

水上設置型太陽光発電設備に関する実証実験

Demonstration Tests on Water-Mounted Photovoltaic Power Generation Systems

渡辺健二*・竹尾知峻*

1. 水上設置型太陽光発電設備の概要

1.1 設計・施工ガイドライン公開までの背景

太陽光発電は、2012年のFIT制度開始後に急速に拡大した一方で、近年では太陽光発電の建設に適した場所の減少に伴い、傾斜地や農地、さらには水上へと太陽光発電の設置環境が拡大している。水上設置型太陽光発電設備（以下、「水上PV」と呼称）は、農業用ため池や貯水池などに設置された太陽光発電設備のことであり、浮力を持ったフロート架台の上に、太陽光パネルを据え付けている。複数のフロートにより形成されたアイランドの係留方法は、水底に打ち込んだアンカーとアイランドの外周フロートを、係留索によって繋ぐことによって、風や水位変動で流されない様に固定されている。このような特殊な設置環境での太陽光発電は、一般的な地上設置型の太陽光発電より設計や施工上の難易度が高く、地方自治体の条例において太陽光発電への要求事項として安全対策が求められつつあるが、それらを満足させる方法については具体的に示されてこなかった。背景には、これらの設備の設計・施工に関する知見が極めて少なく、また、その知見が集約されてこなかったことにある。このため、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」と略称）の委託事業の一環として、得られた知見をまとめ、「地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン2019年版」に特殊な設置環境（傾斜地設置型、営農型、水上設置型）の構造設計、電気設計・施工の項目を加えた設計・施工ガイドラインを2021年11月に公開した。その後、各種設置形態への適用性をより向上させるため、各種実証実験結果などを反映し、2023年4月にガイドラインを改定した。

1.2 関連法規との関係

発電用太陽電池設備における技術基準等の法体系を図1に示す。太陽電池発電設備の増加や設置形態の多様化等を踏まえ、民間規格や認証制度と柔軟かつ迅速に連携できるよう、太陽光発電設備に特化した技術基準「発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令¹⁾」が令和3年4月1日に制定された。これは、太陽電池モジュールを支持する工作物（架台、基礎）および地盤に関する技術基準を定めたものであり、電気設備に関しては、「電気設備に関する技術基準を定める省令²⁾」に規定されている。水上設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドラインについては、「発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説³⁾（令和3年12月20日改正）」に参考文献として引用されている。

1.3 水上PV設計時に考慮すべき荷重

電気設備の技術基準の解釈の解説より、水上PVの支持物（フロート、架台、係留索、アンカー）については、表1を参考として考慮すべき荷重を検討するように記載されている。水上PVは水面に浮か

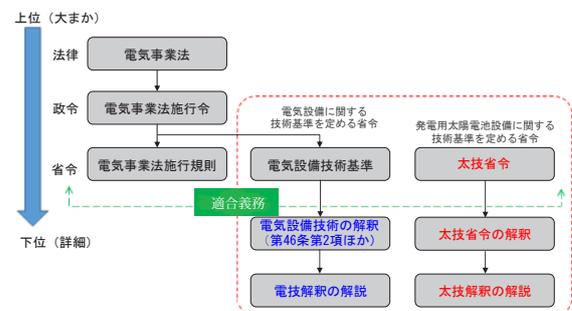


図1 発電用太陽電池設備における技術基準等の法体系

* 八千代エンジニアリング（株）
事業統括本部 国内事業部 港湾・海洋部

んだ浮体構造物を係留索で固定していることから、他の設置形態とは異なり、風や波の作用によって回転や水平運動が発生する。このため、外力による浮体の動揺を考慮した設計が求められる。ただし記載のとおり、個々のフロートが多行列に複数連結して構成されたフロート群（アイランド）を、複数の係留索を用いて係留された浮体構造物について、その水面上での動揺、風・波等により作用する外力、係留索にかかる張力などの実際の現象や知見は極めて少ない。このため、実証実験により実際の現象を確認し、水上設置型ガイドラインの適用性の向上を目指した。

1.4 水上 PV の強風時における特徴

強風時における水上 PV の動揺について、過去の台風時に被災した事例を参考に、水理実験により再現した状況を図 2 に示す。造波機により波を、送風機により風を発生させている。実験スケールは S =

1 / 4（フルードの相似則）である。波浪・風条件は表 2 に示すとおりである。波高が高くなると、フロートが横揺れ（回転運動）することが確認できる。このケースは、被災事例を参考にしていることから、フロートに対して厳しい実験条件下であり、太陽光モジュールの上を通過するような越波・しぶきが確認できる。波高が高くなれば当然のことながら、フロートだけではなく太陽電池モジュール等の設備にも波力が作用することとなる。

水上 PV（浮体構造物）に作用する荷重を図 3 に示す。常時は水位変動に追従するため係留索に余長を持って設置しているが、風や波が作用すると、左

表 1 水上 PV において考慮すべき外力・荷重

事象	外力・荷重	対象部位	考慮事項
積雪	積雪荷重	架台、フロート	浮力
強風	風圧	架台、係留部、	係留耐力、接合部耐力、 衝撃耐力、各部疲労
	波力(動揺)	フロート、接合部	
豪雨	水位	架台、係留部、	浸水防止、係留耐力
	水流	接合部	
凍結	凍結圧力	架台、フロート、 接合部(フロート間)	耐圧力、浮き上がりへの追従性
地震	波力(スロッシング)	架台、係留部、 接合部	係留耐力、接合部の耐力、 衝撃耐力

出典：電気設備の技術基準の解釈の解説(令和2年6月1日改正) p.66

表 2 波浪、風条件（括弧内は実スケール）

波高	10 cm (40cm)
周期	0.85 s (0.85 s)
風速	10 m/s (20m/s)

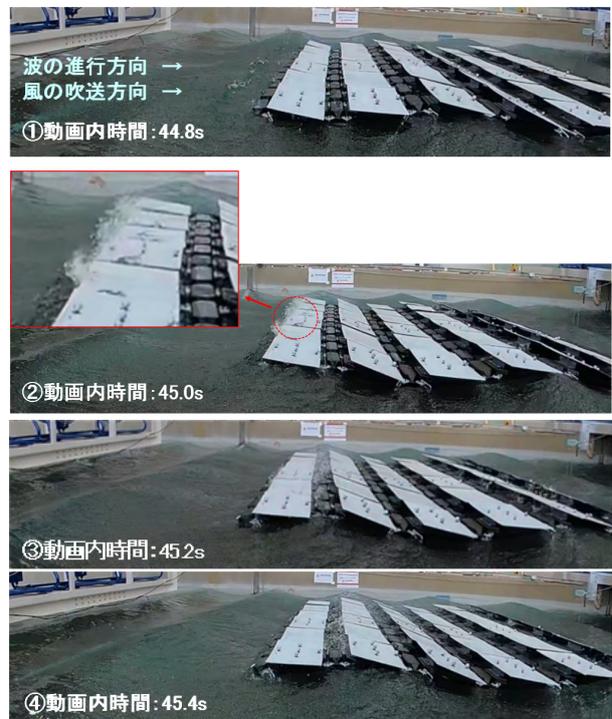


図 2 水理実験による被災事例の再現

- ・風圧：左右揺れ(風上↔風下方向に並進運動)
- ・波圧：横揺れ(回転運動)、左右揺れ(波上↔波下方向に並進運動)

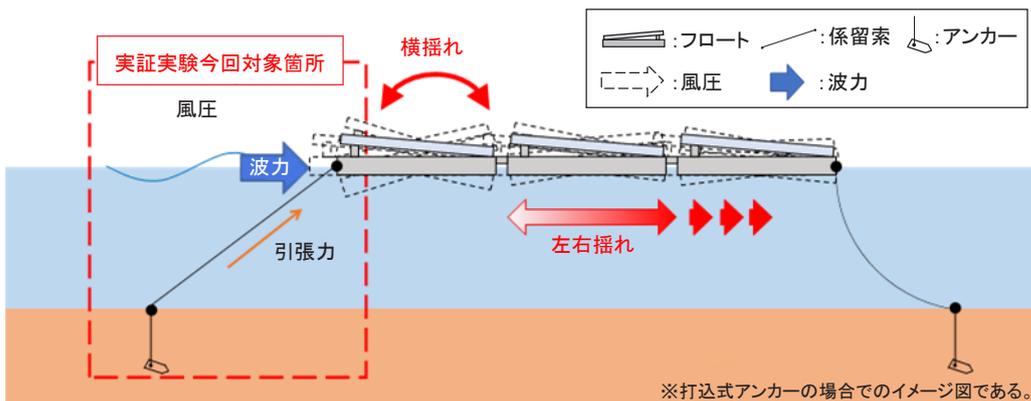


図 3 水上 PV（浮体構造物）に作用する荷重

右揺れしながら風下・波下方向に移動し、風上・波上側の係留索が展張状態となる。波によりフロートが横揺れ（回転運動）するため、係留索を瞬間的に展張する動的な荷重も作用することが想定される。強風時における係留索に作用する荷重は、風や波の作用状況やフロート群の移動による係留索の緊張・緩み具合等、複合的な要素によって、係留索への引張力が変動する。これらの現象はまだ明らかになっていないため、実証実験を実施し、結果を踏まえて、設計時の留意点に反映することとした。

2. 実証実験

実施した実証実験は以下に示すとおりである。

- (1) 係留索に発生する張力の実測調査に関する実証実験
- (2) 水上設置型太陽光発電設備の水理実験
- (3) 打込式アンカー斜め引張試験

以降に実証実験結果について紹介する。なお、詳細な実験内容については、各実証実験の技術資料^{4), 5), 6)}を参照されたい。

2.1 係留索に発生する張力の実測調査に関する実証実験

2.1.1 実験概要

実際に設置されている水上PVにおいて、風とフロート群の移動についての関係性、係留索ごとに作用する荷重の偏りなどについて実測調査を実施した。香川県内の農業用ため池に設置している水上PVを調査対象（表3参照）とした。

2.1.2 実験方法

計測項目を表4に示す。女井間池の水上PVは1本の打込式アンカーから2本の係留索を展張し係留されている。アンカーとフロートを繋いでいる係留

表3 対象施設概要

所在地	香川県木田郡三木町池戸（農業用ため池）
発電出力	2,822kW（パネル出力）
計測期間	令和3年9月～令和6年6月時点も計測中

表4 計測項目

計測対象	計測項目	計測手法	備考
外的環境	風向・風速	風向・風速計	
	水温	温度計	東側：1箇所 西側：1箇所
フロート等への作用	係留索に作用する張力	張力計（鉄筋計）	北側：10箇所 東側：6箇所 西側：12箇所
	アイランド（フロート群）の移動状況	タイムラプス撮影	4箇所

索に張力計（鉄筋計）を接続し、係留索に作用する引張荷重を計測した。また、東西方向の風が卓越していること、太陽電池モジュールが南向きに傾斜しており北風による風力係数が大きくなることから、水上PVの北側、東側、西側の係留索に張力計を設置した（図4参照）。

2.1.3 実験結果の概要

タイムラプスカメラによる撮影画像を図5に示す。この事例は風速5m/s程度であり、強風が吹いているわけではないが、フロート群（アイランド）が水面上を水平移動の様子が確認できる。

2022年5月～2022年9月における係留索の平均張力と最大張力の比較を図6に示す。平均張力とは、北側、東側、西側の各側面で計測された張力から全張力を試算し、1本当りに平均化した値である。最大張力とは張力が最大となる特定の係留索の張力をプロットしたものである。図6より、各アイランド側面において、平均張力に対し約3～5倍の最大張力が作用していた。このことから、特定の係留索に外力負担が生じていると考えられるため設計時に留意が必要である。また、係留索に荷重が均等に作用すると仮定し、平均張力を設計荷重として設定すると、過小設計となる懸念がある。なお、この現象の原因として、①アイランドの辺に対し斜めから風が作用し、風上側の係留索に張力が集中すること、②係留索の長さが不均一であり短い係留索に張力が集中すること等が考えられる。

2.2 水上設置型太陽光発電設備の水理実験

2.2.1 実験概要

「1.4 水上PVの強風時における特徴」での被災事例を再現した水理実験では、波高が高いと波による波力も無視できず考慮する必要がある。水理実験の目的としては、水上PVのようなフロートを多行

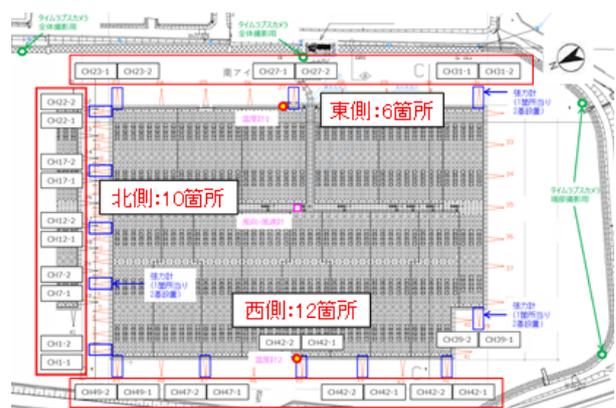


図4 張力計設置箇所



図5 アイランド移動状況（東側堤体から撮影）

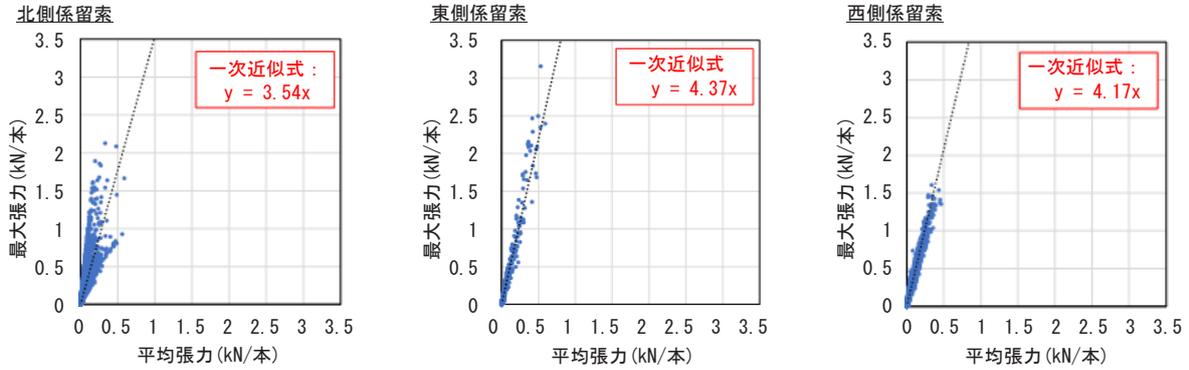


図6 平均張力と最大張力の比較

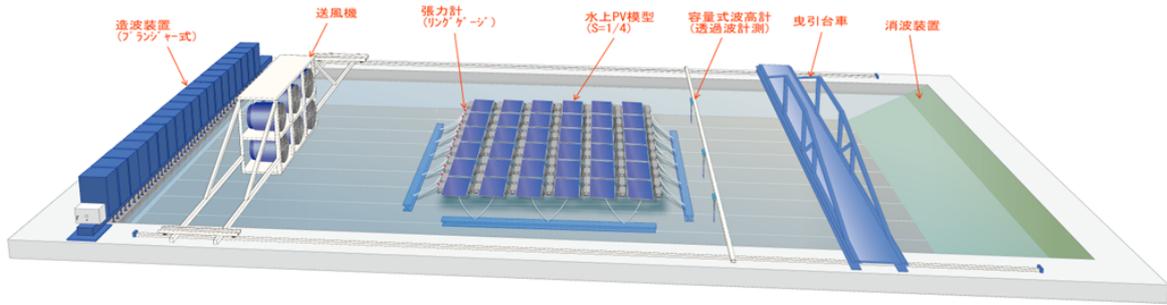


図7 造波水槽の概要

表5 模型ケース名

模型ケース名	タイプ	フロート行数	フロート列数 (波進行方向)
H3	硬接合部タイプ (Hard Type)	6	3
H6	PVC製	6	6
F3	柔接合部タイプ (Flexible Type)	6	3
F6	HDPE製	6	6

表6 計測項目

計測項目	計測方法	備考
係留索張力	張力計(リングゲージ)	
フロートの動揺	モーションキャプチャ	
波高	容量式波高計	・入射波 ・透過波

列に並べた、浅吃水のフロートに作用する波力算出方法は明確ではない。このため、水上設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドラインでは水理実験や数値解析により算出することを原則としている。簡易式として比較的浅喫水の小型浮体に対する波力算出方法⁷⁾を参考に示してはいるが、実際に、

波高と周期が違うとどの程度の外力がフロートに作用しているかを確認するため水理実験を実施し、波力算定式の妥当性について検証した。

2.2.2 実験条件および方法

水上PV模型（縮尺率：S = 1/4）を造波水槽に設置し、係留索に作用する張力やフロートの動揺状況などを計測した。造波水槽の概要を図7、実験を実施するに当たっての模型ケースを表5に示す。なお、フロート間接合部は、実機フロートと同程度の荷重-変位特性を有するPVC（硬接合部タイプ）とフロートと同素材であるHDPE（柔接合部タイプ）を接合部材料として選定した。計測項目を表6に示す。容量式波高計を用いて波高を計測し、係留索に作用する張力を張力計にて計測した。張力計は係留索とフロートの接合部に設置した。パネルにトラックを設置し、フロートの動揺状況をモーションキャプチャにより計測した。

2.2.3 波力算定式による計算値の算出

波力の算出方法は波力を波高の差（波の山部と谷部の水位差）による静水圧の値として算出するもの

である。波力算定に当り、水上PVのような多連結浮体に対して次式を適用する方法として、最も波上側のフロートに作用する波力を計算することとし、浮体長さLおよび浮体幅Bを図8のとおり仮定した。 $d > 1/2 \cdot H_{1/3}$ の場合

$$F_S = \omega_0 \cdot H_{1/3} \cdot L \cdot d \quad : B > L_A/2 \quad (1)$$

$$F_S = 2 \cdot \omega_0 \cdot H_{1/3} \cdot L \cdot d \cdot B/L_A \quad : B \leq L_A/2 \quad (2)$$

$d \leq 1/2 \cdot H_{1/3}$ の場合

$$F_S = 1/2 \cdot \omega_0 \cdot (H_{1/3} + d)^2 \cdot L \quad : B > L_A/2 \quad (3)$$

$$F_S = \omega_0 \cdot (H_{1/3}/2 + d)^2 \cdot L \cdot B/L_A \quad : B \leq L_A/2 \quad (4)$$

ここで、 d ：浮体の喫水(m)、 F_S ：浮体に作用する波力(kN)、 $H_{1/3}$ ：設計波高(有義波高)(m)、 ω_0 ：水の単位体積重量 $\rho_0 g$ (kN/m³) (淡水の場合10.0kN/m³)、 L ：浮体の長さ(波の進行方向に直角な長さ)(m)、 B ：浮体幅(波の進行方向に対する長さ)(m)、 L_A ：波長(m) (深海波長とし、 $L_A = 1.56 \cdot T^2$)、 T ：周期(s)である。

2.2.4 実験結果

係留索に作用する張力(合計値)と波力算定式より算出した計算値を比較した。張力は定常状態を比較対象とし、張力最大値と計算値を比較した。算出した波力算定結果と波浪単独作用時の合計張力(最大値)の比較を図9～図11に示す。実験結果については以下のとおりである。

- (1) 波高 $H = 2.0\text{cm}$ (実波高 8cm 相当) および波高 $H = 5.0\text{cm}$ (実波高 20cm 相当) においては水理実験による合計張力と計算値がおおむね一致した
- (2) 波高 $H = 10.0\text{cm}$ (実波高 40cm 相当) のケースでは、合計張力と計算値の乖離が大きかった。
- (3) フロートが大きく動揺するような高波高の条件下では、波力算定式の精度が低下することが確認された。

高波高の条件下において、波力算定式の精度が低

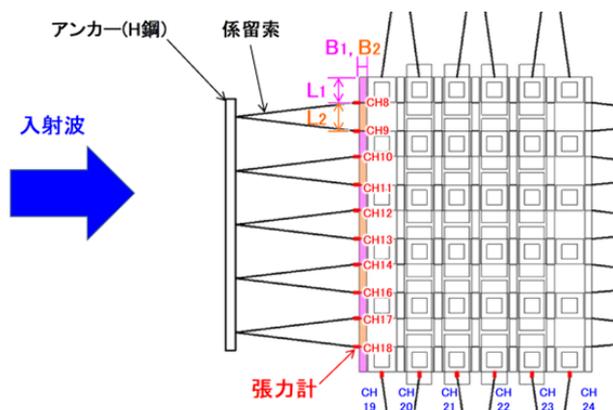


図8 波力算定式の模式図

下した要因としては、フロート端部に波が越波しモジュールにも波力が作用し、フロートの動揺による動的な荷重も作用したと想定される。波力算定式はフロートが動かないものとして、フロート水面下側面の水圧を静的な荷重として算出している。高波高の場合は、上記のような現象が発生することにより実験値が大きく乖離したものと推察される。

2.3 打込式アンカー斜め引張試験

2.3.1 試験概要

水上PVの既往被災において、打込式アンカーが引抜かれた事例があり、アンカーに作用する外力が設計値を超過したか、あるいは、アンカー打込み角度(耐力方向)に対する係留索の引張方向が傾斜したことによる耐力低下が要因と想定される。アンカーの打込み角度(耐力方向)に対して水平力が発生する場合のアンカーの耐力低下の有無を把握するため、斜め引張試験を行った。

2.3.2 試験条件および方法

本試験で使用した打込式アンカーを表7および図12に示す。当該アンカーは、水上PVにて使用実績が多く、打撃貫入にて打設したのちに引抜载荷を行うことでアンカーを地中で反転・定着させ引張反力を得る構造である。本試験では20kN以上の引張反力を確認することでアンカーが反転・定着したと

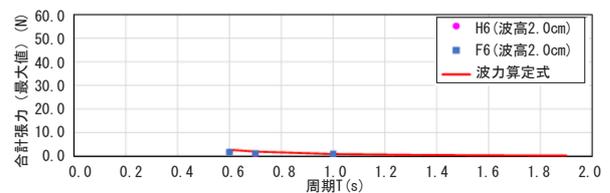


図9 計測値と計算値の比較結果 (波高 $H = 2.0\text{cm}$)

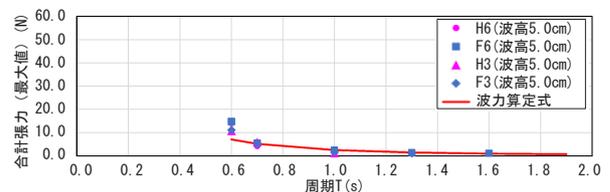


図10 計測値と計算値の比較結果 (波高 $H = 5.0\text{cm}$)

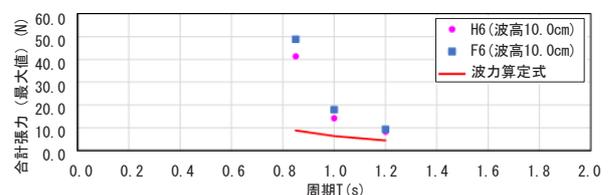


図11 計測値と計算値の比較結果 (波高 $H = 10.0\text{cm}$)

判断した。引張角度は、施工実績の多い仰角 30 度に加え、仰角 45 度、仰角 90 度（鉛直引張）を対象とした（表 8、図 13 参照）。試験方法としては、鉛直打設したアンカーに対し、斜め引張器具及び油圧ロードロッカーを用いて斜め引張载荷を行った（図 14 参照）。载荷方法は連続载荷とした。変位計の計測点はスイベルアイナットの中心とし、油圧ロードロッカーの荷重値とともにデータロガーにて記録した。

2.3.3 実験結果

試験結果を表 9、図 15 に示す。絶対変位は、水

平変位と鉛直変位より算出した。鉛直引張の引張耐力は 19kN 程度であった。これに対し、斜め引張の場合は No.1-30 をのぞく全てのケースにおいて、17kN 程度で変位が生じた。水上 PV において、アンカーの設計耐力は 10kN ~ 20kN と設定される場合が多く、全てのケースにおいて 10kN 以上の引張耐力が確認された。したがって、打込式アンカーの鉛直引張試験と斜め引張試験の結果を比較し、斜め引張に伴うアンカーの耐力低下は生じないことを確認した。また、ほぼ全てのケースで 40kN の耐力を確保出来た結果となっており、40kN までであれば、現地での施工、鉛直方向の耐力試験を適正に行えば

表 7 アンカー部材

部材名	規格・仕様	摘要
アンカー	マンタレイ・アースアンカー MR-SR	引抜耐力 40 kN 以上
アンカーロッド	SAR-10-1.4	L=1.4m、φ23
スイベルアイナット	ENS-32G	



図 12 アンカー全景

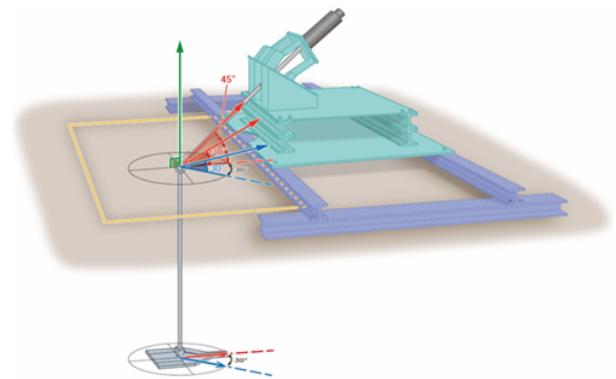


図 14 斜め引張器具の配置

表 8 斜め引張試験ケース

ケース名	仰角	平面引張角度
No.1-30	30°	0°
No.2-30		
No.3-30		
No.1-45	45°	0°
No.2-45		
No.3-45		
No.1-30-30	30°	30°
No.2-30-30		
No.3-30-30		
No.1-90	90° (垂直引張)	-
No.2-90		
No.3-90		

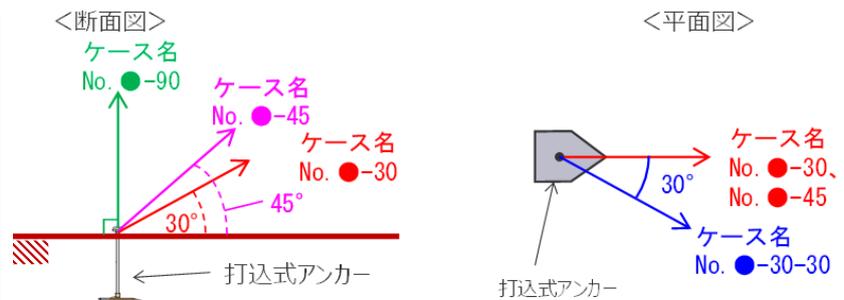


図 13 アンカー引張角度

表 9 斜め引張試験結果

ケース名	変位の起点荷重 (引張耐力)
No.1-30	11.5kN
No.2-30	17.2kN
No.3-30	19.6kN
No.1-45	17.5kN
No.2-45	16.6kN
No.3-45	16.7kN
No.1-30-30	17.4kN
No.2-30-30	16.9kN
No.3-30-30	16.8kN
No.1-90	18.8kN
No.2-90	20.2kN
No.3-90	19.5kN

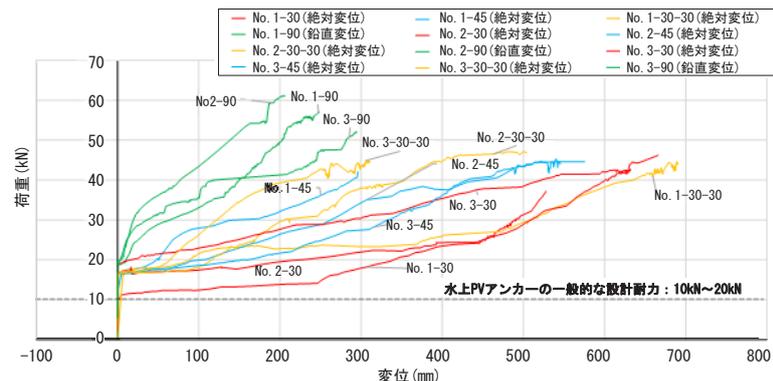


図 15 引張荷重と絶対変位の関係

問題無いと考える。

3. 今後の課題

本稿では、水上 PV の実証試験の結果や水理実験の結果の一部を示した。今回実証試験等で得られた結果によれば、例えば複数の係留索に作用する張力は均等では無いなど、設計上想定している条件と異なることが確認できた。水上 PV は、個々のフロートが多行多列に複数連結して構成されたフロート群を、複数の係留索を用いて係留された浮体構造物である。地上に設置された構造物と異なり、水面上を回転・水平運動しながら移動する構造物である。多くの条件、要素により、フロート群に作用する外力や係留索が負担する張力などが変化する。まだ知見も十分ではなく、机上の計算のみで安全な設計を行うことが難しいと考えられる。今後もまだ明らかになっていない事象について引き続き実証試験や実験を行い、多くの知見の蓄積を行うとともに、設計手法の確立を図っていく必要がある。

謝辞

- (1) 本実証試験は、冒頭に示したとおり NEDO の事業として実施したものである。実施に当り、ご指導賜りました NEDO の関係各位、ガイドライン策定委員会、ワーキングの委員各位に感謝の意を表します。
- (2) 共同事業者である、産業技術総合研究所、(一社)構造耐力評価機構、(一社)太陽光発電協会、再委託先の各位には、実証実験の実施および分析・考察に当り、終始適切なお助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。
- (3) 日本大学理工学部 海洋建築工学科 教授 居駒知樹 先生には、水理実験の実施や考察等に当り多大なお助言を賜りました。水理実験の実施に当り、助教 相田康洋 先生、海洋空間利用工学研究室の学生には多大な協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

- (4) 三井住友建設(株)、(株)日本ランテック様には、水上 PV 実測調査、アンカー引張試験の実施に当り、多大なお協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令，2021
- 2) 経済産業省：電気設備に関する技術基準を定める省令，1997
- 3) 国土交通省：発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説，2021
- 4) NEDO：係留索に発生する張力の実測調査に関する実証実験結果，2023
- 5) NEDO：水上設置型太陽光発電設備の水理実験結果，2023
- 6) NEDO：打込式アンカー斜め引張試験結果の概要，2023
- 7) (一社)日本マリーナ・ビーチ協会：プレジャーボート用浮棧橋設計マニュアル，2018

著者略歴



渡辺 健二 (ワタナベ ケンジ)

1996年日本大学大学院海洋建築工学専攻修了，同年八千代エンジニアリング(株)入社，臨海開発部配属。2016年7月より現職である港湾・海洋部所属。入社以来，港湾，漁港，海岸施設の計画・設計を担当。



竹尾 知峻 (タケオ トモタカ)

2022年日本大学大学院海洋建築工学専攻修了，同年八千代エンジニアリング(株)入社，港湾・海洋部配属。主に，港湾，漁港，海岸施設の設計を担当。