5. 非破壊試験の信頼性向上に繋がる可視化技術

5.1 効果的な指標の組み合わせ

5.1.1 一般的な可視化の効果

一般的に構造物の非破壊試験における可視化とは、試験によって得られた特性値の数値データを画像、グラフ、 図などで表現することを意味している、グラフ化は最も基本的な可視化表現で図5.1.1に示すような2種類の異な る特性値を同時に示すことにより、相関性や変化の割合などが感覚的に把握しやすくなり、新たな知見を見出すこ とが可能となる場合や、評価結果の判断を容易にする効果がある.可視化の効果は複数の情報を合成して表現する ことで、同時に認識できる情報量を増やすことができる.

色彩の濃淡またはカラー画像で表現するコンター図は、可視化技術の代表的な表現方法で汎用的に利用されている.図5.1.2 は電磁波レーダ法により鉄筋位置を探査したデータの一例を示している.電磁波レーダ法による鉄筋 位置の探査では、直接的に得られた時刻歴の反射波データを連続的に測定した位置情報と併せて二次元的に表現し、 さらに反射波の振幅を色彩と関連付けてコンター図として表現している.これらの処理により、試験者は鉄筋位置 やかぶり厚さを比較的容易に判断することができる.



図 5.1.1 2 つの特性値を同時に表現したグラフ化の例



図 5.1.2 コンター図によるデータ処理の例(電磁波レーダ法による鉄筋探査)

以上の例のように、ある特性値と位置情報、さらに特性値をコンター図として表現するなど、異なった複数種別の情報を同時に把握して総合的に判断することが可能になる.これらは図5.1.3に示すように、評価結果を判断する試験者にとっては評価精度を向上させ、結果の説明を受ける依頼者にとっては理解しやすくする効果などが期待できる.しかし、両者は目的が異なることから、依頼者への理解を促す目的の場合は、理解しやすいように情報量を整理するか、目的に合った閾値を設定して表現するなどの工夫が必要となる場合もある.一方、試験者が多くの情報を利用することは、それぞれの特性値の精度やそれらの持つ工学的な意味などを適切に判断して有効に利用できるが、結果の説明を受ける依頼者にとっては、情報量が過多となって理解しにくくなる場合もありうる.

また,依頼者にとって可視化による表現方法は一般的な数値データと比べて理解しやすく深く印象に残る.この ことから,試験者が行った評価結果の正確性が非常に重要で,特に閾値を設定して合否の判定を判断し,その結果 を依頼者に伝える場合は,工学的な見地からも慎重に評価を行う必要がある.



図 5.1.3 目的による可視化の相違

可視化の利用としては、図5.1.4に示すような構造物表面温度をサーモグラフィで測定した結果などは代表的な 可視化表現の例で、表面温度の測定結果を二次元画像のコンター図で示すことによって、位置情報と温度を同時に 表現し剥離や浮きなど内在する欠陥の位置を判断しやすくしている.このほか、目視や叩き点検などで得られたひ び割れや浮き剥離などを示した変状図なども、構造物に作用する外力の推定などの日常的に利用している可視化の 例といえる.



図 5.1.4 特性値と位置情報を同時に表現した可視化の例

5.1.2 組み合わせにより期待される効果

可視化の一つの効果として、多くの情報を総合して判断できることがあげられる.たとえば、図5.1.5 に示すように、ある測定範囲において複数の特性値(データ)を重ね合わせて総合的に判断することで、単一のデータを並列して評価するよりも精度が向上することなどが期待できる.

複数特性値の重ね合わせでは、例えば強度や中性化深さ、表面の透気特性など、コンクリートの緻密さの要因が 大きい工学的に同種の特性値を重ね合わせれば、評価精度を向上させる効果が期待される.また、中性化深さやコ ンクリート表面からの塩分濃度分布、鉄筋かぶり厚さ、鉄筋の自然電位や分極抵抗など異なる特性を重ね合わせる ことによって、鉄筋腐食の評価や今後の予測などの精度向上などの効果が期待される.



図 5.1.5 構造物内の位置情報と複数データの組み合わせイメージ

また、可視化の効果としては全体を俯瞰して総合的に判断し評価精度を向上させる利用方法があげられる.図 5.1.6(下図)は床版下面を機械インピーダンス法により強度推定した結果をコンター図として面的に表現してい る.機械インピーダンス法では非破壊で間接的に強度を推定することから、ある程度の誤差を含んでいる.これを 面的に俯瞰することによって人的な判断により大まかな領域として強度の変化を感覚的に判断することが可能と なる.また、図5.1.6(上図)のたたき点検結果及び外観と合わせることにより、推定した圧縮強度の信頼性が向 上すると考えられる.



図 5.1.6 床版下面の強度推定結果

(執筆者:稲熊 唯史)

5.2 効果的な可視化テクニック

5.2.1 指標の表示と可視化

可視化とは、ある物理量や状態量を空間的に表示することといえる.例えば、写真は色彩(可視光)の空間的(平面的)な配置である.上記の事例にもあったように、得られたデータを空間的に表示する場合、幾何学情報(写真・図面)が基本となり、その上にデータを配置することになる.この場合、得られたデータが単一種類のものであれば、コンター情報を単純にマッピングしても、データの混乱は生じず理解しやすいものとなる.しかし、複数種類のデータが同じ個所で得られた場合、単純にコンター情報を重ねわせてしまうとそれぞれのデータの連続性が失われ、解釈が困難となる.例えば、指標Aの赤色と指標Bの赤色が混在すると、その線や点、面がどちらの指標に属するものか理解できなくなる.そのため、複数の指標を空間的に表示するには、何らかの工夫が必要となる.

信頼性向上の観点からいうと、単一種類のデータを可視化するだけでは、高い効果は期待できない.技術的判断 の精度を向上させるためには、複数の指標を同時に解釈することが必要と考えられる.すなわち、複数のデータを 同時に解釈することができれば、単一のデータでは得られなかった発見を促したり、結果の確度や精度を向上させ ることが可能となる.

以下では、複数の指標を空間上に同時に表示させるためのテクニックについて、5.2.2 二軸化によるデータの融合、5.2.3 三原色(三軸化)による方法、5.2.4 その他の方法を提案し、その特徴や問題点について述べた後、具体例を示す.

5.2.2 二軸化によるデータの融合

この方法は、二つの指標を同時に表示させたいとき、その二つの指標によって定まる新たな状態量を定めた上で、 それらを空間的に表示させる方法である.すなわち、二つの指標が与えられたとき、まず二つの指標で定まる状態 について、何らかの解釈を行う.例えば、「密度」と「強度」という二つの指標が与えられたとき、密度が高く強 度が低い状態は何を表わすのかなど、二つの指標の組み合わせで表現される状態量を想定する.その後、二つの指 標を軸とした平面上にデータをプロットし、適切な閾値を用いてデータを分類する.このとき、分類ごとに色分け などを行っておく.最後に、新たに定められたデータの色分け(程度や分類)に従い、データを空間的に表示する. この手法の流れを図5.2.1に示す.ただし、グルーピングでは四象限に4種類の色を割り当てることになるが、二 色を用いた輝度構成でグラデーションを表現することも可能である.ここでの要点は、二つの指標によって定まる 新たな状態量を見出すことと、それらを分類するために適切な閾値を定めることにある.特に、適切な閾値を一般 的に定めることは難しく、状況に応じた柔軟な対応が必要であり、試験者の判断力に依存する.すなわち、二軸上 に落とし込んだデータ群を分類するときに、試験者の判断力が求められる.

この方法の問題点は、考慮できる指標が二つまでであること、二つの指標の組み合わせで表現される状態量を想 定する必要があること、二軸化後のグルーピングが試験者の判断に委ねられていること、などがある.

5.2.3 三原色 (三軸化) による方法

上記の方法では、二つまでしか指標を考慮できないという問題点があった.これに対し、指標3つを同時に融合 させる方法として、三原色の利用が考えられる.この手法の流れを図5.2.2に示す.三原色では、赤(R)、緑(G)、 青(B)により色彩を構成しており、それぞれの色の輝度を0から1(もしくは0から255)まで設置する.例えば、 (R、G、B)の組み合わせとして、(0、0、0)は黒、(1、1、1)は白を表現している.この方法では、得られた指標 A、B、Cについて、それぞれの範囲を設定し、0から1までの数値と対応させる.その後、三原色の表示に従い、 空間的に色彩を表現する.この方法でも,各指標の範囲の取り方が試験者に依存することや,各指標の組み合わせ により表現される状態量の定義が暗に必要となる.



図 5.2.2 三原色 (三軸化) によるデータの融合

5.2.4 その他の方法

以上の方法は、複数の指標の組み合わせとその物理的意味や状態量を想定しながら解釈を行うというプロセスで あった.また、最大でも3つの指標しか考慮することができなかった.つまり、複数の指標を同時に表示する方法 には限界があった.そこで、時間的なずれを利用して、「ほぼ同時」に複数の指標を表示することを考える.すな わち、アニメーションによって分布図を切り替える方法である.この方法では、無意識下において複数の指標を同 時に認識し、そこから何らかの特徴を捉えようとするものである.この場合には、指標の組み合わせの物理的意義 を明確に意識することはなく、色の出現頻度や重なり具合を認識し、何らかの識別を行うことになる.この手法の イメージを図5.2.3 に示す.



図 5.2.3 アニメーションによる特徴量抽出

また、これらの重ね合わせの技法は、必ずしも特性値の空間配置に限定されるものではない、構造物の劣化評価 における可視化事例を紹介する.本事例は、4.2目視法によるひび割れ分布の可視化を原点とするその後の活用 事例ともいえるが、複数回の過年度の近接目視による橋梁点検結果データを活用した「床版ひび割れと損傷スピー ドとの相関関係の分析」である.図5.2.4 は、横軸に点検年次、縦軸に床版損傷程度、さらには損傷程度の割合、 加えてその損傷程度の割合の年次変化、この4つの特性値を同時に二軸上にありながら表現したグラフ化の例であ る.図中の〇の大きさはその割合を示している.俯瞰して、右下へ〇が大きくなる様子が現れれば、損傷スピード が速いケースと評価することができる.この方法は、試験者の高度な判断を促す可視化に関する良い事例である. ただし、場合によっては、従来通りシンプルな可視化を行った方がより正しい解釈を与えることもあるため、状況 に応じて可視化技術を選択すべきである.



図 5.2.4 「点検年次」「損傷程度」「損傷程度の割合」「損傷程度の割合の年次変化」を軸とした可視化

一方,依頼者へ説明力を向上させる技法として,三次元化処理が挙げられる.図5.2.5は,電磁波レーダにおける可視化の高度化を行った事例である.ここでは,通常の電磁波レーダ法で利用される機器とは異なり,アンテナ

を3つ有する機器(マルチアンテナ:HILTI 社製 X-SCAN PS1000)を利用して測定を行っている.この機器では, 一つの伝搬経路だけでなく,複数の経路を伝播する電磁波の反射情報を利用することで,埋設物からの反射を明確 化している.また,反射波がより明確になった結果,二次元化がより効果的に行われている.さらに,その情報を 三次元で可視化することで,位置情報を理解しやすいものにしている.通常の電磁波レーダ法などでは,有意な反 射波を捉えるためには経験を必要とする場合があるが,このような可視化技術により位置情報の判断が容易になる. また,三次元化により依頼者への説明能力も向上するであろう.ただし,試験者としては機器の適用範囲や限界を 十分熟知し,安易な判断を行わないようにすることが重要である.



図 5.2.5 マルチアンテナを用いた可視化技術:説明力の向上

(執筆者:大島 義信,則武 義辰)

5.3 可視化テクニックの事例

効果的な可視化のテクニックについて、具体的な事例を紹介する.用いるデータは、名古屋大学に設置された模擬橋梁(N2U-BRIDGE)において実施された各種試験により得られた以下のデータとする.N2U-BRIDGEの概要を図 5.3.1 に示す.

- 1) テストハンマーによる反発度
- 2) 透気係数
- 3) 水分量
- 4) 弾性波を用いた反射深さ
- 5) 自然電位

5.3.1 測定対象

測定対象は、N2U-BRDIGE に設置された模擬橋梁のうち、PC 中空床版橋の下面(桁下)1600mm×3400mmの範囲と した.対象区間を200mm×200mmの正方形からなる格子で区切り、格子点もしくは格子で囲われた範囲を測点とし た. 測定区間を図5.3.2 に示し、また計測線を図5.3.3 に示す.



図 5.3.1 N2U-BRIDGE 概観と部材の解説



図 5.3.2 測定対象橋梁と測定位置



5.3.2 個別データの可視化

テストハンマーにより得られた反発度を表5.3.1に示す.反発度は格子で囲われた領域における10回の平均値 としている.表による表現では、それぞれの数値については具体的に理解できるものの、全体的な傾向を捉えるこ とは難しいことがわかる.次に、反発度のコンター図を図5.3.4に示す.コンター図により、図右側の領域におい て反発度が高く、比較的強度が高いことが推察される.次に、水分量の分布を図5.3.5に示す.これより、左端(X=0mm) 付近において水分量が高く、右側の領域においては比較的水分量が低いことがわかる.同様に、透気係数、弾性波 による反射深さ、自然電位の空間分布図を図5.3.6~図5.3.8に示す.ここで、弾性波による反射深さとは、鋼球 を使い打撃入力した弾性波が空隙などの界面で多重反射し、その反射波を打撃側表面で受信した波形から換算され る反射深さである.これらの図からも、それぞれの特性値について空間的な傾向を把握することは可能である.し

59.9	54.5	53.9	63.2	58.2	45.9	61.5	50.1	57.3	65.3	66. 2	65.8	65.8	61.5	65.8	63.7
47.3	57.1	53.9	63.3	63.5	53.1	56.4	55.5	60.2	63.7	63.8	67.9	69.5	64.9	66.2	65.8
59.3	58.2	55.8	63.3	58.2	54.3	59.3	58.7	56.9	63.4	61.9	65.4	68.9	63.3	64.6	64.7
62.1	58.6	53.0	63.7	61.5	51.0	58.1	55.5	57.8	64.7	63.7	63.5	67.1	61.9	63.8	67.0
54.5	58.6	56.3	61.2	59.9	51.9	60.6	52.2	60.2	65.9	64.6	65.3	60.2	62.1	63.8	66.6
61.2	59.9	53.0	56.8	58.5	50.1	61.6	44.9	62.1	64. 2	61.2	63.7	60.9	58.1	64.6	67.1
58.7	56.0	52.7	62.4	51.3	53.5	54.3	51.7	63.2	68.7	57.7	63.7	63.7	62.1	65.3	66.3

表 5.3.1 反発度

















図 5.3.8 自然電位の空間分布

5.3.3 二軸化による可視化

まず、二軸化による可視化を検討する.二軸化では、透気係数および水分量という二つの物理量を用いて、図 5.3.9(a)に示すような二軸化したグラフを作成する.このとき、グラフ右上は両指標が大きい状態、グラフ左下は 両指標が小さい状態を表わしている.すなわち、紫色のときには両指標が大きく、黒色のときには両指標が小さい. これは、紫色ならば気体を通しやすく、かつ水分が多い状態を表わし、黒色ならば気体を通しにくく、かつ水分量 も少ない状態を表わしている.また、グラフの右下、および左上については、それぞれ透気係数が大きく水分量が 少ない状態と、透気係数が小さく水分量が多い状態を表わしている.これらは、鮮明な青色と赤色に対応している. また、参考までに異なる色の組み合わせを図5.3.10に示す.この考察をもとに、図5.3.9(b)を評価する.

図より,紫色が顕著な場所が左上付近に確認できる.この個所は,透気係数が大きく水分量が多いため,鉄筋の 腐食環境としては最も状況が悪い.また,右上から右下に掛けてには黒色の帯状の部分が二つ存在している.この 部分は,水分量も少なく透気係数も低いので,比較的健全な部分であると考えられる.一方,随所に青色の部分が 確認できるが,これは水分量は低いが透気係数が大きい部分を表わしており,鉄筋腐食に対して潜在的な危険性が あるといえる.また,全体として赤色がほとんど確認できないことから,水分量が多く透気係数が小さい個所は少 ないといえる.

次に,水分量と反発度の関係を二軸化した. 図 5.3.11 には指標相関図を示すが,水分量と反発度の双方とも大きい場合には紫色,小さい場合には黒色を示す.また,赤色は水分量が大きく反発度が小さい場合,青色は反発度が大きく水分量が小さい場合を示す.図より,右側の領域には紫色もしくは赤色が多く存在し,左側の領域には青色が多く存在することがわかる,これは,右側領域には反発度が低く水分量が多い領域が多く,左側には反発度が高く水分量が少ない領域が多いことを表わしている.

透気係数と反発度については、図 5.3.12(a)に相関図、図 5.3.12(b)に空間分布図を示す.この場合には、反発度が低く透気係数が大きい領域(青色)が最も好ましくない状況とすれば、右側領域で潜在的な危険性が高いことがわかる.

最後に,弾性波による反射深さと反発度について,図5.3.13(a)に相関図,図5.3.13(b)に空間分布図を示す. この場合,反射深さが小さく反発度が小さい領域においては,剥離の可能性が高いといえる.これを踏まえると, 中央上段に反発度が小さく反射深さの小さい黒色が存在し,この部分の危険性が高いといえる.

以上で示した二軸化の方法は、二つの異なる特性値の空間配置(コンター図)を重ね合わせる一つの手法になり うる.しかし、スケーリングが適切に行われなかった場合や、二つの指標の組み合わせの物理的意義が見出せない 場合には、可視化の効果は小さいといえる.ここで最も重要な点は、二つの指標の組み合わせによる物理的意義を 見出すことにあるといえる.

5.3.4 三原色による可視化

三原色の効果について検討する.三原色を使用した可視化事例を図5.3.14~図5.3.16に示す.

まず,図5.3.14の水分量,反発度,弾性波による反射深さの組み合わせについて考察する. 色彩の対応として は、水分量が多く反発度および反射深さの小さい場合には赤色,反射深さが大きく水分量と反発度が小さい場合に は青色,反発度が大きく,反射深さおよび水分量が小さい場合には緑色となる.物理的意味づけとしては、水分量 が多く、かつ反発度が小さく,反射深さが小さいもの、すなわち、赤色に相当する部分については、水も多くかぶ りが小さい上に強度が小さいため、剥離リスクが高いといえる.これは、中央の領域下部が相当することがわかる. もっとも、可視化の効果が発揮された結果とは言い難い.

その他の図5.3.15 および図5.3.16 での事例でも,必ずしも可視化の効果が発揮されているとは言い難い.これ

は、適切なスケーリングが行われていないことや、三つの指標の組み合わせが有する物理的意義を明確にできてい ないことが理由となろう.これらの手法を活用するためには、指標の組み合わせの有する物理的意義を明確にする 必要がある.

(執筆者:大島 義信,掛 園恵,岩野 聡史,岡崎 慎一郎)







図 5.3.10 水分量と透気係数の二軸化(G: 緑とB: 青による二値化)







図 5.3.12 反発度と透気係数の二軸化(R:赤とB:青による二値化)











図 5.3.15 透気係数 R, 反発度 G, 水分量 B の統合



図 5.3.16 透気係数 B, 反発度 R, 水分量 G の統合