. 学会等名 土木学会コンクリート委員会コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する研究小委員会成果報告・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 蔵重勲
2. 発表標題 実構造物における水分浸透と鋼材腐食の進展について
3. 学会等名 土木学会コンクリート委員会コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する研究小委員会成果報告・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池賢太郎, 加藤佳孝, 蔵重勲, 上野敦, 高橋駿人
2. 発表標題 水分浸透速度係数試験におけるコンクリートの 吸水量と水分浸透深さとの関係
3. 学会等名 土木学会コンクリート委員会コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する研究小委員会成果報告・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢吹太一, 猪熊唯史, 上野敦, 蔵重勲, 上東泰
2. 発表標題 既設構造物に着目した コンクリートの水分浸透試験に関する検討
3. 学会等名 土木学会コンクリート委員会コンクリート中への水分浸透評価とその活用に関する研究小委員会成果報告・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小池賢太郎, 加藤佳孝, 蔵重勲, 上野敦, 高橋駿人
2. 発表標題 コンクリートの吸水量から水分浸透深さへの変換に関する一検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 曾我部巨, 蔵重勲, 米田完
2. 発表標題 段差踏破可能な省自由度壁面移動ロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安達壮紀、蔵重勲、米田完
2. 発表標題 ワイヤーを用いた周長可変式柱昇降ロボットの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水田真紀、高梨宇宙、大竹淑恵、上野敦、蔵重勲、上田洋、久保善司
2. 発表標題 中性子イメージングによる非破壊水分浸透速度係数試験
3. 学会等名 土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	米田 完 (Yoneda Kan) (70221679)	千葉工業大学・先進工学部・教授 (32503)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------