

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和7年度 研究開発助成 成果報告書
助成番号 : 令和 6 年 11 月 30 日付 第 15ー 6 号
研究開発項目 : (番号) ⑤ に関するもの

接合部を有する PRC 部材の 数値解析手法による分析

令和 8 年 4 月 30 日

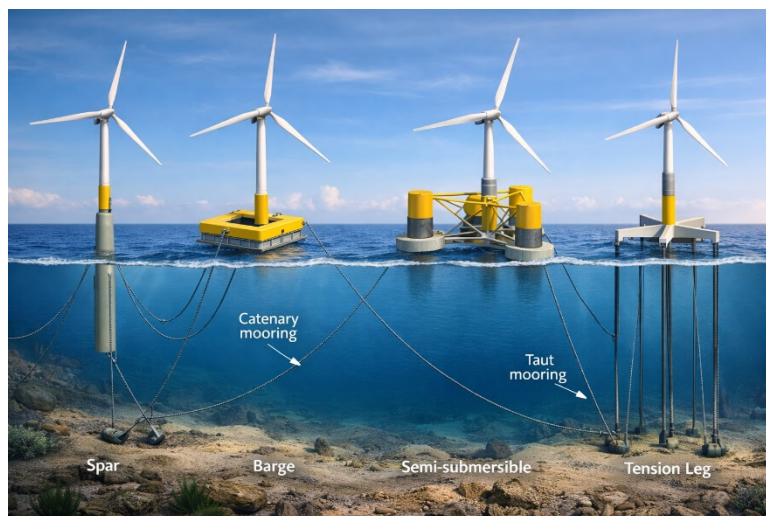
横浜国立大学
小松怜史

目 次

第 1 章 はじめに	1
第 2 章 既往の文献整理	2
2.1 洋上構造物に関する既往研究	2
2.2 接合部挙動に関する既往研究	2
第 3 章 解析モデルの概要	3
3.1 目的	3
3.2 モデル化の概要	3
(1) メッシング	3
(2) RC 要素	4
(3) PC 鋼棒	4
(4) BOND 要素	5
3.3 荷重条件	6
第 4 章 解析結果	7
4.1 フェーズ 1	7
4.2 フェーズ 2	8
(1) 荷重反力—接合部ずれ変位関係	8
(2) コンクリートひずみ分布、試験体の破壊状況	9
(3) PC 鋼棒とコンクリートの剥離・付着挙動	9
第 5 章 結論及び今後の展開	10

第1章 はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの導入拡大が世界的に進められている。中でも洋上風力発電は、大規模な発電量が期待でき、陸上用地の制約を受けにくいことから、重要な電源の一つとして位置づけられている。日本においても、2030年までに10 GW、2040年までに30～45 GWの案件形成を目標としており、今後さらなる普及が見込まれている。一方で、沿岸部の浅海域には限りがあるため、将来的にはより深い海域への展開が不可欠であり、浮体式洋上風力発電の重要性が高まっている。



浮体式洋上風力発電では、風荷重、波浪荷重、係留力、タワー基部モーメントなどが複雑に作用し、支持構造には長期的な疲労耐久性と高い信頼性が求められる。浮体構造の材料としては鋼材が広く用いられてきたが、コンクリートは耐久性、耐食性、疲労抵抗性、維持管理性の面で利点を有しており、ライフサイクル性能の観点からも有望な選択肢である。また、大型浮体を一体で製作することは困難であるため、プレキャスト部材を用いたモジュール化施工は、製作、運搬、組立の合理化に有効である。

しかし、モジュール化により部材間には接合部が生じる。接合部はせん断力や圧縮力を確実に伝達するとともに、繰返し荷重下でのすべり、開口、ひび割れの進展を抑制し、漏水を防止する必要がある。特に浮体式構造物では、接合部の耐力が十分であっても、損傷後に連続した漏水経路が形成されれば、鉄筋腐食や維持管理負担の増大につながり、長期信頼性を損なう可能性がある。

そこで本研究では、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体のモジュール接合部を対象に、プレストレスを導入した平面接合部のせん断挙動を解析的に検討する。昨年度の研究において、気中環境における静的せん断載荷試験を行った。COM3 による非線形有限要素解析を通じて、プレストレス導入、付着、接合面挙動を考慮した数値解析手法の構築を目指す。

第2章 既往の文献整理

2.1 洋上構造物に関する既往研究

洋上風力発電の導入拡大に伴い、支持構造物には大水深海域への適用性、長期耐久性、施工性、維持管理性が求められている。特に浮体式洋上風力発電では、風荷重、波浪荷重、係留力、タワー基部モーメントなどが複合的かつ繰返し作用するため、支持構造物全体の安定性だけでなく、疲労や供用性を考慮した設計が重要となる。

Fernandez and Pardo は、海洋コンクリート構造物について、耐久性、施工方法、ライフサイクルコストの観点から整理しており、コンクリートが海洋構造物において有効な構造材料であることを示している。また、Mathern et al. は、洋上風力発電用コンクリート支持構造の現状、課題、将来展望を整理し、鋼構造と比較した場合の耐久性、疲労抵抗性、維持管理性の利点を指摘している。さらに、Edwards et al. は、浮体式洋上風力プラットフォームの実海域適用事例を整理し、スパー型、セミサブ型、バージ型、TLP 型などの構造形式が、水深、港湾条件、施工方法、維持管理方針に応じて選定されることを示している。

一方で、浮体式コンクリート構造物は大型であり、一体製作には限界がある。このため、プレキャスト部材を用いたモジュール化施工が有効な方法として考えられている。Fujiyama and Munbua は、日本における洋上風力発電用コンクリート浮体構造の実現に向けた課題を整理しており、構造性能だけでなく、製作、輸送、施工を含めた総合的な検討の必要性を示している。これらの研究より、浮体式洋上風力発電におけるコンクリート構造物は有望である一方、モジュール化に伴う接合部の性能評価が重要な課題であると位置づけられる。

2.2 接合部挙動に関する既往研究

モジュール化されたコンクリート浮体構造物では、部材間の接合部が構造性能および水密性能を支配する重要部位となる。接合部では、表面接触、摩擦、骨材かみ合わせ、プレストレスによる拘束圧、PC 鋼棒や鉄筋によるダウエル作用、グラウトの付着、せん断キーや止水材などが複合的に作用して応力が伝達される。したがって、接合部を完全な連続体として仮定すると、すべり、開口、付着劣化、ひび割れ連結、漏水経路の形成を過小評価する可能性がある。

Jiang et al. は、コンクリート製モジュール型浮体構造の挙動を検討し、モジュール化によって施工性や製作性は向上する一方、接合部が構造全体の性能に大きく影響することを示している。Zewdie et al. は、繰返し載荷下におけるダウエル筋の寄与と付着劣化を検討し、接合部の荷重伝達機構が載荷履歴により変化することを示している。

コンクリート界面のせん断伝達に関して、Santos and Julio は、せん断摩擦理論に基づき、界面せん断強度が表面粗さ、圧縮応力、補強筋量、コンクリート強度、載荷履歴、施工品質に依存することを整理している。また、Davaadorj et al. は、コンクリート界面におけるせん断応力伝達の実験結果を分析し、界面条件の違いがせん断耐力評価に大きく影響することを示している。

さらに、浮体式構造物では波浪や風に起因する繰返し作用を受けるため、接合部の疲労損傷や残留変形の評価も重要である。Maekawa et al. は、コンクリート接合界面における経路依存型の高サイクル疲労モデルを提案し、界面損傷が載荷履歴に依存して進展することを示している。Gebreyouhannes et al. は、ひび割れを有するコンクリート界面のせん断疲労挙動を検討し、繰返しせん断により骨材かみ合わせや摩擦抵抗が徐々に低下することを明らかにしている。Kiyomiya et al. は、波浪荷重を受ける PC 梁柱接合部の疲労特性を検討し、水中環境が接合部の疲労性能に影響し得ることを示している。

以上より、接合部挙動に関する既往研究では、せん断伝達、付着劣化、ダウエル作用、繰返し載荷による損傷進展について多くの知見が蓄積されている。しかし、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体のモジュール接合部を対象とした研究は限られている。

第3章 解析モデルの概要

3.1 目的

本章では、プレストレスを導入したコンクリートモジュール接合部を対象に、COM3 による三次元非線形有限要素解析の概要を示す。実験では、気中・水中環境、静的・繰返し載荷条件の違いを比較しているが、供試体数は限られており、接合部形状、プレストレス量、界面剛性、付着条件、載荷履歴などの影響を実験のみで網羅的に評価することは困難である。そのため、実験結果を補完し、将来的なパラメトリック解析へ展開するために数値解析モデルを構築する。

本解析の目的は、単に最大荷重を再現することではなく、プレストレス導入、プレストレス損失、初期剛性、接合面のすべり・開口、ひずみ再分配、ひび割れ発生・進展、PC 鋼棒周辺の付着劣化、最終破壊に至る一連の挙動を再現することである。特に本研究では、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体のモジュール接合部を想定しているため、接合部のせん断耐力だけでなく、供用時の変形性能や損傷進展、さらには漏水経路形成に関わる接合面挙動を把握することが重要である。

3.2 モデル化の概要

(1) メッシング

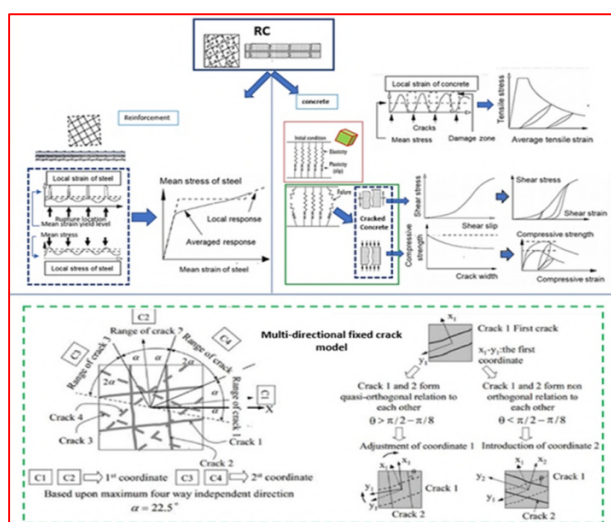
本解析では、供試体全体を三次元ソリッド要素によりモデル化し、要素寸法は概ね 10～50 mm の範囲で設定した。特に、せん断すべり、開口、ひび割れの局所化が生じる中央接合部、PC 鋼棒定着部、載荷点および支持点近傍では、応力勾配やひずみ集中を適切に表現するため、10～30 mm 程度の比較的細かいメッシュを用いた。一方、応力変化が比較的緩やかな領域では、計算効率を考慮して最大で 50 mm 程度の要素寸法とした。

また、要素形状による数値誤差を抑制するため、要素のアスペクト比は概ね 1:1～3:1 の範囲に収めることを基本とし、急激な要素寸法の変化を避けるため、隣接要素間の寸法変化率は概ね 1.5 以下 となるように配慮した。接合部近傍では、ひび割れの発

生・進展、接合面のすべり・開口、PC 鋼棒周辺の付着劣化が解析結果に大きく影響するため、メッシュ分割と界面要素の配置を重点的に行った。以上により、接合部の局所挙動を表現しつつ、解析の安定性および計算効率の両立を図った。

(2) RC 要素

コンクリート部は、8 節点三次元ソリッド要素によりモデル化する。COM3 では、多方向非直交固定ひび割れモデルに基づき、コンクリートの引張ひび割れ、引張軟化、引張剛性、圧縮塑性、圧縮軟化、ひび割れ面のせん断伝達を考慮する。ひび割れ発生後も、鉄筋とコンクリートの付着により、ひび割れ間のコンクリートが引張応力を一部負担するため、テンションスティフニング効果を考慮する。



鉄筋は、コンクリート要素内に分散鉄筋として与える。主鉄筋およびせん断補強筋は、ひび割れ幅の抑制、ひび割れ後の応力再分配、降伏、拘束効果に寄与するものとしてモデル化する。鉄筋の材料モデルとして、降伏応力までは弾性挙動を示し、降伏後は低い接線剛性を有するバイリニア型の弾塑性モデルを用いる。

(3) PC 鋼棒

PC 鋼棒は、接合部を貫通する 36 mm 径の鋼棒として明示的にモデル化する。PC 鋼棒は、接合面にプレストレスによる拘束圧を導入し、接合面の摩擦抵抗を高めるとともに、接合部に相対すべりが生じた際にはダウエル作用によりせん断伝達に寄与する。

解析では、PC 鋼棒を弾性要素としてモデル化するとともに、プレストレスを導入するための線要素を用いる。PC 鋼棒の材料特性として、引張強度 1282 MPa、降伏荷重 1186 kN、ヤング係数 206 kN/mm²と設定した。PC 鋼棒は軸方向のプレストレスだけでなく、接合部近傍での曲げ変形や横せん断作用も受けるため、接合部におけるダウエル作用を表現できるように明示的なモデル化が必要である。

(4) BOND 要素

本解析では、接合部および鋼材・治具との接触部における局所挙動を表現するため、複数の BOND 要素を導入した。主な対象は、PC 鋼棒－グラウト／コンクリート界面、コンクリートモジュール間の中央接合面、載荷プレート－コンクリート界面、および支持プレート－コンクリート界面である。これらの界面では、すべり、開口、再接触、摩擦抵抗、付着劣化などが発生するため、完全一体化モデルとはせず、ゼロ厚の BOND 要素によりモデル化した。

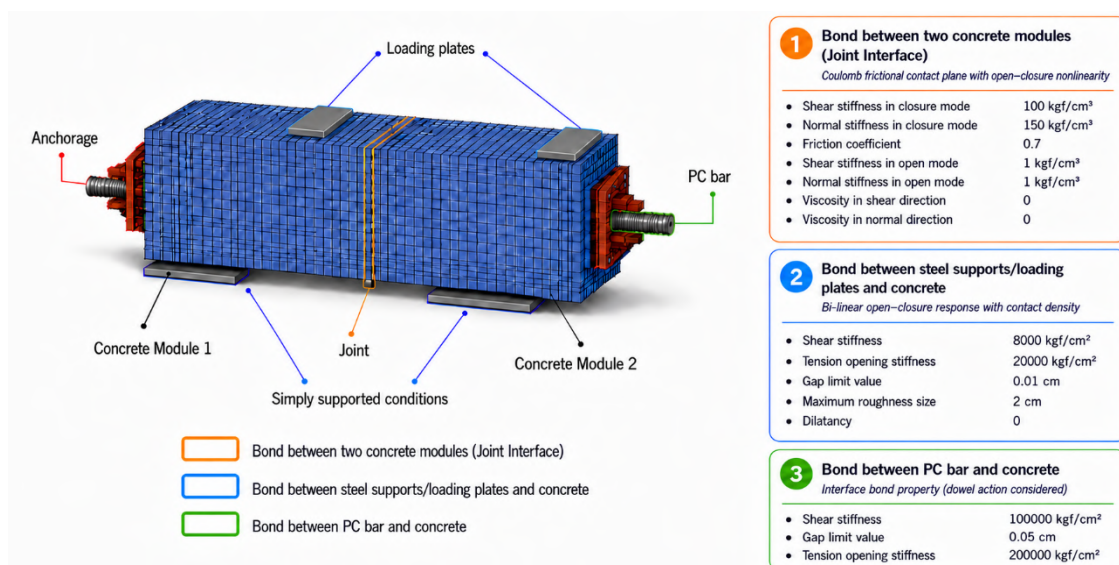
PC 鋼棒周辺には、PC 鋼棒とグラウト、グラウトと周辺コンクリート、および定着部近傍の局所損傷を含む複合的な付着挙動を表現するため、BOND/BONDF 要素を配置した。この界面には、せん断剛性 $K_s = 100,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、法線剛性 $K_n = 200,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、ギャップ限界値 0.05 cm を設定した。これにより、PC 鋼棒周辺の付着すべり、開口、引抜き、支圧およびダウエル作用を考慮した。

一方、載荷プレートおよび支持プレートとコンクリートとの界面は、鋼板とコンクリートが付着しているものではなく、接触・摩擦により荷重を伝達する領域である。

載荷プレート－コンクリート界面に関して、載荷時の鉛直荷重を安定して伝達しつつ、鋼板とコンクリートを完全一体化させないため、せん断剛性 $K_s = 8,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、法線剛性 $K_n = 20,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、摩擦係数 $\mu = 0.3$ を設定した。法線剛性は、載荷時の過度なめり込みを防ぎ、鉛直方向の支圧を適切に伝達するために比較的大きく設定した。一方、せん断剛性は法線剛性より小さくし、載荷プレートがコンクリートと完全合成された部材として作用しないようにした。

支持プレート－コンクリート界面について、鉛直反力を確実に伝達しながら、実験におけるローラー支持に近い水平自由度を再現する必要がある。そのため、法線剛性は載荷プレートと同じ $K_n = 20,000 \text{ kgf/cm}^2$ とし、鉛直反力を安定して伝達させた。一方、せん断剛性は $K_s = 1,000 \text{ kgf/cm}^2$ と低く設定し、水平方向の拘束を小さくした。摩擦係数は載荷プレートと同様に $\mu = 0.3$ とした。支持部のせん断剛性を過度に大きくすると、水平変位や回転が不自然に拘束され、初期剛性や斜めひび割れの発生経路に影響を及ぼす可能性があるため、本解析ではローラー支持に近い挙動を表現する設定とした。

中央のコンクリートモジュール間接合面には、プレストレスによる拘束圧を受けながら、せん断すべり、開口、再接触を生じるため、PC 鋼棒周辺の界面よりも低い剛性を設定した。

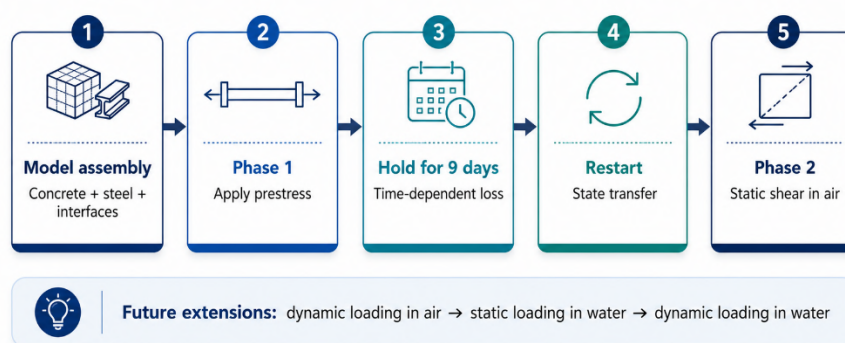


3.3 荷重条件

解析は、実験手順に対応して段階的に実施する。

第1段階では、PC 鋼棒にプレストレスを導入する。この段階では、グラウトの付着が十分に発現していない状態を想定し、PC 鋼棒と周辺コンクリートの付着を有効化しない条件でプレストレスを導入する。目標プレストレス力は約 900 kN であり、これは接合面積 85,050 mm² で除すと、平均拘束圧約 10.6 MPa に相当する。

第2段階では、COM3 のリスタート機能を用いて、第1段階で得られた応力、ひずみ、界面状態、時間依存内部変数を引き継ぎ、静的または繰返しせん断载荷を行う。静的载荷では、実験と同様に低速度の単調载荷により破壊まで载荷する。



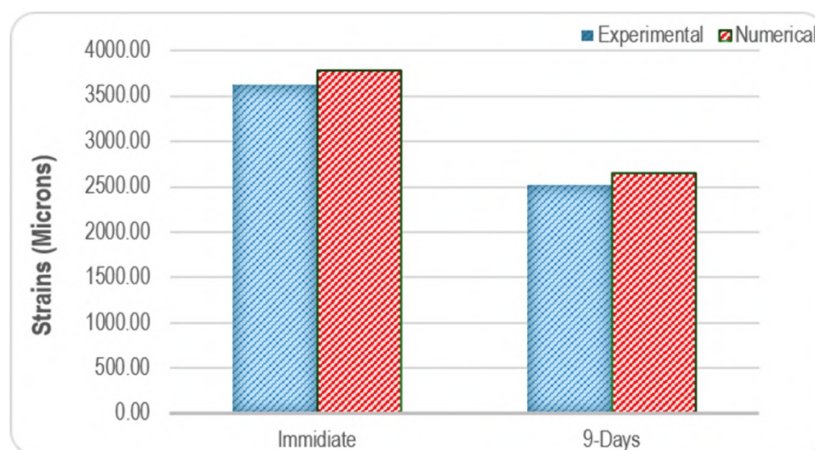
第4章 解析結果

4.1 フェーズ1

フェーズ1では、せん断載荷解析に先立ち、PC 鋼棒へのプレストレス導入を再現した。本段階では、実験においてグラウトによる付着が十分に発現する前に PC 鋼棒を緊張する状態を想定し、PC 鋼棒と周辺コンクリートとの付着を有効化しない条件で解析を行った。目標プレストレス力は約 900 kN であり、このプレストレスにより中央接合面に圧縮力を導入した。

プレストレス導入直後の解析結果は、PC 鋼棒ひずみにより実験結果と比較した。実験における PC 鋼棒の平均ひずみは約 3623 μ であったのに対し、解析値は約 3769 μ であり、両者の差は約 4%であった。このことから、解析モデルはプレストレス導入直後の PC 鋼棒の応力状態を概ね良好に再現できていると判断される。

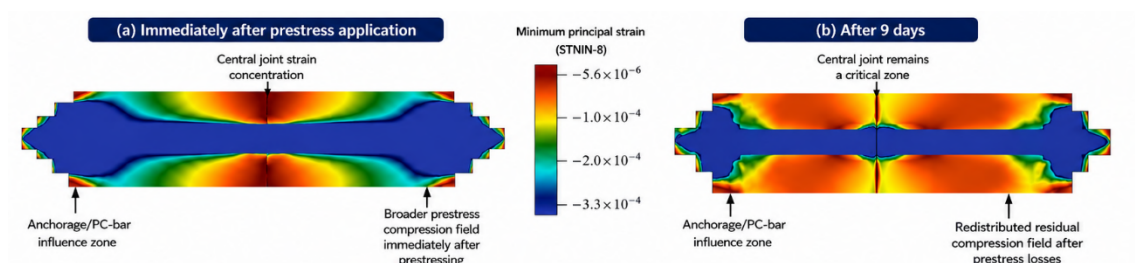
その後、実験条件に対応させるため、せん断載荷開始前の約 9 日間の保持期間を解析上でも考慮した。この期間中には、コンクリートの時間依存挙動や定着部・接合部を介した応力再分配により、プレストレス力が低下する。9 日経過後の PC 鋼棒の平均ひずみは、実験値が約 2517 μ であったのに対し、解析値は約 2650 μ であり、解析値は実験値を約 5.02%上回った。ただし、その差は小さく、プレストレス損失後の有効プレストレス状態についても解析モデルは実験を概ね再現できている。



さらに、最小主ひずみ分布により、プレストレス力がコンクリート部材内へ伝達・再分配される過程を確認した。プレストレス導入直後には、PC 鋼棒の荷重伝達経路および定着部近傍に圧縮ひずみが集中し、PC 鋼棒周辺のコンクリートにも比較的広い圧縮領域が形成された。また、中央接合部では、PC 鋼棒、定着部および接合面を介してプレストレス力が伝達されるため、局所的なひずみ集中が認められた。

9 日経過後には、コンクリートの時間依存挙動およびプレストレス損失の影響により、圧縮ひずみ分布は導入直後に比べて滑らかになり、周辺コンクリート内へ再分配された。

一方で、PC 鋼棒軸方向、中央接合部および定着部近傍には圧縮ひずみが残存しており、せん断載荷開始直前においても有効なプレストレスが保持されていることが確認された。



以上より、フェーズ 1 の解析では、プレストレス導入直後およびプレストレス損失後の PC 鋼棒ひずみを実験結果と良好に対応させることができた。また、コンクリート内部の圧縮ひずみ分布からも、PC 鋼棒から周辺コンクリートおよび中央接合部へのプレストレス伝達が適切に表現されていることが確認された。したがって、本解析で得られたプレストレス状態は、後続の静的または繰返しせん断載荷解析における初期応力状態として妥当であると考えられる。

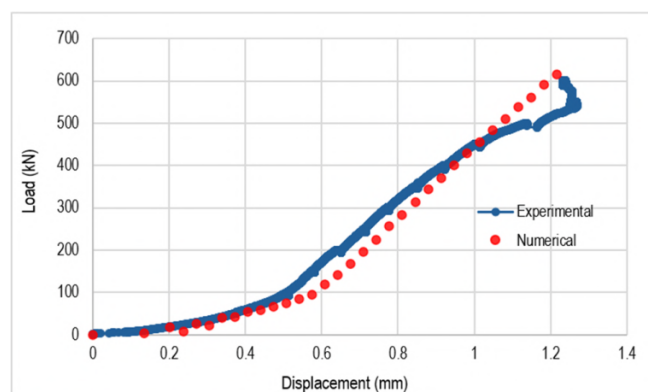
4.2 フェーズ 2

本節では、静的載荷・気中条件の試験体を対象として、COM3 による数値解析結果が実験結果をどの程度再現できているかを検証している。検証対象は、荷重—変位関係、コンクリートひずみ分布、PC 鋼棒とコンクリートの付着・剥離挙動、接合面のすべり・開口、破壊パターンおよび局部支圧損傷である。

(1) 荷重反力—接合部ずれ変位関係

荷重—変位応答については、初期剛性、勾配変化、局部剥離発生荷重、400～500 kN 付近の応答、最大荷重、最大荷重時変位などを比較している。

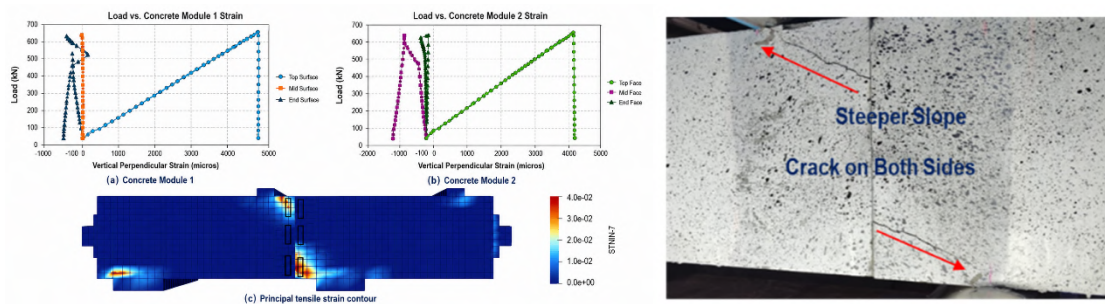
PC 鋼棒を明示的にモデル化し、プレストレスラインを併用したモデルでは、破壊モードはより現実的になった。



(2) コンクリートひずみ分布、試験体の破壊状況

コンクリートひずみは、解析上の最大ひずみだけではなく、実験のひずみゲージ位置に対応する箇所と比較している。実験では、中央接合部を中心とした相対回転に対応して、左右のコンクリートモジュールで反対向きのひずみ分布が確認された。

一方のモジュールでは、上部ゲージで約 $4,000 \mu\epsilon$ の引張ひずみ、中間ゲージで約 $500 \mu\epsilon$ 程度の反対符号のひずみ、下部ゲージではほぼゼロに近いひずみが生じている。隣接モジュールでは、これと逆の傾向が確認された。解析モデルもこの定性的なひずみ分布を再現しており、接合部の回転挙動および荷重伝達経路を概ね適切に表現できていると評価されている。

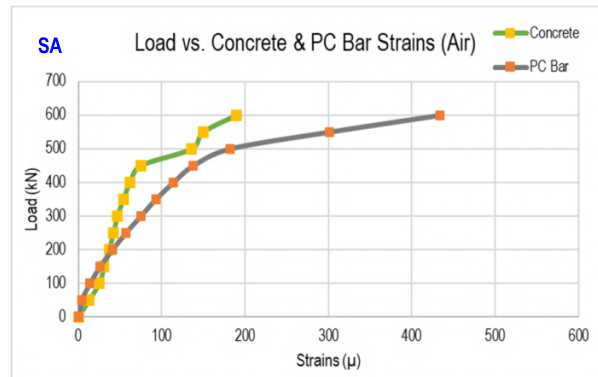
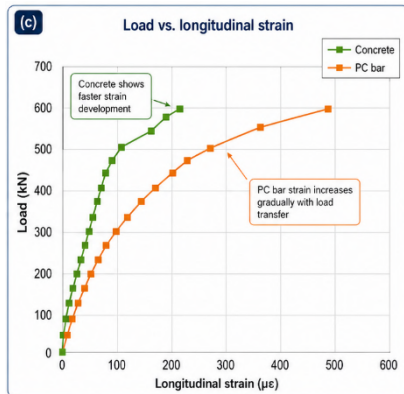


実験では、約 450 kN で上部ローラー直下に骨材剥落が確認された。解析でも、同じ位置に主引張ひずみが集中する領域が形成されている。この一致から、採用した開閉接触モデルが局部損傷の再現に有効であることが示されている。

また、この損傷は、載荷板とコンクリートが完全に一体化しているために生じたものではなく、ローラー直下の支圧およびせん断応力集中に起因する局部損傷であると解釈されている。

(3) PC 鋼棒とコンクリートの剥離・付着挙動

PC 鋼棒と周囲コンクリートの相互作用を確認するため、同じ位置における PC 鋼棒ひずみとコンクリートひずみを比較している。実験では、対象位置においてコンクリートひずみが約 $190 \mu\epsilon$ 、PC 鋼棒ひずみが約 $430 \mu\epsilon$ であり、解析でも同程度のひずみを得られている。



第5章 結論及び今後の展開

本研究では、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体のモジュール接合部を対象に、プレストレスを導入した平面接合部のせん断挙動を解析的に検討した。昨年度に行った、気中における静的せん断載荷試験に対して、COM3 による非線形有限要素解析を用いた適用性検証ならびに破壊挙動の分析を行った。以下に、得られた主な成果を示す。

- ・接合部を模した PRC 部材に関して、時間依存変形挙動を数値シミュレーションで概ね再現できることが分かった。

- ・荷重反力—ずれ変位関係では、100 kN 以降の剛性が実験と概ね一致し、差は約 8%程度であった。

- ・ひずみ分布・破壊性状についても、定性的に再現できた。

- ・PC 鋼棒とコンクリートのひずみ差についても、解析モデルが実験挙動を概ね説明できることが示された。

実際の海上環境における作用状態を再現するため、次のステップとして、接合部を有する試験体に対して水中でのせん断疲労実験の再現解析を実施する必要がある。さらに、波浪場で生じる繰り返し荷重を想定した動的荷重下での接合部のせん断疲労実験の再現解析も行う必要がある。そのうえで、小規模構造から大規模構造への展開も重要と考えている。

参考文献

- Agency for Natural Resources and Energy, METI. Japan's Offshore Wind Power Generation Now and the Future. 2025.
- Ministry of Economy, Trade and Industry. Cabinet Decision on the Bill for the Act for Partially Amending the Act on Promoting the Utilization of Sea Areas for the Development of Marine Renewable Energy Power Generation Facilities. 2024.
- Fujiyama, C., and Munbua, W. Toward the realization of concrete floating structures for offshore wind power generation in Japan. E3S Web of Conferences,

445, 01002, 2023.

- NEDO Green Innovation Fund. Cost Reductions for Offshore Wind Power Generation: Project information and demonstration operations. 2024-2025.
- IEA Wind TCP. Annual Report 2024: Japan. 2025.
- IRENA. Floating Offshore Wind Outlook. International Renewable Energy Agency, 2024.
- Jiang, D., Tan, K. H., Dai, J., Ang, K. K., and Nguyen, H. P. Behavior of concrete modular multi-purpose floating structures. *Ocean Engineering*, 229, 108971, 2021.
- Fernandez, R. P., and Pardo, M. L. Offshore concrete structures. *Ocean Engineering*, 58, 304-316, 2013.
- Mathern, A., von der Haar, C., and Marx, S. Concrete support structures for offshore wind turbines: current status, challenges, and future trends. *Energies*, 14(7), 1995, 2021.
- Edwards, E. C., Holcombe, A., Brown, S., Ransley, E., Hann, M., and Greaves, D. Evolution of floating offshore wind platforms: a review of at-sea devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113416, 2023.
- Santos, P. M., and Julio, E. N. A state-of-the-art review on shear-friction. *Engineering Structures*, 45, 435-448, 2012.
- Davaadorj, O., Calvi, P. M., and Stanton, J. F. Shear stress transfer across concrete-to-concrete interfaces: experimental evidence and available strength models. *PCI Journal*, 65(4), 2020.
- Maekawa, K., Fukuura, N., and Soltani, M. Path-dependent high-cycle fatigue modeling of joint interfaces in structural concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), 227-242, 2008.
- Gebreyouhannes, E., Kishi, T., and Maekawa, K. Shear fatigue response of cracked concrete interface. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(2), 365-376, 2008.
- Kiyomiya, O., Yokota, H., Abe, M., Kohriyama, O., Minamikawa, K., and Mukae, K. Fatigue properties of prestressed beam-column joints, with emphasis on offshore structures subject to wave loading. *Journal Prestressed Concrete Institute*, 33(6), 138-163, 1988.
- Zewdie, E., Soltani, M., and Maekawa, K. (2022). Extended multi-directional crack model applied to the RC joint interface area with dowel action. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20, 535-549.