

# 論文 超高強度繊維補強コンクリートを使用した防風柵の開発

佐々木 一成<sup>\*1</sup>・野村 敏雄<sup>\*2</sup>・石関 嘉一<sup>\*3</sup>・中村 貴志<sup>\*4</sup>

**要旨：**超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と表記）は、塩害や中性化に対する 100 年以上の耐久性と高い引張性能を有している。本稿ではその特長を生かし、一般的に鋼製で製作される防風柵を UFC により製作した。一般的な鋼製の防風柵のような細かな孔の配置が UFC では製作上困難であったため、径が大きい孔を配置し、防風効果に影響がないことを確認した。防風柵のパネルは無筋、支柱はプレストレス構造とすることで、薄肉化し、設計最大風速相当の荷重が作用してもひび割れが発生しないことを載荷実験により確認した。また、試験施工により施工性が良好であることを確認した。

**キーワード：**超高強度繊維補強コンクリート、防風柵、風洞実験

## 1. はじめに

近年、強風による列車の運休を減らすために、防風柵の設置が進められている。防風柵は一般的に鋼製であるが、沿岸部などでは潮風に曝されて腐食するため、維持管理に課題がある。最近では FRP など錆びない材料による防風柵が開発され適用されているが、コストや耐久性に課題があり、低コストで耐久性が高い防風柵が求められている。

そこで、防風柵の材料として、塩害や中性化に対して 100 年以上の耐久性をもち<sup>1),2)</sup>、無鉄筋で高い引張性能を有する超高強度繊維補強コンクリート（Ultra high strength fiber reinforced concrete : 以下、UFC と表記）に着目し、適用を検討した。

防風柵は一般的に支柱とパネルから構成され、鋼製の場合、支柱は H 形鋼、パネルは鋼製有孔折板が用いられる。パネルに配置されているメッシュは、鋼製有孔折板の場合、孔の 1 つの大きさが径 20mm 程度で、遮蔽率は 60% 程度である。

UFC を適用する場合、UFC に入っている鋼繊維の影響により、繊維長よりも短い幅への打込みができない。そのため、鋼製有孔折板と同じ細かさのメッシュを製作することは難しく、孔と孔の間隔を広くするため、孔径を大きくする必要があった。本防風柵で採用した孔径によるパネルは前例がないことから、はじめにメッシュの孔径の違いが風速低減効果におよぼす影響を把握するため、風洞実験を行い、防風効果を確認した。

次に、防風柵を構成する部材であるパネルおよび支柱の構造性能を確認するため、載荷実験を行い、設計風速相当の風荷重に対する安全性を確認した。

最後に施工性を確認するため、UFC 製防風柵を試験施工し、施工性を確認した。

## 2. UFC 製防風柵の概要

UFC 製防風柵の概略図を図-1 に示す。支柱とパネルから構成され、高さ 300mm のパネルを 10 枚積み上げることにより、高さを 3m とした。1 スパン 3m である。

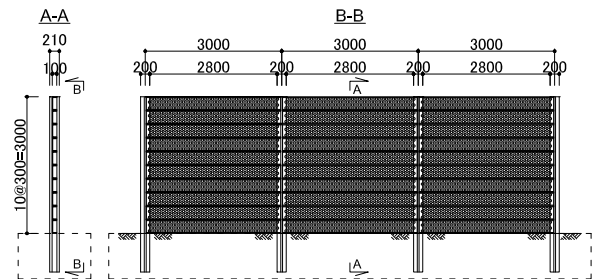


図-1 UFC 製防風柵概略図

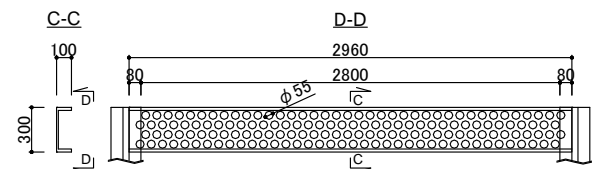


図-2 UFC 製防風柵パネル

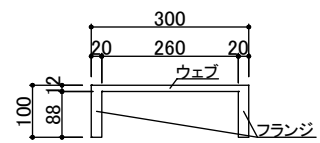


図-3 パネル断面

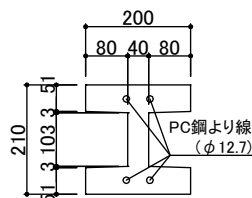


図-4 支柱断面

\*1 (株) 大林組 技術研究所 構造技術研究部 副主任研究員 修 (工) (正会員)

\*2 (株) 大林組 技術研究所 構造技術研究部 上席研究員 博 (工)

\*3 (株) 大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博 (工) (正会員)

\*4 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 主席

使用した UFC は、ポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体、粒径 5mm 以下の骨材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、標準養生（水中 20℃）により材齢 28 日で圧縮強度 180N/mm<sup>2</sup>、引張強度 8.8N/mm<sup>2</sup>、ひび割れ発生強度 8.0N/mm<sup>2</sup>（いずれも特性値）を満足する材料である。使用した鋼繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2800N/mm<sup>2</sup>で 2vol.%混入している。本防風柵の製造では 40℃の水中で 5 日間養生することにより、標準養生と同じ性能を確保している。

パネルの形状を図-2 および図-3 に示す。遮蔽率は一般的な防風柵と同様 60%とし、径 55mm の孔を千鳥に配置することにより製作可能なメッシュ形状としている。断面は C 形とし、フランジ部分で風による荷重を負担する形状とした。フランジ部分は UFC を長手方向に流動させて打込むことにより作製している。

支柱の断面を図-4 に示す。H 形断面とし、フランジの間にパネルを落とし込む構造とした。風荷重作用時にひび割れが発生しないようプレテンションでプレストレスを導入している。UFC は鋼材かぶりを 20mm 以上とすることにより、鋼材腐食に対して耐久性 100 年以上を確保することができるため<sup>1)</sup>、条件を満たすよう断面形状および鋼材配置を設計した。使用した PC 鋼より線は 7 本より φ12.7(SWPR7BL)であり、4 本配置した。

設計風荷重は 3kN/m<sup>2</sup>であり、風速 50m/s 程度に相当する。パネルの遮蔽率 60%であることから 3×0.6=1.8kN/m<sup>2</sup>が防風柵に作用したときにパネルおよび支柱にひび割れを生じないように、発生する引張応力がひび割れ発生強度以下となる部材断面とした。

なお、この UFC 製防風柵は鋼製と比べて重量があるため、橋梁部や高架部への増設には対応が難しく、盛土部など地上部の防風を対象としている。

### 3. 防風効果

#### 3.1 風洞実験概要

パネルのメッシュの孔径が大きい UFC 製防風柵の防風効果を確認するために実施した風洞実験の概略および写真を図-5、写真-1 に示す。

使用した風洞の断面は 3m×3m である。防風柵を模したパネル模型は実物大でアクリル製とし、寸法は風洞の閉塞率を考慮して幅 1000mm、高さ 300mm×3 段積み=900mm とした。遮蔽率は実物と同様に 60%とし、一般的な防風柵を模した径 20mm の孔を配置したパネル（以下、φ20 と表記）と UFC 製防風柵を模した径 55mm の孔を配置したパネル（以下、φ55 と表記）の 2 種類を用意した（表-1）。気流のまわり込みを防いで二次元性を確保するため、模型の両端には端板を設置した。

風速の計測はサーミスタ風速計を用い、模型の風上側

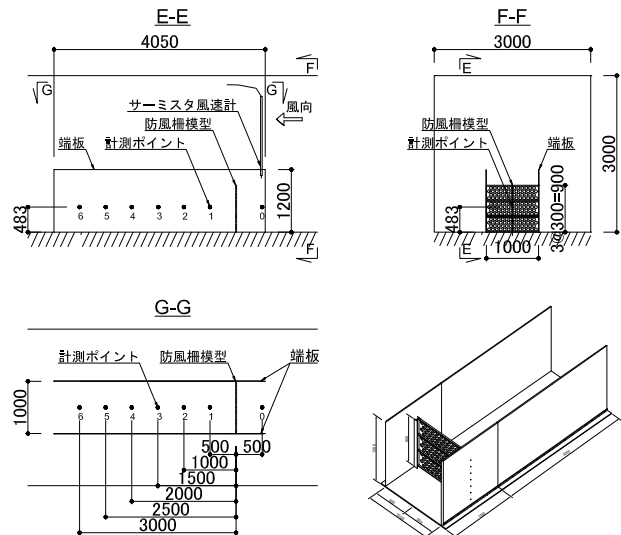


図-5 風洞実験概略図



写真-1 風洞実験状況

表-1 メッシュ形状

φ20	φ55

表-2 パネルの向き

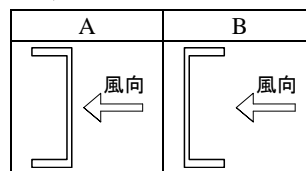


表-3 気流ケース

	気流	風速 (m/s)
1	一様流	10
2	〃	20
3	〃	30
4	乱流	10
5	〃	15

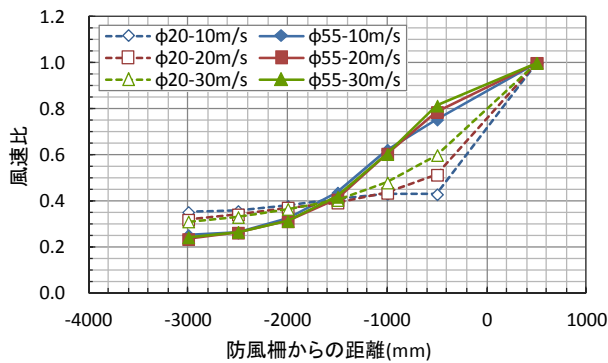


図-6 防風柵からの距離と風速比の関係  
(一様流・A方向)

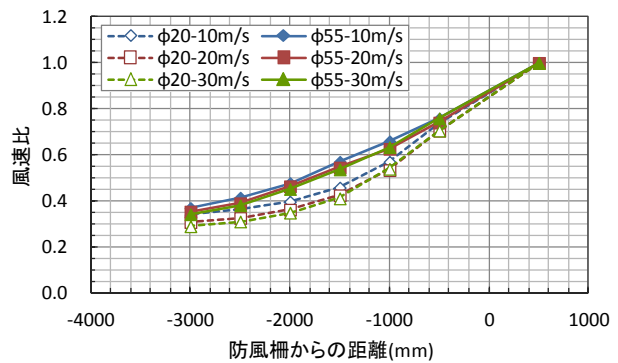


図-7 防風柵からの距離と風速比の関係  
(一様流・B方向)

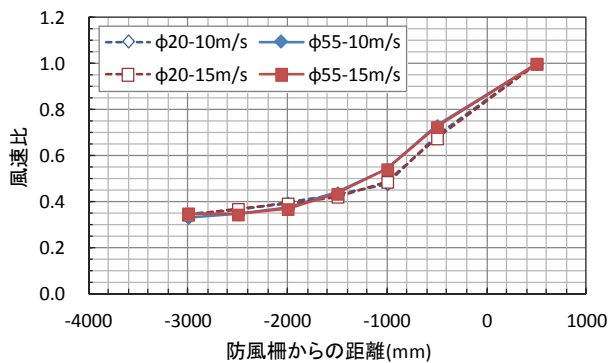


図-8 防風柵からの距離と風速比の関係  
(乱流・A方向)

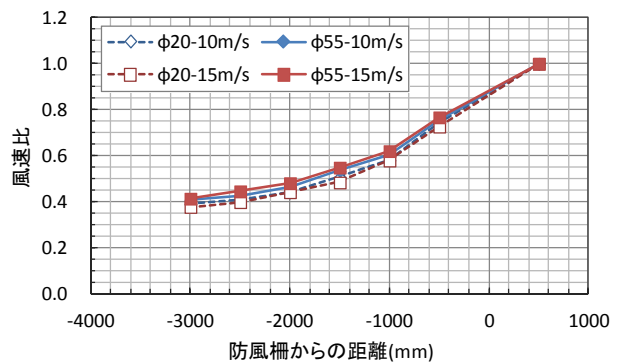


図-9 防風柵からの距離と風速比の関係  
(乱流・B方向)

と風下側の風速を計測して、風速の低減効果を確認した。計測位置は図-5に示すとおりである。

パネルの向きは風向に対して表-2に示すAおよびBの向き(以下、A方向、B方向と表記)について確認を行った。

気流は表-3に示す風速の一様流と乱流について検討を行った。乱流は現地観測された文献<sup>3)</sup>を参考に乱れ強さを15%程度とした。

### 3.2 実験結果

実験による防風柵からの距離と風速比の関係を図-6～図-9に示す。気流およびパネルの向きごとにパネルメッシュの孔径の違いが風速低減効果におよぼす影響を比較している。風速比は防風柵風上側500mmの風速を1とした比である。

#### (1) 気流の影響

一様流で、孔径の違いによる風速低減効果の差が確認された。A方向については防風柵近傍の0.5～1.0m付近ではφ20のパネルに高い風速低減効果が見られ、防風柵から1.5m以上離れたらφ20よりもφ55のパネルの低減効果が大きくなる傾向がみられた(図-6)。B方向についても1.0～2.0mで効果に多少の差がみられた(図-7)。

一方、乱流では孔径の違いによる低減効果の大きな差は見られなかった(図-8、図-9)。

#### (2) 風速の影響

孔径に関係なく、風上側の風速が低減効果におよぼす影響は基本的にみられなかった。ただし、φ20のパネルでA方向に一様流を受けた場合に、防風柵近傍で風速の影響がみられ、風速が小さいほど、低減率が大きい結果となった。

#### (3) パネルの向きの影響

孔径に関係なく、パネルの向きによる差がみられ、乱流では、A方向の方がB方向よりも風速低減効果が大きくなった。A方向の場合、孔を抜けた気流がパネルのフランジに当たることによりさらに風速を低減させていると考えられる。

本実験の計測範囲では孔径に関係なく防風柵から1.5m以上離れた地点でおおむね風速が0.6以下に低減されていることが確認された。

以上より、今回開発したパネルメッシュの孔径が大きいUFC製防風柵は、一般的な防風柵と比較して、一様流では防風柵近傍で風速低減効果が小さいものの、1.5m以上離れた場所では同等の低減効果が確認された。通常、風速低減が必要となる鉄道の軌道や道路の通行帯は、防風柵の設置位置から1.5m以上離れており、自然の風は乱流であることから、UFC製防風柵は実用範囲において、一般的な防風柵と同等の効果が得られると考えられる。

#### 4. 構造性能

##### 4.1 荷重実験に使用した材料

荷重実験に使用した UFC 製防風柵の部材と同条件で作製した UFC のテストピースは、圧縮強度  $207\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $11.8\text{N/mm}^2$ 、弾性係数  $47.8\text{kN/mm}^2$  であった。なお、圧縮強度は  $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$  供試体を用いた JIS A 1108 による試験結果、引張強度は  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$  供試体を用い、JCI-S-002-2003 によって得られた荷重-CMOD 曲線を逆解析して求められる引張軟化曲線の結果、弾性係数は  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  供試体を用いた JIS A 1149 による試験結果である。

また、支柱に使用した PC 鋼より線の最大引張力は  $194\text{kN}$  ( $183\text{kN}$ )、 $0.2\%$  永久伸びに対する引張力は  $185\text{kN}$  ( $156\text{kN}$ )、弾性係数は  $191\text{kN/mm}^2$  であった (カッコ内の数値は規格値)。

##### 4.2 パネルの荷重実験

###### (1) 荷重方法

荷重条件を図-10 に示す。風荷重が作用することを考慮し、等分布荷重が作用した際に発生する曲げモーメントとせん断力の比が等しくなる支点条件とした。支持点は回転および水平移動自由、荷重点は回転自由、一方のみ水平移動自由とした。パネル断面が非対称であるため、図-10 に示す A および B の方向から荷重 (以下、A 方向荷重、B 方向荷重と表記) し、性能を確認した。

単調荷重とし、計測は、ロードセルにより荷重荷重、変位計により中央および荷重点の鉛直変位を計測した。

###### (2) 実験結果

実験結果の荷重-変位関係を図-12 に示す。なお、図-12 および図-13 に示す設計風荷重相当の荷重荷重とは、荷重によって試験体に発生する最大曲げモーメントと、2. に示した設計風荷重とパネル遮蔽率を乗じた荷重

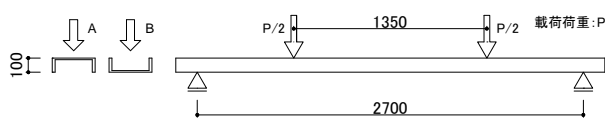


図-10 荷重実験概略 (パネル)

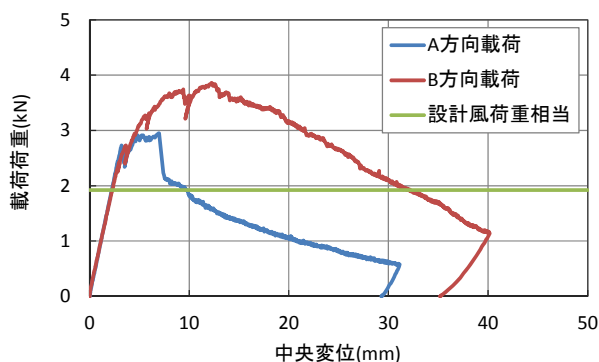


図-12 荷重荷重-中央変位関係 (パネル)

$1.8\text{kN/m}^2$  が図-1 の防風柵に作用した際にパネルおよび支柱に発生する最大曲げモーメントが等しくなるときの荷重荷重を示している。

A 方向荷重では  $2.4\text{kN}$  で曲げひび割れが発生した。その後、部材中央付近の 1 本の曲げひび割れが拡大して荷重を終了した。両側のフランジのほぼ同じ位置に同様のひび割れが見られた (写真-3)。荷重点付近から支点までのフランジにひび割れは見られなかった。また、孔があるウェブ面に大きなひび割れは見られなかった。ウェブ面が圧縮側であったためと考えられる。

B 方向荷重では  $2.6\text{kN}$  で曲げひび割れが発生した。ひび割れは  $100\text{mm}$  程度の間隔で、荷重点間の等曲げモーメント区間に分散して入った (写真-4)。孔の配置により部材幅が小さくなっている部分にひび割れが入っていることから、孔の配置間隔 ( $75\text{mm}$ ) が影響していると考えられる。また、B 方向荷重ではウェブ面が引張側となるため、孔と孔の間の部材も耐力に寄与し、A 方向荷重よりも耐力が大きくなったと考えられる。

##### 4.3 支柱荷重実験

###### (1) 荷重方法

荷重条件を図-11 に示す。支持点は回転および水平移動自由、荷重点は回転自由、一方のみ水平移動自由とした。単調荷重とし、計測は、ロードセルにより荷重荷重、変位計により中央および荷重点の鉛直変位を計測した。

###### (2) 実験結果

実験結果の荷重-変位関係を図-13 に示す。

設計風荷重の 1.3 倍までひび割れは発生せず、最大荷重  $128\text{kN}$ 、中央変位  $50\text{mm}$  付近でフランジが圧壊して荷重低下した。同じ諸元の支柱 2 本について実験したが、バラつきは見られなかった。

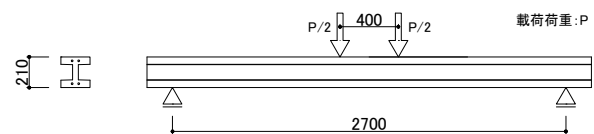


図-11 荷重実験概略 (支柱)

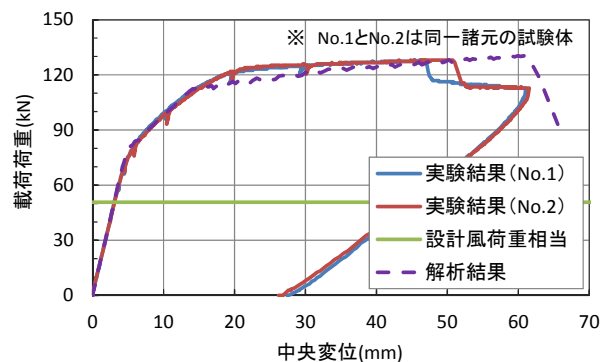


図-13 荷重荷重-中央変位関係 (支柱)

#### 4.4 非線形 FEM 解析

##### (1) 解析条件

解析に使用した圧縮特性および引張特性を図-14、図-15に示す。引張特性は部位に応じて図-15に示す2種類の引張応力-開口変位関係を使用した。引張特性1は引張強度に特性値、開口変位についても文献<sup>1)</sup>で確認されている値を用い、ひび割れ後に引張応力が一旦小さくなるモデル、引張特性2はひび割れ発生後、短繊維による架橋効果がなく、引張応力が0になるモデルとした。

パネルの解析では、引張特性を図-16に示すように、すべての断面に短繊維の架橋効果を期待する場合(解析1)と孔が配置されているウェブの部分には期待しない場合(解析2)の2つのケースについて検討した。

支柱については部位に関係なく短繊維の架橋効果を期待する引張特性1を用いた。プレストレス量についてはプレストレス導入直後の値とした。

モデルは3次元で、パネルおよび支柱の中央を対称面とした1/2モデルとし、1要素がおおむね1辺5mm程度の六面体となる要素分割とした。

##### (2) 解析結果

3次元非線形 FEM 解析を実施した結果を図-13および図-17~図-20に示す。なお、図-19、図-20に示した解析結果1は図-16(a)の解析1による結果、解析結果2は図-16(b)の解析2による結果を示す。

ひび割れは図-17および図-18のように細かくひび

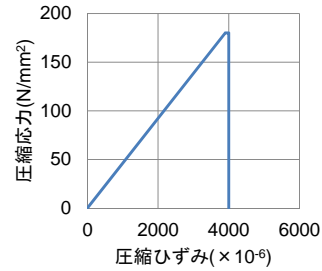
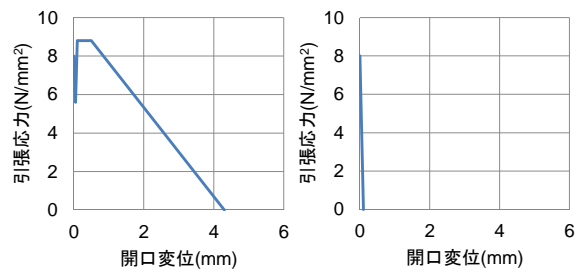


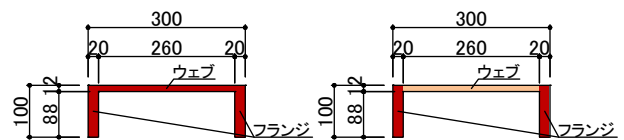
図-14 圧縮特性



(a) 引張特性 1

(b) 引張特性 2

図-15 引張特性



(a) 解析 1

(b) 解析 2

凡例：■ 引張特性 1    ■ 引張特性 2

図-16 パネル解析における引張特性適用位置

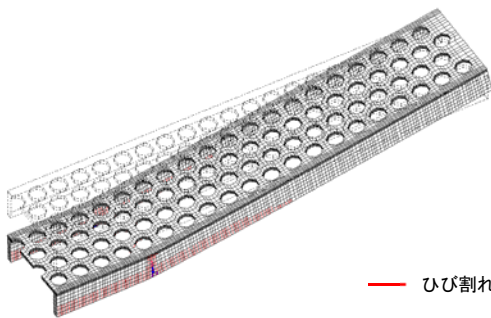


図-17 ひび割れおよび変形図 (パネル A 方向載荷)  
(解析結果 2, 中央変位 18mm 時, 変形倍率 10 倍)

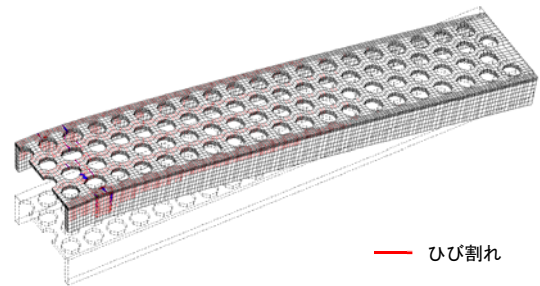


図-18 ひび割れおよび変形図 (パネル B 方向載荷)  
(解析結果 2, 中央変位 21mm 時, 変形倍率 10 倍)

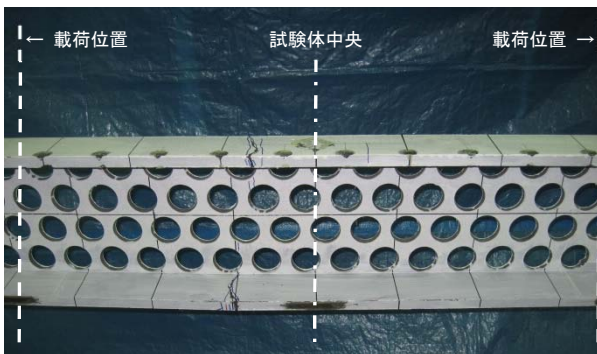


写真-3 載荷実験におけるひび割れ状況 (A 方向載荷)  
(試験終了時)

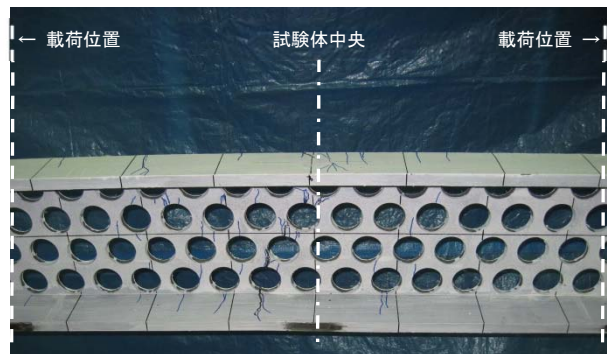


写真-4 載荷実験におけるひび割れ状況 (B 方向載荷)  
(試験終了時)

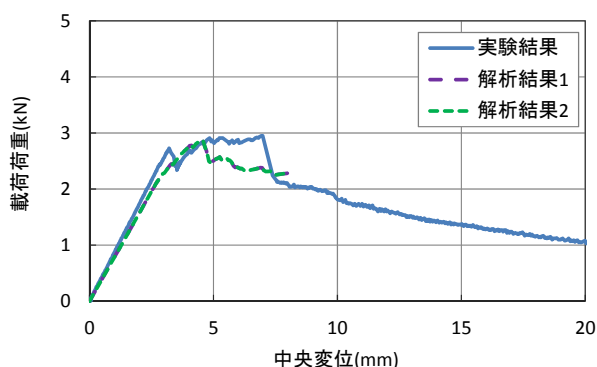


図-19 実験結果と解析結果との比較  
(パネル A 方向載荷)



写真-5 UFC 製防風柵の設置状況

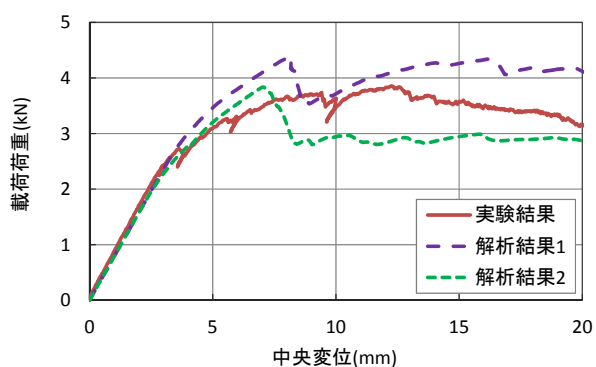


図-20 実験結果と解析結果との比較  
(パネル B 方向載荷)



写真-6 設置した UFC 製防風柵

割れが入る結果となった。載荷実験では解析結果と比較してひび割れ本数は少なく(写真-3, 写真-4)、実際には繊維配向など、材料の不均質性の影響により、ひび割れが集中するものと考えられる。

パネルについては、B 方向載荷において、ウェブ、フランジともに引張特性 1 を適用した解析結果 1 で、最大荷重は実験値と比較して 14%程度大きくなった。一方、ウェブ部分をひび割れ後の引張軟化がない引張特性 2 とした解析結果 2 では、最大荷重は実験値に近い値となった(図-20)。A 方向載荷においては、適用した引張軟化特性による差はみられなかった(図-19)。ウェブが圧縮側となるため、影響がなかったものと考えられる。テストピースから得られた引張強度は解析に用いた特性値と比べて高い値であったが、引張強度は繊維配向の影響が大きく、特にウェブ部分については孔が千鳥に配置されており、1 方向から流して作製したテストピースと複雑な型枠に打ち込まれた部材では引張軟化特性が大きく異なると考えられる。

支柱の荷重-中央変位関係は、圧壊時の変位に差があるものの、実験結果をよく再現している(図-13)。

## 5. 施工性

UFC 製防風柵を実地にて設置した状況を写真-5 に示す。本防風柵は支柱をパネルの幅にあわせて 3m 間隔で建てたあと、H 形断面の支柱の溝部にパネルを上から差し込むことにより設置した。ボルト止めなどが不要なため、煩雑な作業がなく、施工性は良好であった。

設置後の状況を写真-6 に示す。背景の視認性はよく、パネルと支柱の間に若干隙間があるが、風によるガタつきは見られなかった。

## 6. おわりに

高い耐久性と引張性能を生かした UFC 製防風柵を開発し、以下のことを確認した。

パネルメッシュの孔径は UFC で製作可能な大きさであっても遮蔽率が同じであれば、一般的な防風柵と防風効果に違いがないことを確認した。

UFC の特性値を用いて設計風荷重作用時にひび割れが生じないように部材断面を設計すれば、安全性は確保されていることを確認し、非線形 FEM 解析によってもおおむね再現できることを確認した。

試験施工により、施工性は良好であることを確認した。

## 参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.10，2012
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，第 113 号，2004
- 3) 種本勝二，荒木啓司，三須弥生：防風柵による風速低減効果の現地風観測と風洞実験の比較検討，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，pp583-584，2011