

2. 調査・研究の方針

2.1. はじめに

鋼橋を対象とした先進的な非破壊検査技術について調査するにあたり，“先進的”であることの要件をある程度明確にしておく必要がある。そのためには、非破壊検査の歴史や現状を踏まえ、次世代の非破壊評価に何が求められるか、整備すべき環境や解決すべき課題を整理しておくことは重要である。幸い非破壊検査のコミュニティでは、ここ数年、次世代の非破壊検査がどうあるべきかについて活発な議論が行われ、NDE4.0(Non-Destructive Evaluation 4.0, 非破壊評価 4.0)^(2.4.1-2)の名のもと、今後進むべき方向についての共通認識ができつつある。そこで本小委員会でも、NDE4.0 の思想をベースとして、鋼橋分野における先進的な非破壊評価についての調査と研究を行うこととした。本章では、NDE4.0 がどのようなものであるかを、その提唱に至った背景を含めて簡単にまとめる。次に、本小委員会としてどのようなテーマを設定して調査や研究を行ったかを述べる。

2.2. NDE4.0 とは^(2.4.1)

2.2.1 時代区分：インダストリー1.0 から 4.0 まで

NDE4.0 は、インダストリー4.0 において今後実現されるべき非破壊評価のことを意味している。我々の社会はこれまでに 2 度の産業革命を経て、現在、インダストリー3.0 から 4.0 への移行期にある。第一次産業革命では蒸気機関が発明され、繊維産業などの軽工業において機械化が進み、この時代(1750-1850 年)はインダストリー1.0 と呼ばれる。第二次産業革命では、電力や石油をエネルギー源に利用した大規模生産が行われるようになり、重化学工業が発展する。この時代(1850-1960 年)はインダストリー2.0 と区分される。続く 1960 年から今日は、電子産業の発展、コンピュータやインターネットの発明、自動化・自動生産に特徴づけられるインダストリー3.0 にあたり、例えば航空機のような、膨大な数の部品からなる工業製品の生産が可能となっている。これらに加えて現在では、AI や IoT, 5G 通信といった情報通信技術が登場し、DX による社会変革によりインダストリー4.0 への移行が近いと考えられている。

2.2.2 インダストリー3.0（現在）までの非破壊評価

非破壊検査のツールや方法は、その時代におけるニーズと技術レベルに応じたものが用いられてきた。インダストリー1.0 では非破壊検査という概念が明確化されていた訳ではないものの、人間の五感に基づいて製品の異常や不具合を検知するといった意味での品質評価や非破壊評価が行われていたと考えられる。それらは主として視覚（目視）、聴覚（音響）、触覚（表面形状）に基づく検査で、ごく簡単な道具が用いられていたであろうと想像される。

インダストリー2.0 では、電磁気学や連続体力学に基づく光・波動現象の理解が進む。その結果、人間の五感では検知できない周波数帯の電磁波（光）や機械的振動・波動（超音波や音響波）を観測することが可能となる。他にも、放射線の発見とその物質との相互作用について知られるに至り、レントゲン撮影によって物質内部の可視化（透視）が可能であることも知られるようになった。電磁波の性質を利用する渦電流法や、超音波の反射、散乱を利用する超音波探傷法、X線の透過や吸収に基づく放射線透過試験など、現在使われている主要な非破壊検査法の原理は、この時代に見出されたといつてよい。ただし、コンピュータ登場以前のこの時代には、非破壊検査は手動かつアナログ測定で行われ、ごく限られた部品に対してのみ適用されていた。

インダストリー3.0では、マイクロエレクトロニクスの発展とコンピュータの普及により、各種非破壊検査装置のデジタル化が進み、一部、自動測定や自動探傷も行われるようになる。また、原子力や防衛、航空・宇宙産業など、部材や構造体の安全性が死活的な重要性をもつ産業分野を中心に、非破壊検査の手順や判定方法が定められ、検出確率(POD: probability of detection)の概念も提唱される。非破壊評価自体を対象とした学術的な研究も増え、定量的非破壊評価 (quantitative nondestructive evaluation) の実現に向けた取り組みが行われるようになる。中でも、超音波探傷試験に関しては、早い時期にモデルベースのシミュレーションや再構成技術の基礎が作られ、その後より洗練されたものとなっていることが、代表的なレビュー論文^(2.4.3-5)によく示されている。

2.2.3 NDE4.0：インダストリー4.0における非破壊評価

アナログデータをデジタル化することをデジタイゼーションと呼ぶのに対し、デジタルデータとICT技術を活用し、新たなサービスや製品を創出して価値を生み出すことをデジタライゼーションという。現在の社会はインダストリー3.0から4.0の転換期にあたり、デジタライゼーションによる社会変革によってインダストリー4.0へ移行するとされている。インダストリー4.0における非破壊評価であるNDE4.0もその例外でなく、NDE4.0は現在の非破壊評価のデジタライゼーションで実現されると言える。このことは、次のようなNDE4.0の簡潔な定義にも表れている。

“Non-destructive evaluation through confluence of digital technologies and physical inspection methods for safety and economic value (安全と経済性を志向したデジタル技術と物理的検査法の融合による非破壊評価)”

ここに謳われている“デジタル技術と物理的検査の融合”という点に関しては、いくつかのキーテクノロジーやキーワードが具体的に挙げられている。そのうち非破壊評価分野と土木分野に共通した重要性をもつものとして、サイバー・フィジカルシステムとデジタルツインが挙げられる。サイバー・フィジカルシステムとは、製品（物理的対象）の状態を、IoT等のセンシング技術で継続的にモニタリングし、収集したデータの分析結果をフィードバックして製品の設計や製造、使用といった物理空間での活動を最適化するものである。デジタルツインは、現実をできるだけ忠実に再現できるよう、サイバー空間に作成された製品のデジタルモデルで、測定データの分析や、フィードバックによって物理空間に生じる現象をシミュレートするツールとして用いられる。

この考えを鋼橋の維持管理に当てはめれば、モニタリングや非破壊検査で得られたデータを橋梁のデジタルツインで評価、分析し、その結果を、補修や補強、点検、検査にフィードバックして、より高度で経済的なライフサイクル・マネジメントを行うという発想につながることは必然であろう。従って、“先進的非破壊評価”を“次世代で求められる非破壊評価”と解釈するならば、上に述べたようなライフサイクル・マネジメントの中で非破壊評価がどのような役割を果たすべきかを検討することが必要となる。特に、デジタルツインとの協働のもと、非破壊評価がどのような形で維持管理における価値創出に貢献できるか、また、そのために必要な技術や研究、開発、実用化に向けた課題が何かといった点について議論を進めていくことが重要と考えられる。本小委員会ではこのような考えのもとでいくつかのテーマを選定し、これからの非破壊評価という観点から調査や研究を行った。以下では、調査・研究テーマの設定意図と内容を簡単に述べ、詳細について次章で報告を行う。