

置き鋼板セルの施工時における耐波浪安定性と その挙動に関する研究

前田 勇司¹・佐貫 宏²・Duc Thang Chu³・樋口 慎一郎⁴
・山口 吉宗⁵・篠崎 翔一⁶

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:yuuji.maeda@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:hiroshi.sanuki@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:ducthang.chu@mail.penta-ocean.co.jp

⁴五洋建設株式会社 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:shinichirou.higuchi@mail.penta-ocean.co.jp

⁵五洋建設株式会社 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:yoshimune.yamaguchi@mail.penta-ocean.co.jp

⁶五洋建設株式会社 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:syouichi.shinozaki@mail.penta-ocean.co.jp

置き鋼板セルは中詰完了後に強固な構造体となるが、セルの直径に対して部材厚が薄く、海底地盤に設置されるため、中詰めを行うまでは不安定な状態となる。本研究では中詰めを行う前を対象とし、耐波浪安定性とその挙動について検討した。水理模型実験により、波力軌道が真円に近いときは鋼板セルの回転方向が波力軌跡方向と一致することがわかった。また、CADMAS-SURF/3Dを用いた数値計算により、セルに作用する波力を評価したところ、実験結果とおおよそ一致することがわかった。実際の工事ではセルの回転と移動を抑制するために既設セルからワイヤーを展張している。ワイヤーに作用する張力について、現地観測および水理模型実験を用いて評価したところ、セルの動揺と移動による二つの成分があることや周期に対応して最大発生張力が大きくなることなどがわかった。

Key Words :steel plate cellular method , wave force, CADMAS-SURF/3D

1. はじめに

置き鋼板セル工法はあらかじめ製作された鋼製円筒体セルを海底地盤に設置し、中詰めによって柱状構造物とした後、隣接する相互の壁状構造物を円弧状のアーケで接続し、さらにこれを中詰めして築造される壁状構造物である。この工法は止水性に優れ、大水深や急速施工にも適した特徴を有している(図-1)。中詰め後の構造体は強固であるものの、中詰めを行うまでの間については鋼板セルの直径に対する部材厚が薄く、海底地盤に設置されているため、不安定な状態となる。置き鋼板セルの安定性について、完成後の構造に対する設計手法は確立されており¹⁾、完成後の地震時挙動に関する研究²⁾や防波堤として活用する場合の研究も成されている³⁾。しかし、鋼板セル設置から中詰めまでの間の状態に対してはセル設置後に直ちに中詰めを行うとされているだけであるものの⁴⁾、実際には数時間程度の時間を要することから、この

状態に対する安定性の検討が必要であると考えられる。そこで、本研究では鋼板セル設置から中詰め作業まで

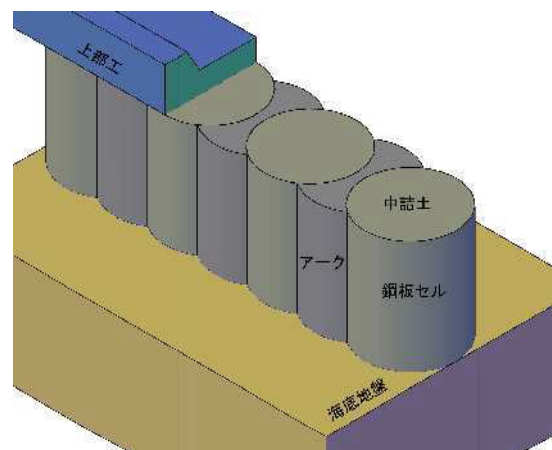


図-1 置き鋼板セル工法概念図

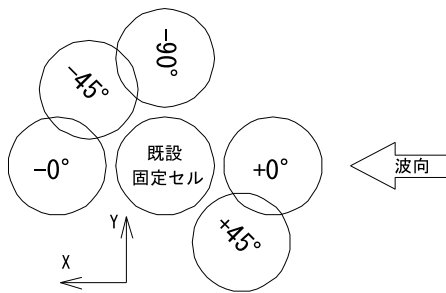


図-2 実験時セル配置

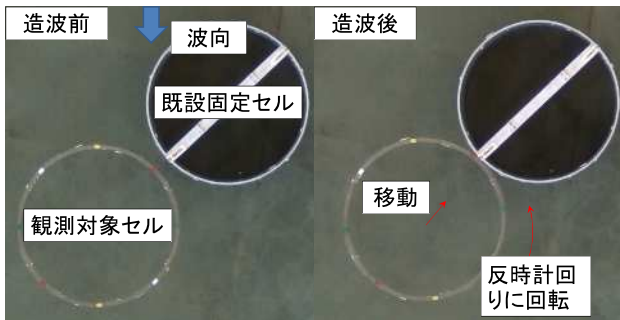


図-3 実験結果の例（セル配置 -45° ，造波周期6s）

の間を対象とし、鋼板セルの耐波浪安定性とその挙動を明らかにすることを目的とした。また、置き鋼板セル工法を採用している茨城港常陸那珂港区中央ふ頭地区廃棄物埋立護岸築造工事では中詰め前の鋼板セルが回転あるいは移動する懸念があったため、これらを抑制するためのワイヤーを展張した。このワイヤーに作用する張力評価も合わせて実施した。

2. 鋼板セルの波浪に対する挙動

(1) 回転・移動特性に関する実験

波浪が作用した際の鋼板セルの回転・移動特性を明らかにするために水理模型実験を行った。実験に使用した水槽は長さ20 m、幅30 m、高さ1.5 mの平面造波水槽である。対象とした鋼板セルは直径21 m、高さ26 m、部材厚14 mm、セル間隔2.1 m、水深24.5 mである。実験縮尺は1/37.5とし、隣に既設中詰完了状態（固定状態）の鋼板セルがある場合を想定した。観測対象セルはアクリル製で水中重量を合わせて水路床に置き、既設固定状態のセルは鋼製の模型を用いて重力式で固定した。以降、断りのない限り現地スケールでの諸元を示す。造波する波は規則波とし、波高は0.5 mで一定、周期を5~8秒（1秒ごと）、波向は鋼板セル模型の配置を変えることで5ケース設定した（図-2）。次に、波浪条件は同一として、二つのセル模型を固定し、観測対象セルの外側の水位変動

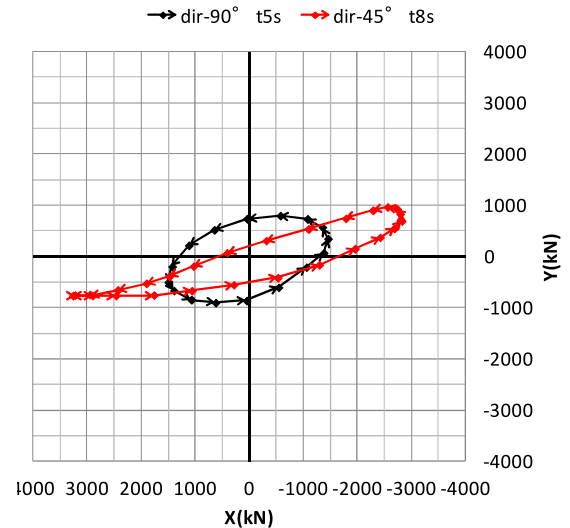


図-4 1波分波力軌道の例

を円周方向に8点で計測することで波圧および波力を評価する実験を行った。

(2) 実験結果

図-3に実験結果の一例を示す。初期位置から大きく回転・移動していることがわかる。ケースによってその方向や量は異なるが、いずれのケースにおいても回転・移動が発生した。実験状況を観察すると、波によって底面のセル中心を軸とした動揺（ロッキング）が発生していたことから、これが回転・移動の要因であると考えられ、不安定な状態となっていた。図-4は1波分の波力軌道の一例であり、軸の定義は図-2に示した通りである。なお、波力は観測対象セル周りで計測した水位変動から微小振幅波理論を用いて波圧の鉛直分布を算定し、鉛直方向および円周方向に積分することで評価した。以降に示す波力に関する実験結果は全てこの方法で評価した値である。いずれのケースにおいても、基本的には楕円軌道を描くが、ケースによって軌道の方向や扁平率が異なっていた。表-1は鋼板セルの回転方向と波力軌道の方向およびその扁平率を示したものである。波力軌道の扁平率が0.64以下の場合、セルの回転方向が波力軌道の方向と一致し、0.64を上回る場合は回転方向に規則性がないことがわかる。セルの動きについて、波力軌道の扁平率が大きい場合は一軸方向の動揺が卓越し、扁平率が小さいときは回転が卓越していると考えられる。特に一軸方向の動揺が卓越する場合はセルと海底地盤の接地面の不陸や微量な据付誤差により回転方向が容易に変化すると考えられる。セルの移動方向についてはおおそ波力楕円軌道の長軸方向に移動することがわかった。

表-1 回転方向に関する実験結果一覧

セル配置	周期	セル回転方向	合力軌跡回転方向	合力軌跡扁平率
+0°	5s	反	反	0.86
	6s	正	なし	0.93
	7s	正	反	0.87
	8s	正	なし	0.94
+45°	5s	正	なし	0.91
	6s	正	正	0.50
	7s	正	正	0.86
-0°	5s	なし	なし	0.97
	6s	反	正	0.93
	7s	反	正	0.93
	8s	正	正	0.86
-45°	5s	なし	なし	0.78
	6s	反	なし	0.98
	7s	正	反	0.75
	8s	正	反	0.89
-90°	5s	正	正	0.52
	6s	反	正	0.80
	7s	反	反	0.64
	8s	正	正	0.79

※1 回転方向:時計回りが「正」、反時計回りが「反」
 ※2 黄色ハッチングは扁平率0.64以下のケース

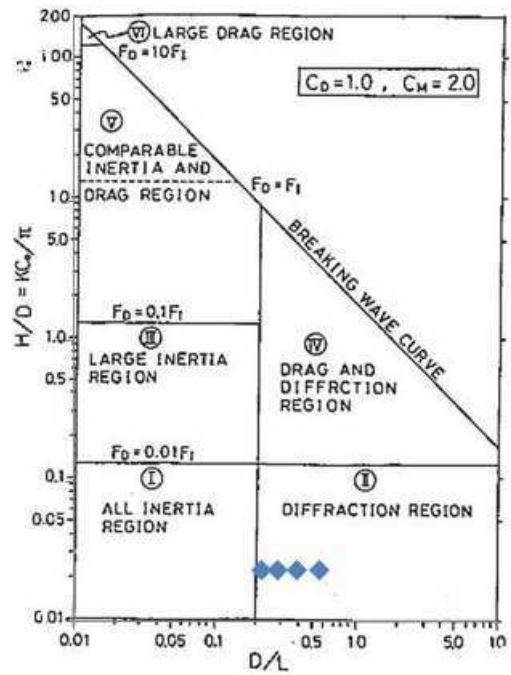


図-6 発生機構別波力の卓越領域¹⁾

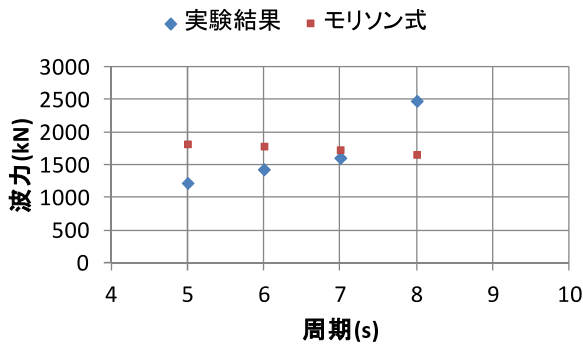


図-5 実験結果とモリソン式の比較

(3) 波力評価式との比較

港湾の施設の技術上の基準・同解説では孤立構造物に作用する波力評価式としてモリソン式を用いている⁹⁾が、構造物の直径が波長の1/10以下である場合の慣性力係数 C_M を示し、波長に匹敵するような大型構造物に対しては回折波理論によって算定するとしている。小田¹⁰⁾は C_M が2.0の条件のもと、5%程度の誤差を許容するとした場合、構造物直径 D と波長 L の比が0.2以下であることがモリソン式の適用限界であるとしている。そこで、鋼板セルが単一の場合の実験結果とモリソン式の比較を行った(図-5)。実験ケースのうち、周期8sのときに D/L が0.21となり、ほぼ適用限界とみなせる。しかし、実験結果とモリソン式による評価値は大きくかけ離れており、周期に対する傾向が真逆であることもわかる。図-6は小田による波力卓越領域の区分けに本実験条件をプ

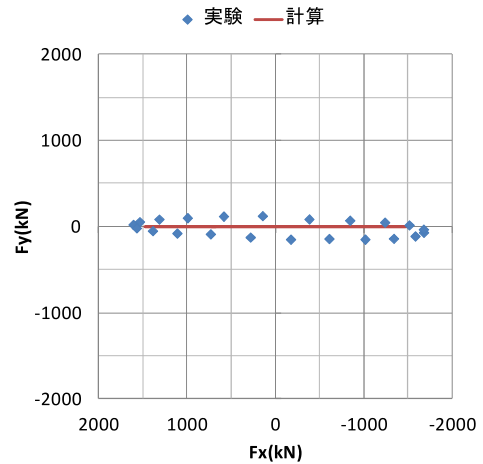


図-7 波力軌道の実験結果と計算結果の比較

ロットしたものであるが、全ケースでDiffraction region (回折力が卓越)に属していることがわかる。以上のことから本実験の条件を抗力と慣性力を評価するモリソン式に適用するのは不適切であり、他の回折力を評価する手法によるべきである。次にCADMAS-SURF/3Dを用いた数値計算により実験結果の再現を試みた。造波関数は流れ関数法B (19次)、差分スキームはDONOR-0.2、構造物周辺の格子間隔は3軸方向ともに0.5 mとした。例として鋼板セル単一、周期7sの結果を図-7に示す。おおよそ計算結果が実験結果と整合しており、CADMAS-SURF/3Dによる波力算定が可能であると考えられる。なお、実験結果について、Y方向(波向直交方向)の波力が発生しているのは、セルの微量な据付誤差によると考

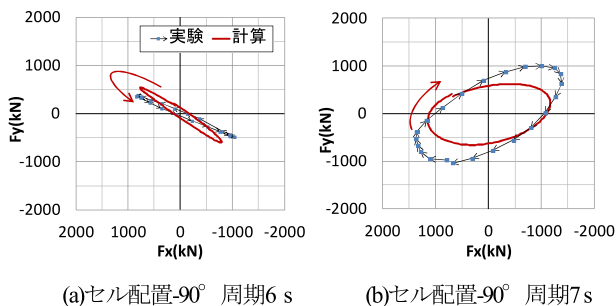


図-8 波力軌道比較

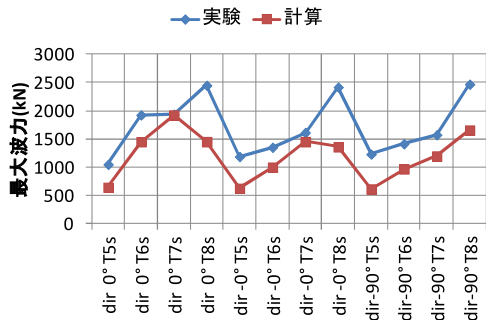


図-9 最大波力比較

えられる。次に鋼板セルを2つ並べた時の最大波力の実験結果とCADMAS-SURF/3Dによる数値計算結果の比較を行った。数値計算はセル配置が $\pm 0^\circ$ 、 -90° のケースで行った。波力軌跡の例を図-8に、最大波力の比較を図-9に示す。波力軌跡の方向や扁平率はおおよそ一致するものの、最大波力は過小評価していることがわかる。この原因として、計算格子間隔を0.5 mと若干大きめに設定したことが挙げられる。特に鋼板セル間隔は2.1 mであることから、鋼板セル間の計算精度が低くなったと考えられる。また、鋼板セルは本来滑らかな円形断面であるが、計算では階段状に設定したという点も精度が低くなった一因と考えられる。以上の結果から、鋼板セルが単独の場合、CADMAS-SURF/3Dを用いた数値計算から波力を評価することが可能であるが、複数並んでいる場合は計算格子間隔を小さくする、また、POROUSを用いて構造物を詳細に再現するといった対応が必要と考えられる。

3. 回転・移動抑制ワイヤーに作用する張力

(1) 水理模型実験

茨城港常陸那珂港区中央ふ頭地区廃棄物埋立護岸築造工事では中詰め前の鋼板セルの回転・移動を抑制するために、図-10に示したような回転・移動抑制ワイヤーを展張している。このワイヤーに作用する張力が不明であったため、水理模型実験による検証を行った。回転・移

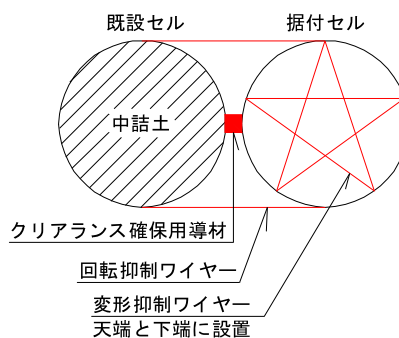


図-10 工事の対策に関する概要図

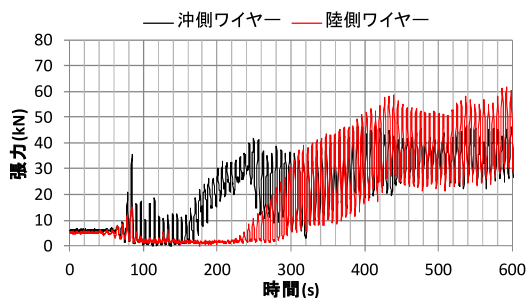


図-11 発生張力時系列(周期6s, dir 0°)

動特性実験と同様に実験縮尺は1/37.5とし、観測対象セルは変形することも考慮して鋼製とし、可能な範囲で断面係数を合わせた。本来実験スケールで0.1 mmの厚さとすべきであったが、製造可能な鋼板の厚さに限界があったため、0.2 mmの厚さとした。隣接する既設中詰完了状態のセルはその自重で固定状態となるような鋼製の模型とした。造波する波は規則波とし、波高は工事における作業限界波高0.36 m、周期を5~8秒(1秒ごと)、波向は回転・移動特性実験と同様に、セル模型の配置を変えることで7ケース設定した。セル配置は図-2に $\pm 22.5^\circ$ の2ケースを加えた7ケースである。現地の状況を可能な限り再現するため、水路床上に碎石を敷設し、その上にセル模型を設置した。また、工事ではセル据付時のクリアランス確保用導材を既設セルに設置していたため、実験ではアングルを既設セルに設置した。さらに、工事ではセル自体の変形を抑制するためのワイヤーを天端と下端に展張していたため、実験ではゴムを使用して再現した。張力を計測する回転・移動抑制ワイヤーはナイロン製の1.5号釣り糸を用いた。回転・移動抑制ワイヤー(釣り糸)に作用する張力は小型ロードセルにより計測した。なお、実験開始前にこの釣り糸の伸び率が現地のワイヤーと合うことを確認している。図-11に実験結果の一例を示す。徐々に上昇する成分と短い周期で振動する成分があるが、前者はセルの回転・移動による成分であり、後者はセルのロックインと変形による成分だと考

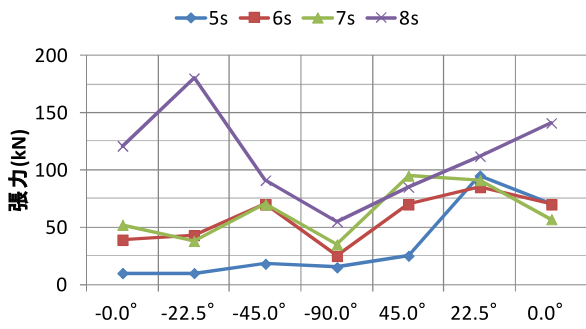


図-12 最大発生張力

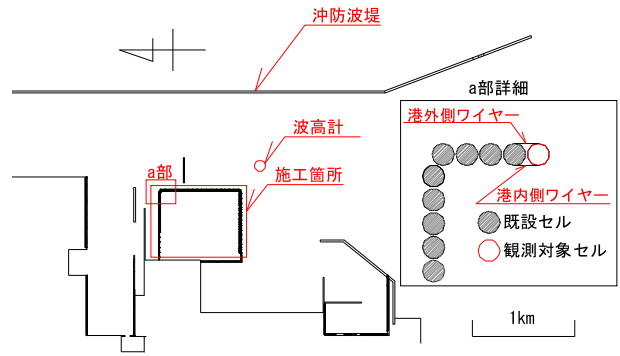


図-15 位置図

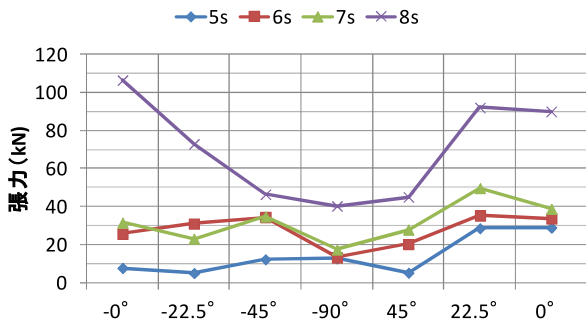


図-13 張力のロッキング・変形成分

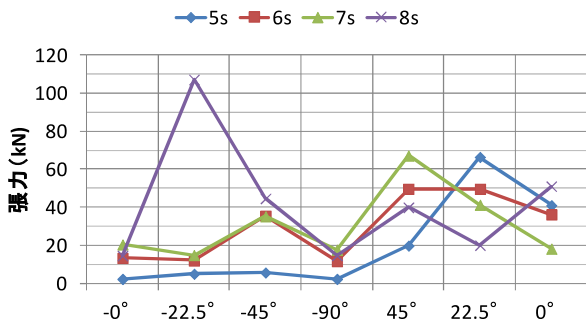


図-14 張力の回転・移動成分

えられる。図-12は全ケースの最大発生張力であり、おおよそ周期に対応して張力が大きくなることから、張力をこれら二つの成分に分けることを試みた。その結果が図-13および図-14である。短周期の振幅をロッキングおよび変形による成分とし、最大発生張力からこの成分を差し引いたものを回転・移動による成分としたものである。セルの回転・移動による成分について、角度が同じであっても、正の場合と負の場合で傾向が異なっていることがわかる。周期8sの場合を除き、角度が正の場合の方が負の場合よりも大きい張力が発生している。これは、角度が負の場合、前面に遮蔽物（既設セル）があるため、波力が低減しているためだと考えら

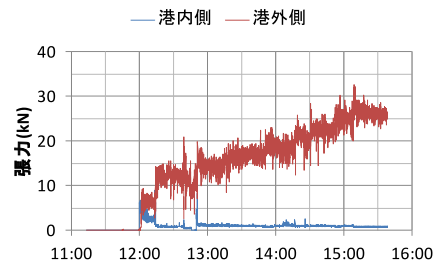


図-16 張力観測結果

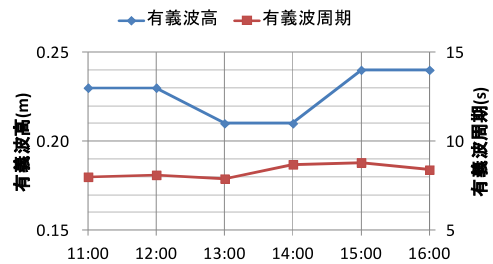


図-17 波浪観測結果

れる。次に、ロッキングおよびセルの変形による成分は周期に対応して増大していることがわかる。特に周期8sのとき90°で極小値、-0°で極大値となるが、他の周期ではセル配置による明確な規則性がないことがわかる。本実験では現地で発生する張力を明らかにすることを目的としたため、現地での状況を可能な限り再現したが、これによりマウンドによるかみ合わせ、変形抑制ワイヤーの効果などランダムな要素が含まれていることから、これらの特性の要因を特定することは困難である。今後単純化した条件のもとでセルの変形量や内外水位などを計測することで、要因を特定できると考えられる。

(2) 現地観測

同工事において、回転・移動抑制ワイヤーに作用する張力を観測した。また、合わせて波浪観測も行った。それぞれの観測位置を図-15に示す。張力観測結果を図-16に、波浪観測結果を図-17に示す。およそ12時頃にセル

据付が完了し、そこから張力の計測を開始した。セル据付完了後の有義波高は約0.22 m、有義波周期は約8.4 秒、波向はおおよそSEであった。張力は港外側が卓越し、最大発生張力は32.6 kNであった。これらの条件に最も近い実験条件は周期8 秒、セル配置45° であるが、現地での最大発生張力は実験結果を大きく下回る結果となった。ここで、実験時と同様に、現地観測結果を2成分に分割すると、ロッキング・変形による成分は約4.5 kN、回転・移動成分は約27.4 kNとなり、前者が実験結果と大きく異なった。実験では規則波を造波しているため、簡単に比較することはできないが、この要因として、実験では回転・移動抑制ワイヤーの伸び率を整合させるためにナイロン製の釣り糸を用いたが、実験で発生した最大張力が作用すると降伏している可能性があるという点が挙げられる。伸び率と降伏応力が整合するような材料を選択することが困難であるため、今回の実験では伸び率のみ整合する材料を選択したが、現地の状況に近づけるためには少なくとも降伏応力が最大発生張力以上の材料を選定すべきだと考えられる。また、港外側の張力が徐々に大きくなり、港内側よりも大きくなっているが、これは回転による張力増大とセルが時計回りに回転していることに起因している。周期8 s、角度45° の実験ケースでは時計回りに回転したことから(表-1参照)、回転方向については実験と観測が整合する結果を得た。

4. まとめ

置き鋼板セルの施工時を対象とした実験により、中詰り前の段階では、鋼板セルの重量次第で波高0.5 m以下という低波浪においても不安定な状況となることがわかった。中詰り前の鋼板セルに波浪が作用した場合、ロッキングにより回転・移動し、波力軌道の扁平率が大きいときはセルの回転方向に規則性はなく、扁平率が小さいときは波力軌道の方向に依存することがわかった。この現象は、セルの動きについて一軸方向の動揺が卓越するか、

回転が卓越するかという点で決定されると考えられる。

鋼板セルのような大口径の円柱構造物に作用する波力について、従来の研究成果通り回折力が卓越するため、モリソン式で評価することは困難であった。CADMAS-SURF/3Dを用いた数値計算によって単独のセルに対しては高精度で波力を評価できたが、複数セルの場合は計算格子間隔を小さくするといった対応が必要と考えられる。

また、実際の工事で採用されているワイヤーを使用した対策について実験および現地観測を行った結果、発生する張力にはセルのロッキング・変形の成分と回転・移動による成分があり、前者については波向や周期によって規則性が存在し、後者については既設セルによる波の遮蔽によって張力が低減することがわかった。ただし、実験で使用した材料が降伏している可能性があるため、発生張力の正確な値を評価するためには材料選定し直した上で再度実験を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), 社団法人 日本港湾協会, pp.1079-1092, 2007.
- 2) 佐藤成, 竹信正寛, 小濱英司, 清宮理: 鋼板セル式岸壁の地震時挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.435-448, 2009.
- 3) 西山貴大, 今井誠, 北村卓也, 小林洋一, 別所友宏, 山村和弘: 根入れ式鋼板セル防波堤の適用条件拡大を目的とした水理模型実験, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.517-522, 2005.
- 4) 根入れ式鋼板セル協会: 根入れ式鋼板セル工法 設計・施工マニュアル, pp.144.
- 5) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 社団法人 日本港湾協会, pp.203-206, 2007.
- 6) 小田一紀: 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, 第 18 回, pp.B-4-1 - B-4-27, 1982.

(2017.3.15 受付)

STUDY ON THE STABILITY AND BEHAVIOR OF STEEL PLATE CELLULAR STRUCTURE UNDER CONSTRUCTION AGAINST WAVE FORCE

Yuuji MAEDA, Hiroshi SANUKI, Duc Thang CHU, Shinichirou HIGUCHI, Yoshimune YAMAGUCHI and Syouichi SHINOZAKI

Steel plate cellular structure becomes stable after filling. However, the structure is unstable before filling because the plate is very thin compared to the diameter of structure and the structure is just set on sea bottom. This study aims to examine the stability and behavior of the structure before filling against wave force. It was observed that the direction of structure rotation was corresponded with it of wave force orbit when the oblateness of wave force orbit was low by hydraulic model experiment. Wave force simulated by CADMAS-SURF/3D was almost the same with experimental result. Two steel wires were used for controlling rotation and slide of the structure in real construction. It was observed the two components of tension working on the wire and the maximum tension were high with increase of wave period.