

論文 デジタル画像相関法を用いた実大試験体での耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひずみ分散評価

落合 昂雄*1・内田 雅隆*2・早野 博幸*3・伊藤 幸広*4

要旨：本研究は、耐アルカリ性ガラス繊維ネットによるひずみ分散効果について、デジタル画像相関法による定量評価を目的とした。開口部を有する実大試験体を屋外曝露し、ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置で試験体表面の画像を取得し、デジタル画像相関法により面的ひずみ分布を算出した。その結果、乾燥過程の面的な引張りひずみを可視化することで、耐アルカリ性ガラス繊維ネットが開口部の隅角部における局所的なひずみを分散させ、ひび割れ発生を抑制していることを確認した。また、ひび割れ発生前の最大主ひずみの度数分布の変化により、ひずみ分散効果を定量的に示した。

キーワード：耐アルカリ性ガラス繊維ネット、乾燥収縮、ひび割れ、デジタル画像相関法、ひずみ分散

1. はじめに

コンクリートのひび割れを抑制・制御する技術として、多くの材料・工法が開発されている。そのなかに、乾燥収縮や温度応力で発生するひび割れを抑制する方法として、耐アルカリ性ガラス繊維ネット（以下、ARG 繊維ネット）を設置する工法がある。この工法はひび割れの発生が懸念される箇所のかぶり位置に ARG 繊維ネットを設置することで、効率的にひび割れ発生を抑制するとともに、ひび割れ幅を低減できる¹⁾。この効果は、コンクリートに局所的に発生するひずみを ARG 繊維ネットが分散するためと考えられるが、この分散効果を定量的に検証する必要がある。

一般的に、変形挙動の計測には、ひずみゲージが用いられているが、ひずみゲージでの測定値は、1点1方向の平均的な値であり、面積全体の変形挙動を把握するためには多くのひずみゲージが必要となる。また、対象物に直接貼付するため、環境条件によっては計測が制限される場合もあり、適用には限界がある。そこで、筆者らは、光学計測技術の一種であるデジタル画像相関法²⁾（以下、DICM）に着目した。これまでに基礎検討として、4辺を拘束する鋼製型枠を用いて ARG 繊維ネットを設置した無筋のモルタル試験体（600×600×50mm）を作製し、ARG 繊維ネットによる乾燥収縮ひずみの分散効果を DICM により定性的に示した⁴⁾。この基礎検討では、乾燥を促進させるために単位水量が極端に高い配合であることに加え、4辺を拘束された拘束度の高い試験体であり、実環境下とは実験条件が大きく異なる。

本研究では、ARG 繊維ネットを配置した実大試験体を屋外曝露し、現実的な実験条件において DICM による画

像解析技術により、ひずみ分散効果を定量的に検討することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の側面図および正面図をそれぞれ図-1、図-2に示す。試験体の形状は逆 T 型擁壁とし、各部材寸法は堅壁：2000×2000×200mm、底版：2000×2000×250mm である。堅壁には D10（SD295）を 230mm 間隔で配置し、底版には D13（SD295）を 250mm で配置した。なお、堅壁および底版はダブル配筋とし、それぞれの鉄筋比は 0.3%および 0.5%とした。かぶり厚さは 60mm である。

堅壁の中央には 700×700 mm の開口部を設けた。全ての隅角部には D10（SD295）を開口部補強筋として 45° 方向に傾けて配置し、図-2 に示す右側の 2 箇所の隅角部には、かぶり厚さ 60mm 位置に ARG 繊維ネットを配置した。ARG 繊維ネットの外観および物性を写真-1、表-1 に示す。また、各開口部補強筋の中央にはポリエステル製ひずみゲージ（ゲージ長：2mm）を貼付し、図-2 に示す 4 箇所には、堅壁の部材厚さ 200mm の断面中心に埋め込み型ひずみ計を設置した。なお、埋め込み型ひずみ計での測定値は温度ひずみの補正を行い、開口部補強筋には温度補償機能を有するひずみゲージを使用した。

コンクリートは設計基準強度を 27N/mm² とし、スランブ 18cm、最大寸法 20mm の粗骨材、セメントには普通ポルトランドセメントを用いたレディミクストコンクリートを使用した。なお、W/C は 55.5%である。標準養生 28 日時点の硬化物性を表-2 に示す。底版打設した 7 日後に堅壁を打設し、底版が堅壁を拘束する条件とした。堅

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 工博 (正会員)

*4 佐賀大学大学院工学系研究科教授 工博 (正会員)

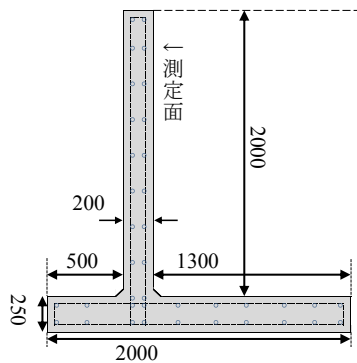
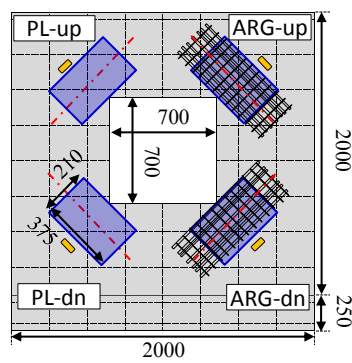
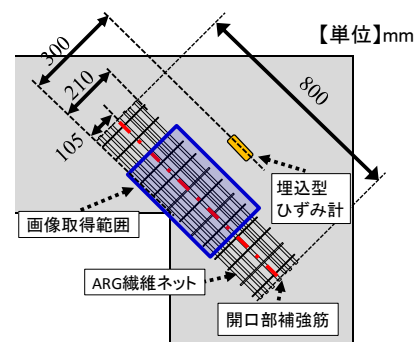


図-1 試験体側面図



(a) 正面図



(b) 開口部右上の拡大図

図-2 試験体正面図

壁の打設から7日後(底版の打設から14日後)に試験体の屋外曝露(千葉県佐倉市)を開始した。

2.2 デジタル画像の取得およびDICMによるひずみ分布の測定

画像の取得は、図-2に示す4箇所(青枠)を対象とし、写真-2に示すラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置(読取り解像度:1200dpi,撮影範囲:210×375mm)を用いて各測定箇所にて1枚の画像を取得した。本装置は、試験体に密着して撮影できるため照明条件を一定にすることが可能であり、ラインセンサを用いるためレンズの収差がなく、高精細な画像が取得できる。画像解像度は0.021mm/pixelである。なお、試験体表面の面的ひずみ分布は、DICMにより算出した。

DICMの概念を図-3に示す。DICMは、変形前の画像において任意領域(サブセット)を設定し、画像の輝度値分布をもとにした数値解析により、変形後のサブセットの位置を探索する。サブセットの中心点の移動量を求めることで変位方向および変位量が得られ、変位量をもとにひずみ分布を算出する。前記の操作を繰り返すことで、局所的な変形挙動の把握とともに、撮影範囲全体での変位やひずみ分布を得られることが本手法の特徴である。なお、本研究では、サブセットを45 pixel、解析基長を100 pixelと設定し、試験体表面のひずみ分布を算出した。

前処理として、測定面に輝度値の分布を持たせるため、測定面に黒色、灰色、白色のスプレーを乾燥に影響がないように霧状に薄く吹付け、斑模様を施した。デジタル画像の取得は、曝露期間0, 33, 53, 158日に実施した。DICMの解析結果は、画像取得時の試験体表面温度に基づき、ひずみ値の補正を行なっている。

3. 実験結果

3.1 コンクリートおよび開口部補強筋のひずみ挙動

コンクリートおよび開口部補強筋でのひずみ挙動をそれぞれ図-4および図-5に示す。

図-4に示すコンクリートのひずみ挙動は、いずれも曝露期間40日に -100×10^{-6} 程度の乾燥収縮ひずみとなり、



写真-1 ARG繊維ネット

表-1 ARG繊維ネットの物性

項目	特性値
引張強度	1500 (N/mm ²)
繊維断面積	17.1 (mm ²)
格子間隔	30×30 (mm)

表-2 コンクリートの硬化物性

圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
34.5	31.1	2.91



写真-2 ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置

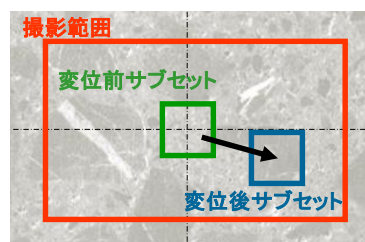


図-3 DICMの解析概念

曝露期間158日には $-280 \sim -310 \times 10^{-6}$ 程度であり、乾燥収縮の挙動がやや緩慢であるが、曝露期間中の降雨の影響と考えられる。

また、堅壁の下部と上部でのひずみ挙動を比較すると、曝露期間158日において、下部では -280×10^{-6} 程度、上部では -310×10^{-6} 程度の乾燥収縮ひずみであり、ほぼ同等の値を示した。なお、ARG繊維ネットの有無にかかわらず、前記の乾燥収縮ひずみは同等であった。

図-5に示す開口部補強筋のひずみ挙動は、曝露期間

158 日において、堅壁の下部では -220×10^{-6} 程度の収縮ひずみを示した。一方、上部では PL-up がわずかに小さな収縮ひずみを示した。

DICM により算出した試験体表面の収縮ひずみ挙動について、堅壁の上部を図-6、下部を図-7 に示す。各図には埋め込み型ひずみ計での測定値も併記する。なお、図-6、図-7 は、デジタル画像上での鉛直方向のひずみ挙動を表し、試験体上においては 45° 方向に傾いており、埋め込み型ひずみ計による測定方向と同一方向のひずみ挙動とした。図-6 および図-7 ともに、DICM により算出したひずみ挙動は、埋め込み型ひずみ計より大きな収縮傾向を示した。埋め込み型ひずみ計は堅壁部材の断面中央に設置していることに対し、デジタル画像の取得は試験体表面で行うことから、表面から水分逸散により試験体が乾燥していく現象を考慮すると、DICM が大きな収縮

傾向を示したと推察できる。また、DICM により算出した収縮ひずみについて ARG 繊維ネットの有無を比較すると、ARG-up では PL-up より 40×10^{-6} 程度、ARG-dn では PL-dn より 50×10^{-6} 程度低い値を示し、わずかながら ARG 繊維ネット上では収縮ひずみが低減された。一方で、図-4 における埋め込み型ひずみ計の測定結果では ARG 繊維ネット有無の影響が認められず、異なる傾向を示した。この傾向の差異は、DICM では ARG 繊維ネットの直上でのひずみ分布を取得することに対し、埋め込み型ひずみ計は ARG 繊維ネットから 90mm 離れた位置で計測するため、ARG 繊維ネットの影響が直接表れていないものと推察される。

3.2 DICM による試験体表面のひずみ分布

ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置で取得した各位置の画像と隅角部との位置関係を図-8 に示す。本図

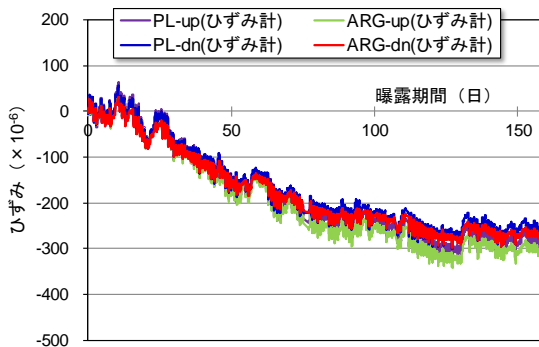


図-4 コンクリートのひずみ挙動

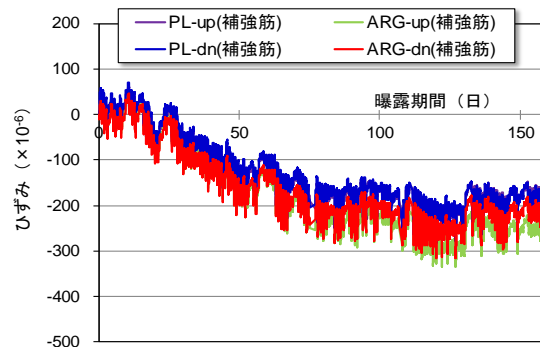


図-5 開口部補強筋のひずみ挙動

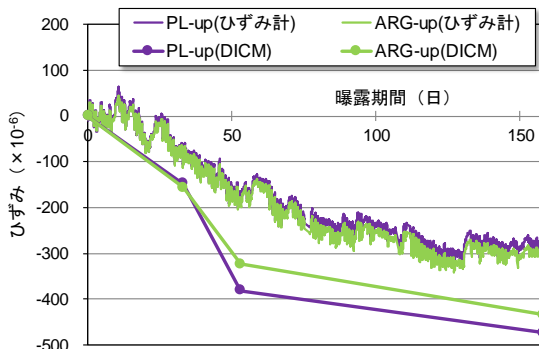


図-6 堅壁上部でのひずみ挙動の比較

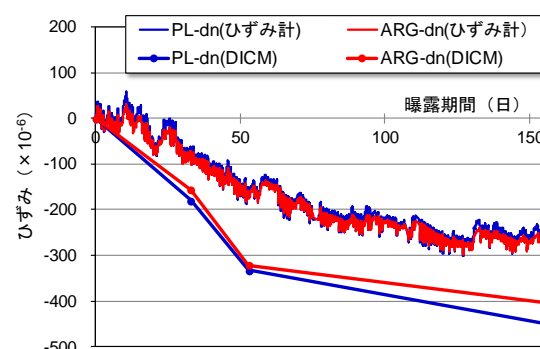


図-7 堅壁下部でのひずみ挙動の比較

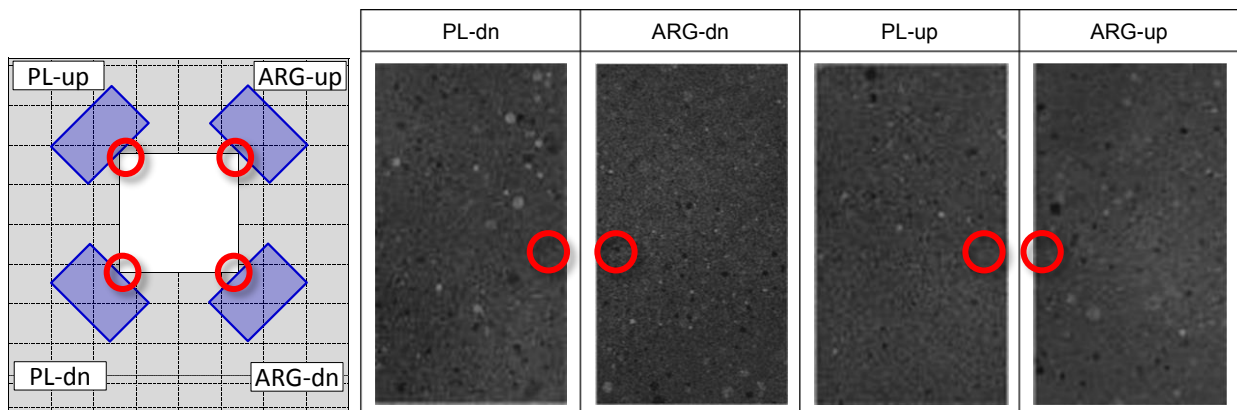


図-8 デジタル画像と開口部の位置関係

の画像上の丸印は、隅角部の位置を示している。DICMにより算出した曝露期間 33, 53, 158 日での最大主ひずみの分布を図-9～図-11 に示す。なお、本結果のひずみレンジは引張（膨張）側で 4800×10^{-6} 、圧縮（収縮）側で -4800×10^{-6} である。曝露期間が進むにつれて収縮を示

す青色の領域が増加し、試験体の乾燥収縮が進んでいることが確認できる。また、図-9～図-11 では黄色で示される $1000 \sim 2000 \times 10^{-6}$ 程度の引張ひずみの集中領域が曝露初期から認められ、曝露経過とともに当該領域が進展し、亀甲状に集中領域が形成されている。なお、試験体

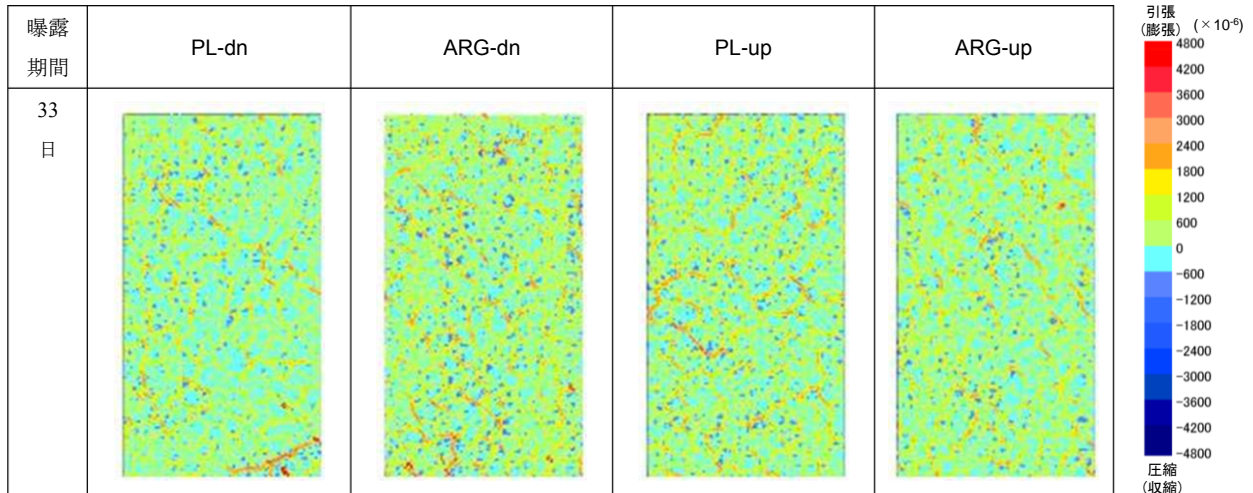


図-9 DICMによる試験体表面の最大主ひずみ分布（曝露期間 33 日）

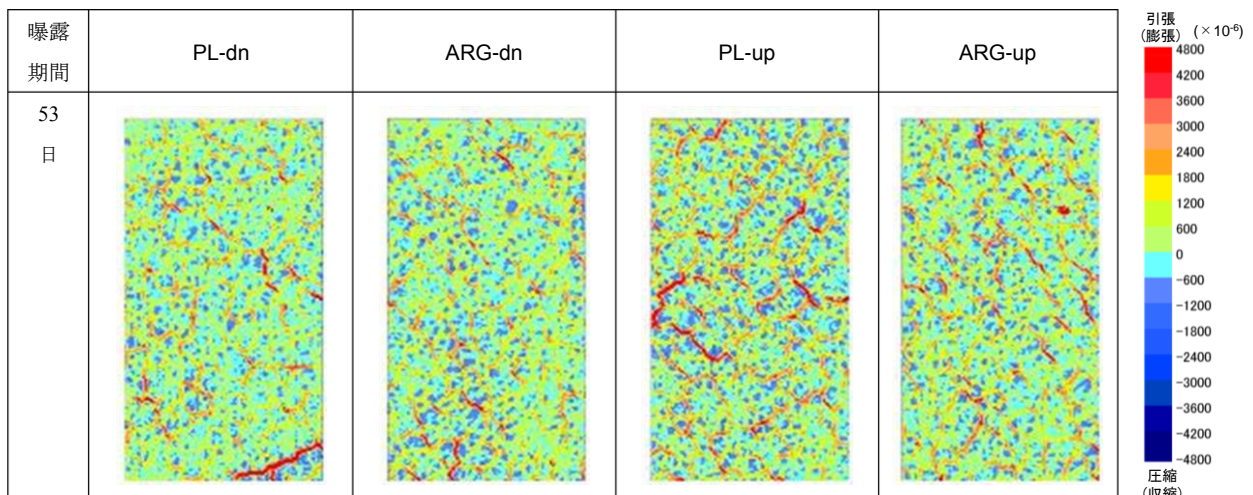


図-10 DICMによる試験体表面の最大主ひずみ分布（曝露期間 53 日）

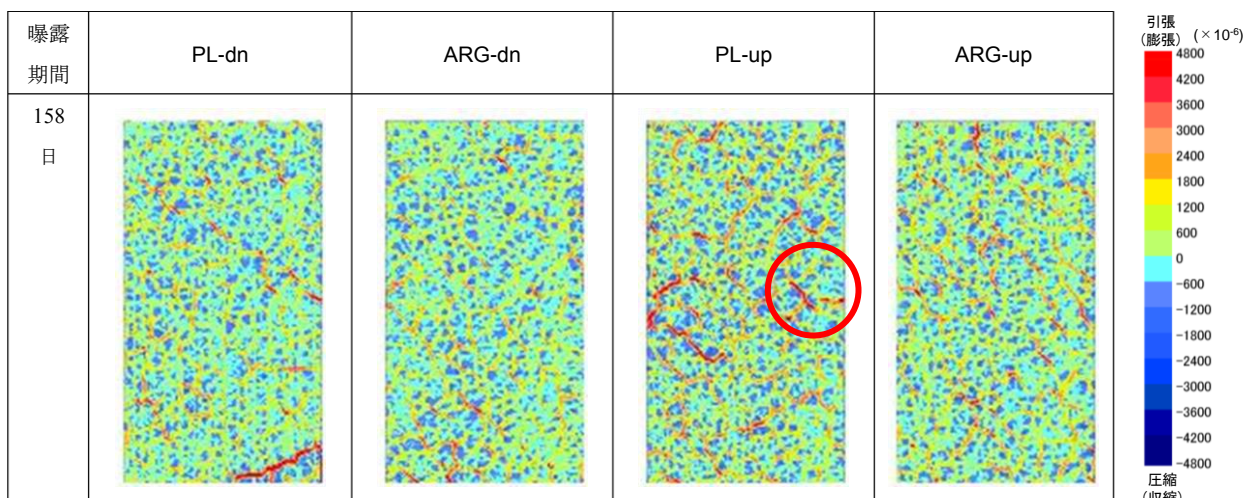


図-11 DICMによる試験体表面の最大主ひずみ分布（曝露期間 158 日）



写真-3 水噴霧時に確認できるマイクロクラック

表面には写真-3に示すように、水の噴霧後に確認できるマイクロクラックが認められた。乾燥時には目視できないことから、極表層のセメントペースト部分で発生したマイクロクラックと考えられ、亀甲状のひずみ集中領域はこのマイクロクラックを捉えていると考えられる。

ARG 繊維ネット未設置の PL-dn および PL-up では、曝露期間 53 日から隅角部付近に 4000×10^{-6} 以上のひずみの集中領域が発生し、曝露期間の経過とともにひずみ値の増加および集中領域の拡大が認められる。当該領域において微細なひび割れが確認でき、前述したひずみの集中領域の拡大に伴い、ひび割れも進展していた。特に堅壁上部に位置する PL-up では、ひび割れの進展が顕著であった。図-12 に曝露期間 158 日における PL-up での隅角部付近のひび割れを示す（図-11 の丸部分）。本図において隅角部は写真の右側中央に位置し、ひび割れ幅は画像上での実測から 0.04mm 程度と算出された。なお、図-12 に示す白色点線上ではひび割れが認められており、白色丸部分での最大主ひずみの分布を図-13 に示す。本図を確認すると、ひび割れ箇所では $4000 \sim 6000 \times 10^{-6}$ 程度の引張ひずみが認められる。また、ひび割れの未発生位置では、最大主ひずみの数値が 4000×10^{-6} 以下を示し、ひび割れ位置から遠ざかるにつれて最大主ひずみの減少を確認できることから、隅角部からひび割れが発生し、進展したものと考えられる。

一方、ARG 繊維ネットを設置した ARG-dn および ARG-up では、隅角部付近での顕著なひずみ集中は認められず、ひび割れも確認されなかった。図-12 で前述した、ひび割れの発生位置および当該位置における最大主ひずみの数値を考慮し、PL-up および ARG-up に着目して図-11 を確認する。前述したように、PL-up では、隅角部を中心として 4000×10^{-6} 以上の集中領域および当該領域におけるひび割れが認められた。また、ARG-up では 4000×10^{-6} 以上の領域が PL-up と比較して減少を示すとともに、 4000×10^{-6} のひずみを示す領域が測定面全体に分散している傾向を確認できる。また、図-6・図-7 では、DICM で計測した ARG 繊維ネットの設置箇所における乾燥収縮ひずみが、わずかに低減される傾向を示した。

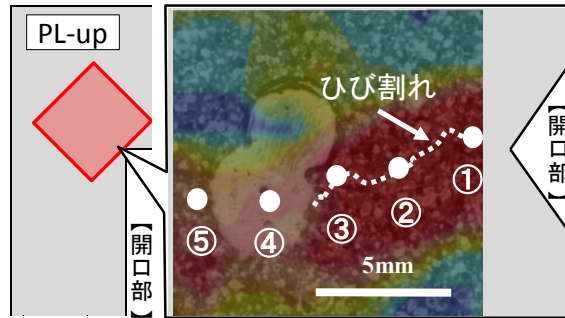


図-12 隅角部で発生したひび割れ

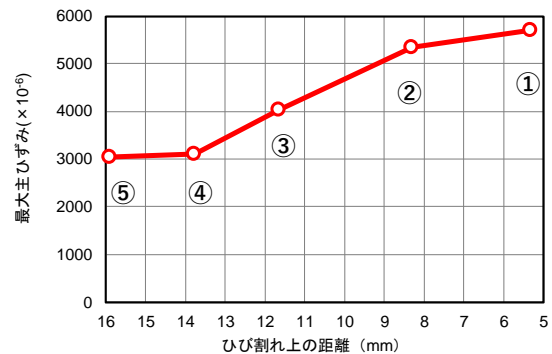


図-13 ひび割れ上での最大主ひずみの変化

当該結果も考慮すると、ARG 繊維ネットは弾性係数および断面積比が小さいことから、乾燥収縮ひずみを大幅には低減しないが、ARG 繊維ネットを設置することで、ひび割れの原因となり得る極端な引張ひずみの集中領域が分散され、ひび割れの抑制に至ったことが示唆される。

また、堅壁下部に位置する ARG-dn および PL-dn についても図-11 を確認すると、前記した堅壁上部より引張ひずみの集中領域は全体的に少ない傾向ではあるが、ARG 繊維ネットの設置によって引張ひずみの集中領域が試験面全体に分散される様子を確認できる。

3.3 ひずみ分散効果の定量評価

PL-up および ARG-up の曝露期間 53, 158 日における最大主ひずみの度数分布をそれぞれ図-14 および図-15 に示す。なお、前述したように、極表層のマイクロクラック（写真-3）には $1000 \sim 2000 \times 10^{-6}$ 、開口部のひび割れ部分には 4000×10^{-6} 以上の引張ひずみが発生したことに着目し、 2000×10^{-6} を閾値として、目視できないマイクロクラック部分および目視できるひび割れ部分での ARG 繊維ネットの効果を検討する。PL-up の度数分布を示す図-14 を確認すると、53 日目では $400 \sim 200 \times 10^{-6}$ の階級に最も多く分布していたが、158 日目では $600 \sim 400 \times 10^{-6}$ が最も多く分布する階級となり、材齢変化に伴う乾燥の影響を受け、ひずみが収縮側へ移行している様子がわかる。一方、ARG-up を示す図-15 では、曝露期間 53 日～158 日において PL-up ほど顕著な乾燥収縮の挙動は確認できない。

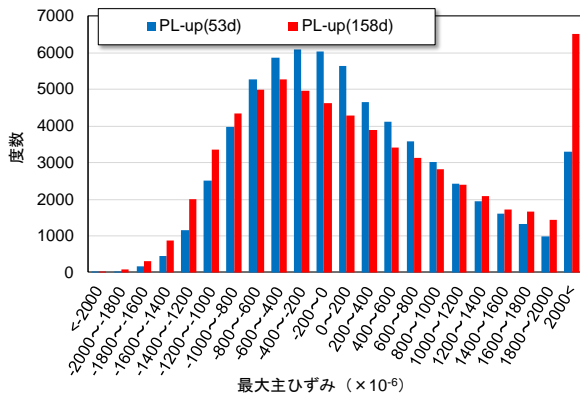


図-14 乾燥による最大主ひずみ分布の変化 (PL)

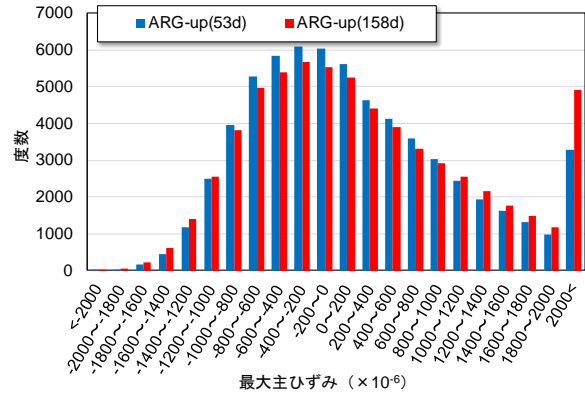


図-15 乾燥による最大主ひずみ分布の変化 (ARG)

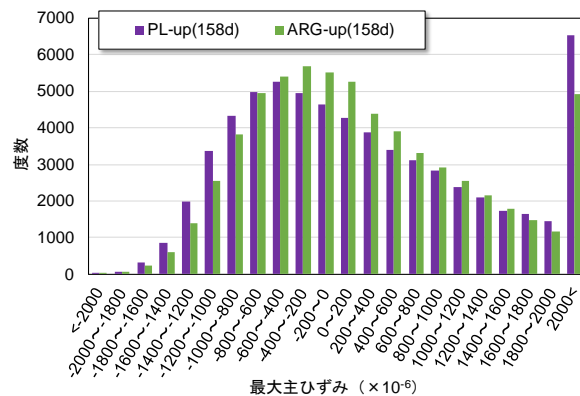


図-16 壁上部の最大主ひずみ分布の変化 (158d)

また、図-14 および図-15 において、 2000×10^{-6} を超える引張ひずみの変化を確認すると、PL-up では度数分布の変化量が大きく、曝露期間 53 日時点の約 2 倍の度数に増加したことが確認できる。一方、ARG-up では 2000×10^{-6} を超えるひずみの変化量は比較的少なく、曝露期間 53 日時点の約 1.5 倍であり、大きな引張ひずみの集中領域を低減させる ARG 繊維ネットの効果が示唆される。

続いて、曝露期間 158 日での ARG-up および PL-up の最大主ひずみ分布の度数分布を図-16 に示す。それぞれの度数分布を比較すると、 2000×10^{-6} を超える引張ひずみでは、ARG-up が PL-up より減少しており、PL-up の約 75%であった。特にひび割れとして確認できた 4000×10^{-6} 以上の引張ひずみにおいても、ARG-up は PL-up の約 54%であり、明確な差がみられる。試験体の曝露期間は 5 ヶ月程度であり、今後、乾燥が進むことでひび割れとして顕在化する可能性のある 2000×10^{-6} を超える引張ひずみに着目した場合においても、ARG 繊維ネットによるひずみの分散効果が表れていると推察される。

4. まとめ

本実験は、開口部を有する実大試験体を屋外曝露し、ARG 繊維ネットによるひずみ分散効果の評価を目的とした。ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置を用い

て試験体表面の画像を取得し、デジタル画像相関法により、前記の分散効果を定量評価した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) DICM によって算出した最大主ひずみの度数分布の変化に基づき、ARG 繊維ネットのひずみ分散効果を定量的に示した。
- (2) 乾燥が進むことでひび割れとして顕在化する可能性がある 2000×10^{-6} を超える引張ひずみは、ARG 繊維ネットの設置によって低減された。
- (3) ARG 繊維ネットが未設置である隅角部には 0.04mm 程度のひび割れが発生し、 4000×10^{-6} 以上の最大主ひずみの集中が確認された。ARG 繊維ネットによって、ひび割れの発生前に局所的な最大主ひずみの集中が分散することを確認した。

謝辞

本実験での試験体作製にあたり、大分大学 大谷俊告准教授には貴重なご意見を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 郭 度連, 竹下 永造: 耐アルカリ性ガラス繊維ネットによる収縮ひび割れの抑制, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.487-488, 2009
- 2) 大谷 俊告ほか: 耐アルカリ性ガラス繊維ネットによるコンクリートの収縮ひび割れ抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.331-336, 2009
- 3) 出水 享ほか: デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.I_683-I_690, 2012
- 4) 内田 雅隆ほか: 画像相関法を用いた耐アルカリ性ガラス繊維ネットによる収縮ひずみ分散効果の評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会, pp.329-330, 2016