

研究委員会 中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関する研究委員会

小林 孝一*1・大竹 淑恵*2・兼松 学*3・久保 善司*4・瀬古 繁喜*5・長谷 俊彦*6

要旨：中性子線は X 線よりも強い透過能力を有し、近年、コンクリートに適用する研究が行われるようになってきた。(1) 水の移動の経時観察, (2) 内部の欠陥 (滯水や空隙) の検出, (3) 塩分の非破壊測定, 等を定量的に行えるため、コンクリート構造物の健全性に関わる重要な情報を得ることができる可能性を持っている。本委員会では小型中性子源の利用を軸に、中性子線を、(1) コンクリート構造物の変状個所のスクリーニング技術, (2) コンクリートの品質や劣化・損傷状態の診断技術, として活用すること, さらにはその成果を踏まえて、(3) コンクリート構造物の維持管理体系のシナリオを作成すること, を活動の目的とした。

キーワード：中性子線, 非破壊調査, 水, 塩分, 維持管理

1. はじめに

コンクリート構造は数多くのインフラを構成し、人々の重要な生活基盤となっている。コンクリート構造が多用される理由として、適切に設計、施工された場合に極めて耐久であることが挙げられるが、実際には早期劣化の事例が多数あり、かつ、高度成長期に建設された構造物の老齢化も急速に進行しており、構造物の維持管理の重要性があらためて認識されるようになってきている。建築分野においても事情は同様で、RC 造, SRC 造は耐用年数の長い構造であることを考えると、これらが今後住宅ストックに占める割合は大きくなると予想される。

これら膨大な社会資本ストックや建築物を維持管理するための点検・診断の技術向上や点検業務の効率化・高度化が最重要課題となっている。厳しい財政状況や熟練技術者の減少という状況において、事故を未然に防ぎ、予防保全により構造物のライフサイクルコストの最小化を実現しつつ、資産価値の低下を防ぐためには、非破壊調査等の新技術を活用する技術支援や詳細調査の技術開発による効率化・高度化が大きく期待されている。

このような状況の下で、コンクリートの状態を中性子線を用いて調査することが試みられるようになってきた。中性子線は X 線よりも強い透過能力を有し、これまで、1) コンクリート中の水の経時観察 (透過中性子を利用したイメージング), 2) コンクリート内部の欠陥 (滯水や空隙) の検出 (後方散乱中性子を利用した反射イメージング), 3) コンクリート中の塩分の非破壊測定 (中性子捕獲即発γ線を利用した元素分析) 等の利用方法が提案

されている。すべて定量評価できる可能性を持ち、そのうち 2) と 3) に関してはコンクリート表面から深さ方向の距離情報も非破壊で得られる。水はコンクリートの特性を左右し、水と塩分はコンクリート構造物の劣化進行に影響を与えることから、中性子線は、コンクリート構造物の健全性に関わる重要な情報を与える手段になる可能性を持っている。

表-1 委員会の委員構成

委員長	小林孝一 (岐阜大学)
幹事	大竹淑恵 (理化学研究所)
	兼松 学 (東京理科大学)
	久保善司 (金沢大学)
	瀬古繁喜 (愛知工業大学)
	長谷俊彦 (高速道路総合技術研究所)
委員	五十嵐豪 (東京大学)
	石川ゆかり (中研コンサルタント)
	大島義信 (ナカノフドー建設)
	大野健太郎 (東京都立大学)
	岡崎慎一郎 (香川大学)
	小野秀一 (日本建設機械施工協会)
	金光俊徳 (電力中央研究所)
	酒井雄也 (東京大学)
	鈴木正樹 (竹中工務店)
	富井孝喜 (大林組)
	松沢晃一 (建築研究所)
	依田侑也 (清水建設)
渡辺 健 (鉄道総合技術研究所)	
顧問	氏家 勲 (愛媛大学)

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博 (工) (正会員)

*2 理化学研究所 光量子工学研究センター チームリーダー 理博 (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部 建築学科 教授 博 (工) (正会員)

*4 金沢大学 理工学域 環境デザイン学類 准教授 博 (工) (正会員)

*5 愛知工業大学 工学部 建築学科 教授 博 (工) (正会員)

*6 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室長 (正会員)

以上を背景に、2018年度に「中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するFS委員会」が設置され、中性子線のコンクリート構造物に対する非破壊調査での利用について、1年間のフィージビリティスタディーを行なった。その成果を受け、2019、2020年度には「中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関する研究委員会」が活動を行なった。表-1にその委員構成を示す。

2. コンクリート工学分野で利用可能な中性子源

コンクリートの内部を透視する方法としてよく知られているのはX線であり、近年、PCケーブルのダクト内のグラウト未充填の調査等に活用されている。このX線が電磁波の一種であるのに対し、中性子線は粒子線に分類され、中性子の粒子が束状になって進んでいく状態である。中性子線の特徴は、水素、リチウム、ホウ素などの透過率が低く、セメントや骨材の主成分であるけい素、カルシウム、酸素、アルミニウム、鉄などの透過率は高い(透過しやすい)ことである。特に、コンクリートの劣化の大多数には水が関与するが、中性子線は水を直接捉える事ができるという点がX線とは異なる。

コンクリートやコンクリート構造物に対して利用実績のある中性子源には、以下のようなものがある。

(1) 原子炉

原子炉にて核分裂反応によって発生する中性子ビームを取り出して利用するものである。現在、国内には日本原子力研究開発機構が運用するJRR-3と京都大学複合原子力科学研究所が運用するKURが存在している。

(2) 加速器

加速器によって加速された粒子線(陽子線や電子線など)をターゲットに衝突させて核反応を起こし、それによって中性子を発生させるものである。大型のものの代表例はJ-PARCであり、高い加速エネルギーによる核破砕反応を利用した高効率大強度中性子源である。一方、本委員会でも用いた理化学研究所のRANSは低エネルギー核反応を利用しており、発生効率は低い装置全体の小型化を実現している。大型と小型の装置では加速エネルギーは約1000倍異なるが、中性子発生法としては両者共にこの方式に分類される。近年は医療用を目的とした加速器方式の中性子源の新設計画も多い。

(3) RI (radioisotope の略)

^{252}Cf (カリホルニウム) の自発核分裂により発生する中性子を利用するものである。前述の二者は中性子発生強度がこの方式の数千倍から10万倍以上あり、かつ収束ビームとして利用可能であるのに対して、この方式は中性子強度が弱い散乱型の線源である。

3. 構造物の検査・診断への中性子線活用の検討

3.1 検討方針

コンクリート構造物の建設時の品質管理に関する検査、既設コンクリート構造物の変状の有無を判定する調査、構造物の初期欠陥、損傷、劣化の種類に分類し、変状を把握する調査など、それらの調査から得られる情報の種類や精度は、目的に応じてさまざまである¹⁾。また、これらの結果を複数組み合わせることで総合的に健全度評価の判定を行い、追加調査や必要な対策を選定する。

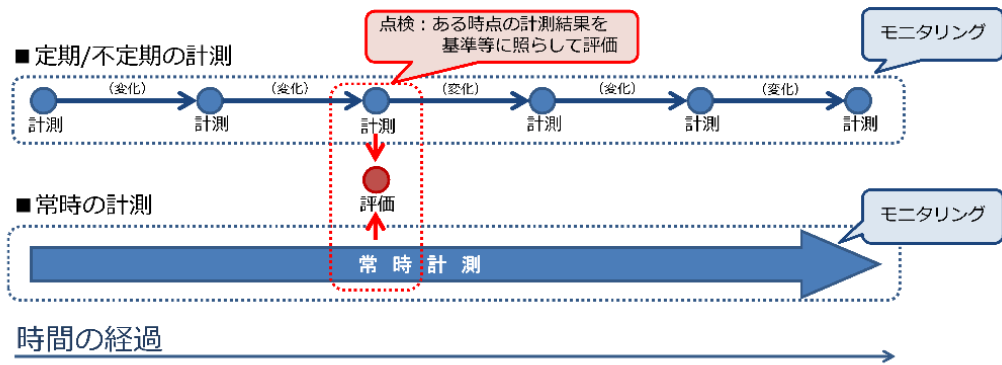
そこで、中性子線を用いた構造物の検査・診断への適用に向けて、検査・診断の現状と課題の整理を行うこととした。そのため、現状の検査・診断に関する基本事項をこれまでの各種機関での取組みから整理することとした。

3.2 検査・診断の目的と要求される技術

検査・診断の目的は、最終的にはそれらの結果から構造物の健全度を評価し、適切な対策を講じることにある。

橋梁の場合には、個々の調査結果から総合的に判断された桁ごと、もしくは橋ごとの健全度に基づき対策を講じる必要があるため、非破壊調査の結果が適切な対策と結びついている必要がある。例えば、評価された事象(例えば、鉄筋の初期的な腐食)に対して講じる対策がなければ、「健全」もしくは「劣化初期」と判断されてしまい放置される場合もあるため、検出された事象への有効な対策があつて初めて調査結果が価値のあるものとなる。また、非破壊調査の精度が向上し、微細な変状事象が検出できたとしても、それに対応する適切な措置が実施されなければ、精度向上の意義も薄れてしまうこととなる。特に予防保全を目標とした調査の場合は、劣化初期の事象を検出する技術と合わせて、劣化初期段階でも有効な予防保全対策が必要で、両者が揃って初めて非破壊調査の意義が生じる。しかし、「調査」から得られた客観的事実を基にして、どのような「対策」を選定するのかは、技術者の暗黙知による判断となっている。また、一般に非破壊調査においては、調査可能な領域の限界や精度の向上が困難なものがあるなど、現地への適用において技術的課題も多い。そのため、複数の調査方法による結果を組み合わせた評価法の確立や、1つの機器で複数の劣化が調査可能な機器の技術開発、これまでの非破壊調査でできなかった領域の調査が可能となる手法の技術開発が今後の研究課題と考えられる。

「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会(国土交通省HP)」では技術開発の方向性が示されており²⁾、点検およびモニタリングは例えば図-1²⁾のように定義されている。また、維持管理に対して期待される役割は、持管理段階の点検時、補修時、非常時毎に区分しされ、モニタリング技術に求めるものおよび現場適



(参考) 広辞苑での意味

点検：一つ一つ検査すること。

⇒検査：基準に照らして、**不適適や異状・不正の有無**などをしらべること。

モニタリング：観測・調査・分析すること。

⇒観測：自然現象の**推移・変化を観察・測定**すること

⇒調査：ある事項を**明確にする**ためにしらべること。

⇒分析：ある物事を分解して、それを**成立させている成分・要素・側面を明らかに**すること。

図-1 点検およびモニタリング技術の定義²⁾

表-1 モニタリング技術に求められるものと現場適用にあたっての供えるべき要件²⁾

要求されるもの	現場適用への要件
<ul style="list-style-type: none"> ・目的に応じた計測内容、箇所、頻度、精度、信頼性 ・計測内容等に見合ったセンサ等の機器、システム ・現場に適用可能な経済性、操作性、耐久性 ・計測データ等と劣化・損傷・修繕等との合理的関連性 	<ul style="list-style-type: none"> ・トータルコストの縮減・平準化の達成に見合ったコストで実現できること ・劣化損傷等の把握すべき事象に見合った精度・信頼性を有すること ・劣化メカニズム等の技術的な知見レベルに整合していること ・供用中の様々な環境において性能を維持できること ・構造物の寿命や点検サイクルに見合った期間、性能を維持できること ・大量の計測データを効率的に収集・整理・分析し、維持管理に活用できること ・建設・供用開始後でも設置・データ取得が可能であること

用にあたって備わるべき要件が表-1²⁾に示すように整理されている。

本委員会においても、このような方向性を踏襲しながら調査を行った。具体的な構造物として、PC 構造物、道路橋 RC 床版、港湾構造物、電力施設構造物、農業水利施設、および建築物を対象とした。

各構造物について詳細に述べるには紙面が不足するため、ここでは代表例として、PC 構造物に対する検討結果を紹介する。

3.3 PC 構造物の維持管理への適用性

PC 構造物における劣化と性能に関連付けて、点検・診断調査における現状の課題整理を行うこととした。PC 構造物の劣化については、特に PC 鋼材の腐食・破断に関連する要因に着目し、点検・調査個所の抽出を行い、維持管理のシナリオをイメージして、中性子線活用の適用範囲について検討を行うこととした。

PC 構造物における劣化程度と性能低下の概念図を図-2 に示す。PC 構造物においては、点検・診断では、劣化進行程度に対する PC 桁としての性能低下についての概念が関連付けられている。その一方で PC 桁の耐荷性

能に関する特徴としては、曲げ作用に対する荷重とたわみの関係において、RC 桁に比べてひび割れが発生してから破壊までの耐荷力の余裕が少ないことが挙げられる。このことから、PC 構造物において、性能低下の大きな要因となる PC 鋼材の腐食と破断を発生させる劣化事象に対する点検・調査・診断を行うことが重要となる。

PC 構造物における維持管理は、劣化の前兆を捉え、劣化が生じる前に対策を講じる予防保全型と、関連する技術基準を把握したうえで点検によって確認された劣化状態の評価・判定を行い必要に応じて補修・補強を行う事後保全型に区分されている。点検による劣化状態は、ひび割れの発生状況や漏水の有無、鋼材腐食などによるコンクリートの浮き・はく離などの他に、たわみの発生有無、床版上面劣化による路面の舗装のポットホールの有無などにより判定が行なわれる。

本委員会においては、PC 構造物について供用年数を想定した維持管理シナリオイメージにより、中性子線活用の適用性の検討を行った。図-2 に示す性能劣化曲線では、供用年数に対して、補修・補強により延命化を図る予防保全型の案と劣化が進行して供用性能を消失する前

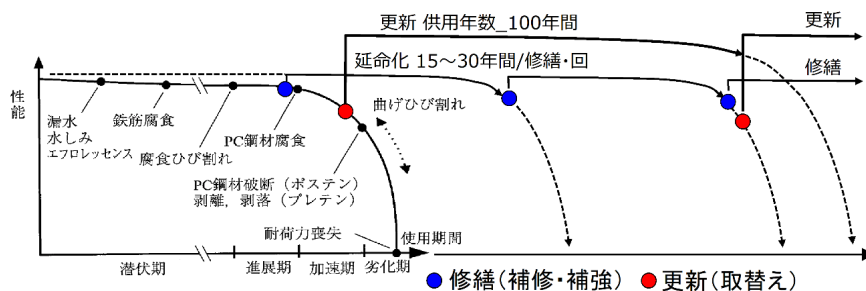


図-2 PC 構造物の維持管理シナリオイメージの概念図

に更新を行う事後保全型の2つのシナリオを示している。そのため、維持管理期間に、点検・調査・診断、健全度評価、対策設計、補修・補強、更新を実施していく中で、中性子線活用の可能性のある点検・調査・判定項目として、既往の非破壊検査法による健全度評価や対策検討につながる調査項目の抽出を行い、それらの方法との対比を行うこととした。

3.4 PC 構造物の非破壊検査・診断技術への適用性

中性子線を用いた検査・診断の活用方針（方向性）の検討するため、PC 構造物の変状把握において中性子線の活用が期待される変状（事象）とその劣化要因ごとに活用が望まれる非破壊検査法の整理を行うとともに、現状の非破壊検査技術に関する最新情報について整理を行った。

(1) 変状

その変状としては、主に水が関与し、場合によっては水以外の劣化因子が同時に水とともに PC 構造物内へ侵入し生じるものを抽出した。PC 箱桁の PC 鋼材配置と漏水経路を図-3 に示す。

その例として、プレキャスト PC 桁における水の侵入に関わる PC 鋼材の腐食破断の事例を以下に述べる。プレキャスト PC 桁は、支間長 20~40m 程度で I 断面や T 断面の桁を架橋地点付近や工場で作成した後、トラックレーン等で架設する形式である。PC 桁の PC 鋼材は、支間 20m 程度の場合は桁の背面に PC 鋼材が定着されているが、支間 40m を超えるような場合には主桁に上縁定着されているものがあることから、桁の背面においては伸縮装置からの漏水により定着部から PC 鋼材に水が浸入する。また、上縁定着部においても路面からの水が浸入するため、凍結防止剤を含んだ水の浸入により PC 鋼材が腐食・破断する事象が発生している。

(2) 劣化要因と非破壊検査法

「水」の浸入（PC グラウトの充填不良）については、路面排水による舗装からの侵入や、伸縮装置の漏水などによる PC 鋼材の定着部からの水の浸入により、グラウトの充填が不十分な鋼製シース内に水が浸入し、PC 鋼材の腐食が進展し破断に至る可能性がある。橋面の滞水や

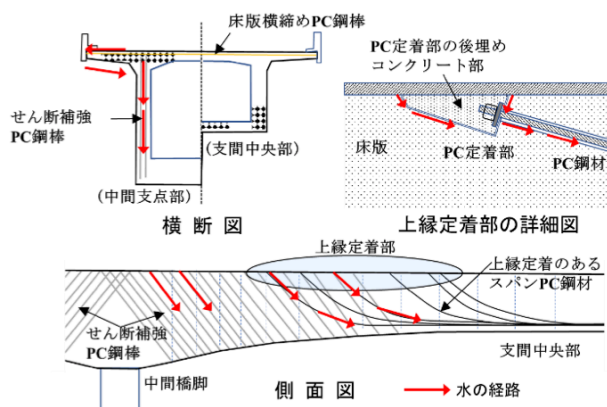


図-3 PC 箱桁の PC 鋼材配置と漏水経路

排水装置の不具合などによって、路肩部からの漏水による劣化が生じている。その他には、施工目地やひび割れなどから「水」が浸透する。コンクリートのはく離や鉄筋露出、錆汁などは、「水」の浸透により劣化がさらに進行した形で表面化したものがある。道路橋などでは凍結防止剤を含む「水」の浸入による影響が大きい。このことから、水の浸入経路を把握するための非破壊検査の活用が望まれている。

「塩化物」については、海岸付近の飛来塩分の多い架橋地点、あるいは冬季に凍結防止剤を多量に散布する道路橋などにおいて、塩害や凍害スケーリングによる劣化が生じる可能性が考えられる。コンクリート内の塩化物量が発錆限界量を超えると鋼材の腐食が懸念されることから、コンクリート内の塩分量の定量評価が可能な非破壊検査法の活用が望まれる。

「PC 鋼材の腐食・破断」については、PC 鋼材の腐食が進行すると、PC 鋼材が破断し、有効プレストレスの低下が橋の耐荷性能の減少につながる可能性がある。そのため、PC 鋼材の破断の可能性が考えられる場合は、残存プレストレス等の推定を行い、耐荷性能を照査し、安全性を確認する必要がある。そのため、PC 鋼材の破断を特定する非破壊検査技術の活用が望まれている。

(3) 非破壊調査技術

放射線透過法、打音振動法、広帯域超音波法、インパ

クトエコー法、SIBIE 法、削穴法、漏洩磁束法等の PC 構造物の非破壊検査技術について検査目的（対象）、原理、およびその適用範囲について整理を行った。

以上、ここでは代表例として、PC 構造物に対する検討結果のみ、その一部を紹介したが、他の構造物についても同様の検討を実施した。

4. 中性子線を用いた試験・調査技術

ここでは、中性子線を用いて各種の試験や調査を行った過去の文献に基づいてそれらの事例をまとめて示す。取り上げた測定対象分野は、1) 欠陥探査、2) 単位水量測定、3) 応力測定、4) 水分移動測定、5) 塩化物イオン、6) セメント材料、7) 土壌・ポーラスコンクリート、8) その他、である。

4.1 欠陥探査

コンクリート中の結果を検出しようとするとき、中性子線の特徴を生かすことができる構造物における空洞等を検出することを目指した研究が行われている。中性子線の特徴の一つは物質透過性であり、もう一つは軽元素との衝突による散乱・エネルギー減衰である。従って、近年増加している鋼・コンクリート合成構造のように、内部のコンクリートの状況を直接確認することが難しい構造物での空洞、あるいはアスファルト舗装とコンクリート床版との間で発生する剥離・空洞等が探査の主な対象となっている。

国内では主に二つの方法による検査技術が研究されている。一つは放射性同位体 (RI) の中性子線源を用いた測定対象に照射された中性子線が散乱・減衰されて戻ってくる熱中性子を測定する散乱型測定装置である。もう一つは、中性子線の線源として加速器を用いてほぼ一定の間隔で中性子を測定対象に照射させ透過する速中性子、又は散乱・減衰されて戻ってくる中性子を測定する装置である。

4.2 フレッシュコンクリートの単位水量推定

中性子の散乱を利用したフレッシュコンクリート中の単位水量の推定手法は、1972 年に Lepper により提案されており³⁾、その後、検討が続けられ、国内では 1980 年代後半より活発な検討がなされてきた。線源は、カリフォルニウム、コバルト 60 が大半であり、実験室レベル、現場レベルでの検討が多く行われた。

その結果国内市場では、連続式 RI コンクリート水分計 COARA がレンタルおよび販売されている。線源は ^{252}Cf であり、機器とデータ取得が無線のシステムによる運用が行われている。また、既往の研究をもとにした製品が、アクアモニタとして一般に販売されている。国外では Troxler Electronic Laboratories が販売する 4430 Water-Cement Gauge による評価が一般的のようである。

4.3 応力測定

鉄筋コンクリート造は、圧縮に強いコンクリートと引張に強い鉄筋を組み合わせた複合材料である。これらの関係は鉄筋とコンクリートの付着特性によって変化し、コンクリートのひび割れや鉄筋の腐食などによって鉄筋コンクリート部材としての特性が大きく変化する。一般的に、鉄筋の応力は鉄筋表面に貼付したゲージにより測定されるが、ゲージ部の防水処理や配線などがコンクリートとの付着特性に及ぼす影響が無視できないため、鉄筋表面への溝切り加工や、鉄筋に穴あけ加工を施してゲージを貼付するなど、測定への影響を小さくする処理がなされることが多い。しかし、ゲージを用いた測定では、貼付のために測定点が離散的となること、また、ひび割れ部近傍の測定、腐食鉄筋への適用などが困難となっている。

これらの問題を解決する手法として、中性子線を用いた中性子回折法による測定が挙げられる。中性子回折法は、原子間を標点距離とするひずみ計測法であり、材料深部における応力やひずみ状態を非破壊および非接触で測定できる唯一の方法である。そのため、コンクリート内部の鉄筋の応力状態を評価できる手法として非常に効果的であり、2008 年頃より研究成果が公表されている。なお、中性子回折法による応力測定は、日本建築学会若手奨励特別研究委員会（主査：兼松学）「中性子利用技術の建築分野への展開」より研究が開始された研究分野である。

鉄筋の応力測定では、引張荷重下の鉄筋の応力測定、ならびに、コンクリート内部に鉄筋が配置された状態での鉄筋の応力測定を行い、中性子回折法の適用性に関する検討を行っている。また、コンクリート表面にひび割れが発生した際に、ひび割れ発生位置における鉄筋の応力変化に関する検討も実施している。付着応力測定では、鉄筋コンクリート供試体の引張試験を行い、付着応力度分布の測定を行うとともに、梁試験体の載荷試験を行い、中性子回折法によりトラス・アーチ理論の検証を試みている。あと施工アンカーの応力測定では、数種類のあと施工アンカーの付着応力度分布について、中性子回折法により検討を行っている。また、繰返し載荷が付着応力度の変化に与える影響についても述べている。腐食ひび割れ時および補修時の付着応力では、中性子回折法を用いてコンクリート内部の鉄筋が腐食した際の付着応力度分布の測定を行い、さらに、鉄筋腐食によりひび割れが発生した箇所を補修材により充填した後の付着応力度を再度、測定することで、付着応力度の回復に関する検証も行っている。

4.4 水分移動測定

中性子イメージングは中性子版のレントゲン (X 線ラ

ジオグラフィ)といえる手法である。中性子の相互作用は水素元素で卓越しているため、水分に対する測定感度が高く、コンクリート中の水分移動の測定への適用が活発に行われている。特に、任意の時刻間の差分画像を計測することで、水分挙動を感度良く観察することが可能である。これまで、硬化体中の水分移動、ひび割れ中の水分移動などに多く適用されている。測定手法に温度依存性が少ないことから、高温下における水分挙動の観察などにも用いられている。空間分解能は最大で 0.1 μ m/pixel 程度、試験体の厚さは線源にもよるが最大 10cm 程度である。時間分解能は通常数秒～数分程度であるが、中性子イメージングインテンシファイアを用いることで数ミリ秒/画像程度まで分解能を上げることが可能である。

国内ではまず八柳ら⁴⁾や Kawabata⁵⁾らが 2004 年に、京都大学の研究用原子炉である KUR B-4 と E-2 (京都大学複合原子力研究所原子炉)を用いてコンクリートを観察し、養生条件による水分状態の違いを可視化することに成功した。これまで国内での検討は KUR に加えて JRR-3 TNRF (原子力機構研究炉) および理化学研究所の RANS を用いて実施されてきた。近年では特に 2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] の鉄筋腐食照査において水分浸透を考慮するようになったことと、土木学会規準「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法 (案) (JSCE-G 582-2018)」において、コンクリートに浸入する水分の浸透速度の試験方法が制定されたこともあり、水分浸透現象に関心が集まっており、中性子イメージングを用いた水分移動観察に関する報告が増加傾向にある。

4.5 塩化物イオン測定

中性子線を物質に照射すると、即時に放射線の一種である即発ガンマ線が放出される。即発ガンマ線は原子核固有のエネルギーを有しているため、これを検出・解析することによって、元素の種類と物質量を求めることができる。この手法を即発ガンマ線分析 (PGA: Neutron-induced Prompt Gamma-ray Analysis) といい、コンクリート分野においては、中性子線の透過性の高さを利用しコンクリート中の塩化物イオンの深さ方向の分布の非破壊測定に適用されている。

PGA による塩化物イオン測定のコングリートへの適用性については、2000 年頃から海外において放射性同位体 (RI) を用いた測定手法が検討されている。日本では 2007 年頃から原子炉を用いた研究がなされ、コンクリート中の塩化物イオンの完全非破壊測定が可能であることが示されている。近年では、加速器を用いた即発ガンマ線分析が開発されており、深さ方向の塩化物イオン分布の測定や、混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン

量の定量が可能となっている。

国内では主に二つの方法による検査技術が研究されている。一つは原子炉 (JRR-3) の中性子線源を用い、測定対象に照射することで発生した PGA を測定する手法である。もう一つは、加速器 (RANS) を用いてプロトンを加速させ、ターゲットから発生した中性子を線源として測定対象に照射することで発生した PGA を測定する手法である。海外では、加速器 (KFUPM) による測定手法や放射性同位体 (RI) を用いた測定手法の報告がある。

4.6 セメント系材料の評価

中性子散乱法のひとつである中性子準弾性散乱法 (QENS) は、非破壊のまま、水和反応の進行を経時的に取得し、微細構造中の自由水、結合水、ゲル水などの水分の状態分布を同定することが可能である。中性子準弾性散乱法はまた、微細構造中における水の形成過程の観測にも利用できる。中性子回折法 (ND) は、水和物相の成長の経時変化の観測に用いられてきた。中性子小角散乱法 (SANS) は、微細構造の特性評価に適していることが確認されている。SANS は、C-S-H ゲルの表面や体積のフラクタル次元の経時変化や、それに及ぼすフライアッシュやシリカフュームなどの添加量の影響について観測するために利用されている。さらに SANS は、アルカリ骨材反応の発生が危惧される骨材の特性評価にも適用されている。これらの中性子散乱法を組み合わせることで、特定の問題への応用だけでなく、ポルトランドセメントペーストの微細構造の新しい解釈が可能になりつつある。

4.7 土壌・ポーラスコンクリート

測器の応答 (カウント比) から土壌中の含水率を求めることができる。他の土壌水分測定法と比較して短時間で測定でき、リアルタイムでのモニタリングも可能である。また非破壊で測定可能なため、同一箇所の繰り返し測定も可能である。含水率の測定値は地質条件、粒度分布、間隙の構造等の影響を受けないため、校正のための実験数を抑制できる。すでに実地レベルの技術であり、地表面付近の含水率のみでなくボーリング孔や排水トンネル内周囲の含水率測定などにも適用されている。

同様の装置を用いて、フレッシュ時にポーラスコンクリートの空隙率を測定するための検討も行われている。装置は可搬式であり、これまでの検討では十分な精度を有することも確認されており、こちらも実地レベルであるといえる。

4.8 その他

D.O. Covault らは、コンクリート中の単位セメント量の推定を目的として、ヴァンデグラフ加速器を用いてモルタル供試体中のポルトランドセメント量を推定した⁶⁾。種々の試験体を用いて、熱中性子により励起されたカル

シウム ^{49}Ca に相当する 3.07-mev のピークの積算値と、検量線を作成し、モルタル供試体を対象に試験を実施すると、推定されたセメント量の 95%信頼区間は 0.7g/mortal g 程度となり、高い精度による評価が可能であることが示された。

岡崎らは、非破壊によるコンクリートの配合推定を目的として、研究用原子炉に設置された即発ガンマ線分析装置を用いてコンクリート円柱供試体の局所の配合推定を行った⁷⁾。種々の水セメント比や骨材量の試験体を用いて、1942keV に相当するカルシウム元素から上述の文献 6)と同様に単位セメント量を算定した。さらに、3540keV に相当するケイ素元素のスペクトル値から、セメント由来のケイ素量を差し引くことにより、単位骨材量を推定した。空気量を 5%と仮定することにより、単位水量を推定することができ、すべての構成材料の単位量が求められるため、水セメント比も評価できるという枠組みである。

5. 実構造物の検査・診断が可能な中性子源の開発

コンクリート構造物の調査や診断に用いることを目的として、2013年に理化学研究所と東京工業大学からなる共同チームが小型中性子源システム RANS を開発し、それを活用した研究が実施されてきた。2019年には更に小型化を図った RANS-II が開発されている。ここで「小型」と称してはいるが、一般の加速器と比較して小型であるという意味であって、RANS の場合には加速器本体のみでも重量 5 トン、装置全体の長さは 15m もある。これと比較して RANS-II は小型化が進められ、車両に搭載して対象構造物まで移動することも可能なレベルとなった。両者の概要を表-2 に示す。

表-2 RANS と RANS-II の概要⁸⁾

	RANS	RANS-II
加速イオン	水素 (陽子)	水素 (陽子)
エネルギー	7MeV	2.49MeV
最大イオン電流	100 μA	100 μA
中性子発生核反応	$^9\text{Be} (p,n) ^9\text{B}$	$^7\text{Li} (p,n) ^7\text{Be}$
最大中性子エネルギー	5MeV	0.7MeV
加速器方式	加速器 2 台を連結	1 台のみ
加速器本体重量	5ton	2.5ton
遮蔽体重量	20ton	3ton
装置長さ	15m	5m

これまでに既に 4.4 節や 4.5 節で紹介したような、コンクリート中の水分分布や移動状況の測定、塩分分布の測定に関して研究実績がある。

さらに実際に車両に搭載して実構造物の調査を行なうことを前提とした RANS-III の開発も進められており、これが稼働すれば中性子線によるコンクリート構造物の調査、診断の可能性が飛躍的に広がるものと期待される。

6. 中性子線の検査・診断への適用の可能性

本委員会では、インフラ構造物や建築物に関する調査や点検のニーズを洗い出した上で、中性子線によるコンクリートの非破壊試験の技術の現状、および近い将来の技術の発展について整理し、移動可能な小型中性子線源を活用した構造物、建築物の調査、点検の可能性について検討を行なった。

中性子線反射イメージングでは、コンクリート表面から約 300mm まで浸入が可能であることから、例えば PC 桁のウェブ側面や下フランジ下面部、道路橋 RC 床版、栈橋上部工下面やケーソン側面において、浮き剥離、砂利化、覆工厚測定、背面空洞等の判定を行ったり、打継ぎ界面部や接着した鋼板と母材との界面の状況を調査できる。また表面から深さ方向のひび割れ方向や分散状況を 3 次元的に可視化できる可能性が考えられる。ダム等の電力施設や農業水利施設にて漏水が生じている場合には、その経路や範囲を特定することができる。さらにコンクリート内の塩分量を 0.3kg/m³ から評価できることが可能であることから、海洋環境にある構造物のみならず、凍結防止剤の影響を受けた構造物においても、深さ方向の塩分分布を非破壊で測定できるなど、コンクリート構造物の非破壊調査の手法として、中性子線は大きな可能性を有しており、5 章で紹介したような可搬式の中性子源システムが稼働すれば、新たな構造物の調査や点検の強力なツールとなりうるものと期待される。

本稿では委員会の成果の一部を紹介している。詳細は本年 9 月に発刊予定の委員会報告書に記載するので参照されたい。また報告書の発刊と同時に報告会、および一般公募の論文の発表からなるシンポジウムを開催する予定としている。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路(株) NEXCO 調査要領, 2016.8
- 2) 国土交通省・社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料 (<https://www.mlit.go.jp/common/001016264.pdf>)
- 3) H. A. Lepper Jr, A. Henry, R. B. Rodgers, and D. E. Chamberlain: Water content of fresh concrete measured

- by neutron radiation, 51st Annual Meeting of the Highway Research Board, pp 25- 34, 1972
- 4) 八柳晃, 大石晃嗣, 森一広, 川端祐司, 川合将義: 中性子散乱及び中性子ラジオグラフィのセメント・コンクリートへの応用の可能性, KURRI-KR-100「中性子ラジオグラフィ」専門研究会報告書(平成 15 年度), pp.50-64, 2004
 - 5) Y. Kawabata, T. Nakano, M. Hino, H. Sunohara, U. Matsushima, and N. Takenaka: High contrast neutron radiography with optical devices in Kyoto University reactor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 529, pp. 238-242, 2004.
 - 6) D.O. Covault and C.E. Poovey: Use of neutron activation to determine cement content of Portland cement concrete. Highway Research Board Bull. 340 (National Academy of Science, Wash. D.C.), Sept. 1962, pp. 1-29.
 - 7) 岡崎慎一郎, 氏家勲, 山手望知世, 松江秀明: 即発 γ 線分析によるコンクリートの配合推定に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, 33(1), 1757-1761, 2011.
 - 8) T. Kobayashi, S. Ikeda, Y. Otake, Y. Ikeda, and N. Hayashizaki: Completion of a new accelerator-driven compact neutron source prototype RANS-II for on-site use, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 994, 165091, pp. 1-6, 2021.