

光ファイバセンサによるコンクリートの凍害劣化モニタリング

Frost Deterioration Monitoring of Concrete using Optical Fiber Sensor

○早野 博幸*¹, 城出 真弥*², 関根 麻里子*³
Hiroyuki Hayano*¹, Shinya Shirode*² and Mariko Sekine*³

*1 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第2研究部 インフラ保全技術チーム リーダー 博士(工学)
Manager, Infrastructure Management Technology Team, Department II, R&D, Taiheiyo Cement Corporation, Ph.D.
*2 太平洋セメント株式会社 中央研究所 第2研究部 インフラ保全技術チーム 研究員
Researcher, Infrastructure Management Technology Team, Department II, R&D, Taiheiyo Cement Corporation

キーワード：センシング；モニタリング；光ファイバセンサ；コンクリート；凍害劣化
Keywords: sensing; monitoring; optical fiber sensor; concrete; frost deterioration

1. はじめに

近年のインフラ老朽化の顕在化に伴い、予防保全を目的とした構造物のモニタリングに関する研究開発が盛んに行われている。構造物に関する点検・モニタリング・診断技術の研究開発から社会実装に至るまでの検討が行われ、インフラ構造物のモニタリングの重要性が認識されている。

コンクリート構造物の劣化の多くはひずみの変化に表れ、そのひずみをモニタリングすることで劣化状況を把握することができる。筆者らは光ファイバセンサを利用し、RC 構造物の腐食ひび割れの直接的要因である鉄筋の腐食膨張を連続的に捉えることにより、鉄筋腐食の発生～進展～腐食ひび割れ発生をモニタリング可能な技術を開発した。現在は、光ファイバセンサを用いたコンクリート構造物の凍害劣化モニタリングを視野に入れた研究を行っており、本報では、コンクリートの凍結融解試験による実験的検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

2.1. 光ファイバセンサ

光ファイバセンサの特長としては、光信号を利用してそのため長距離伝送が容易、外部の電磁ノイズによる影響がない、1本の光ファイバで多点計測が可能、などが挙げられる。本検討では数ある光ファイバセンサの中からFBGセンサ²⁾を選定し、コンクリート中におけるひずみのモニタリングが可能となる仕様にして実験に用いた。

測定原理は、光ファイバケーブルの一部に回折格子が形成されたセンサ部において、外力や温度変化によって回折格子間距離が変わることで、それに応じた反射光の波長変化を物理量としてひずみに変換する仕組みを利用している。光ファイバセンサは、Figure 1 に示すように直径が約 150 μm と極めて細いため、コンクリート内部

に設置しても異物感がなく、コンクリート強度の低下など悪影響を及ぼすことなく連続計測ができる。

2.2. 試験体概要

試験体の概要を Figure 1 に示す。光ファイバのFBGセンサ部が $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の試験体の中心に位置するように配置し、W/C60%のコンクリート試験体を作製した。また、温度変化による光ファイバ自体のひずみ変化をキャンセルするために、温度計測用の試験体も作製した。試験水準は、Table 1 に示すようにコンクリートの空気量が1.3, 3.0, 4.8%の3水準とした。

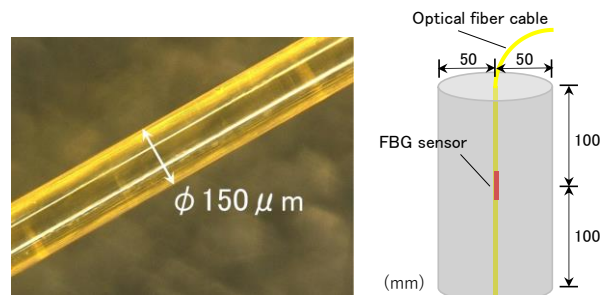


Figure 1. Optical fiber sensor and concrete specimen

Table 1. Outline of specimens

Specimen	Air content (%)	Number of specimens
Air_1.3	1.3	2
Air_3.0	3.0	3
Air_4.8	4.8	2

2.3. 凍結融解試験

凍結融解試験は JIS A 1148 A 法に準拠し、凍結融解試験槽を用いて実施した。測定項目については、所定のサイクルごとに一次共鳴振動数による相対動弾性係数および試験体の質量を測定し、光ファイバセンサによるひず

みは常時モニタリングした。また、それぞれの測定は同一の試験体を利用した。

3. 実験結果および考察

3.1. 光ファイバセンサによるひずみ挙動と相対動弾性係数の関係

空気量 1.3%のコンクリートの各凍結融解サイクルで計測した試験体の温度-ひずみ曲線（ヒステリシスループ）を Figure 2 に示す。なお、凍結融解試験の温度管理用試験体は 10×10×40cm の角柱試験体としたため、本検討の φ10×20cm 試験体の融解時温度がやや低くなったが、各試験体は完全に融解していたことを確認した。

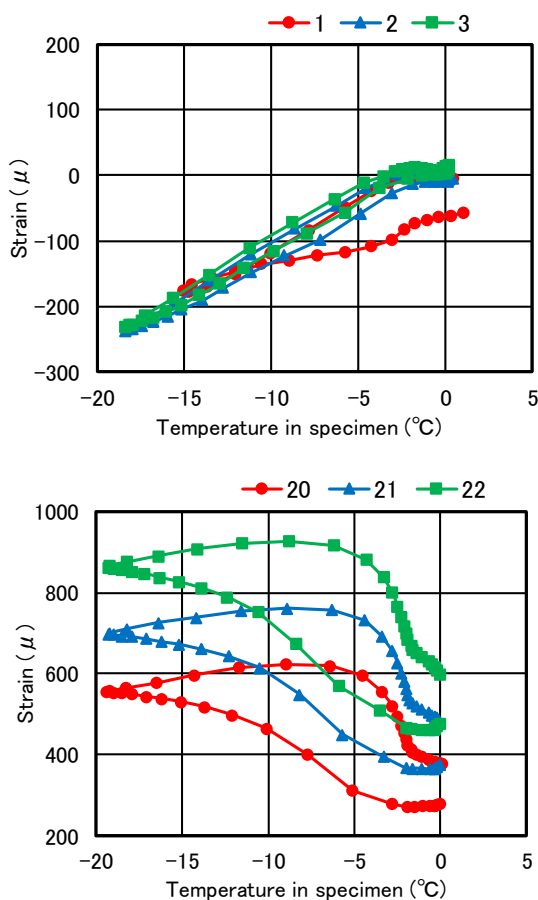


Figure 2. Hysteresis loop of specimen (Air_1.3)

図の上側に示す健全なコンクリートにおいては、光ファイバセンサのひずみは凍結融解 1 サイクル目ではコンクリート自体の吸水膨張の影響により融解後のひずみが若干増加傾向を示すが、2 および 3 サイクル目ではほぼ原位置に戻るために残留ひずみはほとんど生じない。一方、図の下側に示すように、多くの凍結融解サイクルを受けて劣化損傷が生じると融解時のひずみが原位置に戻らずに増加していくため、残留ひずみが生じてヒステリシスループが徐々に上方へ移動することがわかる。これらの現象は既往の研究³⁾においても確認されており、コ

ンクリート試験体全体の融解時における長さ変化をダイヤルゲージで測定し、凍害による劣化損傷の指標としている。本検討では、コンクリート内部に光ファイバセンサを設置しているが、光ファイバセンサとコンクリートは完全に付着して一体となっており、コンクリートの温度変化に伴う挙動や、凍害による劣化損傷をひずみとして捉えていることが確認できる。また、光ファイバセンサでモニタリングした残留ひずみは、内部の微細なひび割れに起因するものであると考えられるため、これを凍害劣化の評価指標として検討を行った。

空気量 3.0%のコンクリートの残留ひずみと相対動弾性係数の試験体 3 体の結果を Figure 3 に示す。図より、凍結融解サイクルが進むことで残留ひずみが徐々に増加するとともに、相対動弾性係数の低下が認められた。

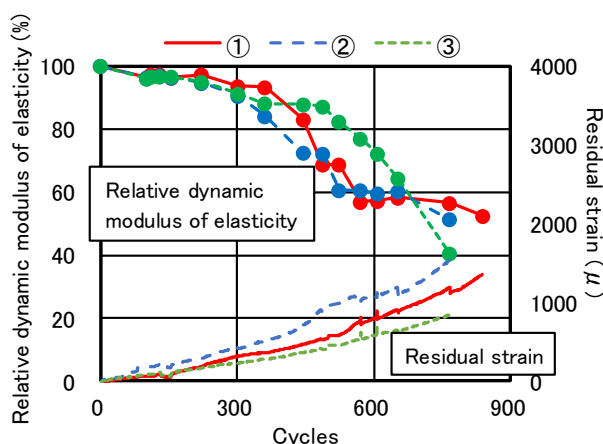


Figure 3. Relative dynamic modulus of elasticity and Residual strain of specimen (Air_3.0)

空気量 1.3%のコンクリートにおける残留ひずみと相対動弾性係数の結果を Figure 4 に示す。本試験体では早期のサイクルで劣化損傷したため、その過程において相対動弾性係数の測定ができていない試験体もあるが、空気量 3.0%と同様に残留ひずみの増加に伴って相対動弾性係数が低下した。また、試験体②では残留ひずみが 4000 μ 程度を示した後に急激に低下した。これは、Figure 5 に示すようにコンクリートが破断したことによって、コンクリートと光ファイバセンサの一部付着が喪失したものと考えられる。

凍結融解試験を実施した全試験体の残留ひずみと相対動弾性係数の関係を Figure 6 に示す。相対動弾性係数は、JIS A 1148 において測定値が有効と考えられる 50%以上の試験体を対象とした。光ファイバセンサを用いて計測した残留ひずみと相対動弾性係数の関係に一定の相関があることが認められ、相対動弾性係数 60%で残留ひずみは 1000 μ 程度を示すと考えられる。既往の研究³⁾でコンクリート試験体の融解時の凍伸度（残留ひずみ）をダイヤルゲージで計測した場合においても、残留ひずみが

1000 μ 程度で相対動弾性係数が 60% 程度となっており、光ファイバセンサによって計測した残留ひずみの値は妥当であるといえる。

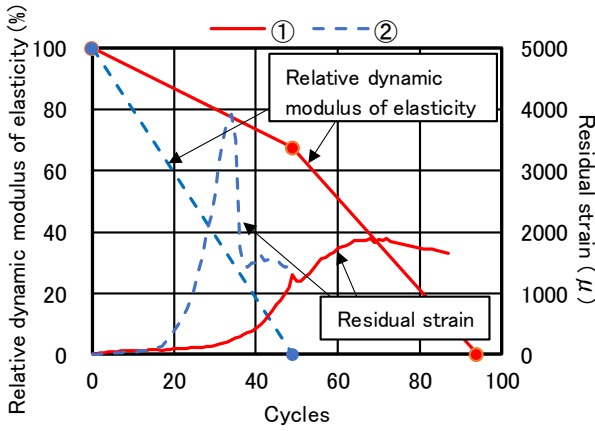


Figure 4. Relative dynamic modulus of elasticity and Residual strain of specimen (Air_1.3)

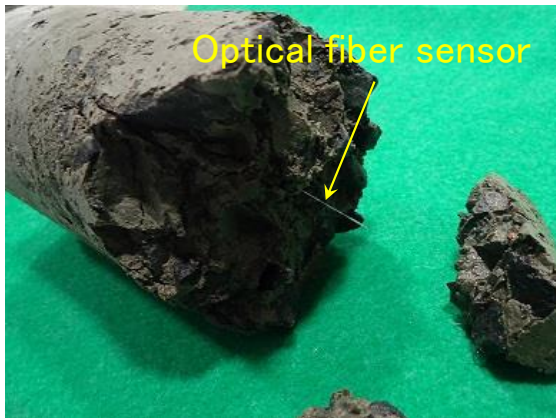


Figure 5. Optical fiber sensor in specimen (Air_1.3)

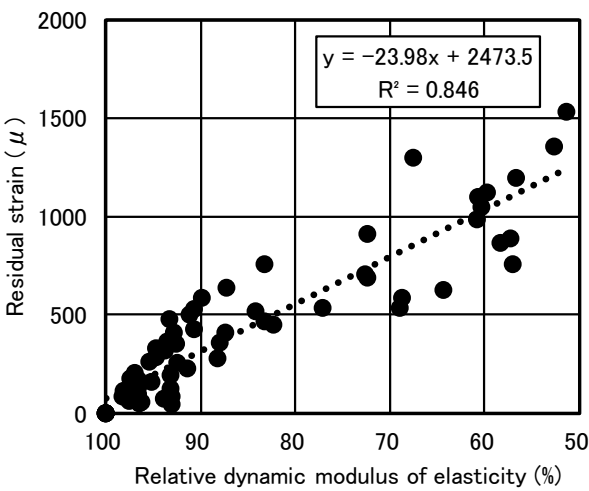
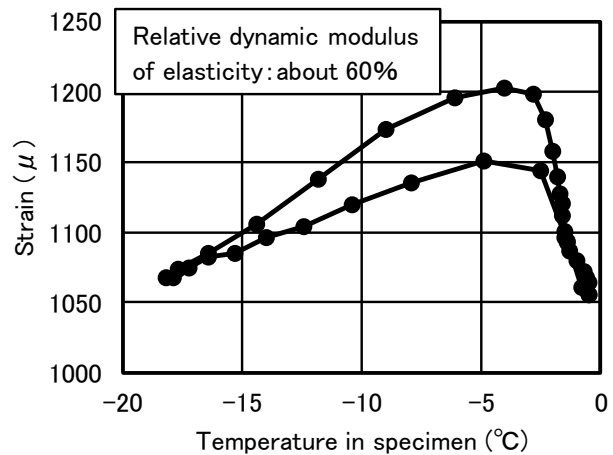
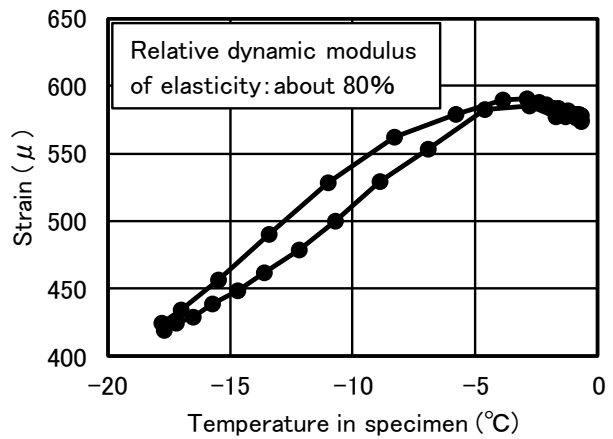
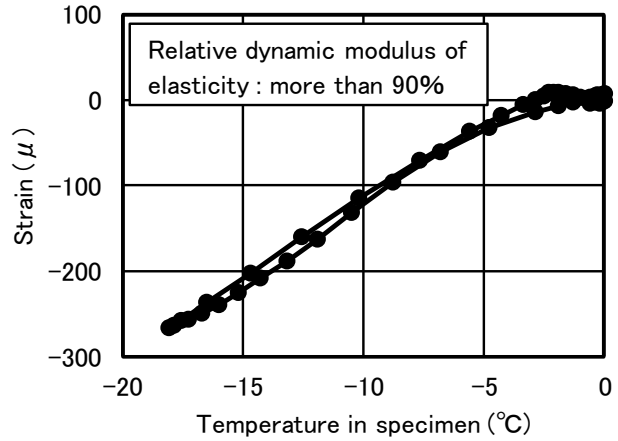


Figure 6. Residual strain vs. Relative dynamic modulus of elasticity

3.2. 光ファイバセンサで測定したヒステリシスループの特徴

光ファイバセンサを用いて測定したひずみのヒステリシスループの挙動から、コンクリートの劣化性状についての検討を行った。劣化の指標である相対動弾性係数ごとに特徴的なヒステリシスループの挙動を Figure 7 に示す。



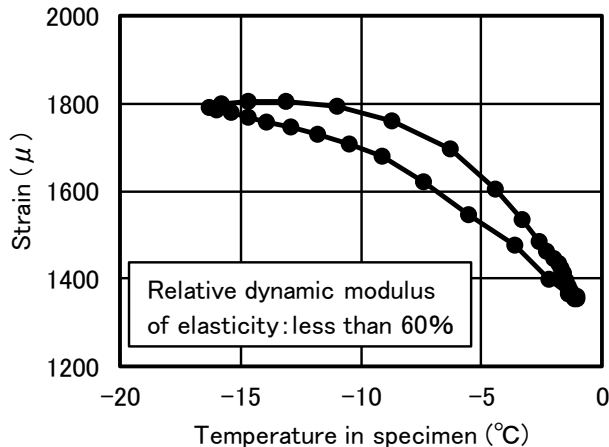


Figure 7. Characteristic hysteresis loop of specimens

相対動弾性係数 90%以上、あるいはサイクル初期の健全なコンクリートは、凍結過程で収縮ひずみ、融解過程で膨張ひずみが生じている。これは、コンクリートの線膨張係数に基づいた温度変化による収縮・膨張ひずみが支配的であることが要因である。一方で、凍害劣化が進行した相対動弾性係数 80%程度になると、凍結直後に膨張ひずみが生じることが確認された。さらに、劣化が進んだ相対動弾性係数 60%程度では凍結に伴う膨張挙動が大きくなり、最終的に 60%を下回ると凍結過程全体で膨張ひずみ、融解過程で収縮ひずみが生じ、健全時と逆の挙動が生じている。これは、劣化の進行に伴う内部損傷とともに凍結可能水が増加し、凍結過程ではコンクリートの温度変化による収縮ひずみを上回る膨張ひずみが生じているためと考えられる。したがって、内部では大きく劣化が進行していることが予想され、これらのヒステリシスループの挙動から、劣化の程度を推定できる可能性を示すものである。

光ファイバセンサは、センサ部でコンクリートとの付着をなくすことによって温度センサとしても有効であることから、温度ひずみをキャンセルすることも容易である。コンクリートひずみは埋め込み型ひずみ計でも計測可能であるが、光ファイバセンサの特長である髪の毛ほどの極細径のためコンクリート性状への悪影響が小さいことや、電気式と異なり多点・長距離計測が可能であることなどを考慮すると、実構造物のモニタリングという観点からは利便性が高いと考えられる。

4. まとめ

本研究では、光ファイバセンサによるコンクリートの凍害劣化評価について実験的検討を行った。その結果、光ファイバセンサを用いて凍結融解過程におけるコンクリートのひずみをモニタリングすることが可能で、融解時の残留ひずみより、コンクリートの凍害劣化が評価で

きることを明らかにした。また、ヒステリシスループの挙動から、内部の劣化程度が推定できる可能性を示した。

光ファイバセンサによる実構造物でのモニタリングはまだそれほど多くはない。筆者らは既往の研究で開発した光ファイバセンサを用いた鉄筋腐食膨張モニタリングの実証実験を Figure 8 のように実施している。補修後における補修効果の検証を想定したものもある。短い鉄筋に光ファイバセンサをらせん状に巻き付け、モルタル被覆した小型センサをはつり部に設置し、鉄筋の腐食に伴う膨張挙動をモニタリングしている。今後、様々なセンシング・モニタリング技術の実構造物における有効性の検証が望まれる。



Figure 8. Verification experiment using optical Fiber Sensors

[参考文献]

- 1) 早野博幸, 井坂幸俊, 吉田愛, 江里口玲: 光ファイバセンシングによる鋼材の腐食膨張挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.1206-1211, 2016.7
- 2) Alan D. Kersey et al: Fiber Grating Sensors, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol.15, No.8, pp.1442-1463, 1997.8
- 3) 洪悦郎, 鎌田英治: コンクリートの凍害と初期凍害—そのメカニズムについて—, コンクリート工学, Vol.16, No.5, pp.1-11, 1978