

(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 2月 21日付 第 18- 7号
研究開発項目 : (番号) ② に関するもの

接合部を有する PRC 部材の 水中での曲げ疲労破壊挙動の解明

令和7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
第3章 予備解析	3
3.1 解析モデルの概要	3
3.2 解析の結果	5
第4章 実験条件	5
4.1 材料特性	5
4.2 実験条件	6
第5章 実験結果	10
第6章 結論および今後の展望	13

第1章 はじめに

世界各国は気候変動による緊急性を背景に、カーボンニュートラルを実現する誓約を表明している。2015 年のパリ協定で定められた目標を達成するため、再生可能エネルギー（太陽光、風力、水力など）は脱炭素化の主要な手段として浮上している。日本もまた、2040 年までに再生可能エネルギーの潜在能力を 30~45GW に拡大する目標を掲げている（日本風力発電協会、2023 年）。この目標を達成するため、2024 年 3 月に「海洋区域の有効利用促進法」を改正し、排他的経済水域（EEZ）内での洋上風力発電の開発を可能にした（Outlaw, n.d.）。この改正により、地域水域を越えた洋上風力発電所の設置が許可され、洋上風力発電プロジェクトの面積が大幅に拡大されている。日本風力発電協会（JWPA）は、EEZ 内の洋上風力発電の地理的ポテンシャルが陸上風力の約 3.5 倍に上ると推計されており、この改正のインパクトは非常に大きいと言える。

洋上風力発電所は大まかに分類すると固定式風力発電所と浮体式風力発電所の 2 つのタイプに分けられる。浮体式風力発電所は係留索を通じて海底と接続されている。多くの先進国は、図-1 に示すように浮体式風力発電所への移行を開始している。

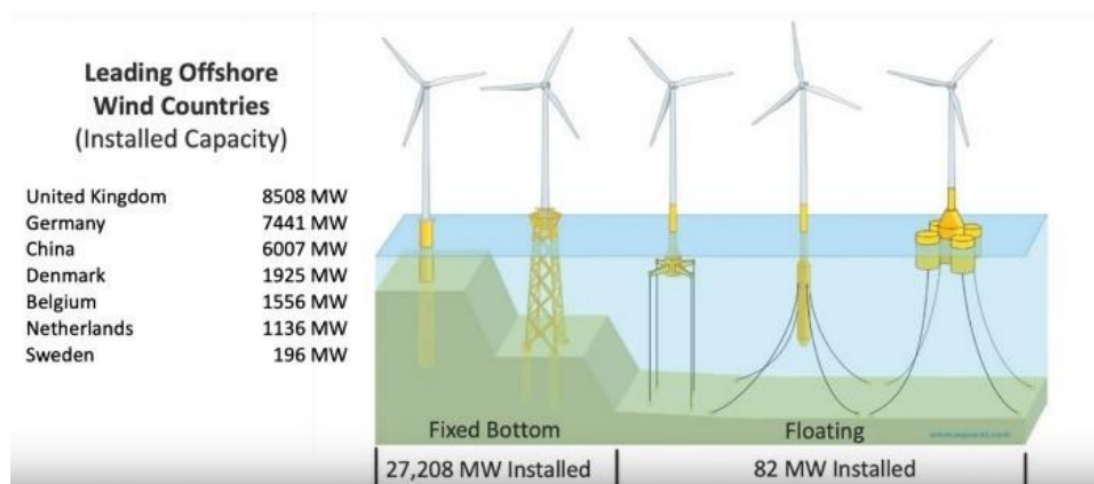


図-1 浮体式と固定式風力発電機の世界的な比較

（Line Currents, 2021, NREL ウェビナー図を基に改変, 2020 年 3 月 17 日）

日本はその 80%が深海に囲まれた島国である（図-2 参照）ため、浮体式風力発電所の実現可能性と実用性が注目され、研究者は浮体式洋上風力発電所の開発に注力している。浮体式風力発電所の支持構造物には、コンクリートと鋼が最も一般的な建設材料として候補に挙がっている。鋼は過去数十年間、海洋構造物において広く使用されてきた実績がある。しかし最近の研究では、コンクリートを代替材料として使用することで、施設の延命化が図れることが示されている。

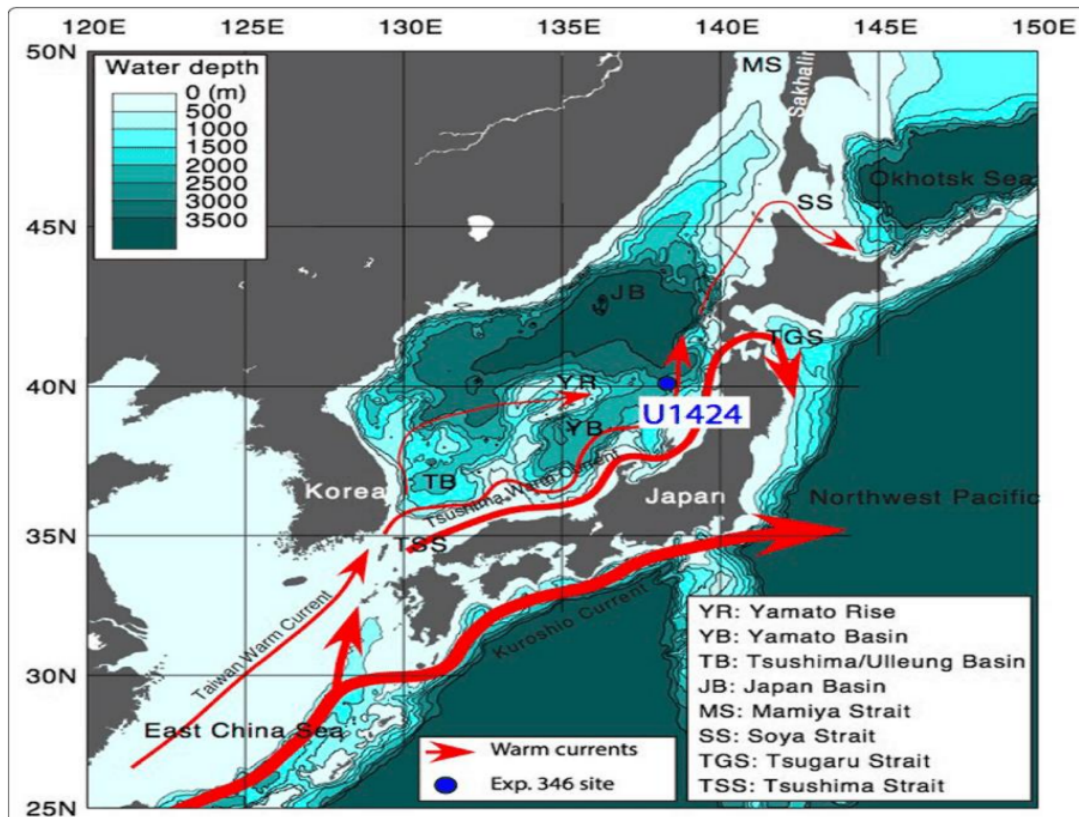


図-2 日本の海水深度プロファイル (Felder et al., 2022 を改変)

ただし、波、風、潮汐、高潮など、沖合環境での作用力に関する検討は不十分であり、コンクリートの応答は依然として検討中である。また、コンクリートを用いた構造物を施工の合理化を検討する際、浮体の事前製造（プレキャスト化）は一つの選択肢となる。この場合、接合部の挙動を明確に理解する必要がある。コンクリート構造物の接合部は、応力の伝達において力学的に弱い領域と一般的に考えられている。したがって、本研究では、水中および空気中におけるせん断応力下でのコンクリート部材接合部の挙動を実験的に分析することとした。

第2章 既往の文献整理

大規模な浮体構造物を建設するには、複数のプレキャスト部材を製造し、それらを一体化させて構造物を製作する必要がある。近年、このような構造物にプレキャストコンクリート部材が効果的に適用されている (Rognaas et al., 2001)。プレキャストコンクリート部材の組み立てには、必ず接合部が生じるが (Chanhong Lee et al., 2011)、接合部は構造物において、せん断力や圧縮力の伝達において不連続面を形成するため、力学的に最も弱い部分とされている。

波の作用、水力学的な力、風荷重などにより、コンクリート部材間にせん断力が作用すると、部材間でせん断応力の伝達が生じます (Zewdie et al., 2024)。接合部における

せん断応力伝達挙動の理解不足は、構造物の予期せぬ損傷や不適切な設計を引き起こす可能性がある。水中ではコンクリートの強度が低下することが一般に知られており、十分な検討が必要と考えられる。

以上のような背景から、本研究では、コンクリート - コンクリート接合部の挙動を深く理解するため、接合部はせん断キーやエポキシ樹脂（実際の海洋構造物で接合強度を強化し、浸水を最小化するために使用される）を排除した平坦な構造とした。鉄筋コンクリートのせん断伝達挙動は鉄筋のダウエル作用（Maekawa et al., 2003）に依存することが知られている。本研究では、2つのコンクリート部材を接続するために、鉄筋の代わりにプレストレス用 PC 鋼棒を使用した。

第3章 予備解析

ここでは実験条件を選定するために、予備解析を行った結果を報告する。検討には COM3（材料非線形有限要素法解析意）を利用した。

3.1 解析モデルの概要

図-3 に要素の全体像を示す。試験体サイズは $315\text{ mm} \times 270\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ とし、接合部（モデル中央）もしくは試験体端部からそれぞれ 90 mm の位置に載荷プレートと支点用プレートを配置した。試験体全体にプレストレスが導入されるよう、弾性要素を配置している。コンクリートの物性値に関しては、ヤング係数が 350000 kgf/cm^2 、圧縮強度は 600 kgf/cm^2 、引張強度 35 kgf/cm^2 とした。一方で鉄筋の物性値に関しては、ヤング係数が 2100000 kgf/cm^2 、降伏強度 4000 kgf/cm^2 、引張破断強度 6000 kgf/cm^2 、引張破断ひずみ 0.12 とした。

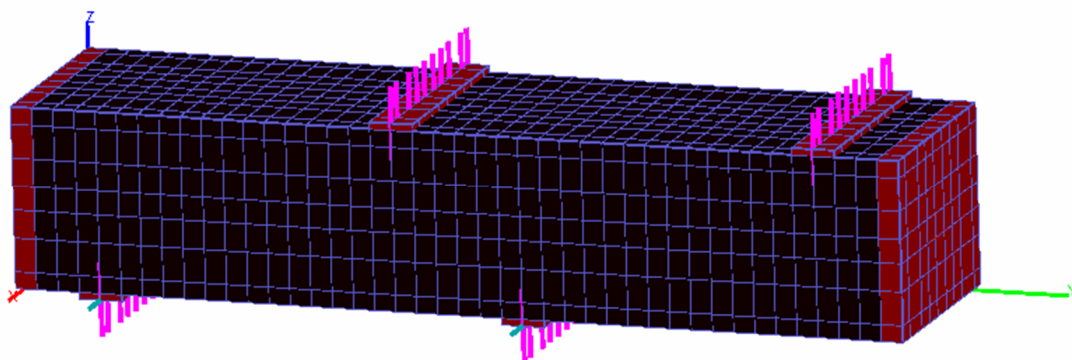


図-3 要素の概要

図-4 は試験体の主鉄筋位置に設置した RC 要素を示す。本解析では主鉄筋位置の RC 要素が所定の鉄筋比となるように設定した。なお、帯鉄筋は試験体全体の鉄筋比として考慮している。

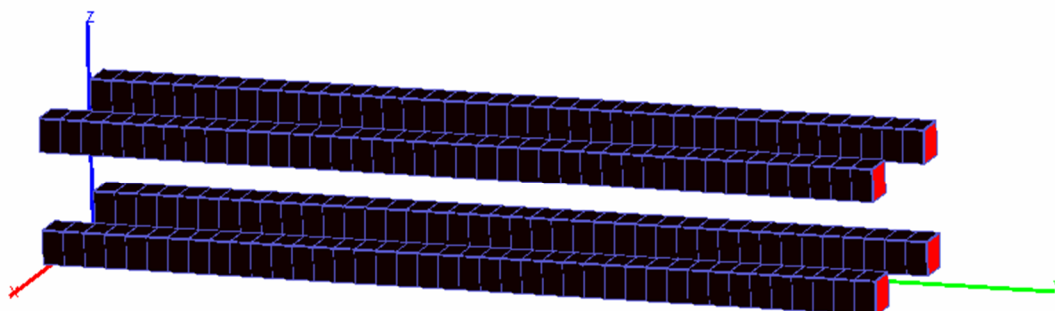


図-4 主鉄筋の要素 (RC 要素)

図-5 は PC 鋼棒の様子を示す。本解析ではソリッド要素でモデル化した。また、プレストレスは PC 鋼棒の要素の両端分を線要素でつなぎ、荷重 (約 90t) を導入した、

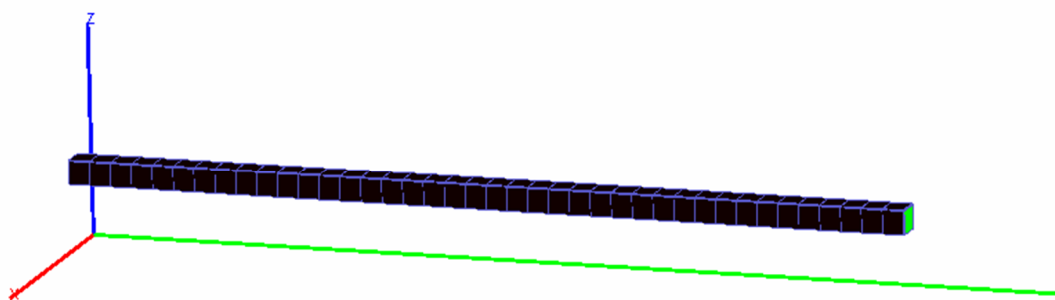


図-5 PC 鋼棒 (ソリッド要素) の様子

図-6 に接合面に設定したボンド要素の様子を示す。ここでは、暫定値として、圧縮時のせん断剛性を 1000000 kgf/cm^3 , 圧縮時の開閉剛性を 2000000 kgf/cm^3 とした。引張時のせん断剛性、開閉剛性はともにゼロとした。なお、摩擦係数は 0.7 を設定した。

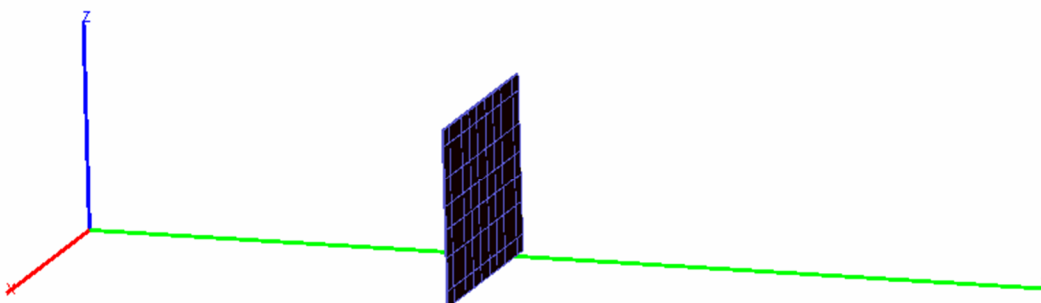


図-6 ボンド要素の様子

3.2 解析の結果

図-7に載荷直後要素（1 c mの変形時）の全体像を示す。接合面において、PC 鋼棒よりも下方から最大主ひずみが生じている。接合部のせん断変形に対して PC 鋼棒が進行を抑制したことで生じていると考えている。

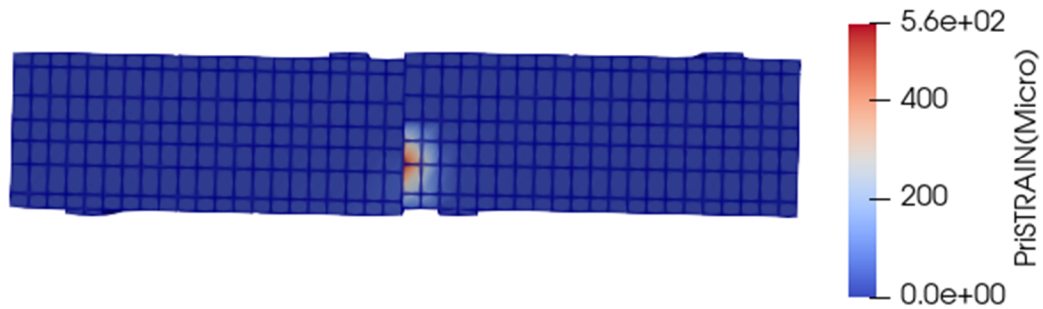


図-7 載荷直後の最大主ひずみ分布

一方で、接合部が最大耐荷力を示したタイミングの最大主ひずみ分布を図-8 に示す。この構造諸元で、選択的に接合面付近に破壊が集中していることが分かった。

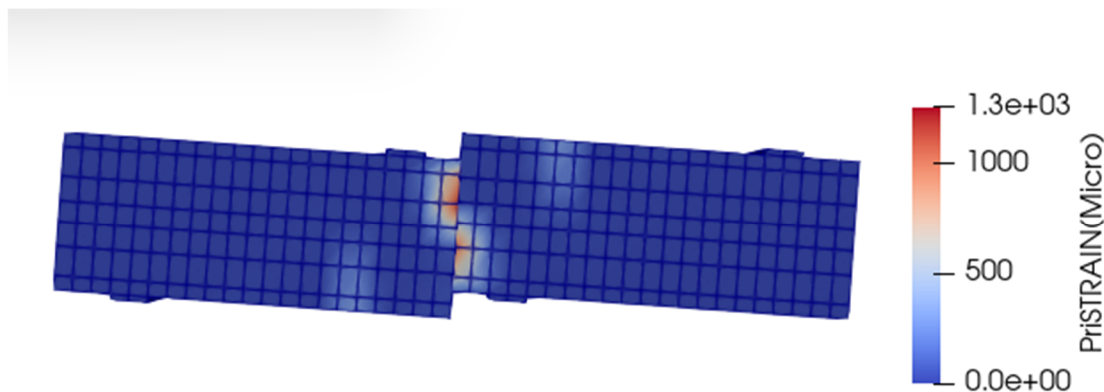


図-8 最大耐力時の最大主ひずみ分布

第4章 実験条件

4.1 材料特性

46-23-20 N のコンクリートの示方配合表を表-1 に示す。スランブ値は 25 cm を採用した。また、目標空気量は $2.0 \pm 1\%$ に設定した。実験時のコンクリート（空気中および水中）の力学的物性値を表-2 に示す。コンクリート部材同士を固定するために PC 棒は径 36 mm のものを使用した。

コンクリートと PC 鋼棒の十分な一体性を確保するため、PC 棒を囲むシース内に表-

3 に示す低粘度・高強度グラウトを注入した。試験体サイズは試設計（10MW 級の洋上風力発電所の浮体）で算出された 0.3 倍のサイズである 315 mm × 270 mm × 600 mm とした。

表-1 コンクリートの示方配合

%			kg/m3				
W/C	s/a	Air	C	W	Ad	S1	S2
40.0	47.9	2.0	438	175	3.94	407	409

表-2 コンクリートの力学物性値

Conditions	Compressive Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Poisson's Ratio
Air	55.6	16.6	3.99	0.19
Submerged in Water for 3 days	59.8	15.9	4.45	0.33

表-3 使用したグラウトの物性値

Item	Temperature Range (0C)	Target Consistency (JP Flow Time, Sec)	Water to Material Ratio (%)	Pre-mix AD
Per m ³	5-35	3.5-6	36% at 20 °C	1458 kg

4.2 実験条件

静的なせん断強度実験において、図-9 に示すように PC 鋼棒で接続された 2 つのコンクリート試験体を使用した。

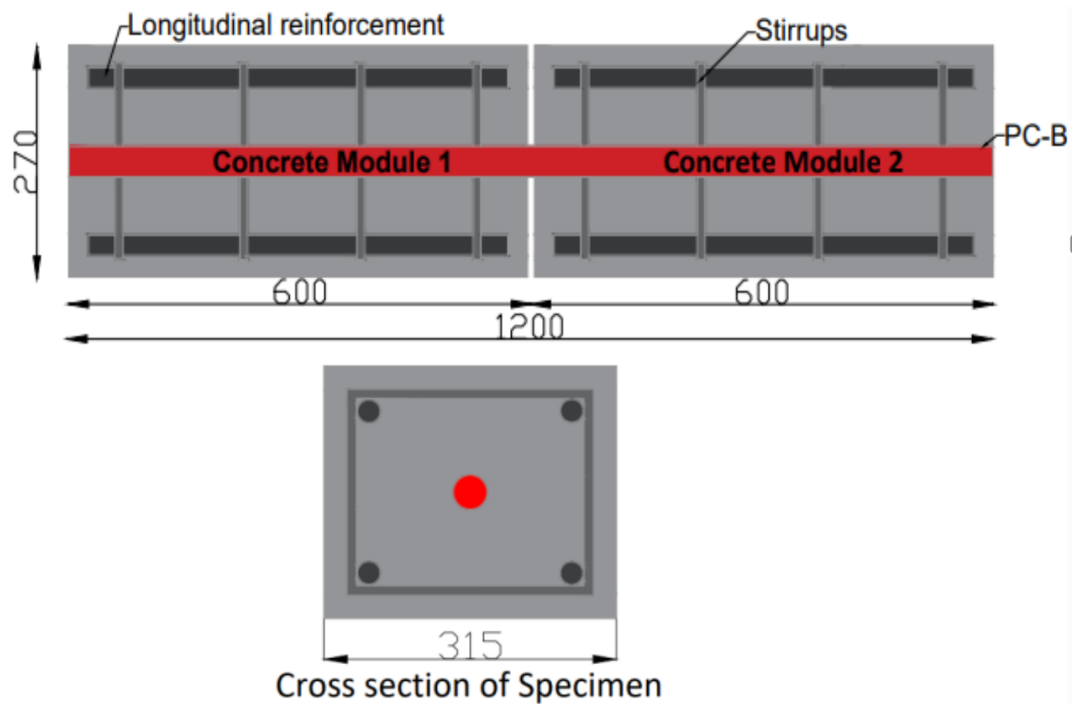


図-9 せん断実験用コンクリート部材の模式図

コンクリート強度の約 20%に相当する有効プレストレス (900 kN) が施され、その後、PC 鋼棒を囲むシース内にグラウトを注入した。両方のコンクリート試験体は平滑な接合面で接している。試験体は 2 体用意し、1 体は (No.0-3) は空気中で実験され、もう 1 体 (No.0-4) は水中で実験された。両条件の実験装置を図-10 に示す。水中での実験の場合、水槽を水で満たし、コンクリート試験体の上面 1 cm は水面から露出させた。空気中での実験では、デジタルカメラを三脚に設置し、時間の経過に伴うひび割れの進行を記録した。一方、水中条件では、防水カメラを使用し、水中のコンクリート部材の応答を撮影した。



図-10 空気中（左写真）および水中（右写真）における試験体設置の様子

接合部のせん断強度を正確に試験するため、図-11 に示されるように Losipescu 式のせん断実験で荷重を加えた。

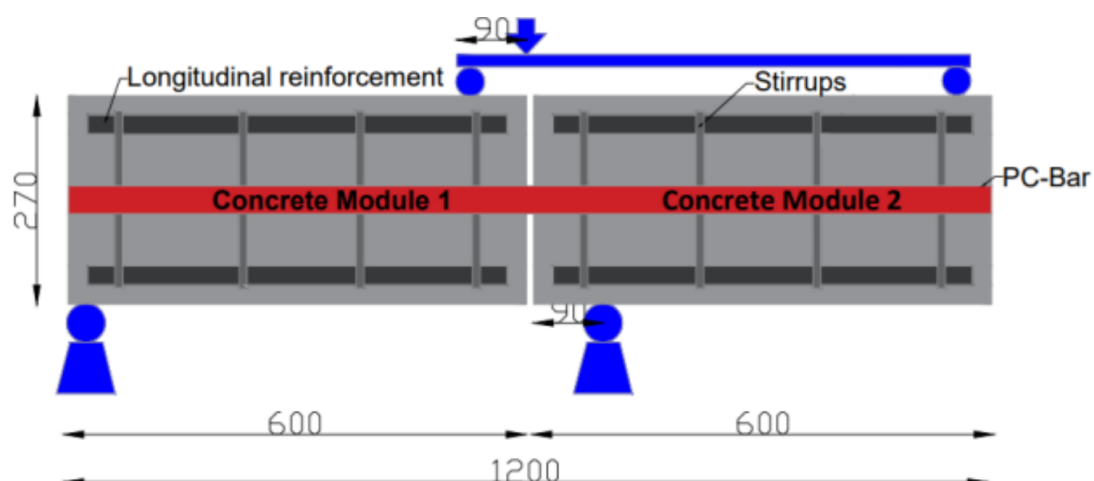


図-11 Losipescu 式のせん断実験

図-12 には、変位計（LVDT）およびひずみゲージ（PC 鋼棒は S1 から S8，鉄筋は S9 から S16，コンクリートは S17 から S23（気中）および S17 から S25（水中））の設置位置を示す。水中実験における計測装置の防水性を確保するため、東京測器研究所製の差動トランス式の変位計（FDP-10A）を使用した。ステンレス鋼製ひずみゲージ（WFLM-60，東京測器研究所製）にリード線を接続し、ゲージの排出孔周囲をシリコンで覆い、防水性を確保した。

支点の剛性を高めるため H 鋼を槽内に設置し，その上に支点（固定点とローラー）2 つを設置した。H 鋼のたわみの有無も変位計で計測した。接合部は相対的なせん断変形および開口変形をそれぞれ計測した。

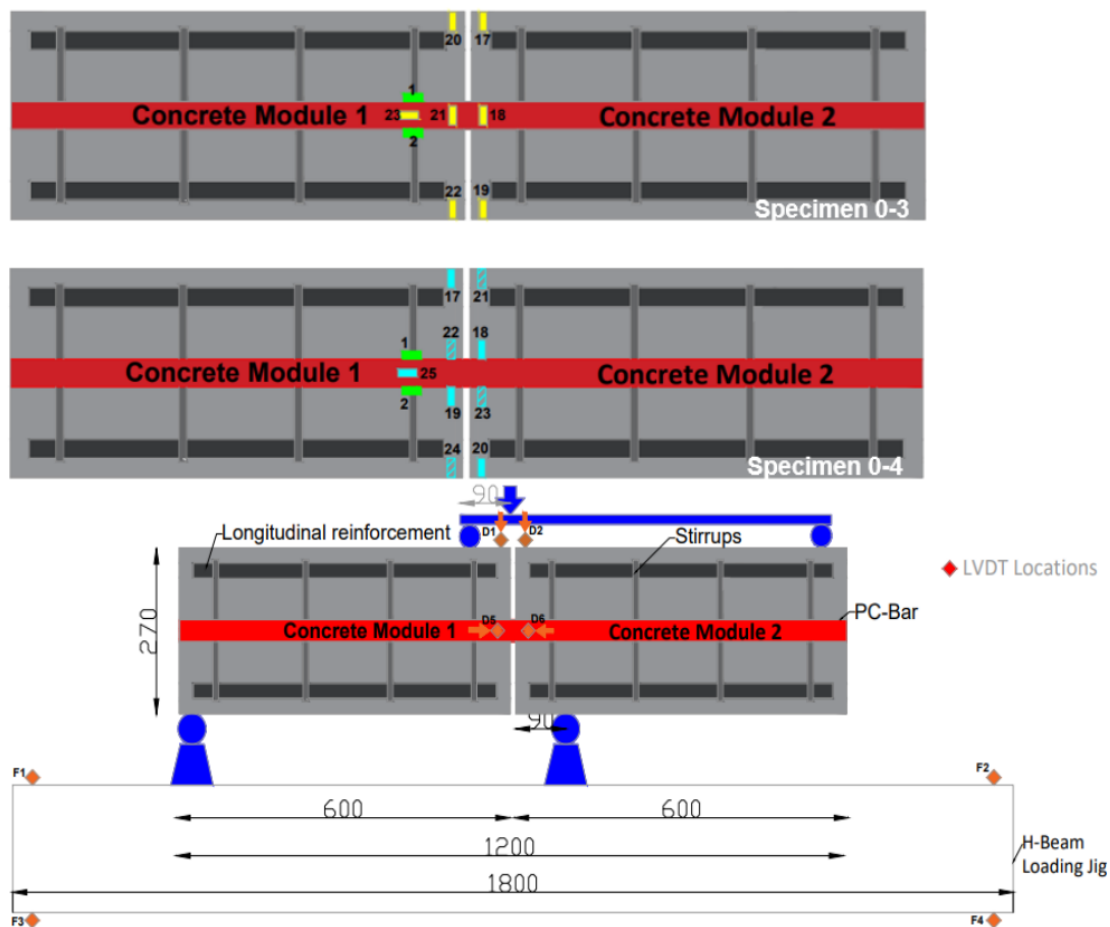


図-12 ひずみゲージおよび変位計（LVDT）の配置（気中：0-3，水中：0-4）

実験装置の全体構成（設置の様子）を図-13 に示す。コンクリート試験体は 28 日間型枠内で養生した。試験体間に 36mm 径の PC 棒を挿入し、所定の応力までプレストレスをかけた後、グラウトを注入した。槽内に H 鋼を設置し、試験体を設置後、上部から載荷治具を降ろして載荷の準備を行った。

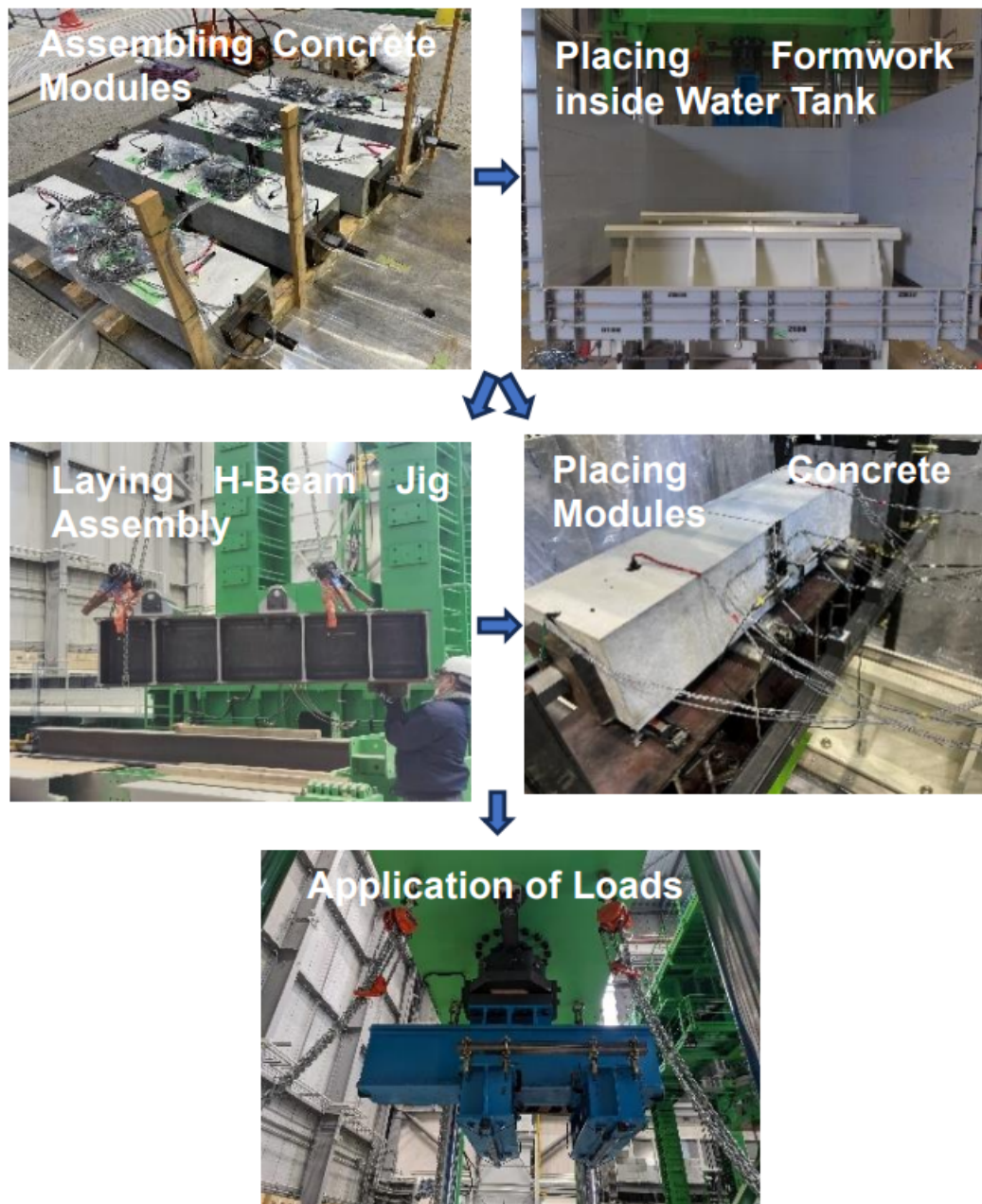


図-13 接合部のせん断実験のための実験準備手順

第5章 実験結果

気中（試験体 No.0-3）および水中（試験体 No.0-4）で、それぞれ部材接合部のせん断実験を実施した。

変位計（LVDT）の D5 および D6 は、図-14 に示すように接合部間の開口挙動を示している。PC 鋼棒を挿入したコンクリート部材における接合部せん断実験は、PC 鋼棒のダボ作用が支配的になる曲率変化点で終了した。この曲率変化点は、PC 棒の降伏点よりもはるかに前に発生した。したがって、この実験条件下では、せん断応力はコンクリ

ート接合部の界面およびPC 鋼棒によって支持されている。

気中の場合、接合部の開口は最終値 0.56mm まで増加し続けた。一方、水中の場合、初期に負の値を示した変位計があった。これは水の存在による初期応力状態の変化に起因する可能性がある。その後は変位が増加し、最大的に、開口変位は 0.43mm に達した。

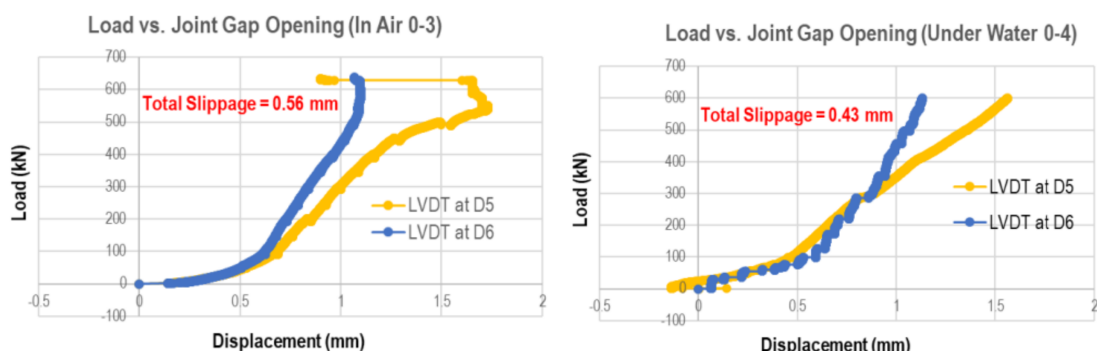


図-14 接合部の荷重 - 開口変位関係（気中：0-3，水中：0-4）

D1 および D2 の変位計の値から、図-15 に示すように接合部の開口変位を計算した。水中（試験体 No.0-4）では、気中（試験体 No.0-3）と比べて接合部開口が小さいことが分かった。水中では、接合部の開口方向が逆転する現象が観察され。原因は定かではないが、水中で接合部に繰り返しせん断力が作用することでコンクリートが損傷し（剛性が低下し）、その結果、接合部が閉じる方向に推移したと考えている。いずれの試験体も、最大荷重においても、接合部に著しい開口は認められず、試験中を通じてプレストレスは有効に機能していた。

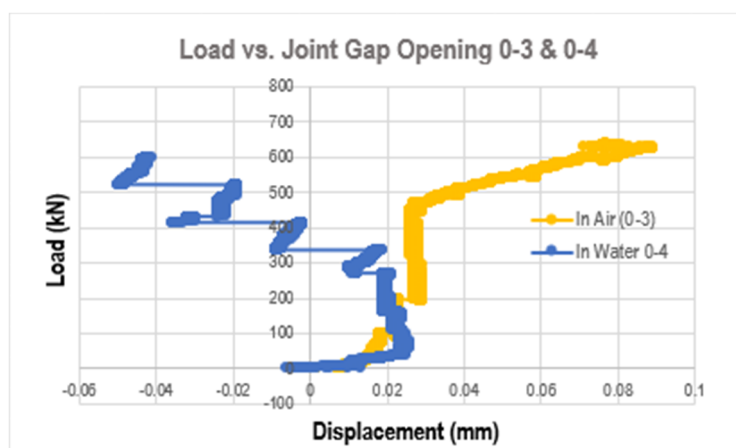


図-15 接合部の荷重 - せん断変位関係（気中：0-3，水中：0-4）

コンクリート部材のひずみ分布は、図-16 に示すように、気中および水中の両方で 450~500 kN において屈曲点を示し、弾性挙動から塑性挙動に移行した。これは、コンクリート部材内の微小亀裂や応力再配分を示唆する可能性がある。ただし、気中では 400 kN 付近でコンクリート片の剥離が確認されたのに対し、水中では最大荷重まで視覚的に損傷は観察されなかった。

また、試験体の上部（0-3 試験体で 20 と 17、0-4 試験体で 17 と 21）と下部（0-3 試験体で 22 と 19、0-4 試験体で 20 と 24）では正のひずみ、中間部（0-3 試験体で 21 と

18, 0-4 試験体で 18 と 23) では負のひずみが計測されている。PC 鋼棒は、2 つの部材を緊張力で一体化させており、試験体高さ中央付近では実験中も圧縮力が常時作用していたためと考えられる。

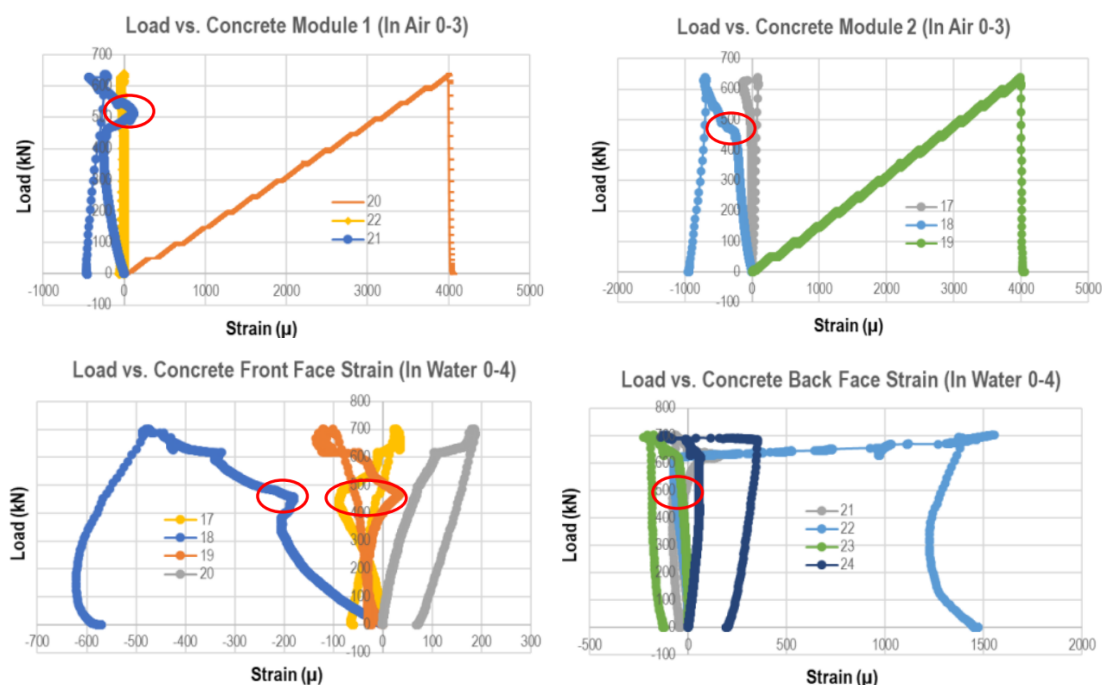


図-16 荷重とコンクリートのひずみの関係（気中：0-3，水中：0-4）

コンクリートと PC 鋼棒のひずみ分布（図-17 に示されているように、いずれも接合部から 72mm 離れた同一断面の値）を図-18 に示す。No.0-3（気中）および No.0-4（水中）の試験体において、PC 鋼棒とコンクリートは荷重初期段階で同じような増加傾向を示している。しかし、450 kN を超えると、No.0-4（水中）で PC 鋼棒とコンクリートのひずみ値に乖離が確認された。これ以降、コンクリートのひずみは減少する一方で、PC 鋼棒のひずみは増加し続け、荷重伝達メカニズムの急激な変化が確認された。PC 鋼棒が主要な荷重伝達成分となることを示している。さらに、450kN 程度に至るまで、No.0-4（水中）のコンクリートひずみは No.0-3（気中）よりも大きく、水中でより大きな変形が生じていることがわかる。これは、水中に浸漬したコンクリート試験体の方が剛性が低いためと考えている。

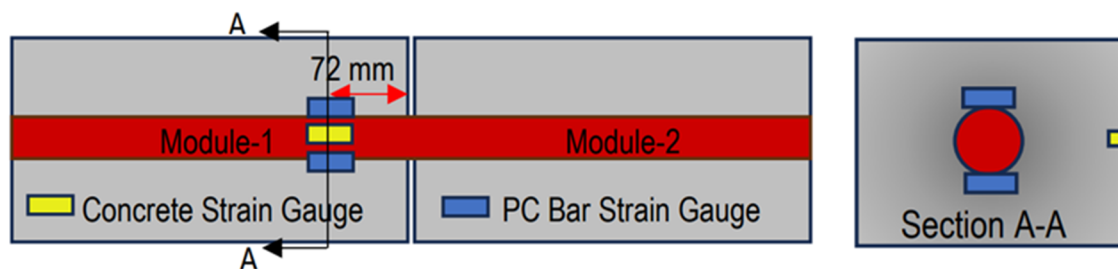


図-17 PC 鋼棒とコンクリートひずみゲージの位置関係図

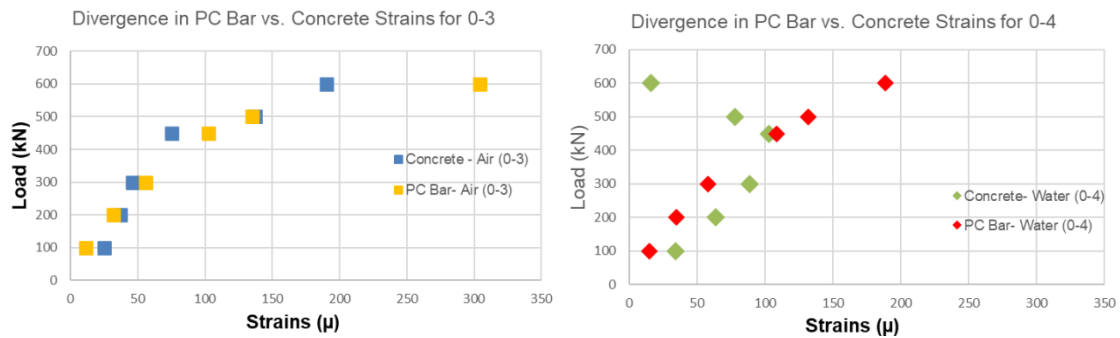


図-18 PC 鋼棒とコンクリートひずみゲージの経時変化（気中：0-3，水中：0-4）

試験体 No.0-3（気中）および No.0-4（水中）の最終破壊状態を図-19 に示す。DIC による分析結果から、ひび割れの進展方向を判定し、矢印で示した。両ケースにおいて、上下両面（上部と下部）に急勾配の均一な亀裂が観察された。ただし、水中条件下では亀裂の分岐がより多く観察された。

気中での最大耐荷力は 638 kN であったのに対し、水中条件下では 600 kN であった。最大荷重として 5% 程度の違いであり、水中においても気中とほぼ同様の耐荷力が示されたと考えている。

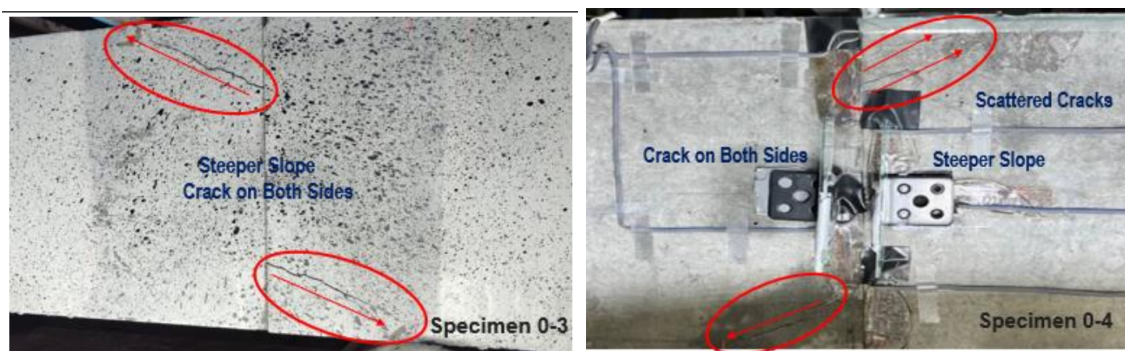


図-19 コンクリート試験体の破壊挙動（気中：0-3，水中：0-4）

第6章 結論および今後の展望

気中（試験体 No.0-3）および水中（試験体 No.0-4）で、それぞれ部材接合部のせん断実験を実施し、主として以下のような結論を得た。

- ・水中条件下では、接合部のすれ変形および開口変形が生じにくい（相対的に高い荷重レベルまで発生しない）ことが分かった。
- ・最大荷重時も水中条件下のほうが、ずれ変形および開口変形ともに小さいことも分かった。
- ・水中条件下での接合部の最大荷重は、気中条件下の場合と比べほぼ同じ（5%程度低い）であった。

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気中および水中でのせん断疲労実験を実施する必要がある。さらに、

数値シミュレーションを用いた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。

謝辞

本研究は電力中央研究所の協力を得て実施しました。深謝いたします。

成果物

M. Imran, S. Komatsu, R. Yamada and T. Matsuo: Shear and Compressive Joint Behaviour of Concrete Floating Structure for Offshore Wind Turbine, Eighth International Conference on Durability of Concrete Structures Paper Number 052, 15 – 17 October 2025, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, United Kingdom

参考文献

- Felder, S., Sagawa, T., Greaves, M., Leng, M.J., Ikehara, K., Kimoto, K., Hasegawa, S., Wagner, T. and Henderson, A.C., 2022. Palaeoceanography of the Japan Sea across the mid - Pleistocene transition: insights from IODP Exp. 346, Site U1427. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 37(1), p.e2021PA004236.
- Japan Wind Power Times, 2023. Japan targets 10GW offshore wind by 2030, 45GW by 2040. [online] Japan Wind Power Times. Available at: <https://jwtimes.com/en/japan-offshore-wind-2030-2040-goals/> [Accessed 10 May 2025].
- Lee, C.H., Chin, W.J., Choi, E.S. and Kim, Y.J., 2011. An experimental study on the joints in ultra-high performance precast concrete segmental bridges. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(2), pp.235-244.
- Line Currents, 2021. Floating Offshore Wind Turbine Tech Explained. [online] Line Currents. Available at: <https://www.linecurrents.live/reports/2021/5/28/floatingoffshore-wind-turbine-tech-explained> [Accessed 10 May 2025]. Adapted from National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2020. Floating vs. Fixed Wind Turbine Across the Globe [webinar], 17 March. Available at: <https://www.nrel.gov/> [Accessed 10 May 2025].
- Out-Law News, no date. Japan plans 45GW offshore wind power by 2040. [online] Out-Law. Available at: <https://www.pinsentmasons.com/out-law/news/japanplans-45gw-offshore-wind-power-by-2040> [Accessed 10 May 2025].
- Rognaaas, G., Xu, J., Lindseth, S. and Rosendahl, F., 2001. Mobile offshore base concepts. Concrete hull and steel topsides. *Marine Structures*, 14(1-2), pp.5-23.
- Zewdie, E.A., Fujiyama, C. and Maekawa, K., 2024. Dowel Bar Contribution to Bond Deterioration under Cyclic Loading. *ACI Structural Journal*, 121(5).