コンクリート製浮体式洋上風力発電基礎の建設（その２）

アルソシア建設（旧三井住友建設）　○澤井　淳司、正会員　津田　和夏希、正会員　富山　茂樹
東京科学大学　正会員　千々和　伸浩
イデオルジャパン合同会社　木村　健太郎

1. はじめに

2026 年 7 月現在、洋上風力発電は、沿岸で水深が浅い箇所の海域入札が第 3 ラウンドまで終了し、第 4 ラウンドの入札と第 1 ラウンドの再入札待ちである。その海域は水深が 10 m～50 m 程度で、モノパイル形式およびジャケット形式の着床式洋上風力発電が主である。今後、水深の 50 m より深い海域が主流となり、浮体式洋上風力が主となる予定である。

浮体式洋上風力は、厳しい気象条件および海流・潮流などの影響下でも安定した発電が求められており、特に大型風車を支える本浮体式洋上風力発電基礎の要素技術の確立が必要である。

本論文は、2024 年の同名の論文発表 [1]の続編であり、発表後も引続き浮体基礎の上床版のプレキャスト構造の安定性の検証を進め、水中での曲げ疲労試験を実施した結果を報告する。さらに、水深制約の厳しい港湾における適用可能性を拡大するため、本浮体基礎のムーンプール形状を活用した、港内施工時の一時的な喫水低減方法を提案した。

2. コンクリート製浮体式洋上風力発電基礎

浮体式洋上風力発電基礎の構造形式は一般に、バージ型、セミサブ型、スパー型、TLP 型の 4 型式に大別される [2]。



写真-1　2MW 実証機
（写真出典：BW Ideol /V. Joncheray）

本論文の対象とするコンクリート製浮体式洋上風力発電基礎は、BW Ideol 社が開発した中央にムーンプールを設けたバージ式であり、かつコンクリート製である。すでに出力 2MW の実証機がフランス大西洋沖に 2017 年に建設係留されて、現在まで順調に供用中である。本構造形式の主な特徴としてはドーナッツ形状により構造的にシンプルで耐波浪性に優れており、かつコンクリート製であるため、耐久性に優れる。その他、コンクリート製浮体基礎の炭素排出量は、同じ寸法の鋼製の 1/2 であり [3]、供用時だけでなく建設時の炭素排出量削減に大きく貢献する。さらにコンクリート、鉄筋などの地元からの調達及び、作業員の地元からの雇用を通じて、地元への経済効果も大きい。

日本で最初のコンクリート製バージは、当社前身の三井建設と三井造船が 1977 年に建設し、日本海事協会より国内最初に承認され [4]、現在も供用中である。その後、その構造を発展させたアルソシア鉄構が、浮防波堤や、浮桟橋などで約 800 基の実績を有している。

3. 建設手順

現在、想定される複数の海域の近傍で、FS（実現可能性調査）を行っている。その際、洋上風力発電基礎は、2 年ほどの短期間で 50 基程度の建設が必要である。今後開催が想定される浮体式を対象とした水深の深い海域の再エネ海域利用法の下での公募入札を経て、建設及び供用により発電される電力を売電することにより、その建設費を賄うことになる。売電価格のみで建設費を含む事業費を賄う必要があるため、いかに早く、大量に、品質を確保し、かつ経済的に浮体基礎を建設するかが我々に課された課題である。

キーワード　浮体式洋上風力発電，バージ式，スリップフォーム工法，プレキャスト，膜構造
連絡先　〒104-0051 東京都中央区佃二丁目 1 番 6 号 アルソシア建設㈱土木事業本部　TEL03-4582-3055

これに対して、従来工法を発展改良して実現する計画であり、その内容、検討結果及び実験結果を記述する。この計画は BW Ideol 社と BYUM 社（Bygging-Uddemann AB）が共同で開発した計画をアルソシア建設が日本サイト向けに最適化させたものである。

図-1 に建設ヤード全景を示す。全体建設工程の最適化を図った結果、陸上工事を 6 つの工種に分けて、それぞれの工種作業位置に浮体基礎を、その下に配置した移動装置により順次移動する。**図-1** 建設ヤード全景の左側より対応する建設手順（STA1～STA6、STA は作業位置）を、**図-2 に**示す。STA1：底版構築、STA2：壁構築（スリップフォーム工法）、STA3：TP（トラジションピース）基礎とフレーム上部構築、STA4：プレキャスト床版による上床版構築、STA5：プレストレス導入とバラスト、STA6：TP 設置と塗装がある。その後の建設手順として、浮体基礎の進水台船への引出と進水などの港内での海上工事がある。その後、通常同一港内で浮体基礎上に風車を組み立て、発電海域への曳航及び係留工事がある。

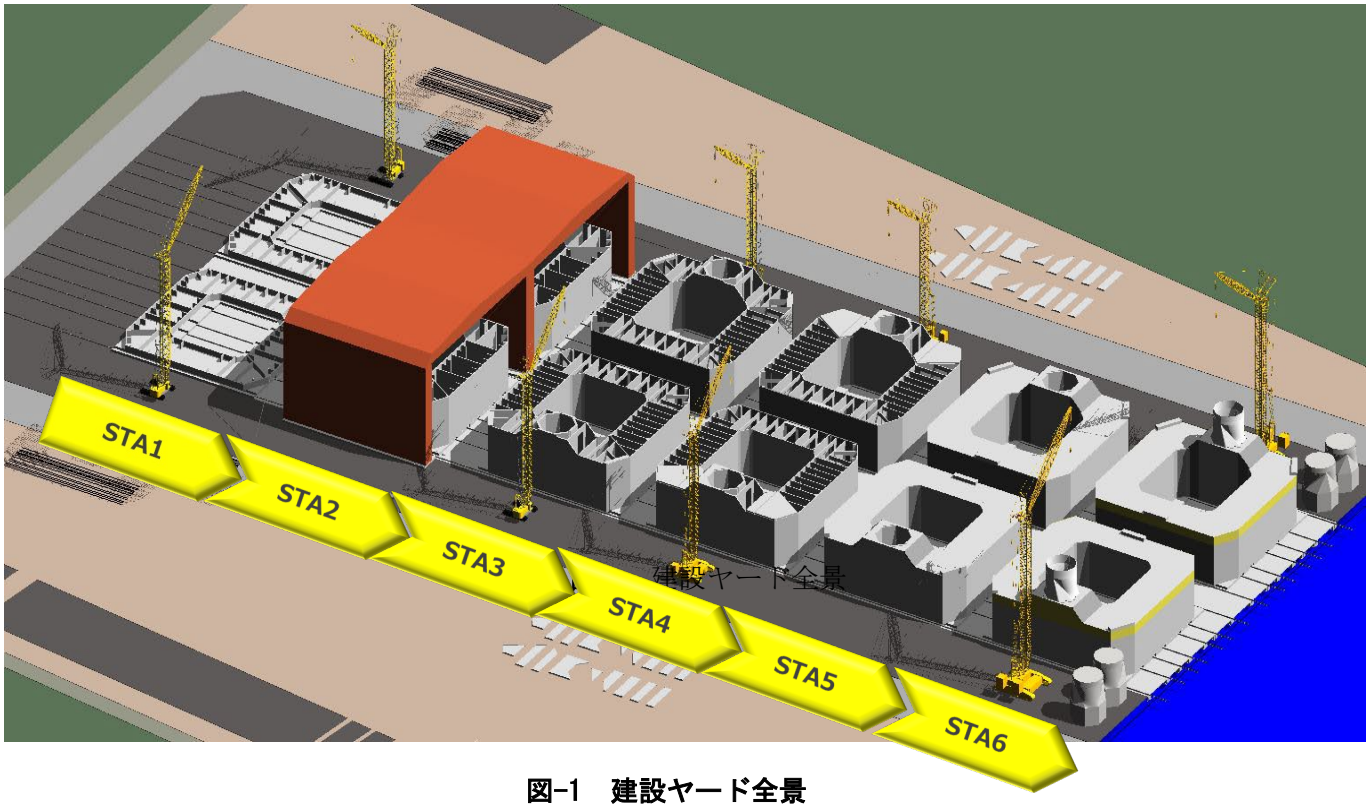


図-1　建設ヤード全景

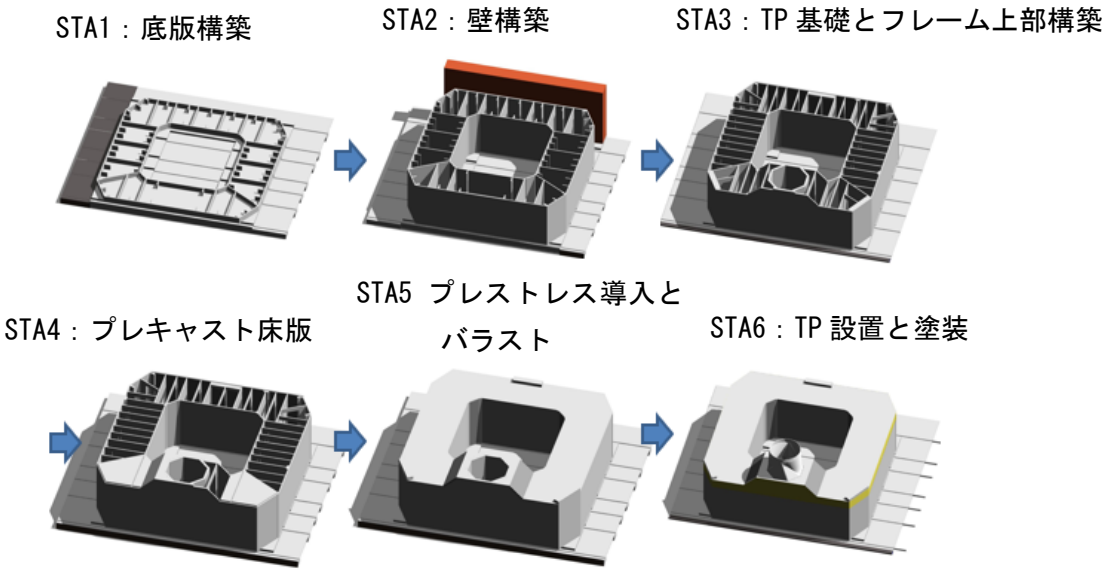


図-2　各工種の STA

ここで、建設時の特徴的な要素技術は、STA2：壁構築（スリップフォーム工法）と STA4：プレキャスト床版による上床版構築および、港湾条件に応じた港内移動時の一時的な喫水低減対策である。この 3 つの工種について細述する。

4. 壁構築（スリップフォーム工法）（STA2）

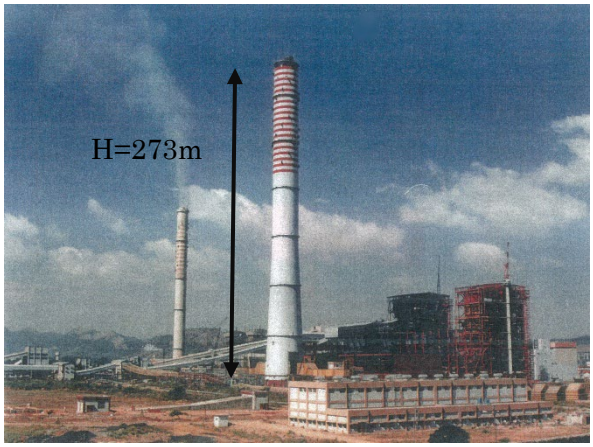


写真-3　煙突（高さ 273m）の在来型スリップフォーム施工状況 [5)]

スリップフォーム工法は、高い塔状の構造物を急速施工するために開発、発達した工法である。今回採用の BYUM 社（Bygging-Uddemann AB）の従来型スリップフォーム工法により、**写真-3** で示す当社施工のインド国石炭火力発電所の高さ 273m の煙突の施工で円筒状壁部を 6 カ月で急速施工されている [5)]。加えて、構造的弱点になりやすいコンクリートの打継目を発生させず、海洋構造物に関しては大きな利点がある。

その一方でスリップフォームでは一つの壁部の施工を終了した後に、型枠を解体し別の基礎位置まで移動させ、別の基礎の壁部用に型枠を組みなおす必要があった。この後に開発されたガントリースリップフォーム工法はこの問題を解決するものであり、型枠は組立解体せずに、そのままの平面位置で門型形状の架構に設置した油圧ジャッキで型枠を上下させ、その代わり構築対象の基礎を門型形状の架構位置まで移動させる工法である。**写真-4** に示す港湾の岸壁や防波堤のケーソン壁部を構築する工法に採用されている。これにより、ほぼ平面形状が鉛直方向に等しい壁部を高さ 3m／日の速度で施工可能である。



写真-4　港湾の岸壁や防波堤のケーソン側壁部を構築するガントリースリップフォーム工法

今回のガントリースリップフォーム工法の採用に当たり、壁部材の厚さ、形状、配筋、PC シースと定着部を実寸で再現し施工するモックアップテストを**写真-5** の例を基に、計画、実施予定である。

本スリップフォーム工法は港湾防波堤などのケーソンで使われた実績がある。これらの実績のある構造に対し、本研究で扱う構造は、平面的にフレームなどの梁がある複雑な形状、密度が高く複雑な配筋状況及び、PC 定着部等の存在がある。そのため、これらを実物大で再現した**図-3** に示すようなモックアップテストを事前に施工することにより、施工時の品質を事前に確認し、



写真-5　港湾のケーソン用モックアップテスト例

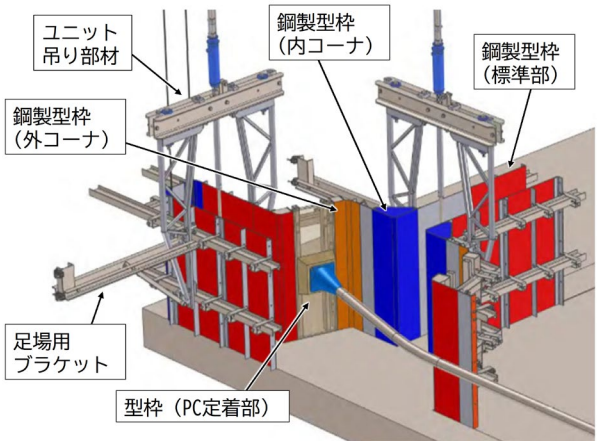


図-3　本研究で扱う構造のモックアップテスト計画

確保することとしている。

5. プレキャスト床版による上床版構築（STA4）

(1) 上床版施工方法

STA4 に位置において、**図-4** のようにプレキャスト床版（Precast concrete panel）による上床版構築を行う。具体的には、あらかじめ製造しておいたプレキャスト床版を外壁（Outer wall）と隔壁（Bulkhead）の上端部に並べる。その後、プレキャスト床版間などの継目に高強度繊維補強コンクリート（UFC）を打設して一体化接合する。

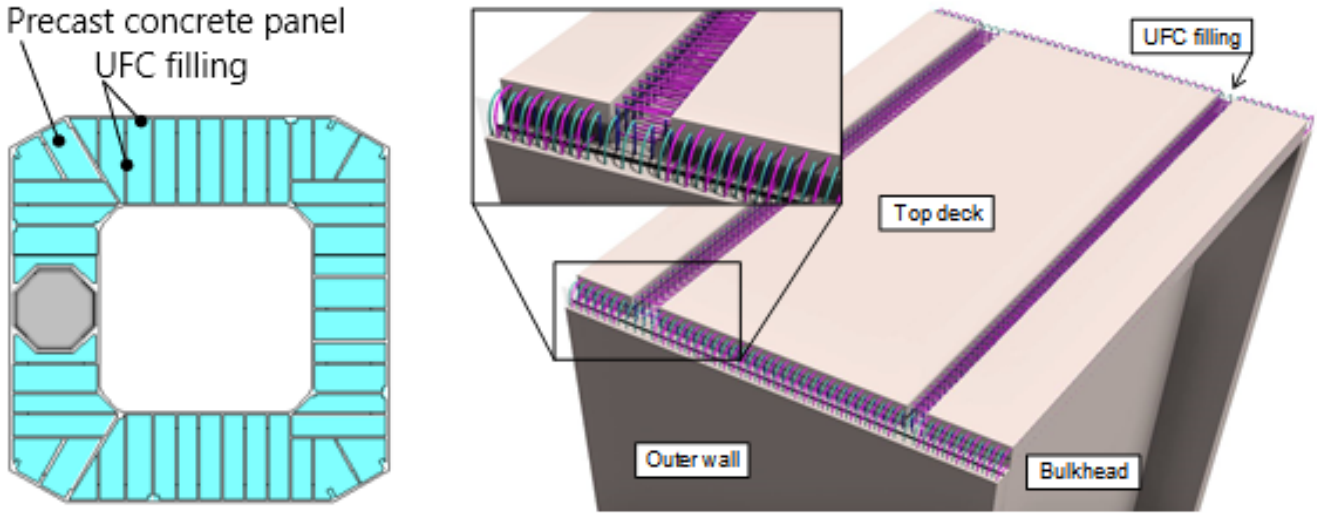


図-4　プレキャスト床版間の継目

(2) 接合部構造の曲げ破壊試験

プレキャスト床版のスパン長、部材厚、配筋状況、継目、高強度繊維補強コンクリート（UFC）による接合を再現し、その安全性を確認するために、曲げ破壊試験を実施した。載荷試験の結果、ひび割れ状況及び終局状況も通常の継ぎ目なしと同等の結果が得られ、内容は前回報告済みである。[1)]



写真-6　実構造物の配筋を再現した継手部の配筋状況



写真-7　供試体の曲げ破壊実験の終局状

(3) 接合部構造の水中曲げ疲労試験

プレキャスト床版を用いた上床版構築の安全性を確認するため、前項の気中での接合部構造の曲げ破壊試験に加えて、「接合部構造の水中曲げ疲労試験（疲労特性確認）」に関する実験を行った。

上床版接合部の曲げ疲労試験（１／４スケール）の試験装置の全景を**写真-8** に、試験装置側面を**図-5** に示す。



写真-8　試験装置の全景

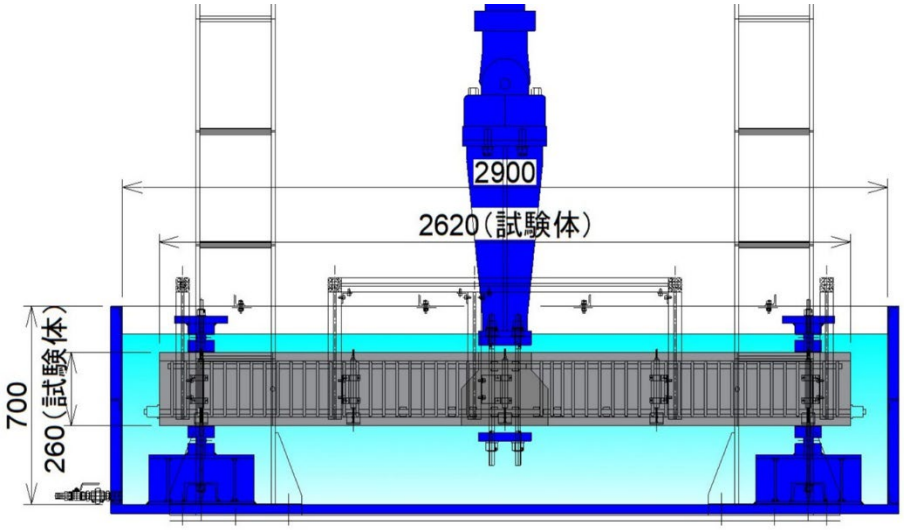


図-5　試験装置側面図

強度比（荷重/降伏強度）70%での、**図-6** に示す接合部なしと接合部ありの実験を行った。

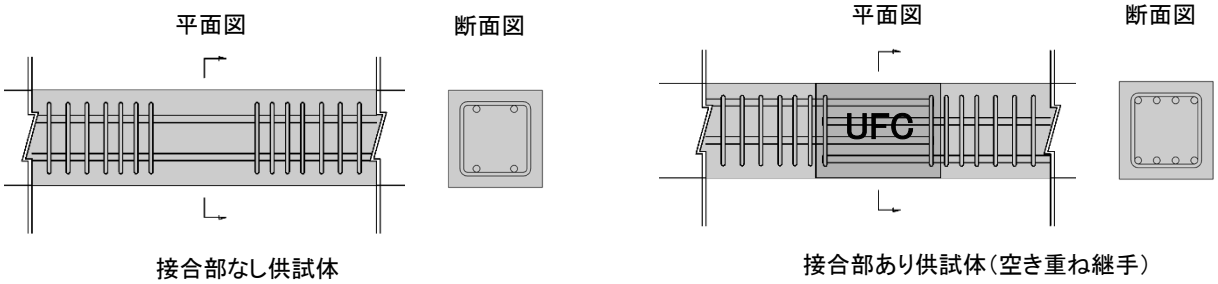


図-6　接合部なしと接合部ありの供試体

その結果、接合部なしでは載荷回数 N=22 万回、接合部ありでは載荷回数 N=15 万回の結果を得た。
比較のために、接合部なしの疲労強度 JSCE 式コンクリート及び鉄筋の式をそれぞれ以下に示す。

・コンクリート：

$$\log N = K - \frac{f_{rd}^{'} \cdot K}{k_1 f\left(f_d - \sigma_p\right)}$$

ここに、

N	：疲労寿命（繰り返し回数）
K	：材料定数（水で飽和されている K=10）
f_{rd}	：コンクリート設計疲労強度
f_d	：設計疲労強度（材料係数 γ_c=1.3 を考慮）
k_{1f}	：定数（圧縮 0.85）
σ_p	：永続荷重による応力

・鉄筋：

$$N = \left(\frac{190\times10^{a}}{f_{srd}\times\gamma_s}\times\left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right)\right)^{\frac{1}{k}}$$

ここに、

N　：疲労寿命（繰り返し回数）
a　：定数　$k_{0f}(0.81\text{-}0.003\phi)$，$k_{0f}$=1.0 ，　ϕ=鉄筋直径(mm)
k　：定数（疲労寿命 2×10^6 回以下の場合k=0.12）
f_{srd}　：鋼材の設計疲労強度
γ_s　：鉄筋に対する材料係数（1.05）
σ_{sp}　：永続荷重による応力（平均応力）
f_{ud}　：鉄筋の設計引張強度

図-7 はこれらの式による S-N 曲線に、接合部の有無による実験結果をプロットし整理したものである。接合部ありの場合、強度比（荷重/降伏強度）70%では、実験の破壊回数 N=15 万回であり、この値は土木学会コンクリート標準示方書によるコンクリート破壊載荷回数 33,338 回を上回る結果となっている。このことは、本強度比における接合部の継手構造の安全性を示すものであると考えられる。

実験では最終的に圧縮縁コンクリートの破壊で終局状態に至った。その原因として、水中載荷によってコンクリートの疲労が加速された可能性や、繰り返しの引張応力作用により鉄筋の付着が低下したことで、圧縮縁に急激にひずみが蓄積して破壊に至った可能性が考えられる。これを確認するため、試験後の試験体を切断し、コンクリートと鉄筋との付着劣化の範囲を把握することとした（**図-8**）。その結果、UFC を用いた接合部では鉄筋周囲の付着劣化とみられる損傷は観測されず、プレキャストコンクリート部分において、付着劣化とみられる鉄筋とコンクリート界面での損傷が見られた。今後は、接合部なしの付着劣化範囲とも比較検討を行うとともに、数値解析を含めた検討を行っていく予定である。

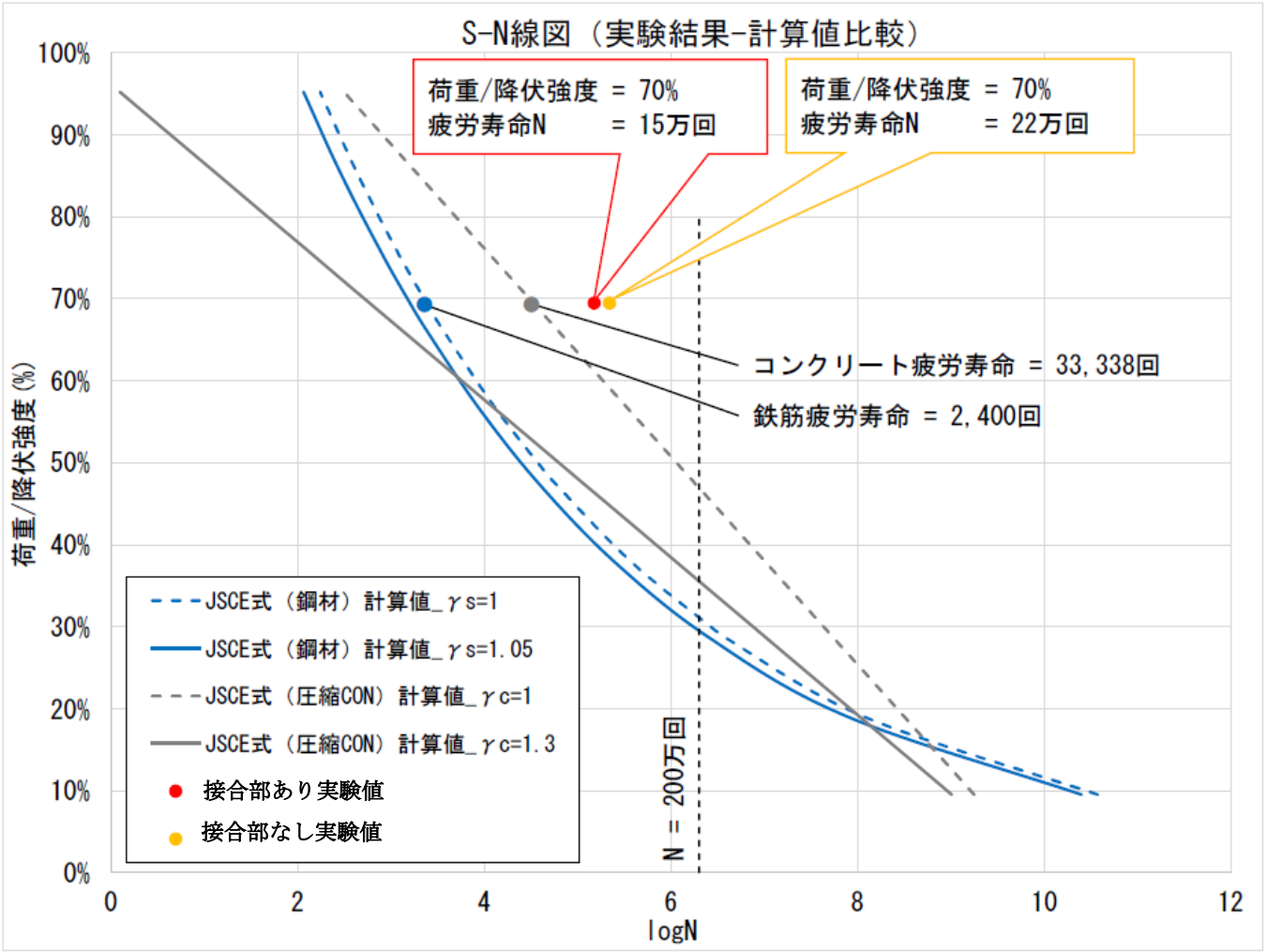


図-7　疲労強度 JSCE 式による S-N 曲線と実験結果

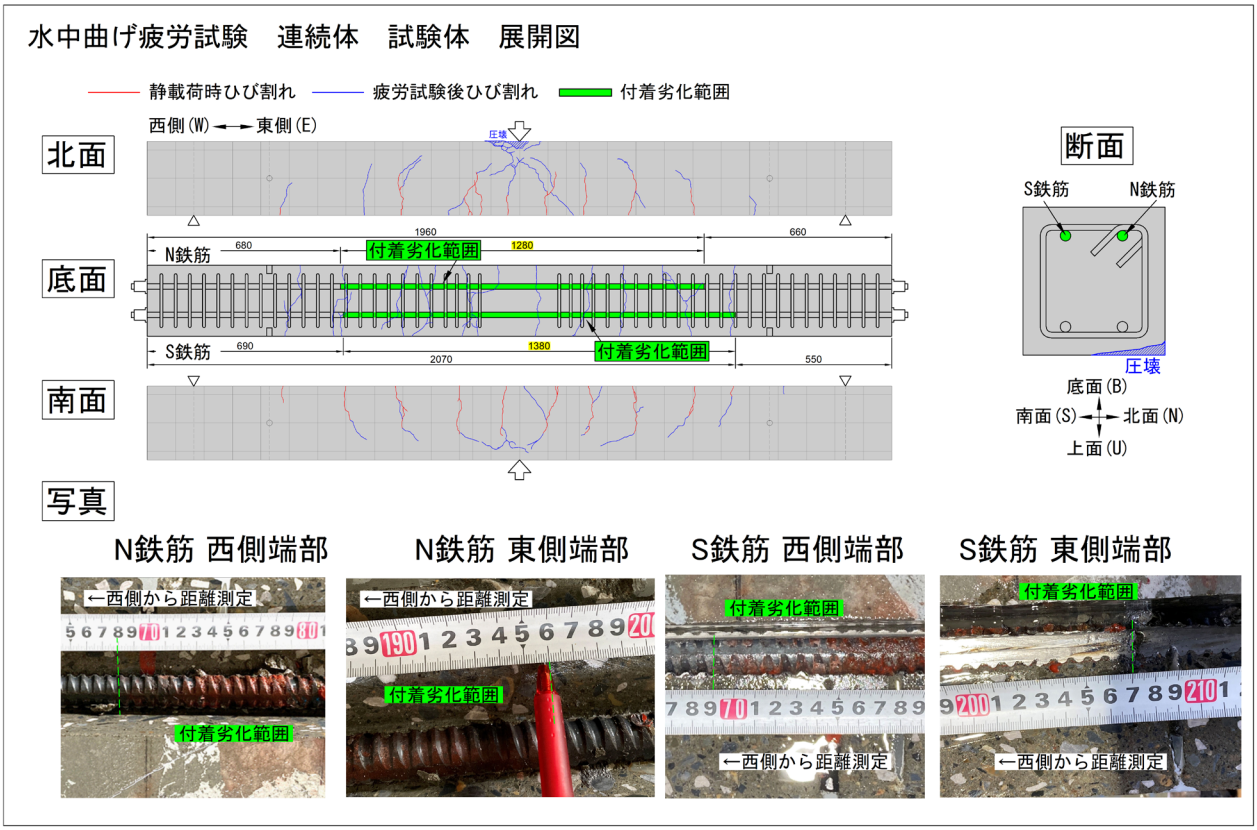


図-8　鉄筋の付着劣化範囲

6. 浮体基礎の浮力増加対策の計画

陸上ヤードでの浮体基礎建造後に、浮体基礎の進水台船への引出と進水などの港内での海上工事がある。その後、通常同一港内で浮体基礎上への風車組み立てから港内での浮体基礎の移動がある。この港内での浮体基礎の移動には港内の水深による制約があり、浮体基礎の喫水の大きさにより、使用可能な岸壁または護岸が制限される。BW Ideol社のコンセプトは他の浮体形式と比較して、喫水が浅く上記の制約が相対的に軽減される強みがあるが、それでもなお制約を無視できるものではない。そのため、港湾内作業時の浮体基礎の喫水を小さくして、使用可能な岸壁または護岸の選択範囲を広くすることを目的として、本浮体基礎形状に特化した浮力増加対策を検討することとした。

具体的には、本浮体基礎形状に特化した浮力増加対策を以下のように計画している。

初めに、大きな面積の屋根を屋根の上下の空気圧の圧力差を膜構造で支える東京ドームの構造（**写真-9**）に倣う。



写真-9　東京ドームの鳥瞰（左写真）と側面（最大対角スパン：約 201 m）

次に膜構造の上下の圧力差を空気圧から水圧の差で置き換えて考え、ムーンプール内部の水位と外の水位の差、すなわち水圧の圧力差より、増加した浮力を得、浮体の喫水の縮小に対応する。**図-9**に、喫水1m低減するために、ムーンプール内部の水位と外の水位の差が2.48m必要となり、本膜構造に水位差分の圧力が均

等に上向きに作用する状況を示す。なお、水位差はポンプで調整できるので、本膜構造に完全な遮水性は要求されない。

この構造を装着し港内を移動したのちに、港内の静穏域から、港外に曳航する前に本膜構造を脱着して、次の浮体基礎に再利用する計画である。

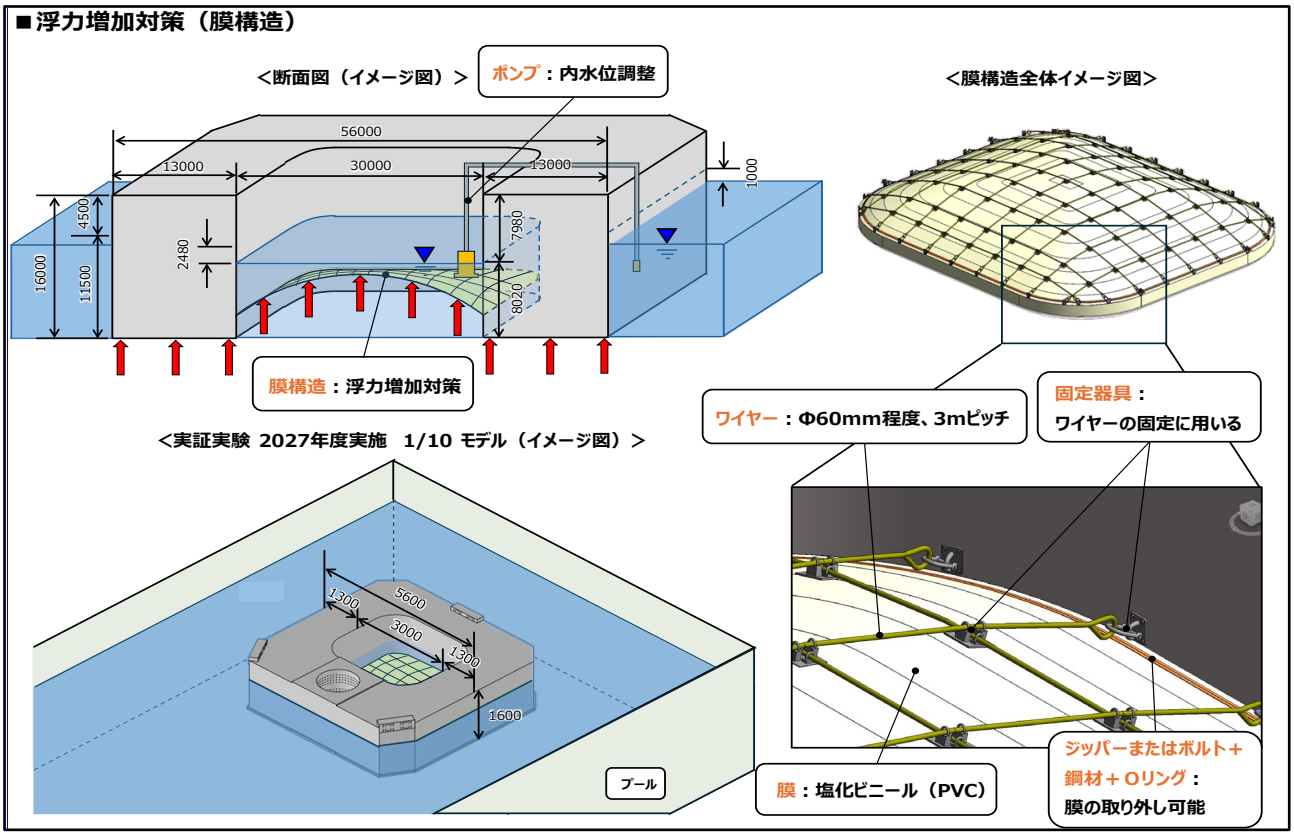


図-9　浮力増加対策の膜構造（最大対角スパン：約 42 m）の詳細と実証実験 1/10 モデル

今後実装するまでに、本膜構造の水中での挙動を把握すべく、1/10 モデルの実験を実施したい。

7. 今後の計画

BW Ideol 社の設計するコンクリート製浮体式洋上風力発電基礎は、ガントリースリップフォーム工法に特に適しているが、複雑な箇所の施工は事前に十分な検討を実施し、経済的に大量生産できるようにする必要がある。

アルソシア建設は、日本の建設基準に従って BYUM スリップフォーム工法技術を使用した BW Ideol の浮体基礎の建設方法を継続的に検討し、今回実施したプレキャスト床版間の接合部構造の水中曲げ疲労試験結果に関する解析評価や、モックアップテストの実施及び港湾適用範囲の拡大を目的とした、一時的な喫水低減対策の模型実験を計画している。このような検討は、2030 年以降に計画されている最初の浮体式洋上風力発電所プロジェクトの実施に合わせてこれからもタイムリーに実施していく予定である。

参考文献

1) 澤井淳司他：コンクリート製浮体式洋上風力発電基礎の建設、土木学会「土木建設技術発表会 2024」セッションⅣ施工技術一般、2024 年 11 月 14 日
2) コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドライン、国土交通省海事局、2023 年 3 月
3) Thomas Choisnet 他：INITIAL COMPARISON OF CONCRETE AND STEEL HULLS IN THE CASE OF IDEOL'S SQUARE RING FLOATING SUBSTRUCTURE, WWEC 2016
4) 三井建設㈱、三井造船㈱：PC バージ実験船の応力測定、共和技報第 237 号、1977 年 11 月
5) 溝田順一、澤井淳司：海外フィールド素描悠久の大地インド、土木学会誌、1993 年 3 月号