

道路橋の維持管理における状態把握技術の適用性に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金

研究期間：平成 26 年度～令和元年度

担当チーム：iMaRRC

研究担当者：新田弘之、古賀裕久、櫻庭浩樹、高橋啓太

【要旨】

平成 26 年度から、近接目視を基本とした道路橋の点検が義務化されるなど、構造物の維持管理を適切に行っていく上での点検が重要であることが認識されている。しかし、例えば塩害では、鋼材腐食が発生する前の段階で、劣化の進行を近接目視のみで発見することは困難である。また、コンクリートのひび割れは早期段階で発見することが望ましいが、表面が補修材料で被覆されている場合には容易ではない。このような近接目視のみで構造物の劣化状態を把握することが困難な事象に対しては、センサや機能材料等を用いた調査技術が期待されるが、これらの技術が構造物の調査に適用できるかは必ずしも明確ではなかった。このような背景から、土木研究所先端材料資源研究センター（iMaRRC）では、物質・材料研究機構と共同研究を行い、塩分センサ、モアレ縞およびオパール薄膜と呼ばれる技術の適用性を検証し、塩分センサは塩害の簡易調査方法として、モアレ縞とオパール薄膜は近接目視が困難な離れた場所からの調査や補修材下のひび割れ可視化方法として活用できることを示した。キーワード：塩分センサ、モアレ縞、オパール薄膜、塩害、補修、ひび割れ遠隔計測

1. はじめに

平成 26 年度から、近接目視を基本とした道路橋の点検が義務化されるなど、構造物の維持管理を適切に行っていく上で点検が重要であることが認識されている。しかし、例えば塩害では、鋼材腐食が発生する前の段階で、劣化の進行を近接目視のみで発見することは困難である。また、コンクリートのひび割れは早期段階で発見することが望ましいが、コンクリート表面が補修材料で被覆されている場合には容易ではない。このような近接目視のみで構造物の劣化状態を把握することが困難な事象に対しては、センサや機能材料等を用いた調査技術が期待されるが、これらの技術が構造物の調査に適用できるかは必ずしも明確ではなかった。

このような背景から、土木研究所 iMaRRC（以下、iMaRRC）では、物質・材料研究機構（以下、NIMS）と共同研究を行い、近接目視のみでは把握できない情報を得るための調査技術として、塩分センサ、モアレ縞およびオパール薄膜と呼ばれる技術の適用性を検証した。

2. 塩分センサの適用性検証

2.1 研究概要

塩害は、コンクリート中に多量の塩化物イオンが含まれることが原因で、鋼材表面の不動態被膜が破壊さ

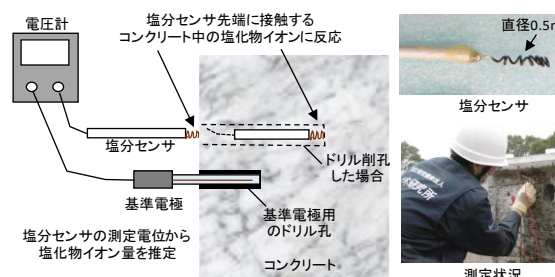


図-2.1 塩分センサによる測定の概要

れ、コンクリート中の鋼材が腐食する劣化現象である。コンクリート構造物の劣化メカニズムの中でも特に劣化速度が速く、構造物の性能への影響が大きい。また、ひび割れなどの変状が顕在化した後に、確実な補修を行うことが難しい。したがって、海岸近くなど、塩害環境下にあるコンクリート構造物では、定期的に塩化物イオンの侵入状況を調査し、必要に応じて予防保全的な対策をとることが望ましい。

国土交通省では、塩害による劣化を早期に発見するため、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）（平成 16 年 3 月）」を定めている（以下、塩害特定点検（案））。コンクリート橋は、上部構造と下部構造で、コンクリート表面から鋼材表面までの距離（以下、かぶり）が異なり、前者の方がかぶりは小さいために、塩化物イオンの侵入による鋼材腐食が生じやすい。このため、塩害特定点検（案）では、上部構造を

主たる対象としている。点検頻度については、調査時に上部構造からコア試料等を採取して損傷を与えてしまうことを考慮して原則として10年に1回とされている。なお、非常に厳しい塩害環境で供用されるコンクリート橋については、竣工後10数年で著しい劣化が見られた事例もあることから、点検頻度を5年1回まで短縮するのがよいとされている。しかし、点検間隔の短縮を推進するためには、調査による構造物の損傷の低減が必要である。また、安全側の評価をするためには、塩化物イオンの侵入が多い箇所での調査が必要であるが、従来の調査方法では室内での分析が必要のため、調査箇所の違いによる塩化物イオン量の多寡を現地で把握できないことが課題であった。

このような背景から、iMaRRCでは、NIMSと共同研究を行い、塩分センサを用いた簡易な塩化物イオン量推定方法を検討した(図-2.1)。

塩分センサは、測定のためのドリル削孔が直径10mm程度で構造物への影響が小さいこと、および、現場ですぐに結果が得られることに利点がある。NIMSでは、塩分センサを用いることで、塩化物イオンのモル濃度(mol/L)を測定する手法を提案していた。しかし、コンクリート構造物の塩害の指標である全塩化物イオン量(kg/m³)で評価する方法の開発や、現地で測定するための留意事項を明確にすることが必要であった。

以上から、硬化コンクリートを用いた実験や、実環境で供用されていた部材の調査を行い、塩分センサによる簡易な塩化物イオン量推定方法を提案した。

2.2 塩化物イオン量推定の原理と検証実験

2.2.1 塩化物イオン量の推定原理

塩分センサは、基準電極および作用電極を銀塩化銀電極として電位を測定し、硬化コンクリート中の細孔溶液の塩化物イオン濃度を推定していると考えられる。

塩分センサの測定電位のモデルを図-2.2に示す。作用電極および基準電極は、それぞれ、塩化銀を被覆した銀線をNaCl水溶液または飽和塩化カルウム水溶液に挿入したもの(銀塩化銀電極)である。NaCl水溶液は、コンクリート中の塩化物イオンを表すものと仮定する。この時、塩分センサの測定電位は式(1)で与えられる²⁾。

$$U = 0.418T - 0.198T \log_{10} \frac{C_{Cl^-}}{C^{\phi}} \quad (\text{mV}) \quad (1)$$

ここに、 C_{Cl^-} : 塩化物イオン量、 C^{ϕ} : 基準塩化物イオン量(=1kg/m³)

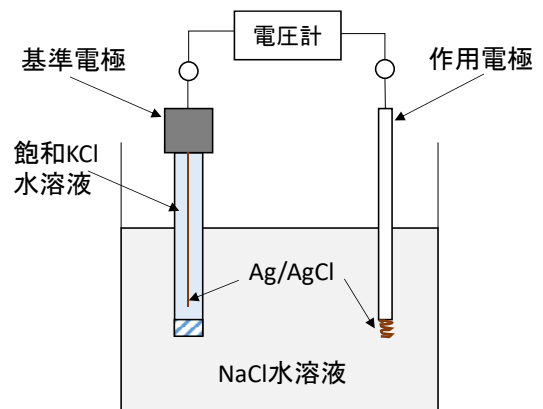


図-2.2 塩分センサの測定電位のモデル



図-2.3 調査に用いる主な機器

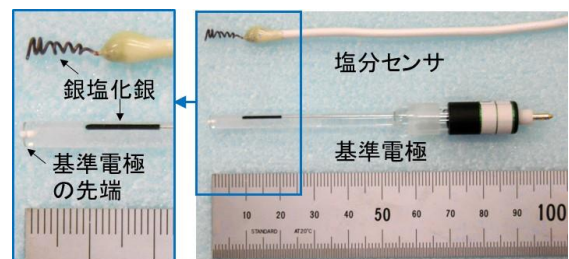


図-2.4 基準電極と塩分センサの細部

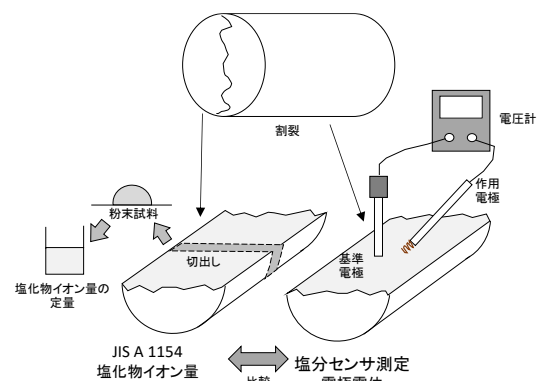


図-2.5 円柱供試体を用いた塩分センサの検証

表-2.1 コンクリートの配合

名称*	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混入した塩化物イオン量 (kg/m ³)
			W	C	S	G	
N	50	47	165	330	827	968	1.2, 2.5, 5.0, 10.0
B	50	47	165	330	827	968	
H	36	44	165	458	721	968	

※N：普通ポルトランドセメントを使用、B：高炉セメントB種を使用、H：早強ポルトランドセメントを使用

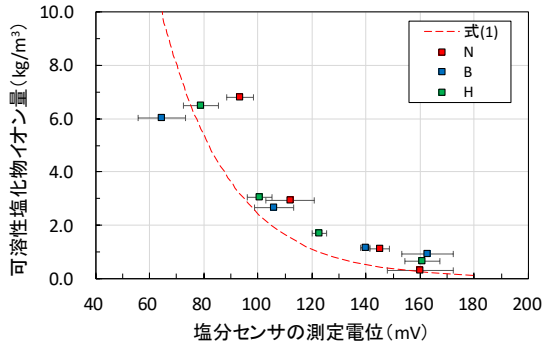


図-2.6 可溶性塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係

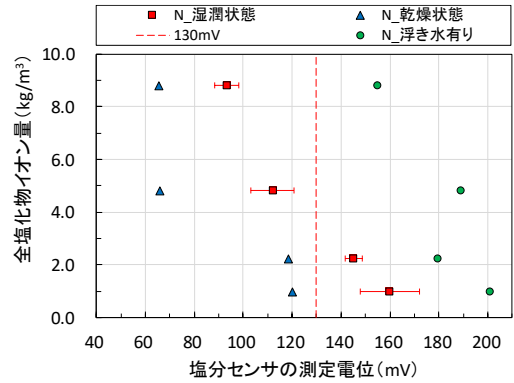


図-2.8 含水状態が及ぼす影響

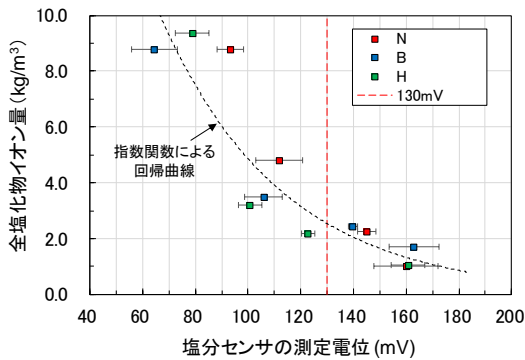


図-2.7 全塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係

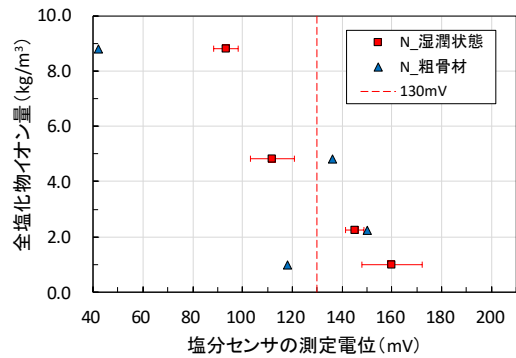


図-2.9 粗骨材の影響

式(1)より、溶液中の塩化物イオン量が大きくなるほど、塩分センサの測定電位は小さくなることからわかる。

2.2.2 塩分センサによる測定の検証実験

1) 実験方法

塩分センサによる測定には、基準電極、塩分センサおよび電圧計が必要である(図-2.3, 2.4)。電圧計には、入力抵抗が100MΩ以上で、目量が1mV以下の直流電圧計を使用した。

電圧計のプラス端子に塩分センサを、マイナス端子に基準電極を接続し、基準電極と塩分センサを測定対象に接触させることで、塩分センサの測定電位を計測した。

NaClを混入したコンクリート円柱供試体(以下、供試体)を用いて塩分センサによる測定の検証実験を行った。実験に用いたコンクリートの配合を表-2.1に

示す。配合は、セメントの種類と水セメント比が異なる3種類(N、B、H)とした。混入した塩化物イオン量は1.2、2.5、5.0、10.0kg/m³で、供試体の養生条件は封緘養生で28日以上である。

図-2.5に供試体を用いた塩分センサの検証方法を示す。割裂した片方を塩分センサの測定に用い、もう一方は、中央部から10mm程度の厚さの試料を切り出し、JIS A 1154および附属書Bに準じた全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量の測定に用いた。これらを比較して、塩分センサの測定電位と塩化物イオン量の関係を検討した。

塩分センサは、接触した箇所近傍の塩化物イオン量に応じた測定電位が得られるため、供試体の割裂面において、確実にモルタル部に接触させて測定を行った。塩分センサの測定電位は、接触から10秒後の計測値を記録した。また、測定のばらつきを確認するために、

各供試体で5回繰り返して測定した。測定は、気温20℃を目標に制御された室内で実施した。配合Nの供試体については、含水状態および粗骨材の影響を確認した。

2) 実験結果と考察

可溶性塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係を図-2.6に示す。塩分センサの測定電位は、5回測定した結果の平均値である。式(1)による算定値の結果も合わせて示す。いずれの配合においても、可溶性塩化物イオン量が多い供試体ほど、塩分センサの測定電位が小さくなる傾向が確認され、式(1)による算定値と傾向は概ね一致した。このことから、塩分センサでは、可溶性塩化物イオン量に応じた測定電位が計測されることが考えられる。

塩分センサの測定電位と全塩化物イオン量の関係を図-2.7に示す。上述のとおり、塩分センサの測定電位は可溶性塩化物イオン量と関係があるが、実務では全塩化物イオン量を指標として鋼材腐食に対する評価を行うことが一般的であるため、全塩化物イオン量との比較も行った。ここで、塩分センサの測定電位130mVを閾値とすると、配合によらず、全塩化物イオン量がおおよそ2.4kg/m³を超える場合を区別できている。全塩化物イオン量が2.4kg/m³を超えると、塩害によって鉄筋が著しく腐食した事例もあるため³⁾、この程度の全塩化物イオン量を検出することは重要である。

以上から、本研究で提案する方法では、塩分センサの測定電位130mVを閾値として、塩分の侵入状況(全塩化物イオン量2.4kg/m³程度を超える範囲)を調査することとした。

測定面の含水状態の影響を検討するために、散水を行わずに測定した場合(乾燥状態)および散水後の測定面に浮き水がある場合(浮き水有)で、それぞれ、1回ずつ測定した結果を図-2.8に示す。湿潤状態の場合は、5回測定した平均値と標準偏差の範囲(1σ)を示す。対象としたのは、配合Nの供試体である。

乾燥状態で測定した場合、湿潤状態の平均値と比較して、塩分センサの測定電位が30~50mV程度小さい。これは、測定面が乾燥していると、見かけ上塩化物イオン量が大きくなるように測定されることを示している。次に、浮き水有で測定した場合、湿潤状態の平均値と比較して、塩分センサの測定電位が40~80mV程度大きい。これは、乾燥状態の場合と反対に、見かけ上塩化物イオン量が小さくなるように測定されることを示している。毎回安定した測定結果を得るためには、含水状態の調整が重要であることを確認できた。

粗骨材の影響を検討するために、配合Nの供試体を

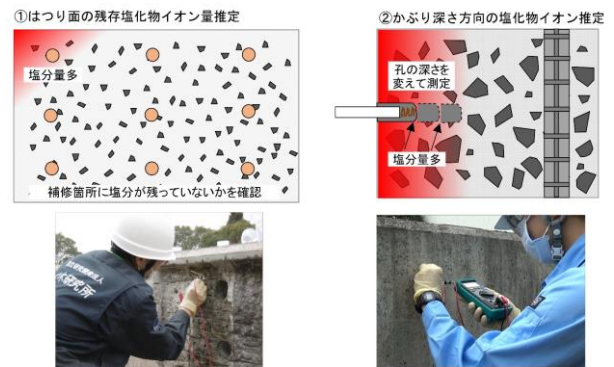


図-2.10 塩分センサの活用方法の概要



図-2.11 はつり面での含水状態の調整の例

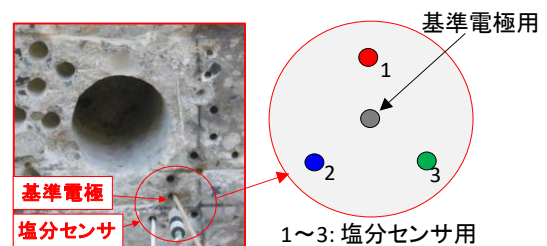


図-2.12 かぶり深さ方向の塩分量を推定する場合の測定孔の例

対象とし、粗骨材に塩分センサを接触させて、1回ずつ測定した結果を図-2.9に示す。湿潤状態の場合は、5回測定した平均値と標準偏差の範囲(1σ)を示す。

湿潤状態の平均値と比較して、塩分センサの測定電位が5~50mV程度の差があり傾向が異なる。粗骨材に接触させた場合、基準電極との導通が不十分となり、適切に測定できないものと推察される。湿潤状態での測定よりも、塩分センサの測定電位が大きくなる場合があり、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性もある。このため、粗骨材を避けて測定する必要があると考えられる。

2.3 塩分センサを活用したコンクリート構造物調査方法の提案

2.2 で確認した塩分センサの特性を踏まえて、塩分センサを活用し塩害を受けた構造物の補修の確実性を向上させる方法として、はつり面の残存塩化物イオン量を推定する方法を提案した(図-2.10①)。また、塩分センサを活用し塩害による腐食が始まる前に塩分の侵入状況を簡易に確認する方法として、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定する方法を提案した(図-2.10②)。以下では、提案する2つの方法の共通の留意点を示す。

2.3.1 評価のための閾値

塩分センサの測定電位は、小さいほど塩分量が多いことを意味するため、安全側の評価をするために、測定電位の最小値を評価に用いる代表値とする。測定結果の評価は、代表値が130mVよりも小さい場合、多量に塩化物イオンを含むと判定する。これは、塩分センサの測定電位が130mVを超えると、全塩化物イオン量でおよそ 2.4kg/m^3 を超えることを実験的に確認したためである(図-2.7)。

2.3.2 含水状態

塩分センサは、可溶性の塩化物イオンと関係があるため、塩分センサの接触面が乾燥していると、見掛け上濃度が高くなり、塩化物イオン量を多く推定する。一方、接触させる面に浮き水がある場合は、見掛け上濃度が低下し、塩分量を少なく推定する。このため、測定の直前に、塩分センサを接触させる面に散水した上で、表面をウェスやガーゼなどで拭き取るなどして、含水状態を調整する必要がある(図-2.11)。

かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定では、ドリル孔内の含水状態の調整となり、深くなると孔内の浮き水の除去が困難になるため、測定深さは100mm以内とするのがよい。

2.3.3 粗骨材

塩分センサは、粗骨材に接触させて測定すると、通常の測定よりも塩分センサの測定電位が大きくなる場合があり、多量に塩化物イオンを含む部位を見落とす可能性があるため、粗骨材を避けて測定する必要がある。

はつり面の残存塩分を推定する場合には、目視で粗骨材を避けて、塩分センサをモルタル部に確実に接触させる必要がある。かぶり深さ方向の塩分量を推定する場合には、ドリル孔の内部を目視等で確認することが困難なため、測定用の孔を3箇所設定する(図-2.12)。3箇所測定し最も安全側のデータを採用することで、

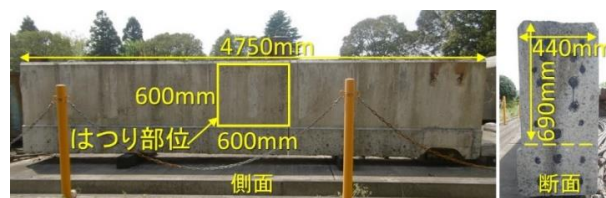


図-2.13 第4章で測定対象とした部材の概要(上下を反転して設置)



図-2.14 はつり深さと塩分センサの測定位置

塩化物イオンを含む部位を見落とすリスクを十分小さくできると考えられる。

2.4 はつり面の残存塩化物イオン量推定事例

本節では、2.3 で示した留意点に基づいて、はつり面の塩化物イオン量を推定した事例を示す。

2.4.1 測定対象

測定対象は、ポストテンション方式3径間PC単純T桁(2主桁)の側道橋で、本線の道路橋と並んで約16年間塩害環境に供用されていた部材である。コンクリート表面には変状が見られず、目視点検では比較的健全と評価されていたが、本線の道路橋の架け替えにより2005年に撤去された。5m程度の長さで側道橋を切断後、土木研究所の実験棟で保管されていたが、2010年頃に雨掛かりのある屋外ヤードに移設した(図-2.13)。

2.4.2 実験方法

図-2.13に示す桁側面の600×600mmの範囲をはつり面とし、ブレーカーを用いてはつり作業を行った。第3章で述べた測定方法を検証するために、はつり深さを0~70mmの範囲で変化させた。

塩分センサによる測定位置は、図-2.14に示す6点とした。6点のはつり深さをノギスで測定した結果、図-2.14の(1)~(6)に示すように4~66mmであった。なお、一部の測定箇所では、約2ヶ月後に追加ではつり作業を行い、再度塩分センサによる測定を行った。

塩分センサによる測定後、測定位置から半径50mm

程度の範囲から、直径 14.5mm のドリルビットを用いて深さ 10mm 程度を削孔 (各測定位置周囲で 6 孔) して試料を採取し、全塩化物イオン量の測定に用いた。基準電極は、塩分センサ測定位置から半径 50mm 以内に設置した。

2.4.3 実験結果と考察

はつり深さと塩分センサの測定電位の分布を図-2.15、図-2.16 に示す。図の縦軸は、図-2.14 に示したはつり面の下端からの距離である。はつり深さについては、はつり面の上部ほど深くなるようにはつりを行った。このはつり深さに対応する塩分センサの測定電位は、はつり深さ 55mm までは 130mV を下回り、はつり深さ 66mm では 180mV 程度であった。

次に、コンクリート表面からの全塩化物イオン量の分布を図-2.17 に示す。ここで、表面からの距離は、はつり深さにドリル削孔深さの中央までの距離 (=5mm) を加えた値である。その結果、60mm までは全塩化物イオン量 2 kg/m³ 程度以上の値を示し、71mm では全塩化物イオン量は 1.2kg/m³ 程度であった。

塩分センサの測定電位と全塩化物イオン量の分布を比較すると、測定電位が 130mV を下回った位置では、全塩化物イオン量は 2kg/m³ 程度以上となった。よって、提案した方法により、多量に塩化物イオンを含む部位を検出できたと考えられる。

塩分センサの測定電位が 130mV を下回った図-2.14 の測定箇所(2)、(3)について、追加はつりを行った。図-2.17 に示した全塩化物イオン量の分布によれば、表面からの距離を 50mm より大きくすれば、全塩化物イオン量 2.4kg/m³ をおおよそ下回ると推察される。そこで、測定箇所(3)では、50mm より大きくなるように追加で 15mm 程度はつりを行った。測定箇所(2)については、初回のはつり時に既に 50mm よりも大きかったが、追加で 15mm 程度はつりを行った。追加はつり後、再度、塩分センサによる測定を行った。

図-2.15、図-2.16 にその結果 (凡例: 青丸) を示す。追加はつり後塩分センサの測定電位は、130mV を上回っている。追加はつりの前は、130mV を下回っていたことから、追加はつりの効果を塩分センサによる測定で確認できたと考えられる。

2.5 かぶり深さ方向の塩化物イオン量推定事例

本節では、2.3 で示した留意点に基づいて、かぶり深さ方向の塩化物イオン量を推定した事例を示す。

2.5.1 測定対象

測定対象は、単純 PC プレテンション方式 T 桁橋 (17

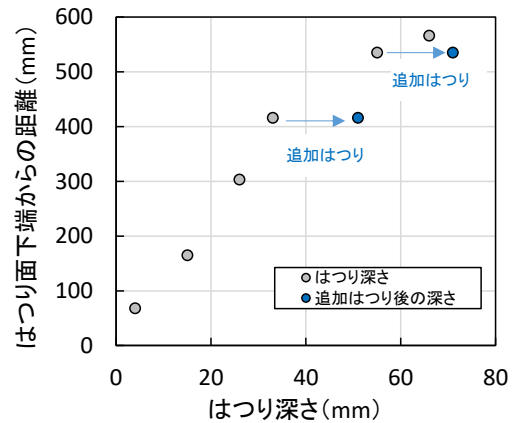


図-2.15 はつり深さの分布

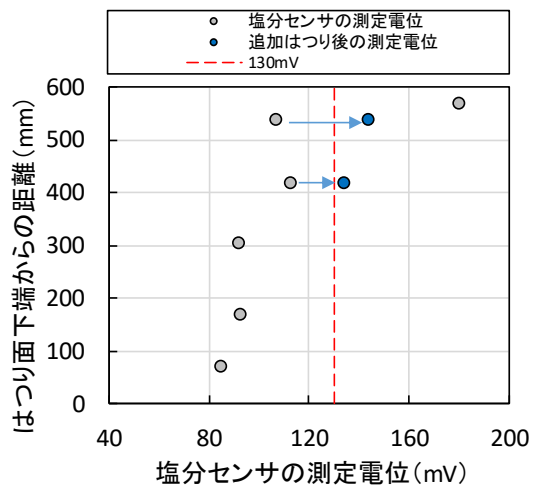


図-2.16 塩分センサの測定電位の分布

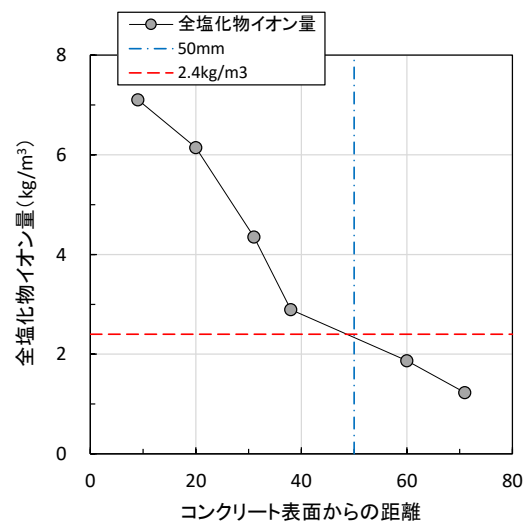


図-2.17 全塩化物イオン量の分布

径間、各径間の主桁 11 本) であり、約 47 年間塩害環境に供用されていたものである。供用から 20 年後からは、電気防食工法が試行的に適用された。飛来塩分

による塩害での主桁の損傷に伴い、2017年に撤去され、部材の一部が切断された状態で、雨掛かりのある屋外に保管されていた。

2.5.2 実験方法

測定対象とした部材の設置状況を図-2.18に示す。塩分センサによる測定は、1径間の主桁7本の下フランジにおいて合計13箇所(No.1~13)で実施した。測定の計画深さは、10、30、50、70、90mmの5段階とした。その後、塩分センサによる測定を行った箇所の近傍で(図-2.19)、直径18mmのドリルを用いて10mm間隔で試料を採取し(図-2.20)、JIS A 1154に準じた全塩化物イオン量を測定した。さらに、塩分センサによる測定箇所から、300~2000mm程度離れた位置で(平均は700mm程度)、φ100×150mmのコアを採取し、塩素についてEPMA分析を行った。

全塩化物イオン量の結果との比較のために、図-2.21に示すように塩化物イオン侵入深さを算定した。塩化物イオン含有量試験による塩化物イオン侵入深さは、全塩化物イオン量が 2.4kg/m^3 となる深さを線形内挿で算定した。塩分センサ測定による塩化物イオン侵入深さは、塩分センサの測定電位が 130mV となる深さを線形内挿で算定した。なお、調査したすべての深さで 130mV を下回った場合は、最後に削孔した深さを塩化物イオン侵入深さとした。

2.5.3 実験結果と考察

塩化物イオン侵入深さを図-2.22に示す。図中の赤線は両方法が一致していることを示し、二点破線は塩分センサによる測定の方が $+20\text{mm}$ 、一点破線は塩分センサによる測定の方が -20mm であることを示す。13箇所の測定のうち、11箇所では、 $\pm 20\text{mm}$ の範囲または $+20\sim 30\text{mm}$ 程度となる安全側の測定結果となった。一方、No.6とNo.11では、 -20mm を下回り、危険側の結果となった。

塩分センサの調査結果および全塩化物イオン量の測定結果の例として、No.4の結果を図-2.23、No.6の結果を図-2.24に示す。塩分センサの測定電位の軸は、全塩化物イオン量の分布と対応するように反転させている。全塩化物イオン量の軸は、塩分センサによる測定で着目している範囲が読み取れるように 7.2kg/m^3 までの範囲を表示している。

図-2.23のNo.4では、塩分センサによる測定結果は、全塩化物イオン量の測定結果と概ね対応した。図-2.24のNo.6については、塩分センサの方が、塩分の侵入が浅いと評価される結果となった。また、No.6では、他の箇所と比較して深部まで全塩化物イオン量が高い



図-2.18 第5章で測定対象とした部材の設置状況(上下反転して設置)

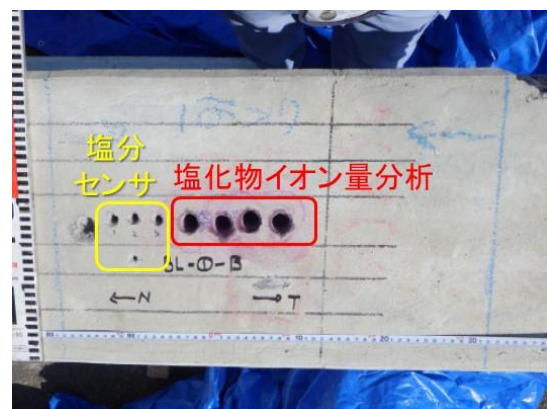


図-2.19 塩分センサによる調査の位置の概要

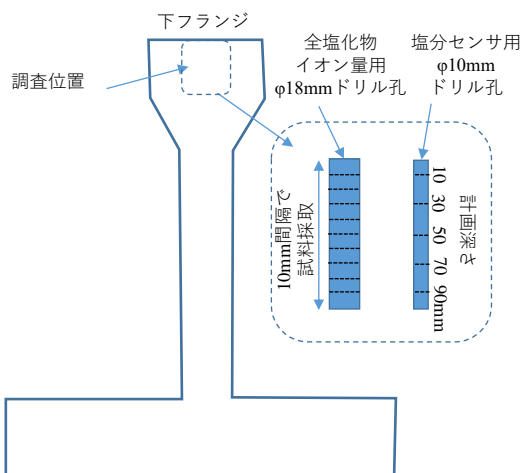


図-2.20 削孔状況の概要

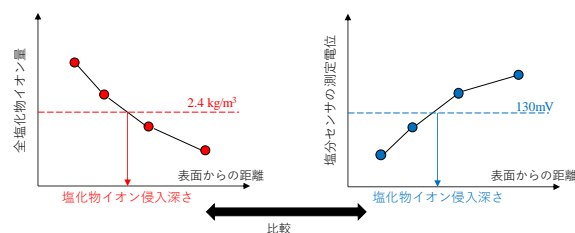


図-2.21 塩化物イオン侵入深さの算定方法

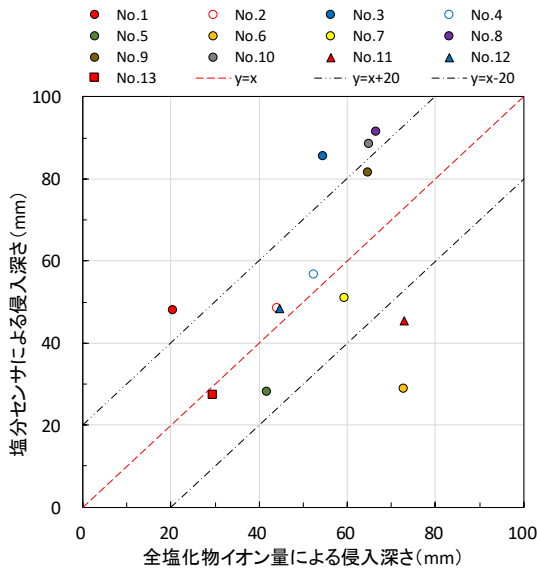


図-2.22 塩化物イオン侵入深さ

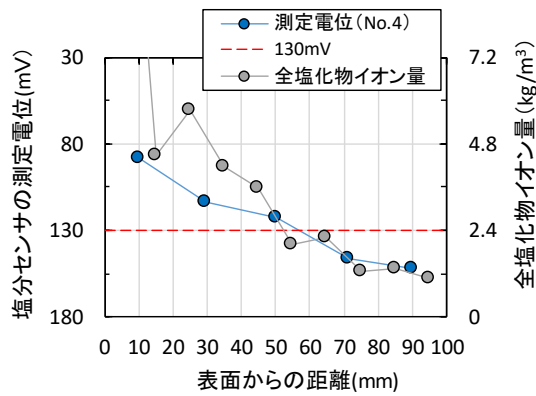


図-2.23 No.4 での調査結果

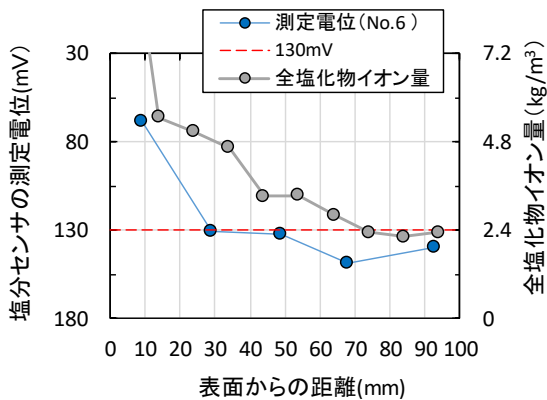


図-2.24 No.6 での調査結果

傾向にあった。

塩分センサによる調査と比較的近い位置（500mm程度）でコアを採取した EPMA 試験結果の例として、No.4 と No.6 の Cl の結果を図-2.25 と図-2.26 にそれぞれ示す。図-2.25 の No.4 では、表面付近の濃度が高

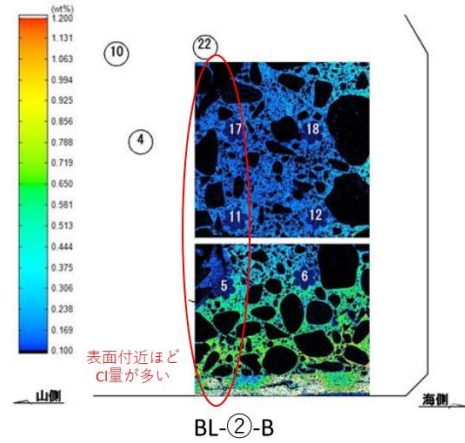


図-2.25 No.4 の EPMA 試験結果 (Cl)

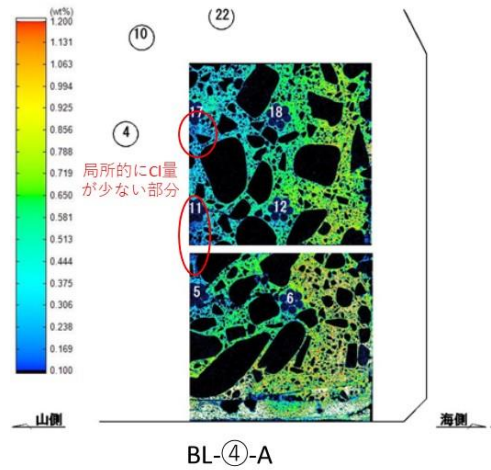


図-2.26 No.6 の EPMA 試験結果 (Cl)

く、深部ほど低い分布となっている。これは、図-2.23の結果ともよく一致している。一方、図-2.26 の No.6 では、深部も比較的濃度が高く、かつ、局所的に濃度が低い部分がある。塩分センサは、センサ接触部で反応するため、局所的に塩化物イオンが少ない部分を測定して危険側の結果となった可能性が考えられる。このため、塩分センサによる測定を複数の箇所で行い、塩化物イオンの侵入状況の傾向を確認することが望ましいと考えられる。

2.6 塩分センサの適用性検証のまとめ

本章では、塩分センサを用いた、はつり面の残存塩化物イオン量およびかぶり深さ方向の塩化物イオン量の推定方法を示した。以下に、まとめを示す。

- 1) 硬化コンクリート中の全塩化物イオン量と塩分センサの測定電位の関係を明らかにした。これにより、塩化物イオン量が鉄筋腐食に影響する程度であるか否かを測定電位で評価が可能になった。

- 2) 含水状態、粗骨材、中性化等の測定に影響を及ぼす因子について検討し、現地で測定する際の留意事項を明確にした。
- 3) 塩害環境で供用されていた部材を対象に検証実験を行い、提案した方法によって、全塩化物イオン量の多寡を現地で評価できることを確認した。

3. モアレ縞・オパール薄膜の適用性検証

3.1 研究概要

iMaRRC では、構造物の維持管理に対するアプローチとして、構造物の変状を色調や発光などの「見え方」の変化で検知できる新材料に着目し、実用化研究を進めている。構造物の劣化検出・診断では、非破壊試験の活用が期待されるが、X線、超音波計測、あるいは、ひずみゲージや光ファイバーなど既存の方法では、特殊な装置や多数のセンサー装置が必要であり、コストや操作性などの面で課題もある。安価でかつ、精度よく広範囲の劣化情報を得るのは容易なことではないが、今後、メンテナンスサイクルを回していくには低コストで信頼性が高い技術が求められる。

最近ではひずみやひび割れに応答する機能材料が国内外で報告され、土木分野への適用にも注目されつつある。このような材料を用いた研究例を表-3.1に示す。これら材料は、それぞれにターゲットとなる変状と、「見え方」によって発現する原理が異なるものの、いずれも面的な情報が得られるため、構造物の効率的な劣化検出に役立つ可能性がある。

本研究では、近接目視が困難な場所や塗膜などに覆われ外観に見られないコンクリートひび割れを非破壊で検査する新しい方法を開発することを目的に、表-3.1の中でも適用できる可能性が高いと考えられた「モアレ縞」および「オパール薄膜」を取り上げ、新しい計測技術の開発研究を行った。本研究は、それぞれの基本技術を有する NIMS と共同研究で進めた。

3.2 基本原理

3.2.1 モアレ縞を活用したひび割れ幅の計測技術

1) モアレ縞とは

モアレ縞とは、図-3.1に示す規則正しく並んだ格子もしくは模様を重ね合わせた際に発生する縞模様のことである。身近な例では、ネットフェンスの重なり、印刷時の網点の干渉、モニターで格子模様を表示した時の画素と格子の重なりによって生じる。

通常はモアレ縞を軽減あるいは抑制する工夫がされるが、あえてモアレ縞を発生させその特性を利用した計測法がある。モアレ縞を利用した計測は古く、工作

機械の治具定位⁹⁾や等高線、等変位線を直接視覚情報として得る方法に用いられてきた。最近では、コンピュータの高性能化によって画像解析が容易になったことからサンプリングモアレ法¹⁰⁾など、デジタル画像処理を利用した高速高精度な計測法として開発が進んでいる。土木分野においても、サンプリングモアレ法を利用して、橋梁などの構造物のたわみを計測する手法が報告されている⁶⁾。これらモアレ縞を用いた計測法は、高速かつ高精度であるが、基準となる初期画像と変状・変形発生後の画像との比較により変位やひずみを測定しているため、全くの同位置で撮影した変状前後の画像が必要となる。構造物のひび割れ発生や進展を計測する場合には構造物の対象箇所全てにカメラを固定し、定点観測しなければならない、法令で定められた定期点検などで利用するのは難しい。

本研究では、これら従来のモアレ縞を活用した変位計測とは異なる方法で、対象のひび割れ幅を計測する技術を開発した¹¹⁾。他の計測法と異なる点は、変状が起こる前の初期画像が不要となったこと、既存のひび割れ進展計測だけでなく、新たに発生したひび割れにも対応できるようになったことである。カメラ位置を固定する定点観測が不要となり、計測に必要な特殊装置も要らない実用的な技術となっている。

表-3.1 新材料による構造物の劣化検出・診断技術

新材料	技術の概要	文献
応力発光体	応力作用時に発光する塗料によるひび割れの動的検出。	4)
力学応答樹脂	力学的刺激に応答して発光強度や色に変化。	5)
モアレ縞	干渉縞によって変形前後の画像処理でひずみを可視化。	6)
ひび割れ検出塗料	ひび割れによって侵入する酸素に応答して発光が消光。	7)
オパール薄膜	変形を検知して変色するシートによってひずみを可視化。	8)

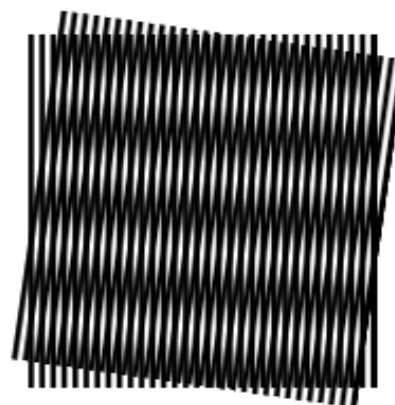


図-3.1 モアレ縞の例

2) ひび割れ幅の計測原理

本研究で開発したひび割れ幅の原理は、ひび割れの発生あるいは進展によりコンクリート部材表面に施工した格子の一部が広がることに着目し、同一幅の格子像を重ね合わせた際に生じるモアレ縞のずれから幾何学的にひび割れ幅を算出するものである。

具体的な原理は、**図-3.2**に示すように、事前にコンクリート部材表面に施工した格子(以下「モデルグリッド」という。)にひび割れが発生することで格子の一部が広がると、その上から同一幅の格子(以下「マスターグリッド」という。)を重ね少し傾けた場合、ひび割れを境にずれのあるモアレ縞が生じる。このモアレ縞のずれとひび割れ幅は幾何学的な関係にあり、ひび割れ幅 w 、モデルグリッドの格子間隔 a 、モアレ縞の幅 d 、縞のずれ Δd とした時、式(2)が導出できる。

$$w = a \times \Delta d / d \quad (2)$$

モデルグリッドの間隔 a が既知であることから、モアレ縞の幅 d と縞のずれ Δd を計測すれば、ひび割れ幅を算出することが可能となる。

3.2.2 オパール薄膜を活用したひび割れ可視化技術

1) オパール薄膜とは

オパール薄膜とは、**図-3.3**の左下のように任意の支持膜上において、粒子径 200nm 程度の揃ったコロイド粒子を三次元周期構造体として最密充填したものであり¹²⁾、ブラッグ反射という仕組みによって構造色を呈する。これは、NIMSにて、これまでに研究・開発されてきた技術である。

オパール薄膜は、生体模倣技術(以下、「バイオミメティクス」という)の一種で、バイオミメティクスとは、生体の組成や形状を研究し、その優れた機能を工学技術として応用することである¹³⁾。例えば、蓮の葉の微細構造を模倣することで撥水、撥油、防汚の効果を得た製品が開発されるなど、身近な実用例も多い。

図-3.4の左に示すのは、鮮やかな色と金属光沢をもつモルファ蝶、その蝶の羽の微細構造を真似たのがオパール薄膜である。モルファ蝶の羽根は色素や顔料を含まず、鱗粉の多層薄膜の周期構造による光の干渉によって色づいていて、構造色と呼ばれる。これを模倣したオパール薄膜の発色も構造に由来し、変形すると上記の周期構造が影響を受け、光の干渉する波長が変化して色が変わって見える(**図-3.4**の右)。ひずみが色の变化で確認できるため、構造物に設置すればひずみだけでなくひび割れも可視化でき、応用が期待できる。

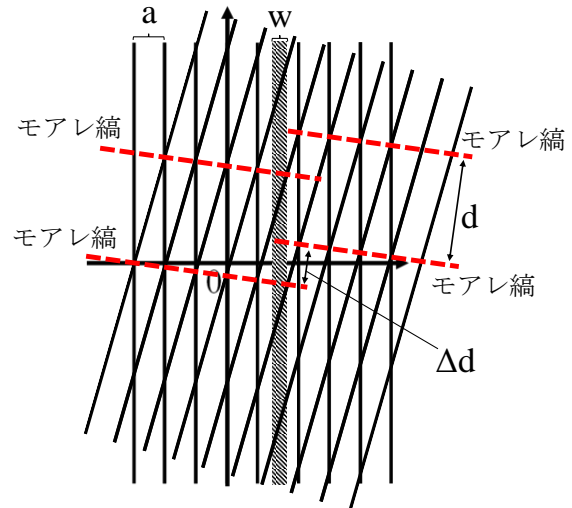


図-3.2 ひび割れ幅の算出原理¹¹⁾

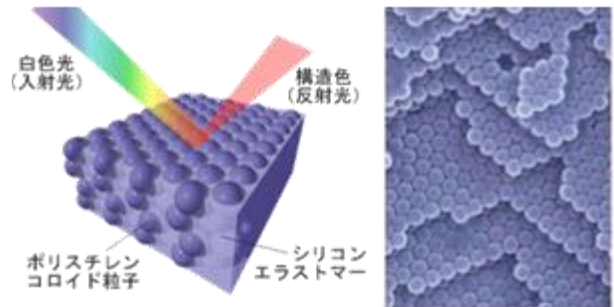


図-3.3 オパール薄膜シート(上)、オパール薄膜模式(左下)およびオパールのSEM画像(右下)

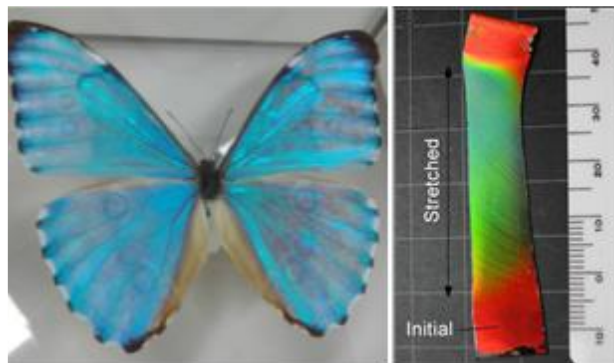


図-3.4 モルファ蝶(左)と変色したオパール薄膜(右)

2) ひび割れの可視化原理

本技術の原理は、ひび割れの発生あるいは進展によって、コンクリート部材表面に施工したオパール薄膜シートが変形してコロイド粒子間の距離が変わることによって、構造色に変化するのを利用したものである。

具体的な原理は、図-3.5 に示すように、オパール薄膜上に等間隔で並ぶコロイド粒子の厚さ方向の間隔が、水平方向の伸長によって粒子間隔 d_1 (変形前) から d_2 (変形後) に変化することで、反射する光の波長が変わるために構造色が変化する。

3.3 研究方法

3.3.1 モアレ縞を活用したひび割れ幅計測の検証

1) 本技術の計測精度

3.2 で説明したように、本研究では、モアレ縞のずれを利用した幾何学的な式からひび割れ幅を算出する方法を考案した。そこで、その計測精度について検証する必要があったため実験を行った。

実験内容については、図-3.6 に示すコンクリート製の U 型側溝用蓋 (330×600×45mm) を用いて供試体を作製し、プライマーを塗布した箇所格子間隔 1.5mm のシート (モデルグリッド) を貼付した。シート両端にセリ矢を打ち込むことでひび割れを導入し、ひび割れ幅は、コンタクトゲージで実測を行い、その実測値と本技術での計測値を比較することで精度を検証した。

2) 離れた場所からのひび割れ幅の計測

構造物の点検作業においては、近接目視が基本となっている。点検箇所は高所もあり、高所作業車や点検用足場、あるいは梯子などを必要として容易ではない。危険が伴い近接目視が困難な場所もあるため、離れた所からでも構造物のひび割れ調査を行うことができれば、安全で効率的な点検作業が行える。

実験的な検証として、遠方からでもひび割れ幅を計測できるのか実験を行った。実験内容は、供試体を遠距離から撮影したのち、撮影画像を本技術で解析して計測した。撮影距離は、10m、30m、50m、60m の 4 パターンとした。撮影する際は、三脚にカメラを設置してプログラムオートでセルフタイマーにて撮影を行った。

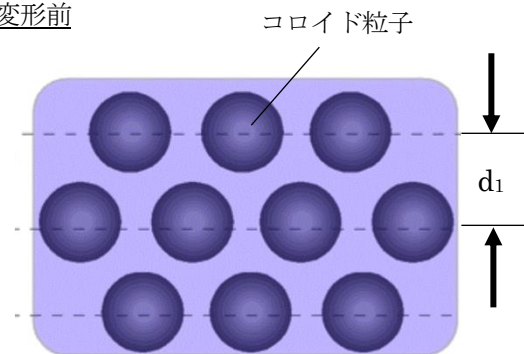
また、本来橋梁やトンネルといった構造物の部材表面を真正面から撮影するのは難しく、離れた所からの撮影であると多少角度のついた画像取得が予想される。

そこで、実験的な検証として、対象物を任意の角度に傾け撮影した際にひび割れ幅を精度よく計測できる

のか実験を行った。実験内容は、供試体を斜めに傾け撮影した際にひび割れ幅を精度よく計測できるのか実験を行った。実験内容は、供試体を斜めに傾けて撮影を行い、撮影画像を本技術で解析し計測した。供試体を傾けた角度は 15° 、 30° 、 45° の 3 パターンとした。撮影距離は、50cm 程度離れた位置にカメラを固定してプログラムオートで撮影を行った。

供試体については、両試験ともに図-3.6 と同じ供試体を用いた。ひび割れ幅については、コンタクトゲージにて実測し、本技術で計測したひび割れ幅と比較した。

変形前



変形後

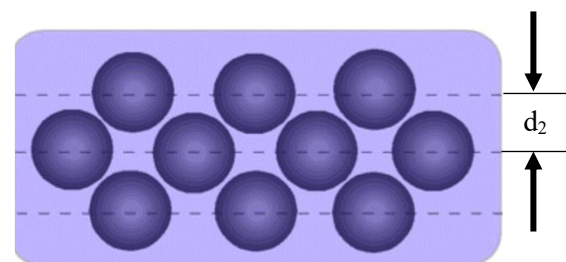


図-3.5 ひび割れの可視化原理

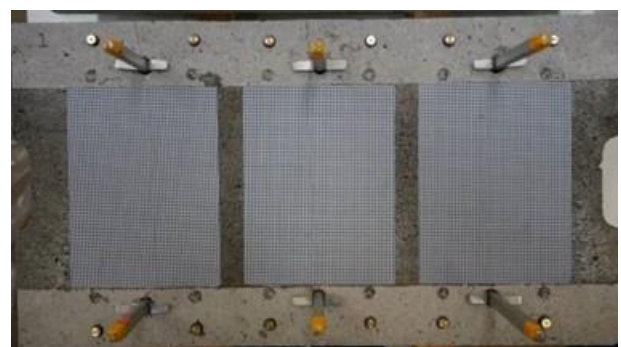


図-3.6 コンクリート供試体

3) 補修材厚みを考慮したひび割れ幅の計測

構造物のひび割れ対策は、維持管理を行う上で重要である。一方で、発生・進展したひび割れを補修した後に再び劣化が生じることがあり問題となっている¹⁴⁾。ひび割れ補修時は部材表面が補修材などによって保護されるため、再劣化した場合に目視観察することができず、対策が遅れることがある。そのため、補修材の被覆下で発生・進行する目視困難な劣化を検知できる技術に対してニーズが高まりつつある。本技術のモアレ縞を利用して、補修材下で目視できない箇所のひび割れの発生・進展を可視化し、ひび割れ幅を計測できるのかを検証した。

実験的な検証としては、ひび割れ補修時の補修材表面にモデルグリッドを付け、目視困難な補修材下でひび割れが生じた場合のひび割れ幅を、モデルグリッドの微小な変状からモアレ縞のずれとして検出し計測できるのか実験を行った。実験内容は、**図-3.7**に示すように、補修材を塗布したコンクリート供試体（U型側溝用蓋：330×600×45mm）に、格子間隔 1.5mm のシート（モデルグリッド）を貼付し、シート両端にセリ矢を打ち込むことでひび割れを導入して、供試体の撮影を行い、撮影画像を本技術で解析し計測した。補修材の厚さは、190 μ m、350 μ mとした（**図-3.8**）。ひび割れ幅については、クラックゲージでも実測し、本技術で計測したひび割れ幅と比較した。

4) 画像解析ソフトの作成

3.2 で説明したように、ひび割れ幅を算出するにはモアレ縞を発生させ、 d と Δd を計測する必要がある。本来ならば、モデルグリッドの上からマスターグリッドを自身で直接重ね合わせなければならないが、近接する必要があったために非常に労力を有した。そこで、計測作業を容易にし、かつ現場での活用を考えた方法を模索して、NIMS にて画像解析ソフトを作成した。本ソフトでは、デジタルカメラで撮影したモデルグリッドを PC 上の画像処理で間接的にマスターグリッドを重ねてモアレ縞を発生させられる。研究結果については、本ソフトを用いてひび割れ幅を計測した。

3.3.2 オパール薄膜を活用したひび割れ可視化の検証

1) オパール薄膜シートの耐候性試験

構造物は屋外環境にあるため、紫外線の影響を受けやすく、オパール薄膜シートを使用した場合に紫外線による劣化が予想される。そのため、実験的な検証として、シートの耐候性試験を行うことで、シート特性を把握し、耐久性向上について検討した。



図-3.7 補修材を塗布したコンクリート供試体

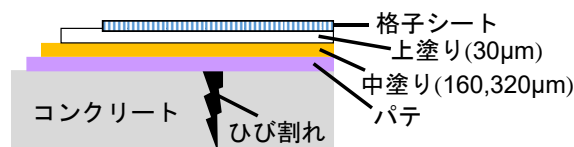


図-3.8 補修材の被覆状況（断面図）



図-3.9 耐候性試験機の概要

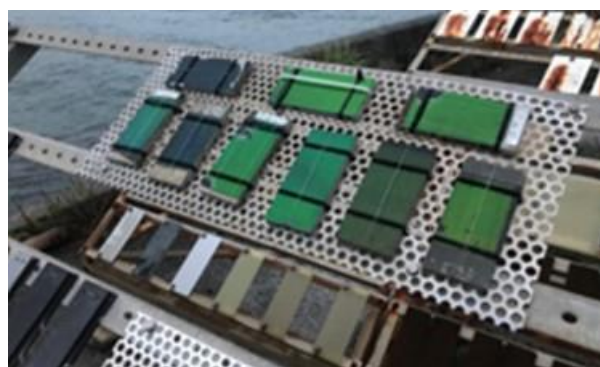


図-3.10 屋外暴露試験の状況

実験内容は、**図-3.9**に示すように、耐候性試験機を用いて、「JIS K 5600 7-7 サイクル試験 A」に準拠して行った。サイクル条件は、温度 $63 \pm 2^\circ\text{C}$ （ブラックパネル温度）、湿度 40-60%RH、キセノンランプ出力 $60\text{W}/\text{m}^2$ 、1 サイクル照射 102 分+濡れ時間 18 分とした。さらに、**図-3.10**のように屋外暴露試験も合わせて行い、暴露場所はつくばと沖縄とした。観測には、

色の変化を正確に観測するため、同軸落射照明を介してデジタルカメラで撮影し、代表点でファイバー分光器を用いて反射波長を計測した（図-3.11）。

2) 梁の曲げ試験によるひび割れの可視化

構造物の本格的な老朽化に対応するべく、近接目視点検の負担を軽減する方法として、変形によって色が変わるオパール薄膜を利用し、構造物に生じる微小なひび割れを簡易に可視化できるのかを検証した。

実験的な検証として、鉄筋コンクリート梁供試体¹⁵⁾（図-3.12）を用意し、曲げ試験を行うことで、曲げひび割れの可視化状況を観察した。実験内容は、図-3.13に示すように、オパール薄膜を鉄筋コンクリート梁模型にエポキシ樹脂系接着剤を用いて貼付し、載荷試験機を用いて四点曲げ試験を行った。載荷方法は静的単調載荷とし、載荷速度はひび割れの進展状況が確認できる速度（1.0kN/mm程度）とした。最初のひび割れが目視できた時点で載荷を一旦停止しひび割れを観察した。その後は、ひび割れ幅が0.1、0.2、0.3、0.5mmと進展するごとに同様に観察を行い、ひび割れ幅が0.5mmに達した時点で載荷を終了した。ひび割れ幅を、クラックゲージを用いて実測した。

3) 補修材厚みを考慮したひび割れの可視化

構造物の点検において、ひび割れの管理は重要な項目の一つである。ひび割れの補修などによって部材表面が被覆されたコンクリート構造物において、目視困難となった箇所のひび割れをオパール薄膜を利用して可視化できるのかを検証した。

実験的な検証として、ひび割れ補修時の補修材表面にオパール薄膜シートを貼付し、目視困難な補修材下でひび割れが生じた場合に、オパール薄膜でのひび割れの可視化状況を観察した。実験内容は、図-3.14に示すように、補修材を塗布したコンクリート供試体（U型側溝用蓋：330×600×45mm）に、オパール薄膜シートを貼付し、シート両端にセリ矢を打ち込むことでひび割れを導入して、ひび割れ幅と構造色の変色度合いについて実験を行った。補修材の厚さは、160 μ m、190 μ mとした（図-3.15）。ひび割れ幅については、クラックゲージを用いて実測した。

4) 画像処理ソフトの作成

オパール薄膜シートの特徴であるひび割れによる構造色変化を活かしつつ、構造物の点検作業を簡素化する方法として、NIMSにて画像処理ソフトを作成した。本ソフトでは、デジタルカメラで撮影したオパール薄膜シートに対し、PC上の画像処理でひび割れの無い健全部の色を任意に設定して、ひび割れのある異常部を

透明化できるソフトとなっている。



図-3.11 ファイバー分光器による波長計測

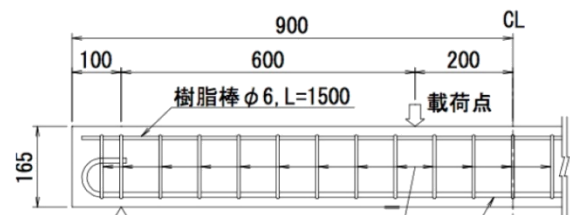


図-3.12 鉄筋コンクリート梁模型



図-3.13 オパール薄膜の貼付状況(上)と載荷試験(下)



図-3.14 補修材を塗布したコンクリート供試体

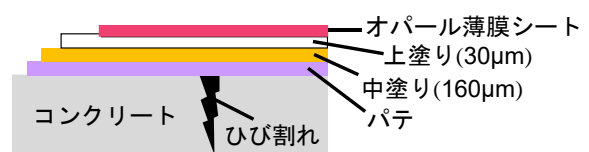


図-3.15 補修材の被覆状況（断面図）

3.4 研究結果

3.4.1 モアレ縞を活用したひび割れ幅計測の検証

1) 本技術の計測精度

図-3.16 に、供試体の撮影画像（上）とマスターグリッドを重ねた解析画像（下）を示す。図-3.16 の上の画像を解析ソフトに取り込み、解析上でモアレ縞を発生させ、下の画像のように縞模様のずれを解析してひび割れ幅を算出した。

図-3.17 は、コンタクトゲージによるひび割れの実測値と、モアレ縞を活用した画像解析による計測値の相関を示したものである。図-3.17 より、実測値と計測値には概ね相関関係があり、解析ソフトによる計測値は全体的に $\pm 0.1\text{mm}$ 以内に収まるバラツキであった。本技術にて測定可能なひび割れ幅として、 0.2mm 以下のひび割れ幅も測定できることを確認した。

検証の結果、コンタクトゲージによる実測値と解析ソフトによる計測値には、大きな誤差はなく $\pm 0.1\text{mm}$ 以内に収まる精度にあり、本技術では 0.2mm 以下のひび割れ幅も計測できることを確認した。

2) 離れた場所からのひび割れ幅の計測

図-3.18 に、遠方から供試体を撮影した画像（上）と解析ソフトによる解析画像（下）を示す。図-3.18 の上の画像を解析ソフトに取り込み、解析上でモアレ縞を発生させ、下の画像のように縞模様のずれを解析してひび割れ幅を算出した。

図-3.19 は、コンタクトゲージによる実測値と、解析ソフトを使用した画像解析による計測値の相関を示したものである。図-3.19 より、全体的に $\pm 0.1\text{mm}$ 程度のバラツキがあった。供試体とカメラの距離が離れると、オートフォーカスで手ぶれ補正しても被写体がぶれ、モデルグリッドが不鮮明となり、モアレ縞を表示できなくなったためと考えられた。検証の結果、画像の解析値に多少のバラツキが見られたものの、 50m までであればある程度計測が可能と考えられた。精度は、 0.3mm 以上のひび割れであれば誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内に収まることを確認した。 0.3mm 以下では、精度は劣るもののひび割れ検出は可能であった。

3) 斜めからのひび割れ幅の計測

図-3.20 に、斜めに傾けた供試体を撮影した画像（上）と解析ソフトによる解析画像（下）を示す。図-3.20 の写真は、図-3.18 と同様に解析ソフトによる解析状況である。ただし、下の画像のように、斜めに撮影された画像に対してモアレ縞を発生させると縞模様が歪むため、解析値のバラツキが懸念された。

図-3.21 は図-3.19 と同様に、コンタクトゲージによ

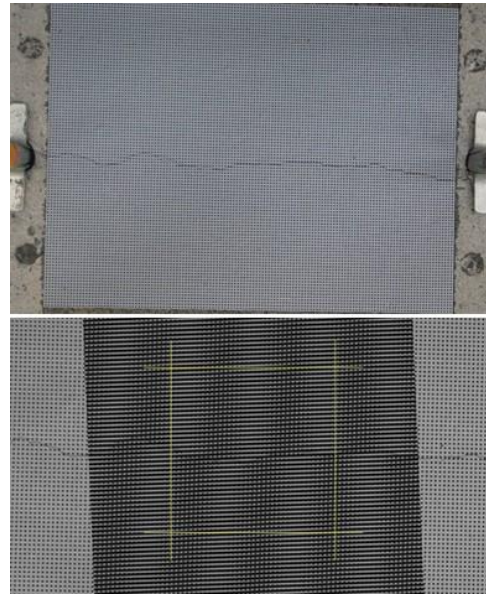


図-3.16 撮影画像（上）と解析画像（下）の比較

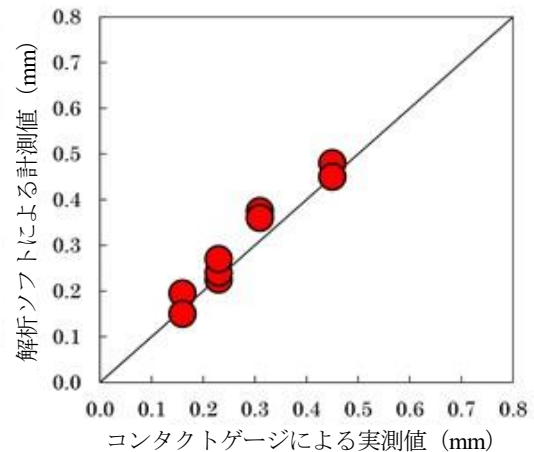


図-3.17 実測値と計測値の相関

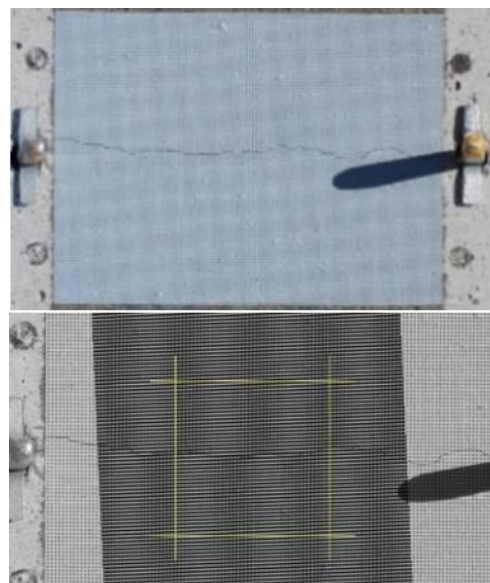


図-3.18 撮影画像（上）と解析画像（下）の比較

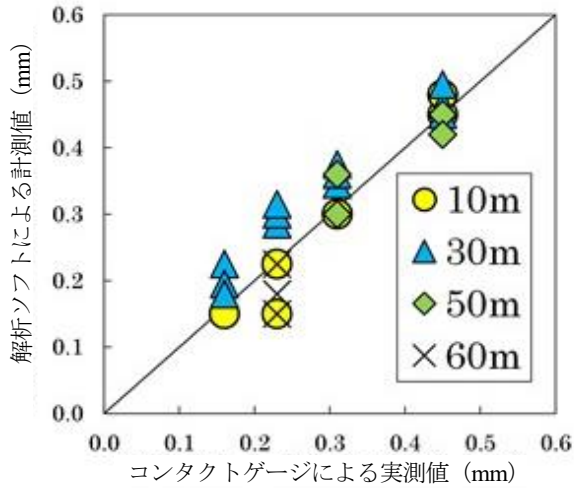


図-3.19 実測値と計測値の相関

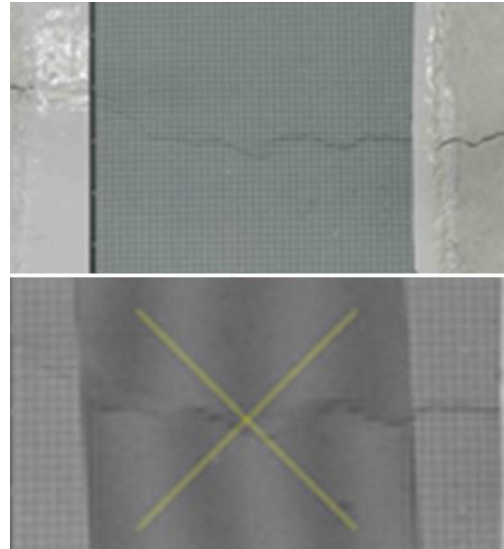


図-3.22 撮影画像（上）と解析画像（下）の比較

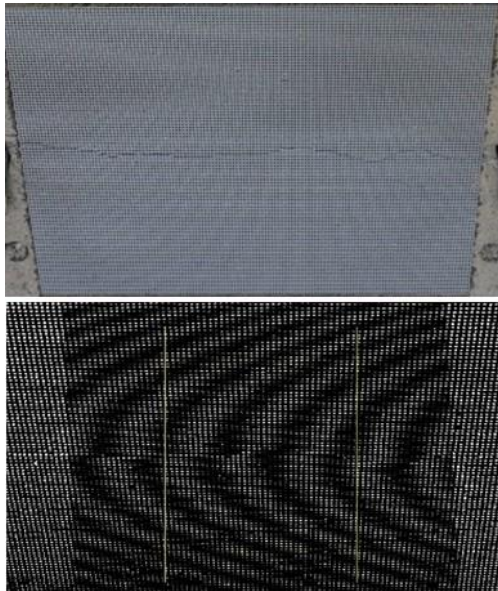


図-3.20 撮影画像（上）と解析画像（下）の比較

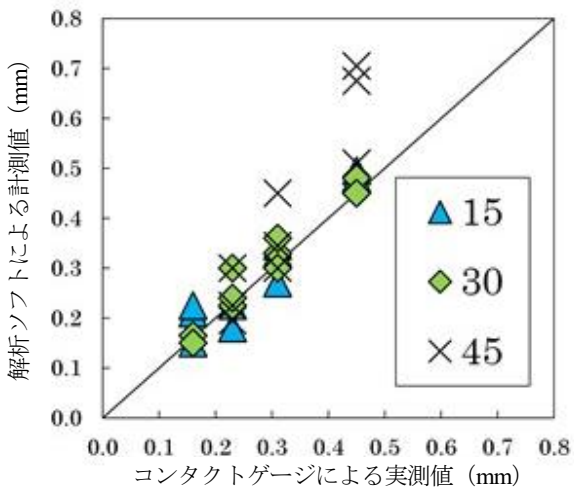


図-3.21 実測値と計測値の相関

る実測値と解析ソフトを使用した画像解析による計測値の相関を示したものである。図-3.21 より、 15° と 30° では $\pm 0.1\text{mm}$ 程度のバラツキがあった。しかし、 45° の傾き角度ではそれ以上のバラツキが見られた。 45° ではモアレ縞の歪みが大きくなり、縞のずれが伸びたため解析値の誤差が大きくなったと考えられた。

検証の結果、傾き角度が 30° までについては、バラツキが $\pm 0.1\text{mm}$ 程度で、 0.2mm 以下のひび割れ幅も計測可能であることを確認した。 45° 以上の傾きがある画像については、傾き補正を事前に行うなど対応が必要と考えられた。

4) 補修材厚みを考慮したひび割れ幅の計測

図-3.22 に、供試体の撮影画像（上）と解析ソフトによる解析画像（下）を示す。図-3.22 の上の画像を解析ソフトに取り込み、解析上でモアレ縞を発生させ、下の画像のように縞模様のずれを解析してひび割れ幅を算出した。

図-3.23 は、クラックゲージによる実測値と解析ソフトを使用した画像解析による計測値の相関を示したものである。図-3.23 より、補修材厚さ $190\mu\text{m}$ では、 0.3mm 以下のひび割れ幅までは、 $+0.1\text{mm}$ 程度のバラツキがあった。 0.5mm のひび割れ幅では、計測にバラツキは見られなかった。補修材厚さ $350\mu\text{m}$ では、 0.5mm 以下のひび割れ幅まで、全体的に $\pm 0.1\text{mm}$ 程度のバラツキがあった。

検証の結果、今回検証した補修材厚さが $350\mu\text{m}$ までについては、バラツキが $\pm 0.1\text{mm}$ 程度で収束し、 0.2mm のひび割れ幅も計測できることを確認した。補修材の上からでもひび割れを検出し、ひび割れ幅計測可能で、目視困難な劣化を検知できることが示唆された。

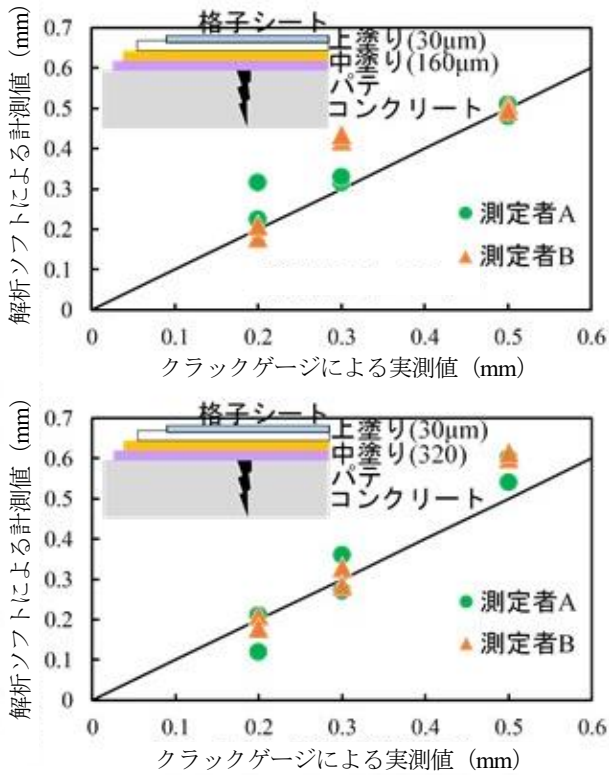


図-3.23 実測値と計測値の相関

3.4.2 オパール薄膜を活用したひび割れ可視化の検証

1) オパール薄膜シートの耐候性試験

図-3.24 に、耐候性試験機による促進劣化の状況を示す。上図はオパール薄膜のみで、下図は、紫外線から材料を保護する機能のある透明なトップコートを施したものである。図中に、試験時間 (h) および分光器により測定した反射波長 (nm) を記載した。図-3.24 より、オパール薄膜のみで耐候性試験を行うと、劣化によりオパール薄膜の色が赤から緑、そして青へと短波長へシフトしていき、400 時間で消失した。これは、電子顕微鏡解析からオパール薄膜シート支持膜上のコロイド粒子が分解されたためであることがわかった。オパール薄膜シートのみでは、耐候性に問題があることが明らかとなった。一方、トップコートを施したものは、図-3.24 の下のように 4000 時間経過しても波長はほとんど変わることなく、耐候性が向上した。

図-3.25 には、オパール薄膜シートにトップコートを塗らず、屋外暴露試験を行った際の劣化状況を示した。図中に、試験時期 (月) および分光器により測定した反射波長 (nm) を記載した。屋外暴露した場所は、つくばと沖縄でそれぞれ行い、どちらも約半年でオパール薄膜の色が消失する結果となった。一方で、図-3.26 には、オパール薄膜シートにトップコートを

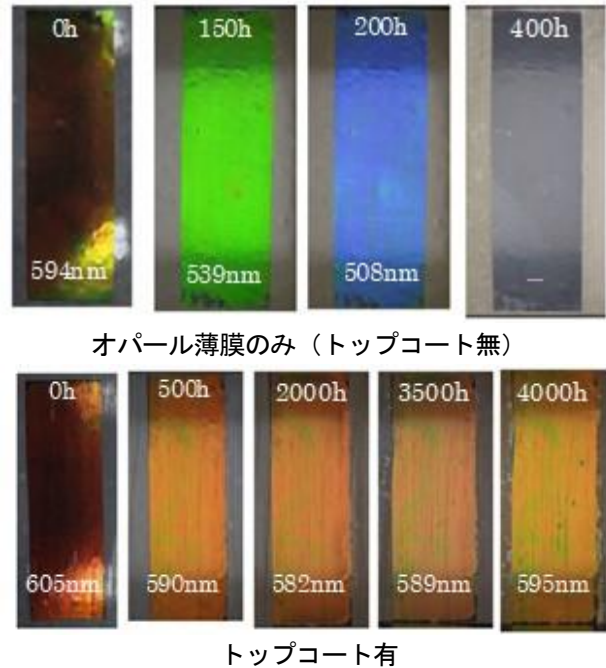


図-3.24 耐候性試験機による促進劣化の状況

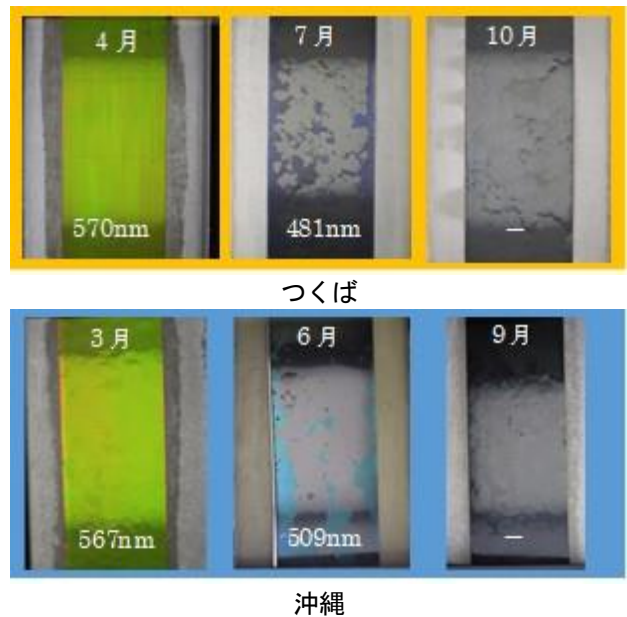
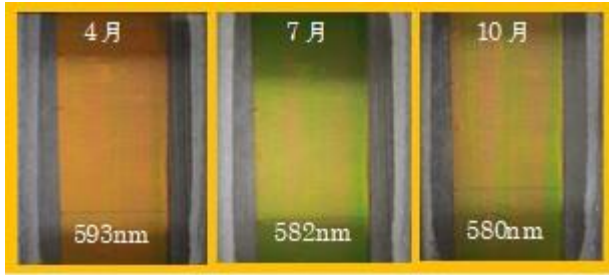


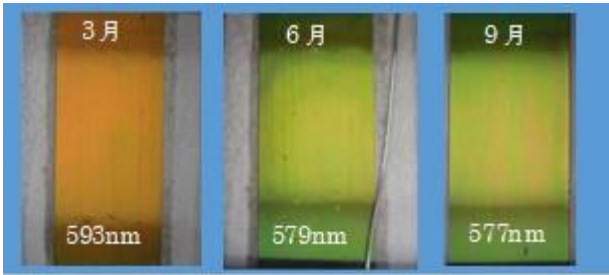
図-3.25 暴露試験による劣化状況 (トップコート無)

塗り、屋外暴露した際の劣化状況を示す。図中に、試験時期 (月) および反射波長 (nm) を記載した。図-3.26 ではトップコートを施しているが、つくばと沖縄ともに約半年で波長が多少変化する結果となった。

検証の結果、オパール薄膜シートのみでは耐候性に弱く、屋外暴露では約半年でシートが劣化し色が消失してしまった。トップコートを施した場合、耐候性試験機による促進劣化および屋外暴露試験の結果ともに耐候性は向上した。しかし、屋外暴露ではトップコートを施しているにも関わらず、約半年で波長が低下する傾向にあり、更に検討の余地があると考えられた。



つくば



沖縄

図-3.26 暴露試験による劣化状況（トップコート有）

2) 梁の曲げ試験によるひび割れの可視化

荷重と梁中央のたわみ関係を図-3.27 に示す。ひび割れ幅が 0.2mm から 0.3mm でコンクリートは降伏し、0.5mm 付近で終了した。載荷によって曲げひび割れが等間隔で発生した。ひび割れの観察結果を図-3.28 に示す。最初にクラックゲージで認識できたひび割れ幅 0.02mm の時点では、オパール薄膜の変色はほとんどなかったが、ひび割れ幅 0.1mm で多少認識できる程度まで変色し、0.2mm でははっきりとした赤から緑への色の変化が見られた。0.3mm 以上のひび割れでは緑色の変化がひび割れ幅よりも大きく現れた。実際のひび割れ幅の 3 倍から 5 倍に拡張して色が変化した。0.5mm のひび割れにもオパール薄膜および支持膜は追従し、剥がれることはなかった。載荷終了後は荷重が解放されたため、変色幅が若干小さくなったものの、ひび割れ箇所の履歴は残った。荷重によって生じたコンクリートのひび割れは荷重が解放された時に閉じることがあり、目視では気付きにくい、オパール薄膜を用いればひび割れが発生した箇所と、ひび割れ幅の程度を概ね把握できる。これらは、目視やデジタルカメラなどによって簡単に検知することが可能であり、オパール薄膜によって補修を必要とする初期のひび割れを検知することが容易となる。例えば、0.2mm のひび割れは 10m 遠方からもデジタルカメラのズーム機能で十分に認識できた。

検証の結果、梁の曲げ試験によるひび割れの発生をオパール薄膜で追従することが可能で、0.2mm 以上の

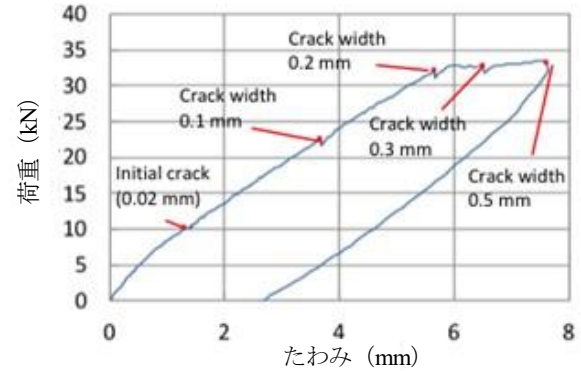


図-3.27 荷重-たわみ曲線

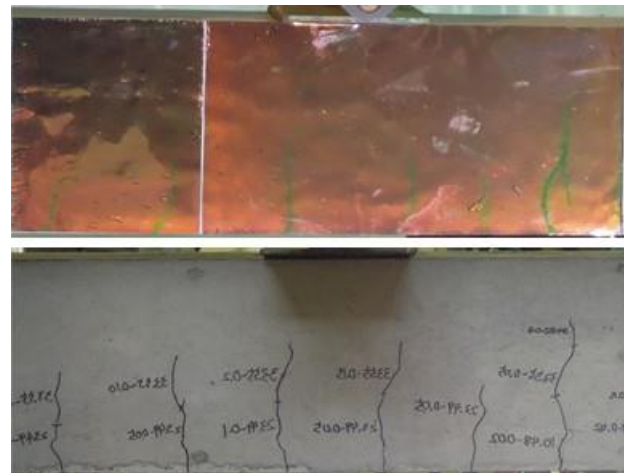


図-3.28 オパール薄膜を用いた曲げひび割れの可視化

ひび割れ幅であればオパール薄膜の色が赤から緑にはっきりと変化するのを確認できた。さらに、実際のひび割れ幅よりも 3~5 倍の幅で発色するため、ひび割れ箇所が目立ち、点検時に遠方からでも認識できると考えられた。

3) 補修材厚みを考慮したひび割れの可視化

図-3.29 に、補修材を塗らず厚みによる影響がない場合のひび割れ可視化状況を示す。導入したひび割れ幅は 0.2mm であるが、オパール薄膜もひび割れに伴い赤から緑に変色した。実際のひび割れ幅よりも 3~5 倍拡張して発色するため、ひび割れを見つけやすくなる。図-3.30 には、補修材を塗って（厚さ 160 μ m）、ひび割れを導入した際の可視化状況を示す。図-3.30 より、ひび割れ幅 0.1mm ではオパール薄膜の変色はほとんど見えず、0.2mm 程度までひび割れを広げると変色が認識できた。図-3.31 では、補修材を塗る厚さを変え（厚さ 190 μ m）、ひび割れを導入した。ひび割れ幅 0.2mm および 0.3mm までは、オパール薄膜の変色を顕著に確認することができず、0.5mm までひび割れを導入すると変色を認識することができた。

検証の結果、補修材が塗られていない場合には、

0.2mmのひび割れをはっきりと可視化することができた。補修材の厚みが増すと、オパール薄膜シート自体のひび割れ応答性が鈍化することを確認した。



図-3.29 補修材厚み無しのひび割れ可視化



図-3.30 補修材厚さ 160µm（中塗り）のひび割れ



図-3.31 補修材厚さ 190µm（中塗り+上塗り）のひび割れ可視化

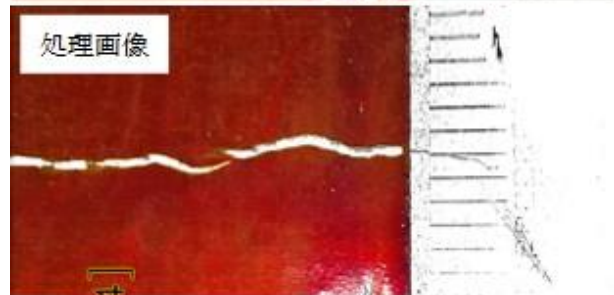
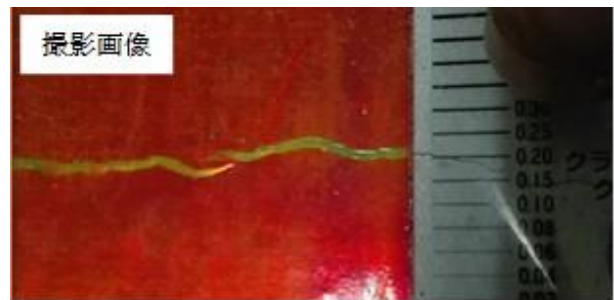


図-3.32 処理ソフトを使用した際のひび割れ可視化

4) 画像処理ソフトの活用

画像処理ソフトを活用して、オパール薄膜シートの観察画像の処理を行うと、図 3-32 に示すようにひび割れ発生箇所といった健全部以外を透明化することができる。本ソフトを用いて色の変化を透明化することで、ひび割れの判別が容易になった。

3.5 モアレ縞・オパール薄膜の適用性検証のまとめ

3.5.1 モアレ縞を活用したひび割れ幅の計測技術

本章では、モアレ縞を用いて、コンクリート部材表面に発生・進展するひび割れ幅を計測する技術を提案した。以下に、本研究のまとめを示す。

- ・従来のモアレ縞を用いた計測法とは異なり、モアレ縞のずれを利用した幾何学的な式からひび割れ幅を算出する方法を考案した。
- ・計測作業を容易にする画像解析ソフトを作成した。本技術の計測精度について検証した結果、実測値と計測値の誤差は±0.1mm 以内に収まる精度で、0.2mm 以下のひび割れ幅を計測できることを確認した。
- ・本技術の用途として、離れた所からでもひび割れ幅を計測できるのか検証を行った結果、50m までであればある程度計測が可能で、精度は 0.3mm 以上のひび割れであれば誤差±0.1mm 以内に収束することを確認した。さらに、角度のついた画像取得を想定し、供試体を任意の角度に傾けて撮影して本技術で解析した結果、傾き角度が 30° までについては、バラツキが±0.1mm 程度で、0.2mm 以下のひび割れ幅も計測可能であった。

- ・本技術の用途として、補修材下で目視困難な箇所のひび割れ発生・進展を可視化し、ひび割れ幅を計測できるのかを検証した結果、補修材厚さ 350 μ m までについては、バラツキが ± 0.1 mm 程度で収束し、0.2mm のひび割れ幅も計測できることを確認した。

3.5.2 オパール薄膜を活用したひび割れ可視化技術

本章では、オパール薄膜を用いて、コンクリート部材表面に発生・進展するひび割れを可視化する技術を提案した。以下に、本研究のまとめを示す。

- ・オパール薄膜シートの特性把握として、耐候性試験を行った結果、耐候性に弱く、屋外暴露では約半年で劣化してしまい色が消失してしまった。そのため、耐候性の向上としてトップコートを検討し、耐候性向上を確認した。
- ・構造物に生じる微小なひび割れを可視化できるかの検証として、鉄筋コンクリート梁供試体を用意して曲げ試験を行い、曲げひび割れの可視化状況を観察した結果、0.2mm 以上のひび割れ幅であればオパール薄膜の色が赤から緑にはっきりと変色するのを確認した。
- ・本技術の用途として、目視困難な補修材下でひび割れが生じた場合、オパール薄膜でひび割れを可視化できるかを検証した結果、補修材の厚みが増すとオパール薄膜シート自体のひび割れ応答性が鈍化することを確認した。
- ・点検作業を簡素化する画像処理ソフトを作成し、観察画像の処理を行うと、判別が容易になることを確認した。

4. おわりに

本研究では、道路橋の維持管理における状態把握に資する材料技術について、NIMS と共同研究を行い、近接目視のみでは把握できない情報を得る手法として、塩分センサ、モアレ縞およびオパール薄膜の適用性を検証した。結果として、塩分センサは塩害の簡易調査方法として、モアレ縞およびオパール薄膜は離れた所からのひび割れ検出や補修材下のひび割れの可視化方法として活用できることを確認した。

謝辞

本研究の 2.5 節に示した調査は、国土交通省北陸地方整備局橋梁塩害研究会における調査研究活動の一環として実施されたものである。ご協力いただいた関係各位、貴重な意見をいただいた委員各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Vedarajan Rama and Toshiyasu Nishimura: Monitoring of Environmental Factors and Corrosion Analysis of Reinforcing Steel in Mortar, Materials Transactions, Vol.50, No.4, pp.799-805, 2009
- 2) 櫻庭浩樹、西村俊弥、中村英佑、古賀裕久：塩分センサを活用したはつり面の塩分量測定方法の提案、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 18 巻、pp.615-620、2018
- 3) 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発、pp.21-33、1988
- 4) 徐 超男、上野直宏、寺崎正、山田浩志：応力発光による構造物診断技術、NTS、380p、2012
- 5) Balkenende D., Coulibaly S., Balog S., Simon Y., Fiore G., Weder C.: Mechanochemistry with Metallo-supramolecular Polymers, J.Am.Chem.Soc.136, pp.10493-10498, 2014
- 6) 李志遠、王慶華、津田浩、飯田伊佐務、佐藤浩幸、中島富雄：サンプリングモアレ法による構造物材料のひずみ計測、非破壊検査、64、pp.160-165、2015
- 7) 百武壯、西崎到、道信剛志：ひび割れ検出塗料を用いた構造物の劣化検出技術、検査技術、20、pp.18-22、2015
- 8) 百武壯、西崎到、新田弘之、不動寺浩、轟眞市、田中義和：ひずみやひび割れを視覚化するシート材料を用いた計測システムの検討、土木学会年次学術講演会概要集、72、pp.55-56、2017
- 9) 中村常郎：生産と技術、Vol.19、No.11、pp.30-36、1967
- 10) 森本吉春、藤垣元治、榎谷明大：サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測、J.Vac.Soc.Jpn.、54 巻、第 1 号、pp.32-38、2011
- 11) 岸本 哲、百武 壯、新田 弘之：“き裂開口幅の測定法”，特開 2019-200180。(出願：2018/05/18，公開：2019/11/21)
- 12) Fudouzi H., Sawada T. : Photonic Rubber Sheets with Tunable Color by Elastic Deformation , Langmuir, Vol.22, pp.1365-1368, 2006
- 13) 新語時事用語辞典：
http://www.breaking-news-words.com/2014/04/blog-post_7.html
- 14) 特集 維持・補修 2018 恐怖の再劣化、日経コンストラクション、第 694 号、2018
- 15) 青山尚、中村英佑、村越潤、木村嘉富：鉄筋腐食 RC はり供試体の曲げ耐荷特性の検討、土木学会年次学術講演会概要集、64、V-075、pp.147-148、2009

A STUDY ON THE APPLICABILITY OF EVALUATION METHODS FOR UNDERSTANDING THE STATE OF ROAD BRIDGES

Research Period : FY2014-2019

Research Team : iMaRRC

Author : NITTA Hiroyuki, KOGA Hirohisa,
SAKURABA Hiroki, TAKAHASHI Keita

Abstract : Inspection is essential in order to make a proper maintenance plan for civil structures, and therefore a periodical inspection for road bridges has become legal obligation from FY2014. However, for example, it is difficult to detect the initiation of corrosion of re-bars in concrete structures by only adjacent visual inspection. Also, it is difficult to detect concrete cracking under the surface coating. While the use of sensors and functional materials are expected for detecting these types of deterioration phenomenon which is difficult to observe by visual inspection only, these technics are not necessarily clear whether they can apply to investigation for concrete structures. The iMaRRC conducted a corroborative research with the National Institute for Materials Science and validated investigational technics which are so-called chloride sensor, Moiré method and opal photonic crystal film. It was concluded that chloride sensor can be used for an easy investigational method to detect the ingress of chloride ions in concrete cover and that Moiré method and opal photonic crystal film can be used as a remote measurement method of crack and as a visualization method of crack hidden by surface coating.

Key words : chloride sensor, Moiré method, opal photonic crystal film , chloride attack, repair, crack remote measurement