

# 論文 10MW 級風車を搭載したスパーク型浮体式洋上風力発電設備 PRC 製浮体の部分模型供試体による圧縮疲労挙動に関する分析

小松 怜史\*1・山野井 悠翔\*2・山田 理紗\*3・石川 哲哉\*3

**要旨**：本研究では、スパーク型洋上風力発電設備 PRC 製浮体の部分模型供試体を製作し、気中・水中で常時圧縮応力下の疲労載荷実験を行った。解析手法の適用性を検証し、疲労破壊挙動の分析を行った。結果、本解析手法は気中・水中ともに、初期損傷がない場合に対して疲労破壊挙動を概ね推定可能であることを確認した。構築した解析モデルで検討した結果、過去の知見同様、水中では疲労寿命が低下することを確認した。本条件では初期損傷の有無によらず主鉄筋軸方向のひび割れで破壊に至ること、コンクリート材料の破壊が支配的であることも明らかにした。示方書の疲労強度式で疲労寿命を評価するにはデータの蓄積が必要である。

**キーワード**：浮体式洋上風力発電設備、コンクリート浮体、水中疲労、高強度コンクリート、PRC

## 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルに向け、再生可能エネルギーの利用・導入に向けた取り組みが盛んに行われている。風力発電は、例えば10MW級の大型風車を搭載し大規模に開発できれば、発電コストが火力並みとなり経済性も確保できる可能性がある。風力発電は大きく分けて陸上と洋上に分けられ、洋上はさらに2種類（着床式と浮体式）に分けられる。本論文で対象とする浮体式は日本沿岸の地理条件や風速条件などから、発電効率や当該発電設備の導入量が高く見込まれている。

これまで国内の実証研究では、風車支持浮体（以下、浮体）として鋼材が使用されてきた。しかし商用化にあたってはコストダウンが課題となっているため、鋼材より安価なコンクリートが浮体材料として着目されている。一方でコンクリート浮体の構造特性、特に主たる作用である疲労特性に関する知見が十分とは言えない。浮体を使用するコンクリートは構造・耐久性の観点で高強度コンクリートが使用されることも想定されるが、コンクリート標準示方書【設計編】（以下、示方書）<sup>2)</sup>に記載のコンクリートの疲労強度式（式(1)）に関して、設計基準強度が50N/mm<sup>2</sup>を超えるデータが十分でないため適用範囲外となる。

$$f_{rd} = k_{1f} f_d \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d}\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \quad (1)$$

ただし  $N \leq 2 \times 10^6$ 。  $f_d$ ：コンクリートの設計強度（材料係数  $\gamma_c$  は 1.3、 $f'_{ck} = 50\text{N/mm}^2$  に対する各設計強度を上限）。  $K=10$ （普通コンクリートで継続してあるいはしばしば水で飽和される場合および軽量骨材コンクリートの場合）もしくは  $K=17$ （その他の場合）。  $k_{1f}=0.85$ （圧縮および曲げ圧縮の場合）もしくは  $k_{1f}=1.0$ （引張および曲げ引張の場合）。  $\sigma_p$ ：永続作用によるコンクリートの応力度。

\*1 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造・耐震工学研究部門 主任研究員 博士（工）（正会員）

\*2 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 構造・耐震工学研究部門 研究員 修士（工）（正会員）

\*3 東京電力ホールディングス 技術戦略推進ユニット 土木・建築統括室 修士（工）

そこで本研究では、10MW級スパーク型浮体式洋上風力発電設備のPRC造円筒形浮体の部分模型供試体を製作し圧縮疲労載荷実験を行った。さらに、材料非線形有限要素法解析プログラム（COM3）<sup>3)</sup>を用いて解析手法の適用性を検証し、疲労破壊挙動の分析を試みる。

## 2. 実験概要

### 2.1 構造諸元

図-1に供試体（模式図）および載荷の様子を示す。対象構造物は、波浪によって主に曲げ応力を繰り返し受ける。断面設計の結果<sup>4)</sup>を参考に、本実験ではPRC浮体圧縮縁近傍の応力状態を一軸圧縮応力状態と仮定して分析することにした。試験装置の載荷能力およびサイズを踏まえ、実規模PRC部材の一部（鉄筋を中心とした1/4断面、縮尺1倍）を抜き出してきた部分模型供試体を製作した。横254mm×奥行き224mm×高さ500mmで、断面中央に直径38mmのねじ鉄筋を埋設し、配力筋は部分模型であることから省略した。初期プレストレスは供試体外の4本のPC鋼棒で緊張する構造となっている。供試体の両端部の載荷面にはゴム板（厚さ1mm）を設置し、片当たりを極力抑える工夫をした。

### 2.2 材料物性

表-1に示方配合表を示す。49-18-20Nのコンクリートを使用した。陸砂(S<sub>1</sub>)と砕砂(S<sub>2</sub>)を50.7:49.3（容積比）で混合して使用した。各種骨材の表乾密度はそれぞれS<sub>1</sub>=2.56g/cm<sup>3</sup>、S<sub>2</sub>=2.64g/cm<sup>3</sup>、G=2.70g/cm<sup>3</sup>である。セメントの密度は3.16g/cm<sup>3</sup>である。目標空気量は4.5±1.5%に設定した。混和材は高性能AE減水剤を使用した。材齢28日で脱型し、載荷試験の前日まで封緘養生を行った。

表-2に載荷試験開始時点（材齢49日）、載荷試験終了時点（材齢79日）での硬化コンクリートの物性を示

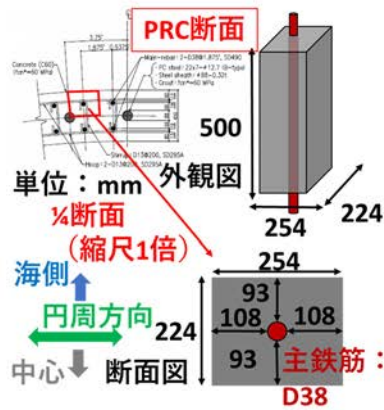


図-1 供試体（模式図）および载荷の様子

表-1 コンクリートの示方配合

%		Kg/m <sup>3</sup>					
W/C	s/a	C	W	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	Ad
38.0	45.7	448	170	395	393	972	3.81

表-2 硬化コンクリートの力学物性

材齢(日)	圧縮強度(MPa)	弾性係数(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度(MPa)	ポアソン比
49	64.4	4.08	3.00	0.25
79	65.6	3.96	3.29	0.24

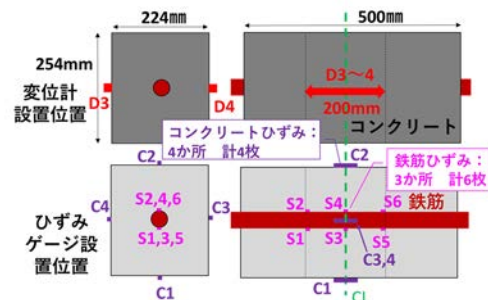


図-2 計測位置

実験ケース	载荷条件【静的/疲労, 振幅, 環境】		
	静的	疲労	環境
S	【静的】	単調圧縮	気中
F-s-a	【疲労】 ひび割れ無	小	水中
F-s-w			
F-l-w			
Fc-l-w	【疲労】 ひび割れ有	大	

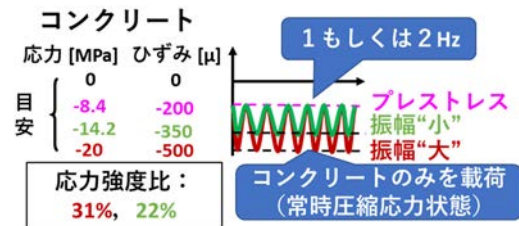


図-3 実験ケース（左表）と载荷パターン（右図）

す。なお、本結果はφ100×200mmの円柱供試体の3本の平均値となる。

実験に使用した鉄筋（D38、ねじ節鉄筋）の物性は弾性係数が197.7GPa、ポアソン比が0.31であった。

### 2.3 計測位置

図-2に供試体の変位（D3またはD4）とひずみゲージ（鉄筋：S1～6、コンクリート：C1～4）の設置位置を示す。水中でも計測を行うことから、防水構造の差動トランス式変位計（FDP-10A、東京測器研究所製）を使用した。水分での絶縁抵抗の低下を極力抑えるため、ステンレスベースのひずみゲージ（WFLM-60、東京測器研究所製）を使用した。鉄筋に貼り付けたひずみゲージ（FLA-2、東京測器研究所製）のリード線が供試体から搬出する箇所は、浸水を極力防ぐためシリコン樹脂でコーティングした。

### 2.4 実験ケースならびに载荷パターン

図-3に実験ケース、载荷パターンを示す。実験ケースは大きく2つ（静的試験、疲労試験）に分かれる。“静

的载荷”では、鉄筋は押さずコンクリート端面を一軸に圧縮する試験を行った。なお、“静的载荷”は気中で実施しPC鋼棒による緊張は行っていない。一方“疲労試験”は载荷方向（鉄筋軸方向）に対して直交する初期損傷（以下、水平ひび割れ）のある供試体とない供試体に分かれる。この水平ひび割れは、偶発的な大荷重が発生した場合に曲げ応力で断面内に生じるひび割れを意図する。载荷は3点曲げ（支点距離400mm）を、両側から供試体を裏返して行うことで、貫通した水平ひび割れを設けた。水平ひび割れのない供試体は気中と水中の2パターンで実験を行った。いずれの実験ケースも供試体数は1体である。

载荷パターンは2つ設定した。一つは、20年に1度の暴風雨程度の荷重レベル（以下、振幅“大”）で応力強度比は実強度で約31%となった。もう一つは上記の半分の荷重で、最頻度の応力振幅相当（以下、振幅“小”）で応力強度比は約22%となる。载荷手順としては、試験開始前にPC鋼棒を緊張し、有効プレストレス相当の圧縮力

(コンクリートに約 8.4MPa) を作用させたところから疲労荷重を開始した。実験期間の制約から、荷重周波数は 1Hz を基本とし、一部は 2Hz で実施した。

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析手法

本研究では、三次元材料非線形有限要素法解析プログラム (COM3) <sup>3)</sup> を使用した。任意の荷重履歴を考慮した材料非線形構成モデルに基づく RC 平面モデルを三次元に拡張したものとなっており、高い解析精度が示されている。RC 平面モデルは、複数の微細なひび割れの挙動を有限体積上で平均化することにより、平均ひずみ-応力関係が規定されている (分散ひび割れモデル)。

図-4 に鉄筋コンクリートの圧縮・引張・せん断伝達に関する構成則をまとめる。圧縮と引張によるコンクリートの疲労損傷は、一軸疲労試験に基づく構成則となっている。圧縮疲労下のコンクリートは、コンクリートに発生した微小亀裂に起因して剛性が徐々に低下 ( $K_c$  で考慮) するようにモデル化されている。鉄筋とコンクリートの界面の疲労による剛性の低下は、引張領域で進行中の損傷パラメータ  $K_t$  で表されている。せん断伝達モデルでは、係数  $X$  としてサイクル数に従って、ひび割れ面で伝達されるせん断力が減少するようモデル化されている。

図-5 に水が浸透したコンクリートの動的平衡モデルの概念図を示す。水が浸透したコンクリートでは、疲労寿命が低下することが一般に知られている <sup>5)</sup>。本解析コードでは、Biot の固液二相理論を組み込んだ凝縮水の動態を考慮している。ひび割れ後はコンクリートの透水性に異方性が生じる。また、ひび割れ直後や高速度でひび割れの開閉が続く場合、圧力が大気圧以下 (負圧) となる場合がある。負圧レベルが上昇すると、常温で相変化が発生し、気泡が発生することで圧力低下が緩和される。本解析プログラムでは、このような透水性の変化や負圧による相変化の影響 (異方性) が定式化されており、液状水に生じる圧力が、専らひび割れ面に直交する方向に作用すると仮定して力学現象 (コンクリートのせん断剛性の低下とひずみ振幅) と関連付けられている。なお、

非直交方向ひび割れが交差する場合には、さらに第二ひび割れ面に直交する方向にも間隙水圧が作用することとなる。凝縮水の動態を考慮した構造解析としては、RC 床版 (コンクリートの圧縮強度として 30~40N/mm<sup>2</sup> 程度) の水張り環境下での輪荷重走行実験に対して多くの解析的検討の実績 <sup>6)</sup> を有している。本研究のようにコンクリートの設計基準強度が 50N/mm<sup>2</sup> を超えかつ、常時圧縮応力下での適用性の可否に関しては新規性を有する。

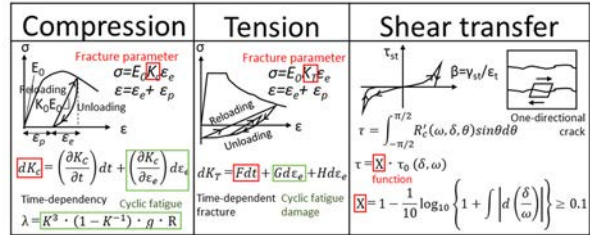


図-4 鉄筋コンクリートの圧縮・引張・せん断伝達に関する構成則 (疲労現象考慮)

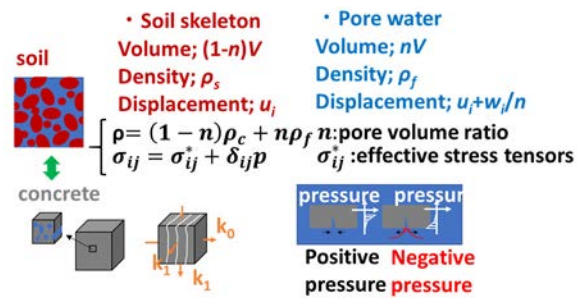


図-5 水が浸透したコンクリートの動的平衡モデルの概念図

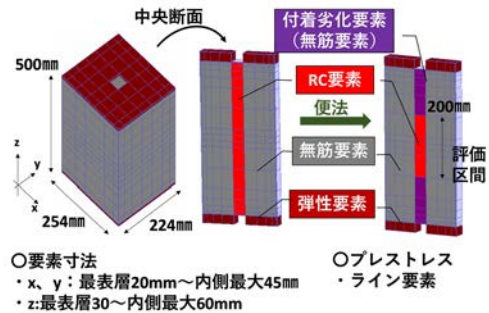


図-6 解析モデルの概要

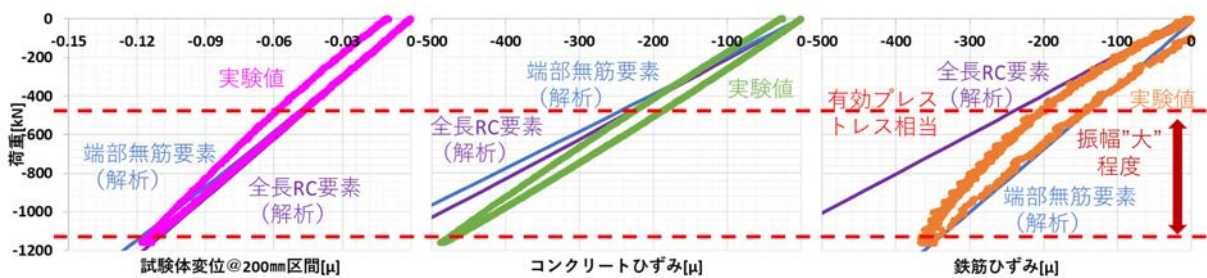


図-7 実験ケース S の荷重-変位, コンクリートひずみ, 鉄筋ひずみ関係 (平均値)

### 3.2 解析条件

図-6 に解析モデルを示す。実験同様、鉄筋を直接押さないよう、載荷板（弾性要素）は断面中央（RC 要素の直上・直下）が開口したモデルを作成した。4 章で後述するが、載荷過程において供試体端部から徐々に鉄筋とコンクリートの付着劣化（抜け出し）が生じている可能性が確認された。本解析プログラムでは、ひび割れの状況や鉄筋の方向、鉄筋比によらず、鉄筋コンクリートの平均ひずみと鉄筋の平均ひずみとコンクリートの平均ひずみが一致するように定式化されている。そのため、圧縮状態において鉄筋とコンクリートの付着劣化が進行するような状況では、供試体全体の変形挙動を精度よく推定できない可能性がある<sup>7)</sup>。4.1 で後述するが、本研究では供試体両端から 150mm（静的載荷時の鉄筋ひずみゲージの挙動から決定）の RC 要素を無筋コンクリート要素と置き換えることで、端部付近の鉄筋とコンクリート間の付着を便宜的に無視し、供試体中央 200mm 区間の変形挙動に着目するという方針で検討を進めた。

疲労載荷前に 3 点曲げで、鉄筋軸に直交する方向に水平ひび割れを生じさせた実験ケース Fc-l-w に関しては、解析モデルでも同様に 3 点曲げで曲げひび割れを発生させ疲労解析を実施した。

鈴木ら<sup>8)</sup>の実験結果から載荷期間において液状水が表層から深さ 10~30 mm 程度までは浸潤している可能性が考えられた。そこで周面から深さ 20mm までを一律で凝縮水の動態を考慮する領域として解析的検討を進めた。

## 4. 再現解析に基づく解析手法の適用性検証

### 4.1 静的載荷の結果とモデル化手法の妥当性確認

図-7 に実験ケース S（静的一軸圧縮載荷）の荷重-変位、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみ関係（各計測項目の平均値）の実験結果と解析結果をそれぞれ示す。解析結果に関しては、鉄筋位置をすべて RC 要素としたケース（凡例名：全長要素 RC）と、先述のように両端から 150mm の区間の RC 要素を無筋要素にしたケース（凡例名：端部無筋要素）を示す。負の値が圧縮を示す。

載荷後、外観では供試体に損傷は見られなかったものの、実験・解析結果ともに除荷時に残留ひずみや残留変位が生じている。供試体内部では、鉄筋とコンクリート間の付着劣化が生じている可能性が考えられる。

便宜的に鉄筋コンクリートの両端から 150mm ずつを無筋コンクリート要素と置き換えたほうが、最大荷重時の変形挙動を概ね表現できていることから、以後はこのモデルで検討を進めることとした。

### 4.2 疲労載荷の結果と解析手法の適用性検証

#### (1) 実験ケース F-s-a の結果

図-8 に実験ケース F-s-a の 100 万回載荷までの荷重

-変位、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみ関係（実験・解析結果）をそれぞれ示す。解析結果は平均値を示す。負の値が圧縮であり、実験・解析いずれも振幅最大時の値をプロットした。以上は図-9~11 でも同様である。

実験では載荷回数 100 万回に至るまでに、変位やひずみに若干の変化が生じているものの、試験区間には目視で確認できる損傷はなかった。一方、解析結果においても目立った損傷は確認できなかった。

ひずみや変位の変化が小さい領域で本解析プログラムの適用性を議論するのは難しく、さらにデータを積み重ねて議論する必要はある。しかし、ひずみや変位の変曲点の実験も解析も載荷回数 10 万回前後であることから、適用可能ではないかと筆者らは考えている。

#### (2) 実験ケース F-s-w の結果

図-9 に実験ケース F-s-w の結果を示す。実験では載荷回数 100 万回までに供試体は破壊に至らなかったが、載荷回数 10 万回程度から、変位や鉄筋ひずみの実験値に変化がみられる。実験では鉄筋ひずみの値が 10 万回前後から、正方向（引張方向）に推移している。理由は定かではないが、水中供試体においてみられる傾向であることから、液状水が鉄筋近傍において何らかの影響を及ぼし、鉄筋ひずみの値として計測されたと考えられる。

水中での疲労載荷に対する本解析プログラムの適用性に関して、4.2(1)同様、ひずみや変位の変化が小さい領域で議論するのは難しく、さらにデータを積み重ねる必要はある。しかし、ひずみや変位の変曲点の実験も解析も載荷回数 10 万回前後であることから、本解析モデルは適用可能ではないかと筆者らは考えている。

#### (3) 実験ケース F-l-w の結果

図-10 に実験ケース F-l-w の結果を示す。解析結果が載荷回数として 1 オーダー程度遅く破壊に至っている。図-12 に示すように、実験では載荷回数約 6 万回で、かぶりコンクリートが剥落した。疲労試験の過程で、供試体端部に設置したゴム板が劣化し、片あたりが生じたことで、早期に疲労破壊が生じた可能性も考えられる。

#### (4) 実験ケース Fc-l-w の結果

図-11 に実験ケース Fc-l-w の結果を示す。実験ケース F-l-w が約 10 万回で破壊に至っていることから、載荷軸方向に対して直交する方向に水平ひび割れが生じたことで、曲げひび割れ近傍における凝縮水の動態の影響が疲労寿命の低下につながった可能性が示された。同様の傾向は解析でも表れている。ただし、解析結果は実験結果より載荷回数が 1 オーダー程度遅く破壊に至った。分散ひび割れモデルでは、曲げ載荷による初期ひずみが供試体内で分散するため、解析が実験を過大評価したのではないかと考えている。曲げひび割れの影響を分析する上で、モデル化手法は今後の検討課題としたい。

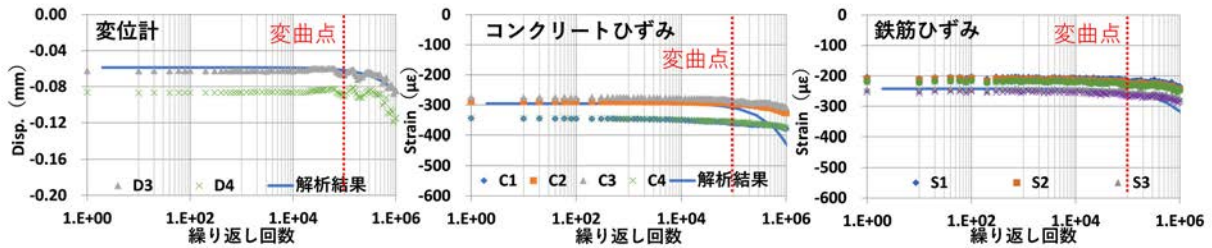


図-8 実験ケース F-s-a の荷重-変位, コンクリートひずみ, 鉄筋ひずみ関係 (実験は点, 解析は実線)

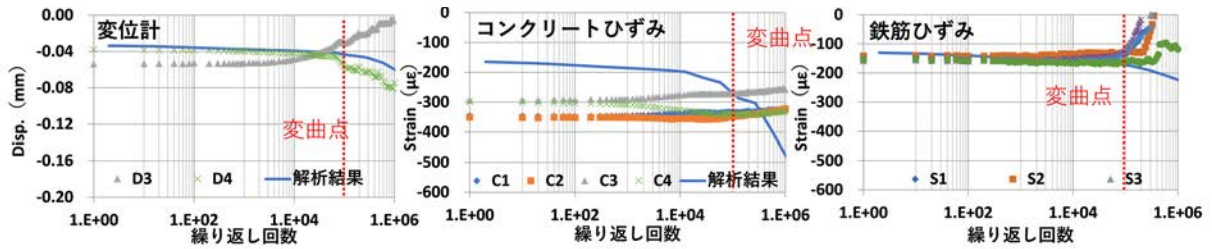


図-9 実験ケース F-s-w の荷重-変位, コンクリートひずみ, 鉄筋ひずみ関係 (実験は点, 解析は実線)

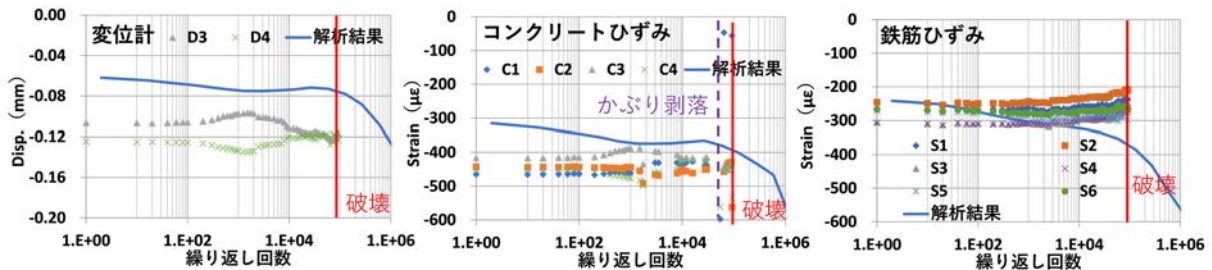


図-10 実験ケース F-l-w の荷重-変位, コンクリートひずみ, 鉄筋ひずみ関係 (実験は点, 解析は実線)

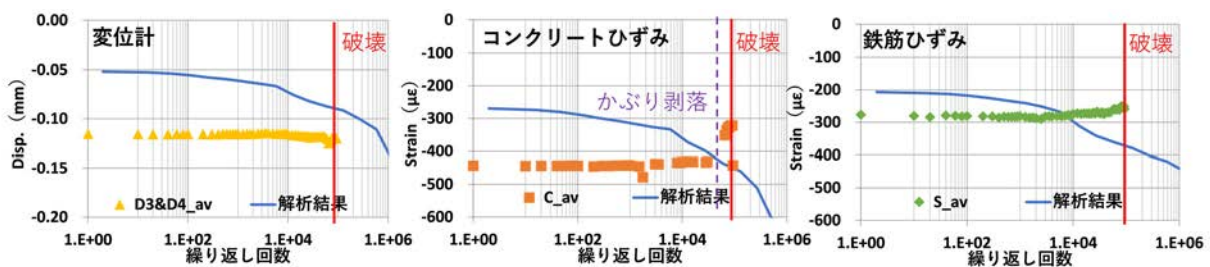


図-11 実験ケース Fc-l-w の荷重-変位, コンクリートひずみ, 鉄筋ひずみ関係 (実験は点, 解析は実線)



図-12 かぶりコンクリートの剥離

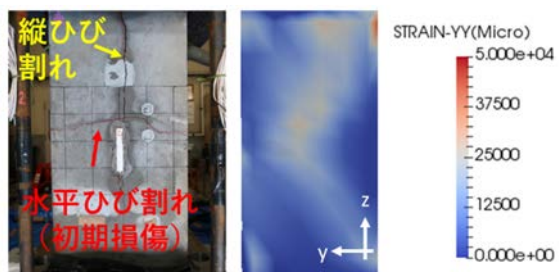


図-13 実験ケース Fc-l-w の破壊の様子 (左: 実験, 右: 解析)

## 5. PRC 浮体の圧縮疲労破壊挙動に対する分析

### 5.1 疲労载荷に対する分析

#### (1) 破壊形態

実験ケース F-l-w, Fc-l-w いずれも最終的には鉄筋軸方向のひび割れ(縦ひび割れ)が起点となり破壊に至った。ここでは実験ケース Fc-l-w を取り上げて分析する。図一

13に破壊時の様子(実験および解析)を示す。解析の凡例は引張が正である。解析結果も実験結果と同様、縦ひび割れに相当する方向(Y方向)のひずみが大きくなった。供試体上部で縦ひび割れに相当する方向のひずみが大きいのは、重力で相対的に供試体下部の拘束度が高かったためと考察している。

## (2) 疲労寿命

表-3 に疲労寿命に関する実験結果と解析結果の比較を示す。水中では気中と比べ疲労寿命が低下することが知られている。本解析でも同様な傾向を推定できることが分かった。また、定性的ではあるが、疲労寿命の低下の傾向(実現象)を解析は表現していることが分かった。

### 5.2 S-N 線図に対する分析

図-14 に示方書の疲労強度式(式(1))を基に S-N 線図を描き実験・解析値をプロットした結果を示す。 $k_{1f}=1$  で図化し $\gamma_c$ は 1.3 と 1.0 で計算した。縦軸を応力振幅に関する値とし、水中で疲労破壊した実験値(実験ケース F-l-w, Fc-l-w)と気中で疲労破壊した解析値(解析ケース F-s-a\_st, F-s-a\_no\_st)を塗りつぶし丸でプロットした。一方、実験ケース F-s-w, F-s-a は载荷回数 100 万回で供試体が破壊しなかったため、実験での最大繰返し回数である 100 万回に白抜き丸でプロットした。

鉄筋の有無で疲労寿命に大きな差は見られない(解析ケース F-s-a\_st と F-s-a\_no\_st の比較)ことから、鉄筋の有無が疲労寿命に与える影響は小さく、コンクリート材料の破壊が支配的であると考えられる。

また、気中・水中の疲労载荷の結果はいずれも現行の示方書を過小評価することが分かった。50N/mm<sup>2</sup>を超える高強度コンクリートでは粗骨材の品質が普通コンクリートより疲労寿命に大きく影響する<sup>9)</sup>という指摘もある。材料特性のみならず、構造物の境界条件(拘束条件, 荷重条件等)や構造諸元(プレキャスト部材の接合面, 水圧の影響等), 波の周期の影響等も考えた実験や解析データを蓄積していき、コンクリート浮体の疲労設計に関する手法を確立していきたい。

## 6. まとめ

本研究では、10MW 級スパー型浮体式洋上風力発電設備の円筒形浮体の部分模型供試体(PRC 造)を製作し、圧縮疲労载荷実験を行った。さらに解析手法の適用性を検証し破壊挙動の分析を行った。以下に結論を整理する。

- (1) 再現解析の結果、本解析で用いたモデル化手法は、気中・水中ともに、水平ひび割れない場合に対して疲労破壊挙動を概ね推定可能であることを確認した。ただし、曲げ損傷が生じるような場合、解析モデルの改善が必要であると考えられる。
- (2) 構築した解析モデルで分析した結果、過去の知見同様、水中では疲労寿命が低下することを確認した。今回の条件では、水平ひび割れの有無によらず、主鉄筋軸方向のひび割れで破壊に至ること、コンクリート材料の破壊が支配的であることも明らかにした。
- (3) 今回の実験値は示方書に記載の疲労強度式よりも低い値を示した。実構造物を想定した材料・構造の各種

表-3 疲労寿命に関する検討結果(実験・解析結果)

試験体ケース名	実験	解析
F-s-a	1×10 <sup>6</sup> 回で	約2×10 <sup>8</sup> 回
F-s-w	破壊に至らず	約2×10 <sup>7</sup> 回
F-l-w	約1×10 <sup>5</sup> 回	約2×10 <sup>6</sup> 回
Fc-l-w	約3×10 <sup>4</sup> 回	約4×10 <sup>5</sup> 回

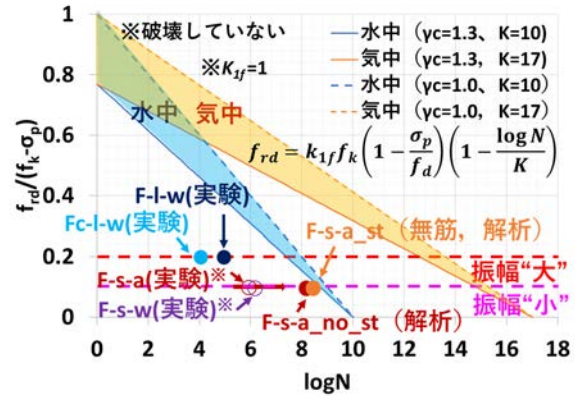


図-14 S-N 線図での疲労寿命評価

条件を踏まえた実験・解析データの蓄積が必要である。

## 参考文献

- 1) 日本風力発電協会：JWPA ビジョン，  
<http://jwpa.jp/jwpa/vision.html>
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2017
- 3) K. Maekawa, A. Pimanmas and H. Okamura: Nonlinear mechanics of reinforced concrete, Spon Press, London and New York, 2003.
- 4) 福王翔, 高橋祐弥: 非線形 FEM を用いた 10MW 風車用コンクリート製スパー型浮体のプレストレス力影響評価, 第 42 回風力エネルギーシンポジウム
- 5) 松下博通: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文集, 第 296 号, pp.87-95, 1980
- 6) Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, Engineering Computations, Vol.30, No.6, 2013
- 7) 小松 怜史, 細田 暁: 若材齢で曲げひび割れが生じた RC 梁の収縮特性を考慮した時間依存変形機構の分析, 土木学会論文集, Vol.71, No.1, pp.58-71, 2015
- 8) 鈴木浩明, 上田洋: コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.676-681, 2014
- 9) 林宏信, 高木宜章, 児島孝之: 高強度コンクリートの圧縮疲労特性, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.67-76, 2000