

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1299 March 2015

杭係留方式浮体の津波による被災メカニズムの検討

有川 太郎
中野 訓雄
城戸崎 新
島田 潔
三上 隆
西 和宏
塚原 靖男

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 東日本大震災による宮城県内の浮体の被災状況	4
1.2 出島漁港の浮体の被災状況	8
1.3 本報告書の構成	8
2. 杭係留方式浮体の水理模型実験	9
2.1 実験手法	9
2.2 実験結果	13
2.3 考察	15
2.4 まとめ	17
3. 数値計算による津波の状況と被災メカニズム	17
3.1 STOCによる津波の状況把握	17
3.2 浮体の被災メカニズムの検討	21
3.3 まとめ	23
4. 係留杭の設計手法の検討	23
5. おわりに	24
参考文献	25
記号表	25

Failure Mechanism of Mooring Pile System Pontoon by Tsunami

Taro ARIKAWA*, **Kunio NAKANO****, **Arata KIDOSAKI*****, **Kiyoshi SHIMADA******,
Takashi MIKAMI****, **Kazuhiro NISHI*******, **Yasuo TSUKAHARA*******

Synopsis

Many port structures were severely damaged by the tsunami of the Great East Japan Earthquake. Meanwhile, most of the pontoons were only slightly damaged in Miyagi Prefecture and remained usable even after the earthquake. Damage survey has shown that the pontoon contributed to decrease the damage to the ship moored to the pontoon. However, there is little knowledge and design examination of the pontoon on the occurrence of tsunami, and design technique for such case is not established yet. In this study, various failure situations of pontoon in Miyagi Prefecture were carefully investigated. In order to clarify the characteristics of pontoon at the time of tsunami, hydraulic model experiments were conducted with pontoon of the mooring pile system. Mooring reaction force and dynamic behavior under the tsunami have been clarified through the experiments. Furthermore, the situation of the tsunami of the Great East Japan Earthquake was analyzed using numerical computation to verify the failure mechanism closely and to establish the countermeasures and design techniques against tsunami. Major conclusions out of the experiments are as follows;

- (1) Horizontal mooring reaction force corresponds to the dynamic pressure of the flow. Resistance coefficient is estimated about 1.2.
- (2) Vertical mooring reaction force occurs when the pontoon goes up by tsunami, and the mooring roller and the access bridge come into contact with mooring pile head. When pontoon is totally below the water surface, vertical mooring reaction force is almost at the same level with the surplus buoyancy of the pontoon.
- (3) When the surplus buoyancy acts on the mooring pile head, pull-out force, which hardly occurs in the normal situation, is caused and acts to the mooring pile. Mooring pile is pulled off the ground resulting in the flow-away of pontoon to make the damage extensive.
- (4) When the horizontal speed of the flow is about 2.5~3m/s, the pontoon shows the behavior of overturn due to the partial submersion. However, when pontoon is buried in water totally, pontoon is not overturned.
- (5) It is recommendable that the distance between mooring piles is amply wide, and mooring roller should be installed at the lower part of pontoon, which eventually suppresses the lurch of pontoon by the speed of the flow.

Key Words: Pontoon, Mooring pile, Tsunami, Hydraulic model experiments, Failure mechanism, Great east Japan earthquake

* Research Director, Coastal and Ocean Engineering Field
** Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd.
*** Seibu Polymer Co., Ltd.
**** Akishima Laboratories (Mitsui Zosen) Inc.
***** Mitsui Zosen Steel Structures Engineering Co., Ltd.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5052 Fax : +81-46-842-7846 e-mail: Arikawa@pari.go.jp

杭係留方式浮体の津波による被災メカニズムの検討

有川 太郎*・中野訓雄**・城戸崎新***・島田潔****・
三上隆****・西和宏*****・塚原靖男*****

要 旨

東日本大震災の津波による港湾構造物の被害が甚大な中、宮城県では大きな損傷に至らなかった浮棧橋（浮体）も複数あり、震災直後も早期に使用できたことや、係留されていた船舶への被害拡大をおさえる働きもあることが調査結果から確認された。一方、これまで浮体について津波を考慮した設計事例や知見は殆どなく、津波に対する浮体の設計手法も確立されていない。

そこで、本研究では、震災による宮城県内の浮体の被災状況を整理したうえで、津波に対する浮体の特性を知ることが目的とし、津波を想定した孤立波に対する杭係留方式浮体の水理模型実験をおこない、係留反力や動的挙動を明らかにするとともに、数値計算を用いて東日本大震災の津波の状況を把握、被害を受けた浮体の被災メカニズムを検証することで津波を考慮した係留杭の設計手法について検討した。本実験で得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1)水平方向の係留反力は流速による動圧に比例、抗力係数は1.2程度と考えられる。
- (2)鉛直方向の係留反力は、津波水位により浮体が上昇し係留杭の杭頭部に浮体や係留ローラー、連絡橋が接触した状態から発生し、浮体が全没したときは浮体の余剰浮力とほぼ同程度の力と考えられる。
- (3)浮体の余剰浮力が杭頭部に作用した場合、常時ほとんど発生しない引抜き力が係留杭にかかるため、海底地盤から杭が引抜かれ浮体が流出するなど被害が大きくなることが考えられる。
- (4)水平流速 2.5～3m/s で浮体は部分冠水から転覆への挙動を示すが、浮体が全没する状況では転覆に至ることはない。
- (5)杭頭への接触を想定する場合は係留杭の間隔をできるだけ広くすること、係留ローラーは浮体重心より下に設置するほうが、流速に対する浮体傾斜角を小さくする効果がある。

キーワード： 浮体、係留杭、津波、水理模型実験、被災メカニズム、東日本大震災

* 海洋情報・津波研究領域 上席研究官
** 三井造船株式会社
*** 西武ポリマ化成株式会社
**** 株式会社三井造船昭島研究所
***** 三井造船鉄構エンジニアリング株式会社
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5052 Fax：046-842-7846 e-mail:Arikawa@pari.go.jp

1. はじめに

東日本大震災の津波による港湾構造物の被害が甚大な中、宮城県では大きな被害に至らなかった浮棧橋が複数あり、震災直後も早期に使用できたことや、浮棧橋に係留していた船舶は被害をほとんど受けず残っていたことが震災時のビデオや調査結果から確認された。

浮棧橋は干満差に関係なく水面からの高さ（乾舷）が常に一定であるため、船舶からの乗降や陸揚げ作業が円滑に行える利点から港湾や漁港の係船設備として実績がある。

杭係留方式の浮棧橋は、浮体本体に取り付けられた係留装置（弾力のある係留ローラーの回転）により、海底地盤に打設した係留杭をガイドに上下動ができ、杭頭部を連結材でつないだ連結杭構造（図-1.1）と連結しない単杭構造（図-1.2）が一般的である。

また海底地盤に設置したアンカーブロックとアンカーチェーンを用いて浮棧橋を碇係する方法がチェーン係留方式であり、浮防波堤も同係留方式が用いられる（図-1.3）。

一方、これまで浮棧橋（浮体）について津波を考慮した設計事例や知見は殆どなく、『港湾施設の技術上の基準・同解説(2007)』でも津波外力や挙動について詳述されておらず、設計手法も確立されていない。

そこで、港湾空港技術研究所においては、三井造船㈱・西ボリマ化成㈱と共同で平成24年8月から平成26年5月までの1年10カ月にわたり、『浮棧橋の耐津波性能照査に関する研究』に取り組んできた。本研究では津波による浮体の特性を知るため、水理模型実験により浮体の挙動や外力を測定するとともに、津波数値計算を用いて実際に起きた浮体の被災メカニズムについて検証をおこなった。

1.1 東日本大震災による宮城県内の浮体の被災状況

宮城県内の港湾や漁港8箇所を設置されていた主要な浮棧橋と浮防波堤合計21基の位置図（図-1.4）を示し、三井造船㈱がおこなった現場調査（日程：平成24年4月11日～15日）による被災状況を一覧表にまとめる（表-1.1）。

津波高は海岸線の形状や大きさ、津波の伝播状況など複数の要因に影響されるため一律ではないが、津波痕跡調査結果などから、5m以上が松島湾や石巻湾・気仙沼湾、10m以上が女川湾や仙台湾と報告されている（東北，2011）。

杭係留方式の浮体16基のうち9基が流出、そのうち単杭構造は7基（①②⑦）が流出していた（写真-1.1, 1.2, 1.8）。宮城県は満潮時の水位レベルが比較的低いことから杭天端高さも概して低く、単杭構造では杭自身は残存していた事例が多いことから、津波で浮体が上昇しそのまま杭頭から抜けだしたことがわかる。

連結杭構造では、大きな津波高が観測された2基（③⑤）は浮体だけでなく杭も残っていない状況が確認された（写真-1.4）。流出した浮体はそれぞれ近傍の湾内で見つかり、外壁損傷などで内部へ浸水し傾いた状態（半沈）であった。

一方、残り7基（④⑥⑦⑧）は軽微な損傷に留まったことから必要な安全対策を講じたうえで、震災後も係船設備として利用されていた。

図面等による杭天端高さと津波高を比較すると、杭天端高さが津波高より高くなっていった浮体は、杭頭から抜けだすことなく被害も小さかったことがわかった（写真-1.3, 1.5, 1.7, 1.9）。

チェーン係留方式の浮体5基（③⑦）は、前後左右にずれが生じていたものの浮体本体には大きな損傷はなく、アンカーチェーンが破断した形跡も見られなかった（写真-1.6）。

連絡橋は、浮体が定位置に留まっていれば軽微な損傷におさまっているが、浮体が流出した場合には半水没や支承部が壊れ連絡橋も流出するなど被害が大きくなり、岸壁の沈下や変形のほか橋台コンクリートにも亀裂等が見られた。

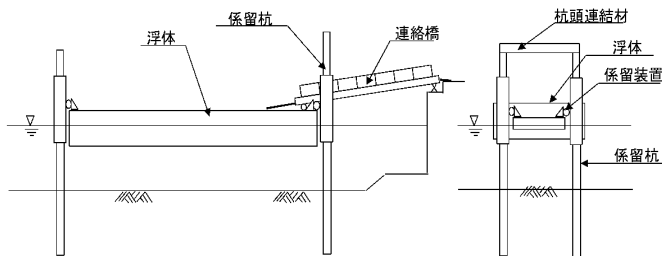


図-1.1 杭係留方式（連結杭）

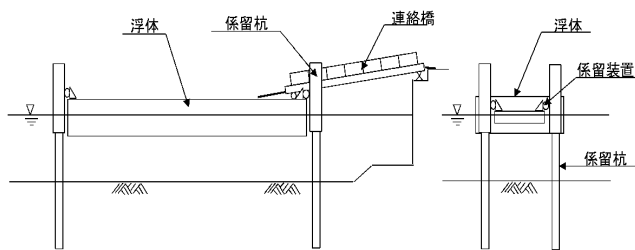


図-1.2 杭係留方式（単杭）

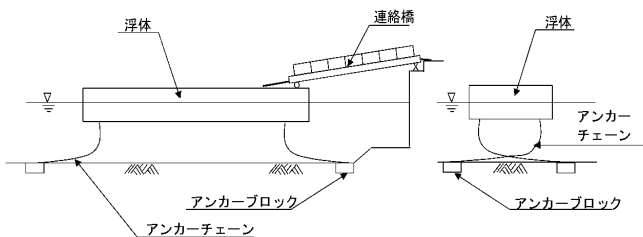


図-1.3 チェーン係留方式

表-1.1 被災状況一覧（宮城県）

位置, 港名		①気仙沼	②浦の浜	③出島		④石巻	⑤寒風沢
諸元(長さ×幅)		33m×10m×2 基	33m×10m	30m×10m	50m×7m×3 基 (浮防波堤)	40.5m×9.5m	30m×10m
浮体	位置	流出	陸上へ打ち揚げ	流出	浮体法線ずれ	定位置	流出
	状態	半沈, 焼損	ほぼ無傷	半沈	ほぼ無傷	軽微な損傷	半沈
連絡橋	位置	定位置	陸上へ打ち揚げ	流出(水没)	—	定位置	流出
	状態	半水没	損傷大	全損	—	半水没	全損
係留	方式	単杭	単杭	連結杭	チェーン	連結杭	連結杭
	状態	残存	残存	陸杭流出	残存	残存	流出
水深		-3.5~-4.4m	-3.9~-4.8m	-5~-8.5m	-8~-24m	-3.5m	-3.2~-3.4m
杭天端高さ		4.7m	4.6m	5.0m	—	6.0m	5.6m
津波高観測値		3.8~12.0m	8~10m	10m 前後 (*)		6.2m	5m 前後 (*)

位置, 港名		⑥野野島	⑦松島		⑧塩釜	
諸元(長さ×幅)		30m×10m	80m×16m 40m×16m	43.5m×9m	38.5m×9m×3 基 28.5m×9m×1 基	51.5m×9m×4 基
浮体	位置	定位置	定位置	定位置	流出(4 基)	定位置×4 基
	状態	軽微な損傷	軽微な損傷	ほぼ無傷	半沈(3 基)	ほぼ無傷
連絡橋	位置	定位置	定位置	定位置	定位置	定位置
	状態	ほぼ無傷	軽微な損傷	ほぼ無傷	半水没	軽微な損傷
係留	方式	連結杭	チェーン	単杭(A)	単杭(B)	連結杭
	状態	残存	残存	残存	残存	残存
水深		-2.6~-3.1m	-4m	-4m	-2m	-4.5m
杭天端高さ		5.6m	—	4.5m	1.65m	7.5m
津波高観測値		5m 前後(*)	3.0m		3.4m	

(*) 調査グループなどによる公的な観測値は無いため独自の調査値を示す。

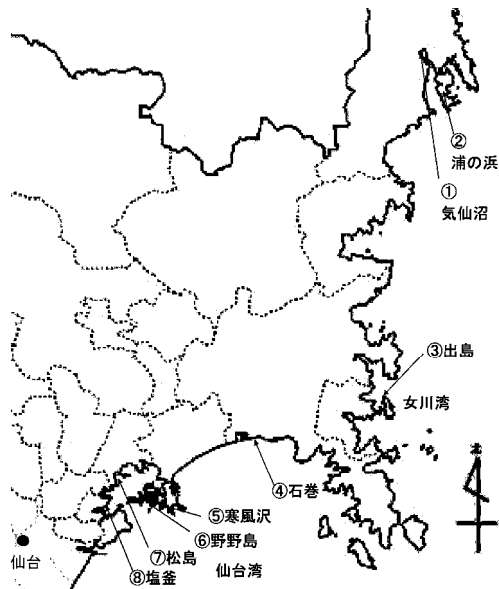


図-1.4 位置図（宮城県）



写真-1.1 ①気仙沼

(浮体は流出, 連絡橋は半水没, 係留杭のみ残存)



写真-1.2 ②浦の浜
(浮体・連絡橋は陸上に打ち揚げ，係留杭のみ残存)



写真-1.4 ⑤寒風沢
(浮体・連絡橋・係留杭 全て流出)



写真-1.3 ④石巻
(浮体・係留杭は軽微な損傷，連絡橋は半水没)



写真-1.5 ⑥野野島
(浮体・連絡橋・係留杭 軽微な損傷)



写真-1.6 ⑦松島 (チェーン係留)
 (浮体・連絡橋は軽微な損傷,
 縦列に並んだ2基の浮体法線が左右にずれ)



写真-1.8 ⑦松島 (B 杭係留)
 (浮体は流出, 連絡橋半水没, 係留杭のみ残存)



写真-1.7 ⑦松島 (A 杭係留)
 (浮体・連絡橋・係留杭 ほぼ無傷)



写真-1.9 ⑧塩釜
 (浮体・連絡橋・係留杭 ほぼ無傷)

1.2 出島漁港の浮体の被災状況

8箇所のうち10m前後の大きな津波が来襲し、杭係留とチェーン係留の2つの係留方式がある③出島漁港に注目しその被災状況を個別に取り上げる。

(1) 杭係留方式

被災後には沖側の係留杭のみ残存、浮体は流出し連絡橋と護岸側の係留杭は海底に水没していた(写真-1.10)。潜水調査を含む被災状況から分かったことを示す。

- ①護岸側係留杭には海底地盤から引き抜かれた形跡があるが、杭本体に大きな変形や割れはみられない。
- ②護岸側係留杭頭部と連結材の溶接部が部分的に破断している。
- ③連絡橋は橋台部の支承アンカーごと外れ海底地盤上に着底し、その上に護岸側係留杭が被さっている。
- ④沖側係留杭には大きな損傷や変形は見られない。
- ⑤浮体は流出し近隣の浜に座礁、外壁や付帯設備の部分的な損傷もみられ半沈していた。



写真-1.10 ③出島漁港（杭係留）

（上：被災前，下：被災後）

（上：動揺制御型浮体式係船岸実施例集 漁港新技術開発研究会 資料の一部を引用）

(2) チェーン係留方式

チェーン係留方式では浮体が流失することはなかったが、縦列に3基配置された浮体は被災後に法線がずれていた(写真-1.11)。

各浮体は4本のアンカーチェーンで放射状に係留され

ていたが、チェーンが破断した形跡は見られなかった。

アンカーブロックの水深が約20mと深くチェーン全長も約70mと長かったことから、チェーンの弾性効果や自重による懸垂長さの余裕がチェーンにかかる張力を緩和、海底地盤に設置されたアンカーブロックもチェーンを介して引っ張られ動いた可能性を考えた。そこでチェーン係留方式については、係留シミュレーションプログラムを用いた津波作用時の浮体の挙動解析をおこなった結果、津波により海底に設置したアンカーブロックが走錨したため法線がずれたものと推定される(有川ら、2013)。津波により浮体の係留バランスがくずれたため、水位安定後も初期の位置に戻りきれず、ずれた位置で留まったものと推定される。

1.3 本報告書の構成

本書は杭係留方式浮体の被災メカニズムの検討に特化し3つの構成とする。第2章で出島漁港をモデルにした杭係留方式の浮体の水理模型実験を行い孤立波に対する浮体の挙動や反力を推定、第3章で津波数値計算による津波の状況把握と杭係留方式での被災メカニズムの検証、第4章で津波を考慮した係留杭の設計手法について報告する。なお、港内での浮体構造物の津波による被災は、水位変動や流速による一次的要因の他、漂流物の衝突など二次的要因も考えられるが、陸上に大きな施設がなく被災に繋がる衝突はなかったものとし一次的要因のみを扱うものとした。



写真-1.11 ③出島漁港（チェーン係留）

（上：被災前，下：被災後 衛星写真@Google）

2. 杭係留方式の浮体の水理模型実験

2.1 実験手法

(1) 使用水槽及び計測器配置

実験は港湾空港技術研究所の105m堤体実験水路の主水路（以降、水路と略す）で実施した。波高検定時の計測器配置を図-2.1に示す。実験時の計測器配置を図-2.2、模型近傍を拡大したA部を図-2.3に示す。

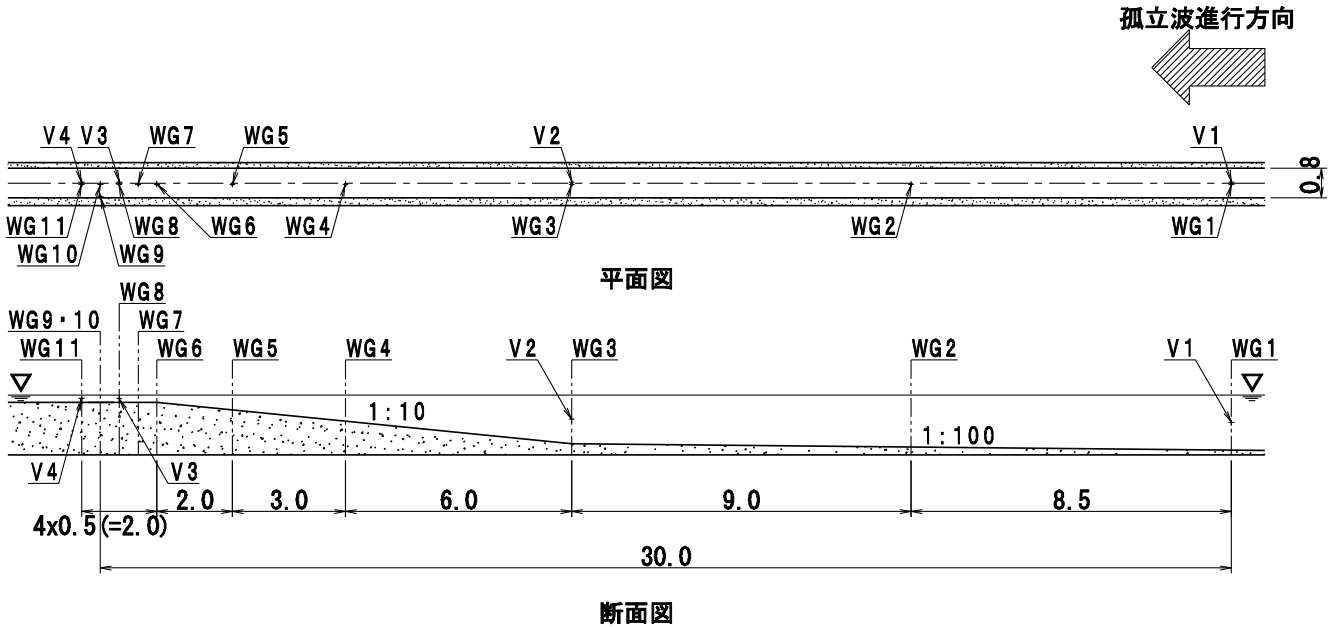


図-2.1 波高検定時 計測器配置 (単位：m)
(WG1~11：波高計 V1~4：流速計)

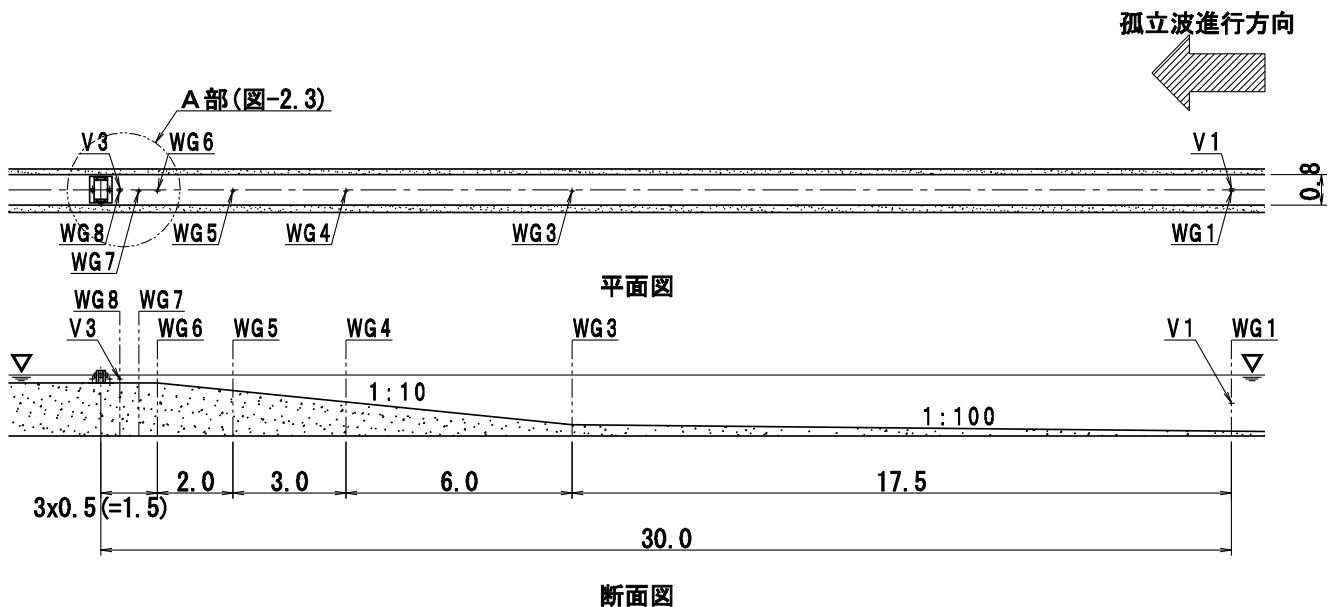


図-2.2 実験時 計測器配置 (単位：m)
(WG1~8：波高計 V1,3：流速計)

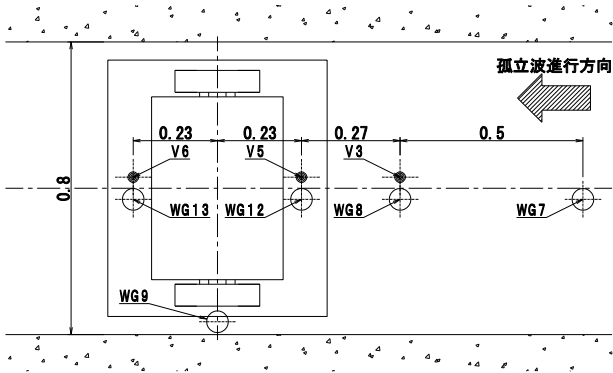


図-2.3 模型近傍 計測器配置 (単位: m)
 (図 2.2 の A 部拡大図を示す,
 WG7~9,12,13: 波高計 V3,5,6: 流速計)

(2) 実験模型

浮体前面側を 1/10 の水底勾配とし、模型浮体設置用の杭と模型浮体は出島漁港浮棧橋の断面形状を 1/25 に縮尺したものをを用い、浮体が幅方向から波を受けるように水路に設置した (写真-2.1)。

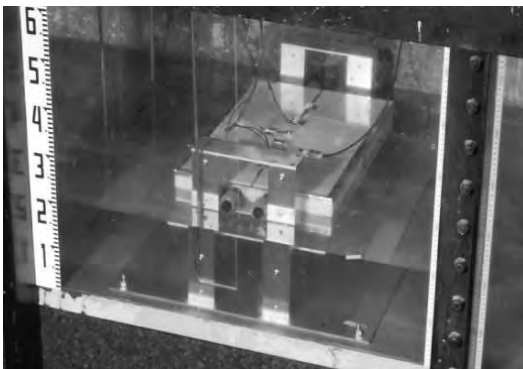


写真-2.1 模型浮体

模型浮体の寸法は、長さ(L)×幅(B)×高さ(D)×喫水(d) = 0.5m×0.36m×0.10m×0.06m である (図-2.4)。

喫水(d)は水面から浮体底面までの距離を示す。

図-2.4 中の記号 α , β , ℓ_1 , ℓ_2 の数値は、実験条件にまとめた表-2.2 に示し①~⑤の名称は以下とする。

- ①: 模型浮体
- ②: 係留杭 (杭間隔 2 種類)
- ③: 係留ローラー
- ④: 杭頭連結材
- ⑤: 係留杭ベース (水路底面に固定)

模型浮体単独で浮体の排水量と浮力の釣合を維持しながら、重心を通過する長手軸回り (ロール; Roll) に傾斜した場合に生ずる静水圧による復原モーメントと、水面と浮体上面の距離 (乾舷; Freeboard) を図-2.5 に示す。

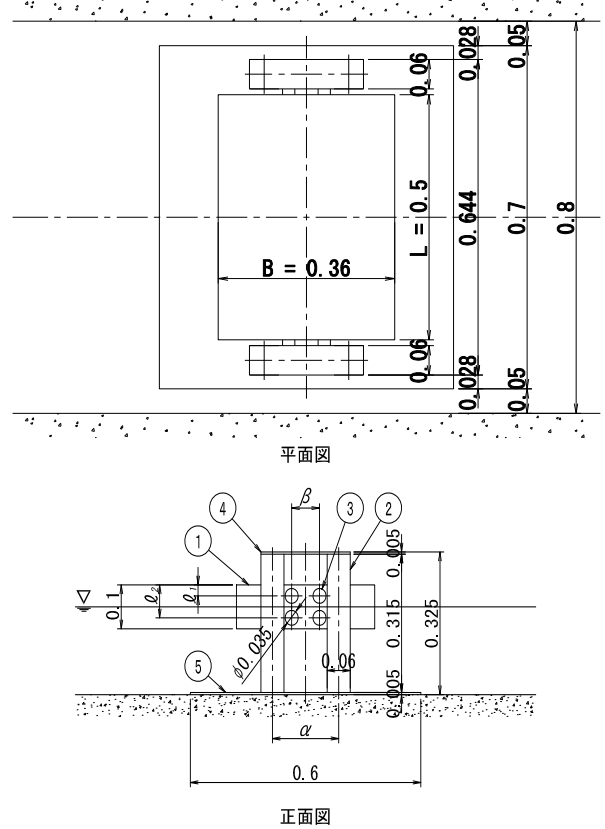


図-2.4 模型浮体 (単位: m)

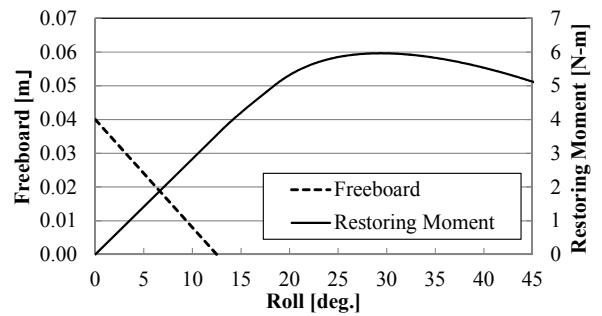


図-2.5 浮体模型のロール角と乾舷・復原モーメント
 左縦軸: 乾舷, 右縦軸: 復原モーメント, 横軸: ロール角, 実線: 復原モーメント, 破線: 乾舷

浮体は 12.5 度を超えて傾斜すると乾舷が 0 となり冠水する事がわかる。また、浮体単独での復原モーメントは 15 度程度までほぼ直線的に増加するが、15 度以上だと増加の程度が減り、30 度近傍で最大、より大傾斜になると復原モーメントは減少する。

(3) 計測方法

実験では、入射波高、流速、浮体表面圧力、浮体中央での鉛直加速度、水平係留反力、鉛直係留反力を計測した(表-2.1, 図-2.6)。時系列は2kHzでサンプリングして記録した。なお、以下の解析では得られた時系列中での最大値を用いている。また、係留反力に対しては、ノイズ除去のため5Hzのローパスフィルタを用いて処理している。

表-2.1 計測器一覧

計測項目	記号	計測器
波高	WG	電子工業製 NWS640, KENEK 製 CHT6 等
流速	V	KENEK 製 VM-801HFS
圧力	UG	SSK 製 P310A-02S
分力	F_x, F_z	電子工業製 2 分力計 (特注品; $F_x=50N, F_z=150N$)
加速度計	ACC	共和電業製 AS-2GB

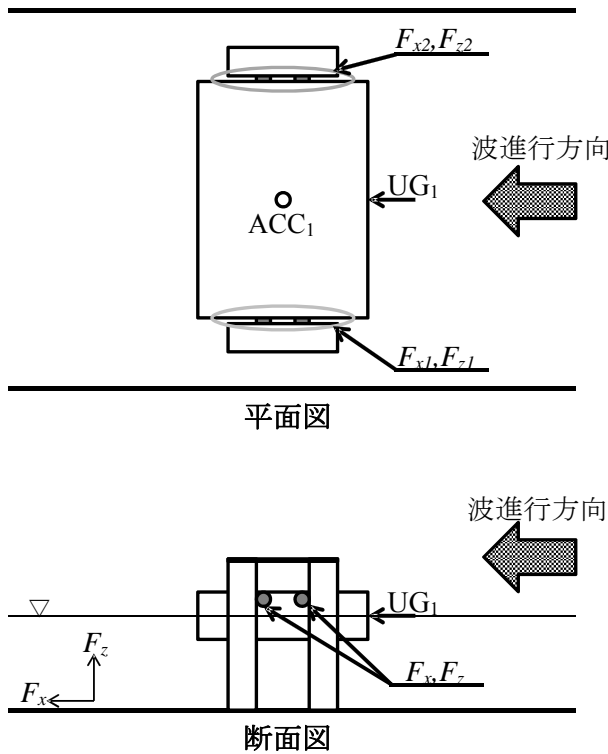


図-2.6 計測器配置 (圧力, 分力, 加速度計)

浮体は実機と同様に、基本的に自由浮体として波浪などに対し自由に上下することができるが、係留ローラーに対して設定した間隙以上の水平変位が生ずると係留ローラーを介して係留杭で変位が抑制され、水平係留反力が作用する。同様に、浮体の上昇に伴い杭頭で上昇が抑制されると、鉛直係留反力が作用する。係留反力は係留ローラーの根元に設置した2分力計で計測されている。以降に示す係留反力は浮体の左右にある係留ローラーで計測された値

の合算値によって評価している。従って、片方の係留杭に作用している係留反力は1/2となる事に注意願いたい。

(4) 実験条件

水深は模型縮尺1/25から0.20, 0.24, 0.28, 0.32m(実機5, 6, 7, 8m相当)とした。また係留ローラーの取付位置(以降、係留位置と略す)が浮体の安定性に与える影響を評価するため、浮体重心高さから見て、ローラー設置高さを上段、下段として与えた。実験条件のまとめを表-2.2に示す。

表-2.2 実験条件

杭間隔	値			
	狭 $\alpha:0.172m, \beta:0.072m$		広 $\alpha:0.292m, \beta:0.192m$	
係留位置	上段 $\ell_1:0.025m$	下段 $\ell_2:0.075m$	上段 $\ell_1:0.025m$	下段 $\ell_2:0.075m$
水深 h	0.20m, 0.24m, 0.28m, 0.32m	0.20m, 0.28m, 0.32m	0.20m, 0.28m, 0.32m	0.20m, 0.28m, 0.32m

本報告では、孤立波を用いた。また、波高検定は $h=0.20m$ および $h=0.32m$ の水深にて実施した。 $h=0.24m$ および $h=0.28m$ に関しては、実験中の値から後述の手法により推定した。結果を表-2.3に示す。

表-2.3 浮体模型位置における波高 H [m]

($h=0.24m$ 及び $0.28m$ は模型設置時の計測値からの推定値)

水深 h [m]	波高 H [m]
杭間隔：狭, 係留位置：上段	
0.20	0.052,0.060,0.065,0.067,0.074
0.24	0.020,0.032,0.054,0.068,0.069,0.072,0.079,0.088
0.28	0.021,0.034,0.052,0.083,0.084,0.102
0.32	0.022,0.032,0.049,0.076
杭間隔：狭, 係留位置：下段	
0.20	0.052,0.067,0.074,0.082,0.086,0.104
0.28	0.084,0.102
0.32	0.076,0.101,0.124
杭間隔：広, 係留位置：上段	
0.20	0.065,0.074
0.28	0.076,0.102
0.32	0.076,0.124
杭間隔：広, 係留位置：下段	
0.20	0.065,0.074
0.28	0.076,0.102
0.32	0.076,0.124

$h=0.24m$ および $h=0.28m$ で模型がない場合の模型設置位置の波高は以下のように推定した。①WG7の波高検定時と模型設置時の波高の比較を行い②WG7の波高検定時と模型設置時の波高差の原因を調べ③WG7とWG10の関係性を

調べ、波高比率を用いて $h=0.24\text{m}$ と $h=0.28\text{m}$ の模型設置時の波高から模型がない場合の模型設置位置の波高を導く。

①波高検定時と模型設置時における WG7 における波高の比較を行ったものを、図-2.7 ($h=0.20\text{m}$)、図-2.8 ($h=0.32\text{m}$) に示す。

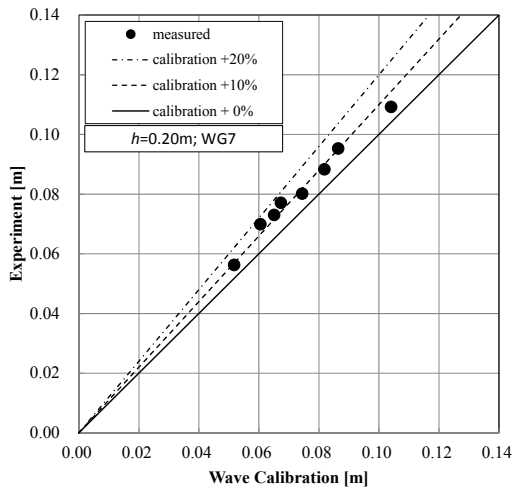


図-2.7 波高の比較($h=0.20\text{m}$, WG7)

縦軸：模型設置時波高，横軸：波高検定時波高，●：計測値，一点鎖線：検定値+20%，破線：検定値+10%，実線：検定値+0%

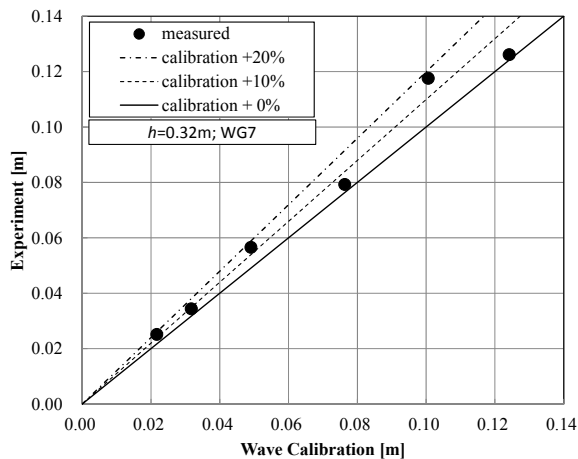


図-2.8 波高の比較($h=0.32\text{m}$, WG7)

縦軸：模型設置時波高，横軸：波高検定時波高，●：計測値，一点鎖線：検定値+20%，破線：検定値+10%，実線：検定値+0%

図-2.7 および図-2.8 とともに計測値は破線近傍に分布しており、水深によらず、模型設置時の方が波高検定時よりも 10%波高が高くなっているということがわかる（平均値はどちらも約 10%）。

②WG3 における $h=0.20\text{m}$ 時の波高の比較を図-2.9 に示す。図-2.9 では、計測値は実線近傍に分布しており、WG3 は模型よりも遙か前方で反射波の影響が出にくいと考えられるため、図-2.7 で模型設置時の波高が 10%増加している原因は、模型による反射波であると考えられる。従って模型設置時の WG7 の 0.9 倍が、模型が無い場合での WG7 となると考えた。

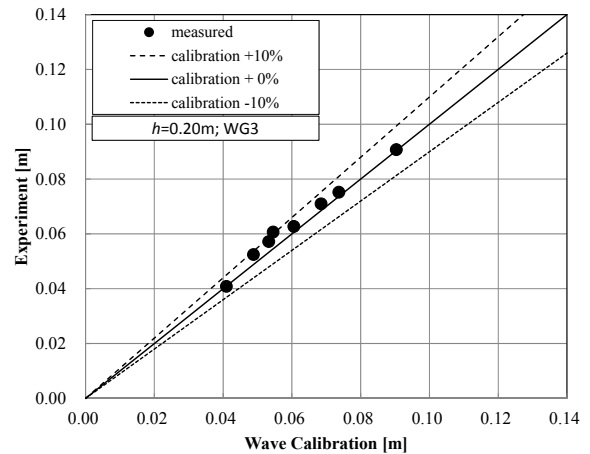


図-2.9 波高の比較($h=0.20\text{m}$, WG3)

縦軸：模型設置時波高，横軸：波高検定時波高，●：計測値，破線：検定値+10%，実線：検定値+0%，点線：検定値-10%

③波高検定時の WG7 と模型設置位置の WG10 における波高を比較したものを図-2.10 に示す。

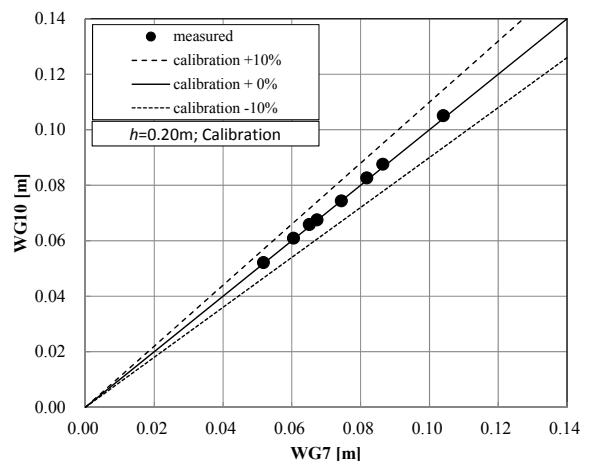


図-2.10 波高の比較($h=0.20\text{m}$)

縦軸：波高検定時波高(WG10)，横軸：波高検定時波高(WG7)，●：計測値，破線：WG7+10%，実線：WG7+0%，点線：WG7-10%

図-2.10 から WG7 と WG10 は良く一致しており、模型前方 1m の WG7 の波高と模型設置位置の波高はほとんど変

化していないといえる。従って全ケースにおいて模型が無い場合のWG7はWG10となる。以上の①～③によって模型設置位置における、模型がない場合の波高を得た。

2.2 実験結果

(1) 係留反力

係留反力を示す時系列として2つの例を示す。

図-2.11 と対応する写真を写真 2-2、図-2.12 と対応する写真を写真 2-3 に示す。

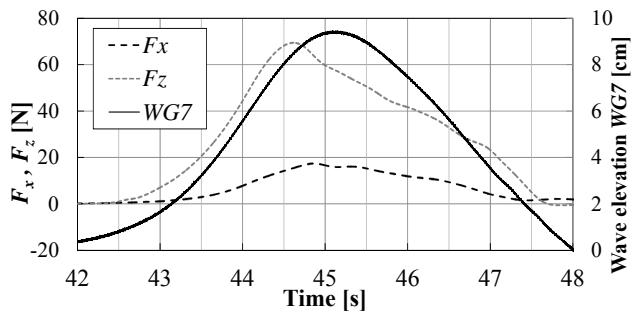


図-2.11 係留反力時系列

(杭間隔：狭，係留位置：上段，水深 0.28m，波高 0.083m)
左縦軸：水平反力 (F_x) および鉛直反力 (F_z)，右縦軸：波高，横軸：造波開始からの経過時間，黒破線： F_x ，灰点線： F_z ，太線：WG7 における波高

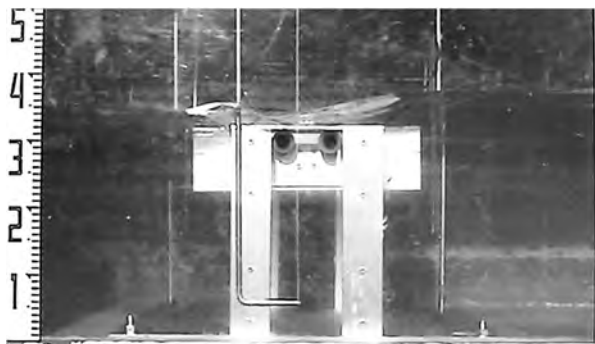


写真-2.2 浮体全没の状況 (杭間隔：狭，係留位置：上段，水深 0.28m，波高 0.083m)

図-2.11 では係留位置が「上段」で水位が 0.28m であり，杭頭と係留ローラー間のクリアランスが小さく (0.008m)，図-2.12 では係留位置が「下段」で水位が 0.28m であり，杭頭と係留ローラー間のクリアランスが大きい (0.058m)。

図-2.11 ではクリアランスが小さいため，水平反力 F_x ，鉛直反力 F_z がほぼ同時に生じ始めている (42.5～43.5 秒)。一方，図-2.12 ではまず水平反力が生じはじめ (44 秒)，杭頭と係留ローラーのクリアランスが大きいため，その後も水位上昇を続けた後に杭頭へ浮体が接触し鉛直反力 F_z が生じている (45.5 秒；写真-2.3 参照)。

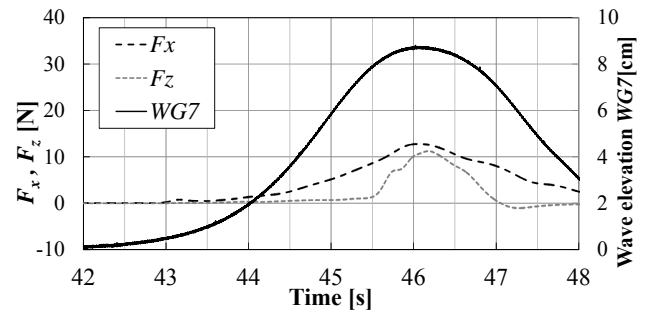


図-2.12 係留反力時系列

(杭間隔：広，係留位置：下段，水深 0.28m，波高 0.077m)
左縦軸：水平反力 (F_x) および鉛直反力 (F_z)，右縦軸：波高，横軸：造波開始からの経過時間，黒破線： F_x ，灰点線： F_z ，太線：WG7 における波高

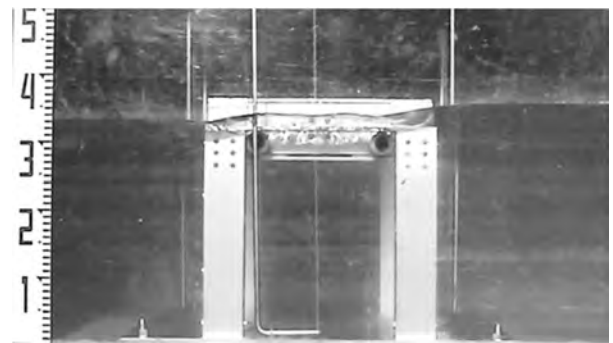


写真-2.3 杭頭に係留ローラーが接触した瞬間の状況 (杭間隔：広，係留位置：下段，水深 0.28m，波高 0.077m)

a) 水平方向成分

係留反力の水平方向成分を図-2.13 に示す。図-2.13 では転覆していない全ケースを示している。

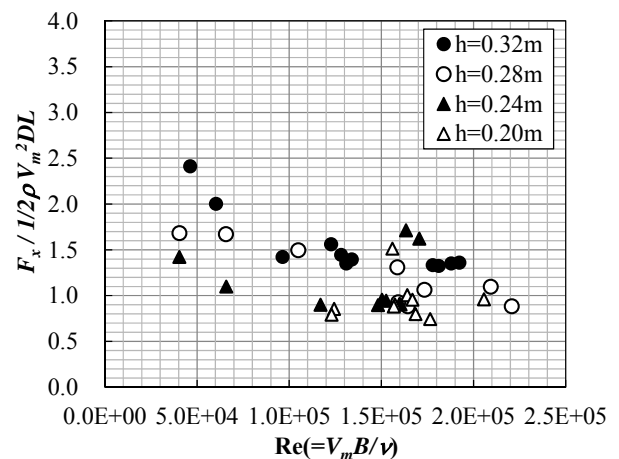


図-2.13 係留反力水平成分

縦軸：水平反力最大値，横軸：レイノルズ数，△：水深 0.20m，◇：水深 0.24m，□：水深 0.28m，●：水深 0.32m

縦軸は水平反力最大値 F_x を動圧×投影面積で無次元化している。動圧算出用の流速は計測された水平方向最大流速 V_m 、投影面積としては浮体高さ D ×浮体長 L を用いた。レイノルズ数が 1.0×10^5 より高い領域では、水深によらず $0.7 \sim 1.7$ にあり抗力係数は平均 1.2 と推定される。

b) 鉛直方向成分

係留反力の鉛直方向成分を図-2.14 に示す。図-2.14 では転覆してない全ケースを示している。

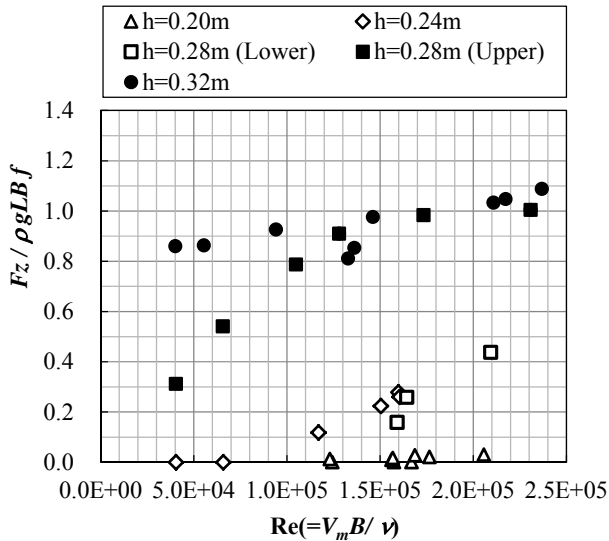


図-2.14 係留反力鉛直成分

縦軸：鉛直反力最大値，横軸：レイノルズ数，△：水深 0.20m，◇：水深 0.24m，□：水深 0.28m 下段，■：水深 0.28m 上段，●：水深 0.32m

浮体は水位によって上昇するが、杭頭で上昇が妨げられることで鉛直力が作用する。縦軸は鉛直係留反力最大値を浮体全容積が生ずる浮力から重量を差し引いた力（余剰浮力）によって無次元化しているため、全没で 1.0 となる。

水深 0.20m 時は杭頭に接触しないため反力が出ていない。水深 0.24m 時と水深 0.28m 時の係留ローラーが下段の場合は係留ローラーと杭頭のクリアランスが大きく全没に至らない。水深 0.28m で係留ローラーが上段の場合はクリアランスが小さい。そのため、波高が低い時から杭頭にあたるため反力は生ずるものの、全没には至らないため 1.0 となることはなく、波高が高くなるに従い 1.0 に近づく。また、水深 0.32m においては最初から杭頭に接触しており、余剰浮力と同等と見なせる 1.0 近傍である。

以上から、浮体が杭頭にあたるような状況では鉛直反力が生じ、浮体の余剰浮力とほぼ同程度の力が作用していると考えて良い。

(2) 浮体挙動

主な浮体挙動を写真-2.4~2.7 に示す。

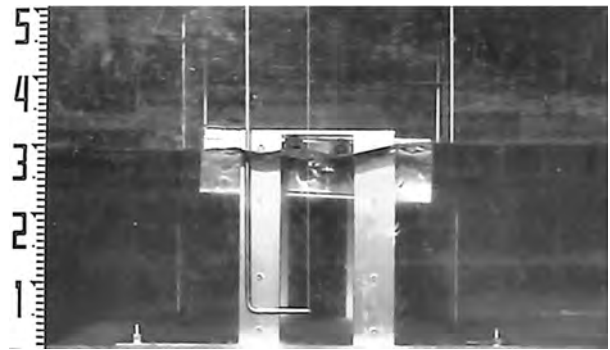


写真-2.4 冠水なし

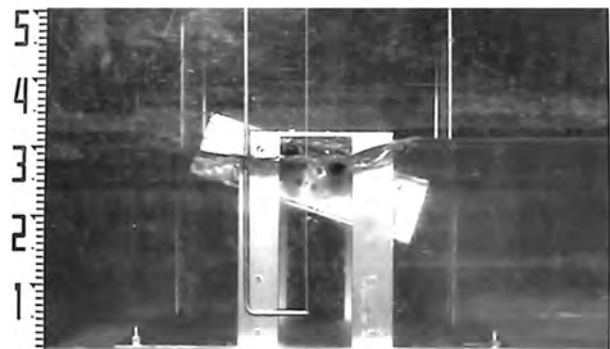


写真-2.5 部分冠水

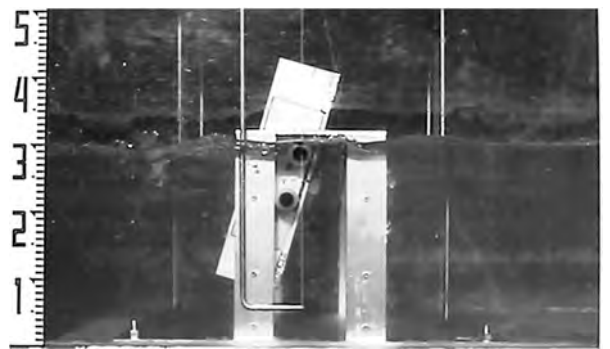


写真-2.6 転覆（時計回りに回転中）

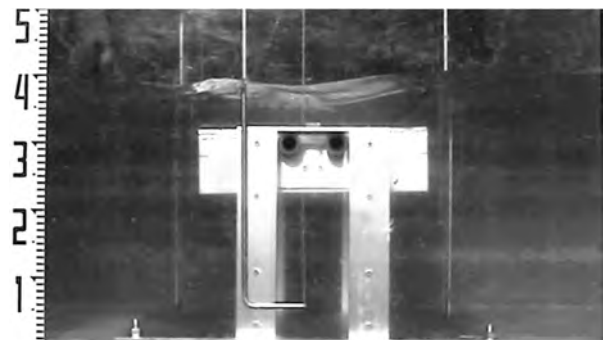


写真-2.7 全没

実験では、水面変位に応じて浮体上面に冠水することなく単に上下動をする場合(写真-2.4)、部分冠水を生ずる場合(写真-2.5)、復原力が担保できず転覆してしまう場合(写真-2.6)および実質的には転覆状態だが、水深が浅いため回転途中で止まる状態(以降、触底と略す)や全没(写真-2.7)といった状態となった。全実験ケースにおける浮体挙動のまとめを表-2.4に○△×の記号で整理する。

表-2.4 全実験ケースにおける浮体挙動
(各水深における記号の並びは表-2.3の波高順)

水深 h [m]	○：冠水なし，△：部分冠水， ▲：全没，×：触底，転覆
杭間隔：狭，係留位置：上段	
0.20	△， △， △， ×， ×
0.24	○， ○， △， △， △， △， ×， ×
0.28	○， ○， ▲， ▲， ×， ×
0.32	▲， ▲， ▲， ▲
杭間隔：狭，係留位置：下段	
0.20	△， △， △， △， ×， ×
0.28	△， △
0.32	▲， ▲， ▲
杭間隔：広，係留位置：上段	
0.20	△， ×
0.28	▲， ▲
0.32	▲， ▲
杭間隔：広，係留位置：下段	
0.20	△， ×
0.28	△， ×
0.32	▲， ▲

2.3 考察

(1) 浮体の最大傾斜角

孤立波の最大流速に対する浮体の最大傾斜角の試験結果を図-2.15に示す。なお、図-2.15では流速を実機換算値とし、実験計測値は、フルード則を適用し計測値の5倍の値とした。図中、転覆した場合を90°として表示した。

まず、杭頭と係留ローラーとの初期クリアランスが十分にある場合、係留ローラーが上段に配置されたケースでは、実機換算値で最大流速が2.5m/s程度を超えると、浮体は大きく回転し、触底、あるいは転覆している。一方で、係留ローラーが下段に配置されたケースでは、上段配置に比べて回転に至る限界流速が若干大きくなっている。これは、上段配置においては、係留ローラー位置が重心より高いため F_x によるモーメントは転倒モーメントとなるが、下段配置においては、重心位置より低くなるため、復原モーメントとして作用することによる。

次に、係留ローラーが杭頭に接触する場合には、図-2.16に示す F_z が復原モーメントとして作用し、最大傾斜角は小

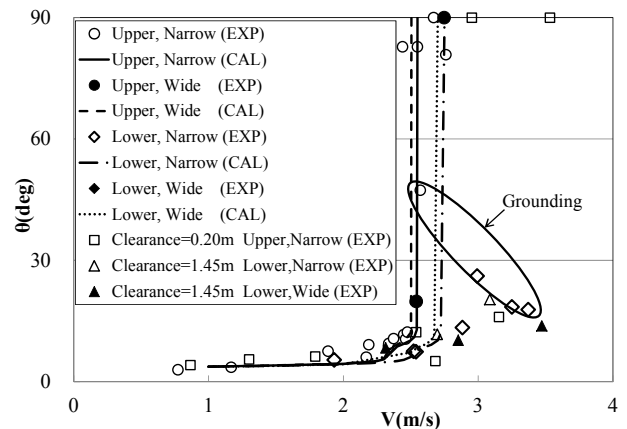


図-2.15 実機換算流速と浮体傾斜角

図中；縦軸：ロール角，横軸：水平方向最大流速（実機換算値），○：係留ローラー上段，狭（実験），実線：上段，狭（計算），●：上段，広（実験），破線：上段，広（計算），◇：下段，狭（実験），一点鎖線：下段，狭，◆：下段，広（実験），点線：下段，広（計算），□：実機換算クリアランス=0.20m，上段（実験），△：実機換算クリアランス=1.45m，下段，狭（実験），▲：実機換算クリアランス=1.45m，下段，広（実験）

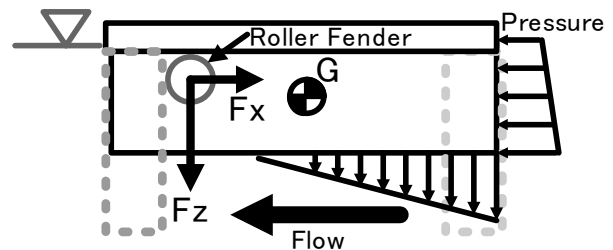


図-2.16 係留杭と杭頭に係留ローラーが接触したことにより生ずる反力の向き

さくなる傾向にある。また、それは、杭間隔が広い方が小さくなる。図-2.15の△と▲で示す結果をみると、その様子が確認できる。

最後に、杭頭と係留ローラーとの初期クリアランスが小さいケースでは、杭頭との接触による鉛直下向きの力が復原モーメントとして働くため、傾斜角を抑える傾向が見られる。初期クリアランスが無いケース（水深=0.32m）については回転や触底が見られないため、図-2.15ではそのケースの結果を省略している。図中の実機換算クリアランスが0.20mと1.45mの結果は、水深0.28mで係留ローラー配置を上段と下段に対しておこなった実験結果である。

(2) 浮体の回転現象のモデル化

浮体の回転（触底を含む）メカニズムは次のように考えることができる。まず浮体に流れが作用することによって

図-2.16 に示すように、浮体底面前端で流れの剥離に伴い浮体の底面前方に負圧が生じ、浮体は前方に傾斜する。流速の増加に伴って傾斜角が増大し、上面の冠水が発生する。冠水による流圧が上面からも作用するため、さらに傾斜角が増大し、最終的には回転に至る。

流速変化が緩やかな津波流れを想定した場合、浮体の回転現象は定常釣合い問題として扱うことが可能と考えられるので、以下のような簡易的な定式化を試みる。ただし、ここでは、杭頭との接触は考えないものとする。

まず、浮体に作用する力として、次の5成分(図-2.17)を考える。

- W : 浮体重量
- F_B : 浮力
- F_R : 係留反力
- F_1 : 前後面に作用する流圧力の和
- F_2 : 上面、底面に作用する流圧力の和

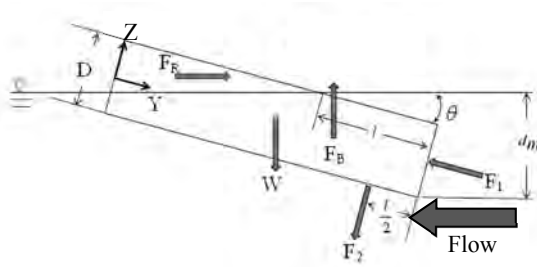


図-2.17 浮体に作用する力

ここで流圧力を

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho (V_m \times \cos \theta)^2 D \times C_{p1} \quad (2.1)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho V_m^2 d_m \times C_{p2} \quad (2.2)$$

の2成分で表すこととする。ただし、ここで

ρ : 水の密度, V_m : 最大流速, θ : 傾斜角, d_m : 最大喫水,
 D : 最大高さ, l : 上面冠水長さ, C_{p1} : 前後面圧力係数 (=1.2), C_{p2} : 上面、底面圧力係数 (=3.5) である。

図-2.13 に示す試験結果から静止時喫水で無次元化した前後面の圧力係数を 1.2 とした。このとき、前後面流圧力の着点、前面の中央とした。

上面、底面に作用する流圧力については、傾斜角の増大に伴って圧力係数自体が増大することが想定されるため、ここでは圧力係数を一定値(実験結果に良く整合する 3.5 を採用)とする代わりに受圧面積を前方投影面積として、

傾斜に伴う流体圧力の増大効果を考慮した。上面、底面流圧力の着点、上面冠水部の中心とした。

試験結果から想定される圧力係数を用いて、面内の3成分の釣合いから浮体の傾斜角を求めることができる。

$$F_1 + F_B \sin \theta = F_R \cos \theta + W \sin \theta \quad (2.3)$$

$$F_R \sin \theta + F_B \cos \theta = F_2 + W \cos \theta \quad (2.4)$$

$$F_2 \left(B - \frac{l}{2} \right) + \frac{WB \cos \theta}{2} = F_B (Y_B \cos \theta + Z_B \sin \theta) + F_R (Y_M \sin \theta - Z_M \cos \theta) \quad (2.5)$$

B : 浮体の幅, Y_B : 浮心の Y 座標, Z_B : 浮心の Z 座標, Y_M : 係留点の Y 座標, Z_M : 係留点の Z 座標である。

本簡易モデルによる傾斜角の計算結果を図-2.15 に試験結果と比較して示しており、概ね良好な結果が見られている。傾斜角が 10° 程度を超えると急激に傾斜角が増大し、回転に至る現象が見られている。これは、 10° 程度で前面が全没して上面の冠水が発生し、浮力による復原係数の減少に伴う傾斜角の急増によって触底、回転に至ったものと考えられる。

係留反力による傾斜モーメントは、係留ローラーの設置位置を下げることによって復原方向に働くため、回転が発生する限界流速を増すことになる。今回の計算結果では、二段ローラーと下段ローラーで設置高さの差が 1.25m あり、限界流速の差は 0.2m/s 程度となっている。

図-2.15 に示した計算結果は係留ローラーが杭頭に接触しないものとし、係留反力として水平力のみを考慮したが、杭頭とのクリアランスが小さく、接触がある場合には鉛直下方に係留反力が作用する。これは復原モーメントとなるため、浮体の傾斜を抑える方向に働く。図-2.15 に示すクリアランスが小さいケースの試験結果にその傾向が見られており、転倒が発生する速度(限界速度)が右側(高速側)に移動している。杭頭とのクリアランスを小さくすることで、杭頭からの係留反力によって浮体の回転を防止することが可能となるが、この係留反力は杭の引抜き力として作用する。

(3) 杭の引抜き力

大きな鉛直反力が発生したケースの計測時系列の一例を図-2.18 に示す。水面の上昇とともに杭の引抜き力に対応する上向きの鉛直反力は増大し、浮体が全没してからは急激に減少する試験結果が得られている。

この結果から、浮体に作用する鉛直荷重として、

- ・ 底面に作用する静水圧(浮力)
 - ・ 上面に作用する水塊重量(図-2.19 参照)
- に単純化して考えることとする。

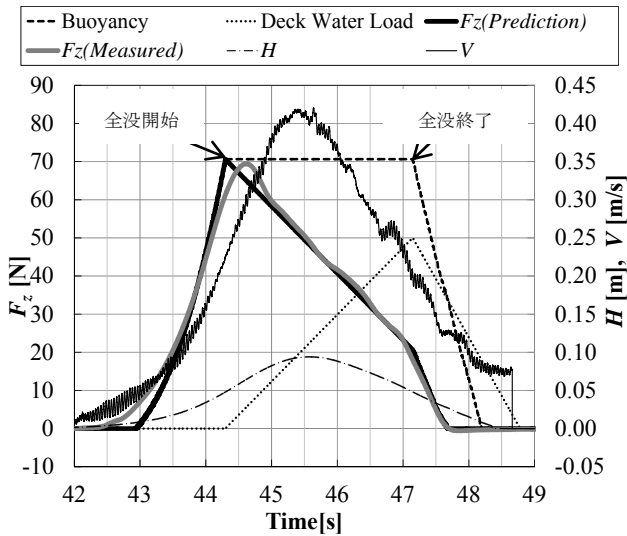


図-2.18 鉛直反力(F_z)の推定

(杭間隔:狭, 係留位置:上段, 水深 0.28m, 波高 0.083m)
 左縦軸:鉛直反力(F_z), 右縦軸:波高, 流速, 横軸:造波開始からの経過時間, 破線:浮力, 点線:上面に作用する荷重, 黒太線:推定値, 灰太線:計測値, 一点鎖線:波高, 細線:波進行方向流速

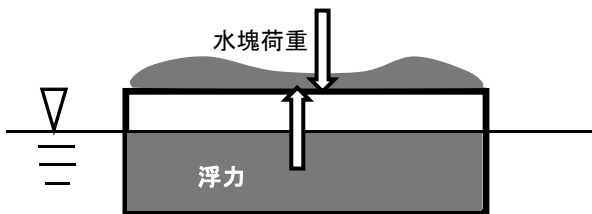


図-2.19 浮体に作用する水塊荷重

浮力は, 時々刻々の孤立波の水位と浮体の位置から決まる排水量として求めることとする。水塊は, 冠水が始まる瞬間, つまり孤立波の水位が浮体上面まで上昇した瞬間(44.2秒)から直線的に増加し, 水位がピークを打った後, 再び浮体上面まで降下した瞬間(47.1秒)に最大量が残留するものとする。その後, 水塊はその瞬間の孤立波の流速 0.2m/s で浮体上面を移動して落下するものと仮定する。水塊重量の最大値は, 計測結果を参考にして 50N と設定した。これは, 浮体上面に平均 28mm 水深の水塊が取り残された状態に対応する。

計測された鉛直反力 F_z には, 水位が浮体上面に一致する瞬間に最大値を示した後, 直線的に減少し, 水位が再び浮体上面まで降下してからは, さらに減少速度を増して直線的に減少する傾向が見られており, 本簡易推定法による鉛直係留力の時系列変化は, 計測結果と良く一致する。

2.4 まとめ

杭係留を用いた浮体模型に対して, 津波の代わりに孤立波による実験を行った結果, 以下のことが明らかになった。

- ① 水平反力は動圧に比例し, 浮体高さで無次元化した水平方向のレイノルズ数 1.0×10^5 より高い領域では, 抗力係数は 0.7~1.7 にあり平均 1.2 と推定される。
- ② 鉛直反力は杭頭に係留ローラーが接触すると生じ, その大きさは, 浮体が全没したときの余剰浮力と同程度である。
- ③ 実験を行った浮体諸元において, 浮体が杭頭に接触しない状況では津波の水平流速が 2.5~3m/s 程度で転覆(または触底)するが, 浮体が全没するような状況では転覆に至ることはない。
- ④ 係留ローラーを重心より下にするか, 杭頭への接触を想定する場合は係留杭の間隔をできるだけ広くすることで復原モーメントが大きくなるため, 流速に対して浮体の傾斜角を小さくすることができる。

3. 数値計算による津波の状況と被災メカニズム

3.1 STOC による津波の状況把握

東日本大震災における津波の状況を把握し, 浮体の被災メカニズムを検証するため, 高潮津波シミュレータ「STOC」(富田ら, 2005)(以降, STOC と略す)による津波数値計算を実施した。

(1) 計算手法

本計算では, 沖合で発生した津波が伝播し, 浮体が設置されている沿岸部での津波の状態を把握するため, 静水圧近似を仮定した準 3 次元モデル「STOC-ML」を用いた。計算時間は, 宮城県の沿岸部に津波の第 1 波が到達するよう 3 時間と設定, 計算領域は南北方向に北緯 36 度から北緯 40 度, 東西方向に東経 140 度から東経 146 度, 格子サイズは浮体橋の設置地点近傍を最小 10m/mesh とした。また地形データは, 810m/mesh, 270m/mesh, 90m/mesh, 30m/mesh, 10m/mesh の計 5 種類を重ね合わせた。

津波の初期波源分布(内閣府, 2012)は, 断層面を 98 のブロックに分割し, 地震発生時刻を 0 秒とし, 0~60 秒, 60~120 秒, 120~180 秒, 180~240 秒, 240~300 秒の時間ごとに各ブロックのすべり量を設定している断層パラメータを用いた(図-3.1)。

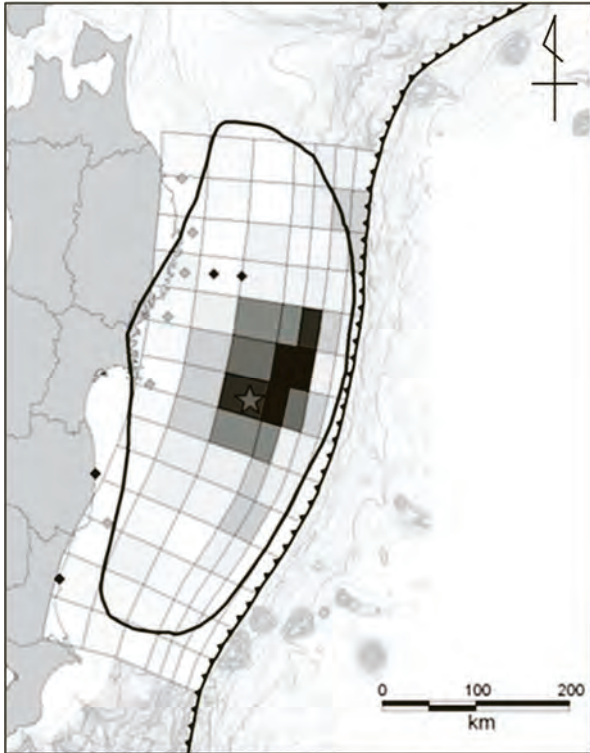


図-3.1 断層パラメータ

(2) 計算結果

STOC による計算結果の津波波形の妥当性を検証するため、沖合の GPS 波浪計による実測値 (表-3.1) と STOC による計算結果を 4 地点で比較し、整合性の確認を行った (図-3.2)。STOC の計算結果による波形は GPS 波浪計による実測値と概ね一致しており、整合性があるといえる。

表-3.1 GPS波浪計による計測地点

地点名	北緯	東経
岩手中部沖	39°37'38"	142°11'12"
岩手南部沖	39°15'31"	142°05'49"
宮城北部沖	38°51'28"	141°53'40"
宮城中部沖	38°13'57"	141°41'01"

次に STOC を用いて津波高が明らかでない出島漁港における津波の状況を計算する。出島漁港の位置図と初期状態を 図-3.3、 図-3.4、 出島漁港近郊の最大波高と流れの状態を 図-3.5、 図-3.6 に示す。

STOC による杭係留方式の浮体設置地点での波高と流速の計算結果を 図-3.7 に示す。

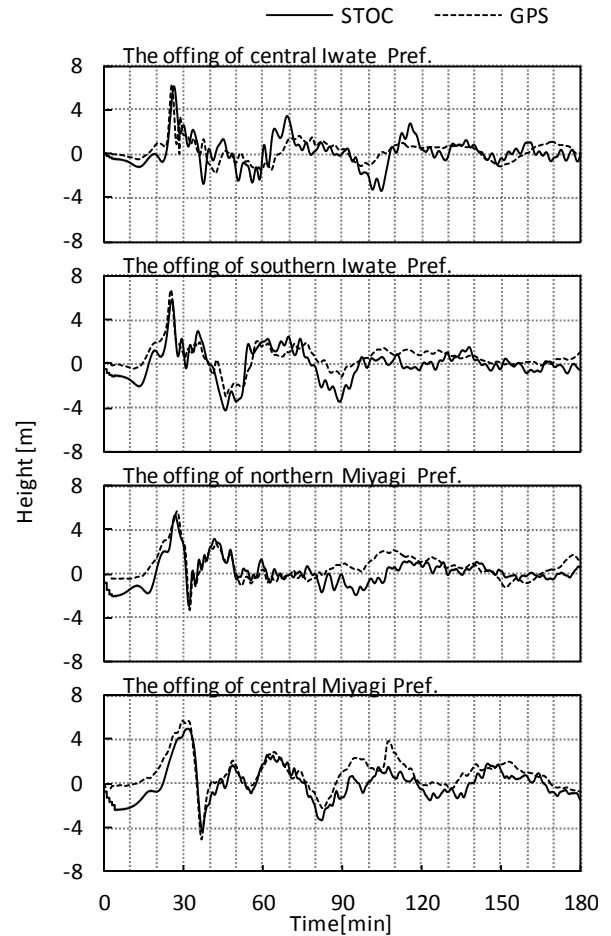


図-3.2 GPS波浪計とSTOCの比較結果

縦軸：波高 (m)，横軸：時間 (min)，実線：STOC による計算結果，破線：GPS 波浪計による計測結果，1 段目：岩手中部沖，2 段目：岩手南部沖，3 段目：宮城北部沖，4 段目：宮城中部沖，横軸：地震発生からの経過時間

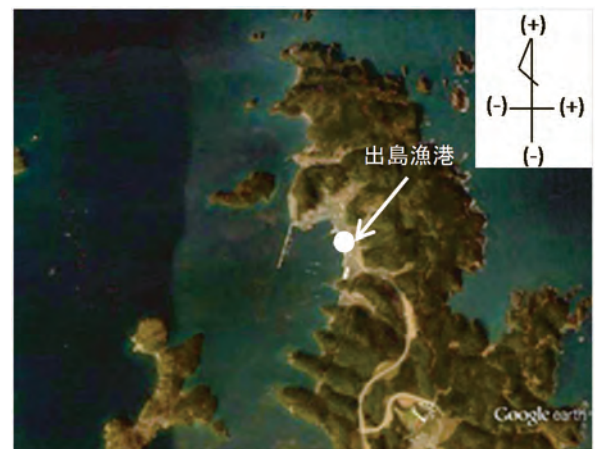


図-3.3 出島漁港位置図 (衛星写真@google)

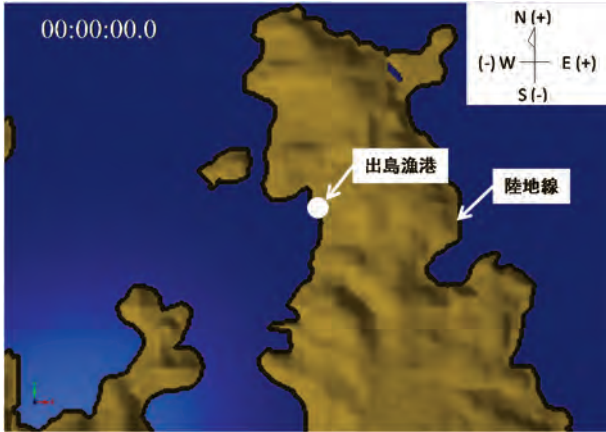


図-3.4 出島漁港近郊の初期状態

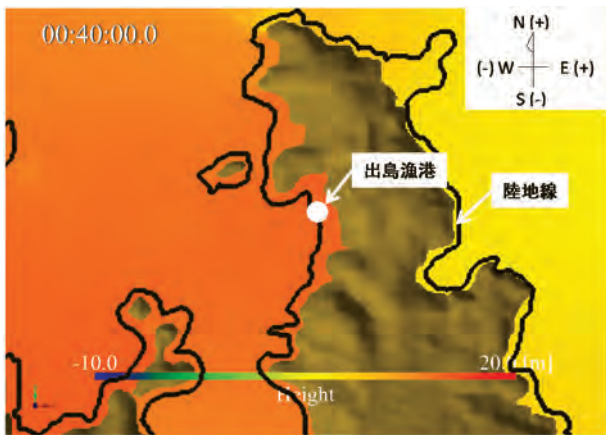


図-3.5 出島漁港近郊の最大波高

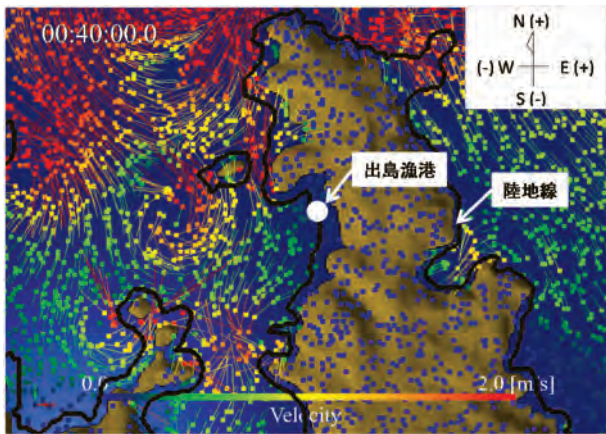


図-3.6 出島漁港近郊の最大波高時の流れの状態

なお、図-3.4～図-3.6 中にある黒線は STOC 計算で用いた地形データの陸地線を図中に落とし込んだものであり、津波の影響により波高エリアが内陸まで広がっていることがわかる。図-3.7 上に示す出島漁港の浮体設置地点での波高グラフより、地震発生から約 40 分で最大波高をむかえ、そのときの流れは図-3.6 に示す通り、出島を回り込み南側より津波が来襲していたことがわかる。

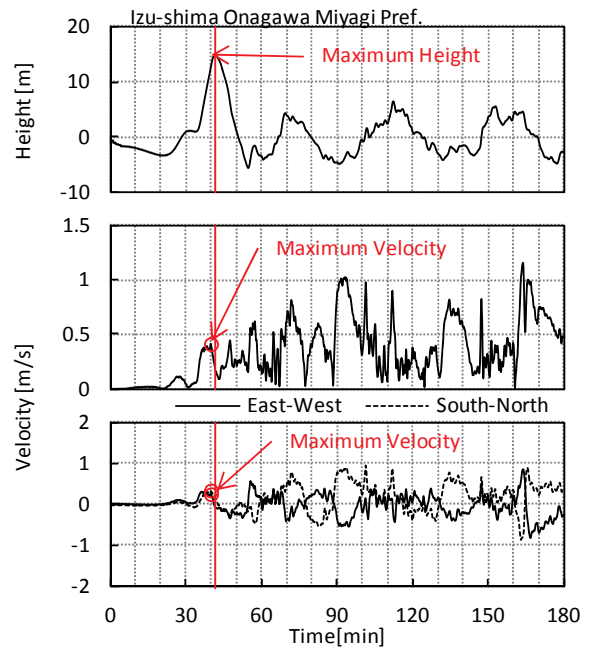


図-3.7 出島漁港の波高及び流速

上：縦軸：波高 (m)，中：縦軸：流速 (m/s)，下：縦軸：流速 (実線：東西方向流速:m/s, 破線：南北方向流速:m/s)，横軸：地震発生からの経過時間, 赤線：最大波高, 赤丸：最大流速

出島漁港における杭保留の浮体設置地点での波高は第 1 波で大きく上昇した。このときの最大波高は約 15m という非常に大きな値であり、係留杭の杭頭レベルを遥かに超えているため、護岸側係留杭の杭頭連結材下端に浮体（連絡橋）が接触したと考えられる。また、第 2 波以降の波高は、第 1 波と比べ小さいことがわかる（図-3.7 上）。

流速は、地震発生から最大波高時まで最大約 0.41m/s となった。また、最大波高時の流速は約 0.21m/s であり、流速自体は速くないといえる（図-3.7 中）。このときの最大波高時までの流速約 0.41m/s を東西方向と南北方向に分解すると、東西方向で約 0.24m/s、南北方向で約 0.33m/s であった（図-3.7 下）。

同様に津波高が明らかでない出島漁港以外の杭保留方式の浮体が設置されている地点として、寒風沢漁港と野野島漁港についても数値計算を実施した。

ただし寒風沢漁港と野野島漁港の浮体設置地点は、浦戸諸島の複雑な地形や島影が本計算で用いた地形データ (90m/mesh) に充分反映されていないため、あくまで寒風沢漁港付近と野野島漁港付近としての計算結果である。

寒風沢漁港と野野島漁港の位置図と初期状態を図-3.8、図-3.9、最大波高と流れの状態を図-3.10、図-3.11 に示す。図-3.9～図-3.11 の黒線は STOC 計算で用いた地形データ

の陸地線を図中に落とし込んだものであるが、図-3.8の浦戸諸島の地形とかなり違っていることがわかる。

また、寒風沢漁港付近での最大波高と流速を図-3.12、野野島漁港付近での波高と流速を図-3.13に示す。

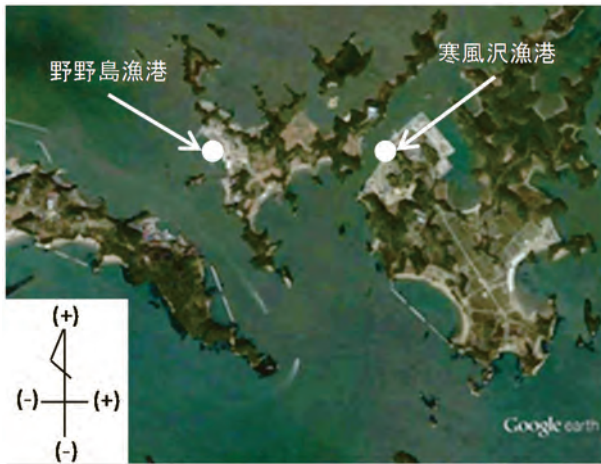


図-3.8 寒風沢漁港及び野野島漁港位置図
(衛星写真@google)

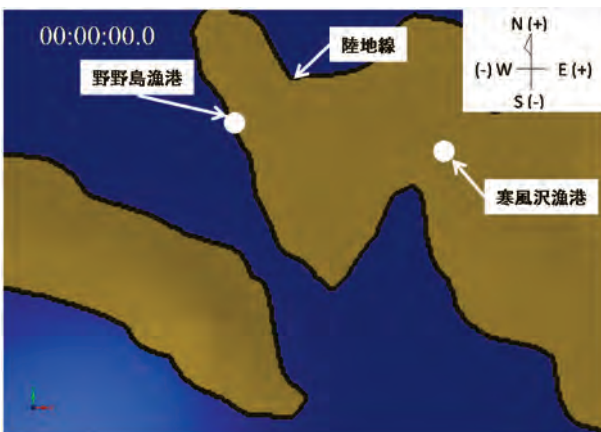


図-3.9 寒風沢漁港及び野野島漁港付近の初期状態

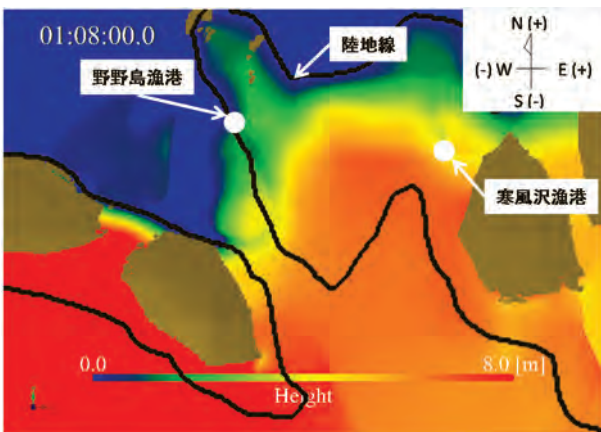


図-3.10 寒風沢漁港及び野野島漁港付近の最大波高

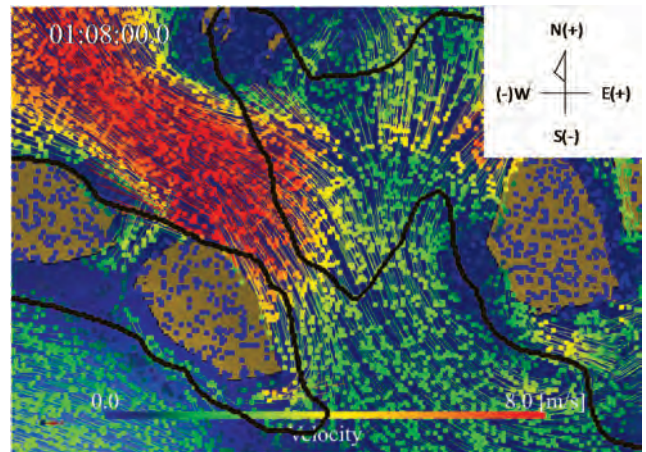


図-3.11 寒風沢漁港及び野野島漁港付近の最大波高時の流れの状態

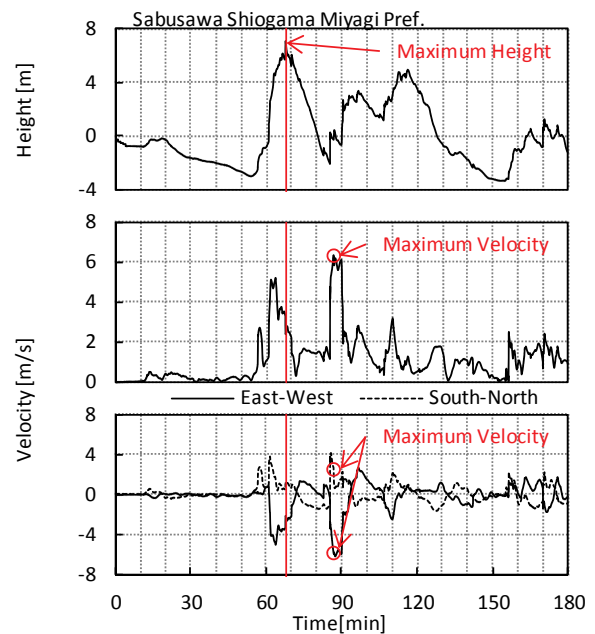


図-3.12 寒風沢漁港付近の波高と流速

上：縦軸：波高 (m)，中：縦軸：流速 (m/s)，下：縦軸：流速 (実線：東西方向流速：m/s，破線：南北方向流速：m/s)，横軸：地震発生からの経過時間，赤線：最大波高，赤丸：最大流速

寒風沢漁港付近で最大波高となる津波の第1波は、地震発生から約68分で来襲、約7.2mという大きな値であり(図-3.12上)、係留杭の杭頭レベルを超えており係留杭の杭頭連結材下端に浮体が接触したと考えられる。

このときの流れは、図-3.11に示す通り東南方向から来襲していたことがわかる。流速は、地震発生から最大波高前の10分間で約5m/sとなり、その後流速は2m/s以下におちる。しかし、第2波以降の約85分後に最大流速は約6.3m/sとかなり速い流れが生じている(図-3.12中)。この最大流速を東

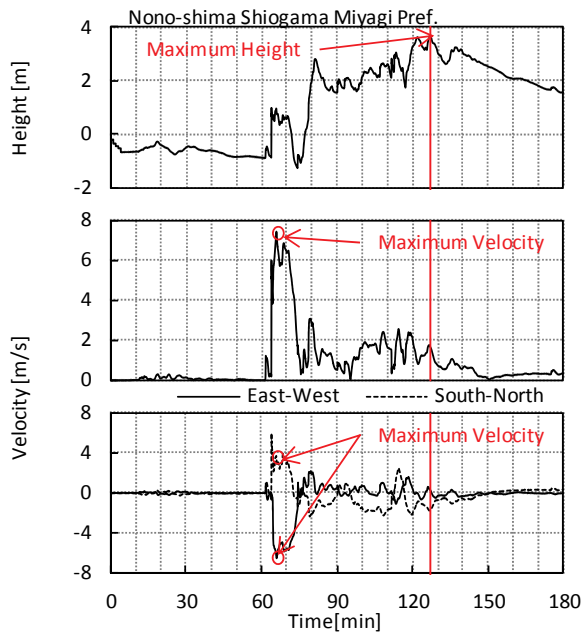


図-3.13 野野島漁港付近の波高と流速

上：縦軸：波高 (m)，中：縦軸：流速 (m/s)，下：縦軸：流速 (実線：東西方向流速：m/s，破線：南北方向流速：m/s)，横軸：地震発生からの経過時間，赤線：最大波高，赤丸：最大流速

西方向と南北方向に分解すると，東西方向に約-5.8m/s，南北方向に約2.5m/sとなった (図-3.12下)。

野野島漁港付近では，第1波の波高は比較的小さく第2波以降でも最大で約3.7m，浮体上面は係留杭の杭頭レベルには達していないと考えられる (図-3.13上)。また，最大波高時の水平流速は約1.7m/sだが，第1波での最大流速が7.4m/sとかなり速い流れが生じている (図-3.13中)。この最大流速を東西及び南北方向に分解すると，東西方向に約-6.5m/s，南北方向に約3.6m/sとなった (図-3.13下)。

以上 STOC による津波計算を行った3漁港について，実験結果と数値計算の値を用いて浮体の被災メカニズムの検討をすすめる。3漁港で浮体高さは若干異なるが，浮体サイズ (長さ×幅) が同じであることから実験結果で得られた浮力の考え方や抗力係数を用いる。

3.2 浮体の被災メカニズムの検討

(1) 出島漁港

震災後の潜水調査において，護岸側係留杭は原形を留めた状態で海底地盤上に水没しており，大きな変形や割れは見られなかった。計画配置から津波により護岸側係留杭にかかる引抜き力として以下①②が主と考えられ，これらの力が③杭の許容引抜き力を越えていたのかどうか実験結果と数値計算の値を用いて検討する。

①浮体の余剰浮力による引抜き力

係留杭の杭頭連結材下端に浮体 (連絡橋) が接触した後にさらに水位上昇し，図-3.7では約15mの最大津波高さとなり，浮体が海面下 (全没) の状態にあったと考えられる (図-3.14)。

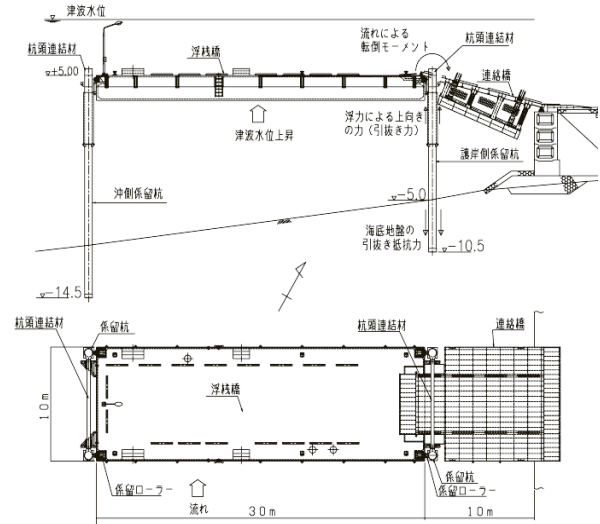


図-3.14 係留配置図 (出島漁港)

浮体の余剰浮力が係留杭に対し上向き力 (引抜き力) として作用，余剰浮力は長さ×幅×乾舷×海水比重から3000kNの値になる。係留杭4本が均等に負担したものと考えると，護岸側係留杭1本当たり $P_1=750\text{kN}$ の引抜き力が作用したことになる。

②流圧力の転倒モーメントによる引抜き力

流れによる力は，水中および水面付近の部材に作用する力 (2.1) より求められる。

図-3.7から最大津波高の流速 $V=0.21\text{m/s}$ ，流れの向きから浮体の投影面積は長さ×最大喫水 (浮体高さ) と考えると $F_1=16\text{kN}$ の水平荷重となる。海底地盤面から約10mの杭頭高さから160kN-mの転倒モーメントが杭頭部にかかり，杭基礎の外力を求めると係留杭1本当たり $P_2=10\text{kN}$ の引抜き力が作用したことになる。

係留杭基礎にかかる引抜き力は津波により浮体が全没していることから護岸側係留杭にかかる引抜き力は①が支配的といえる。

③杭の許容引抜き力

杭の許容引抜き力は，静力学的支持力公式 (全国漁港，2003) より求める。

$$R_a = W_p + R_u / F_s \quad (3.1)$$

$$R_u = 2 \times \bar{N} \times A_s \quad (3.2)$$

ここで、 R_a ：杭の許容引抜き力、 W_P ：杭の自重、 R_u ：杭の極限引抜き力、 F_s ：安全率、 N ：杭の周面摩擦抵抗を考慮できる根入れ長に対する平均N値、 A_s ：根入れ部分の杭周表面積

海底地盤条件から $N=50$ 、 $F_s=2.5$ とすると杭1本当りの許容引抜き力 $R_a=476\text{kN}$ が求められる。

杭にかかる引抜き力 $P_1+P_2 >$ 許容引抜き力 R_a となり、護岸側係留杭が海底地盤から引抜かれるに十分な荷重が作用したことがわかる。

また水深測量において係留杭周囲は洗掘の影響もあったのか 1m 程度の地盤沈下もみられたことから海底地盤への杭の根入れ長が短くなり、許容引抜き力がさらに低減した可能性も考えられる。

これらの結果から図-3.15 STEP1~5 に示すような経過をたどって被災したものと推測される。

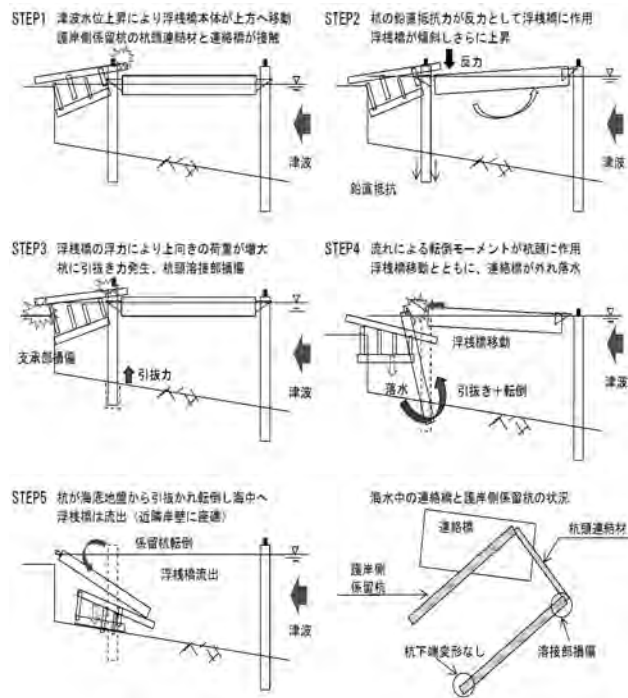


図-3.15 係留杭の被災フロー

(2) 寒風沢漁港

寒風沢漁港では震災後、全ての係留杭が流出していた。出島漁港と同様に係留杭にかかる引抜き力を考え、これらの力が杭の許容引抜き力を越えていたかどうか検討する。

①浮体の余剰浮力による引抜き力

図-3.12 では約 7.2m の最大津波高さとなり、係留杭の杭頭連結材下端に浮体が接触、図-3.16 のように浮体は海面下の状態にあったと考えられる。

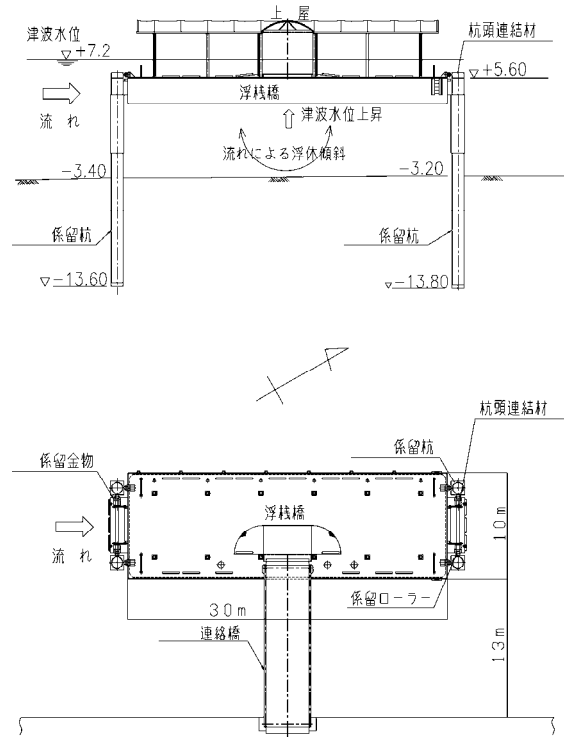


図-3.16 係留配置図 (寒風沢漁港)

余剰浮力は長さ×幅×乾舷×海水比重から 3000kN の値になる。係留杭 4 本が均等に負担したものと考えると係留杭 1 本当り $P_1=750\text{kN}$ 引抜き力が作用したことになる。

②流圧力の転倒モーメントによる引抜き力

図-3.12 から最大津波高の流速は $V=2.0\text{m/s}$ 、流れの向きから浮体の投影面積は幅×最大喫水（浮体高さ）と考えると、 $F_1=64\text{kN}$ の水平荷重となる。海底地盤面から約 9m の杭頭高さから 576kN-m の転倒モーメントが発生したと考えられる。出島と同様に杭基礎の外力を求めると係留杭 1 本当り $P_2=30\text{kN}$ の引抜き力が作用したことになる。

津波により浮体が全没していることから護岸側係留杭にかかる引抜き力は①が支配的といえるが、実験結果のように津波の速い流れの影響による浮体傾斜も生じたものと考えられる。

③杭の許容引抜き力

海底地盤条件から $N=10$ 、 $F_s=2.5$ とすると杭 1 本当りの許容引抜き力 $R_a=330\text{kN}$ が求められる。

杭にかかる引抜き力 $P_1+P_2 >$ 許容引抜き力 R_a となり、係留杭が海底地盤から引抜かれるに十分な荷重が作用したことがわかる。これらの結果から以下に示すような経過をたどって被災したものと推測される。

- ・ 津波の流れによる浮体傾斜発生、流れによる転倒モーメントが全ての係留杭に発生
- ・ 津波水位により浮体が上方へ移動し、浮体と係留杭の

杭頭連結材が接触

- ・ さらなる水位上昇により浮体本体が全没し、浮力による引抜き力が係留杭に作用
- ・ 許容引抜き力を越えたため、係留杭が海底地盤から抜けだし流出（浮体・連絡橋も流出）

(3) 野野島漁港

野野島漁港では震災後の調査で、浮体の係留ローラーの一部破損や、岸壁沈下による連絡橋支承部の不具合などが発生したが浮体機能は有していた。

図-3.13 から津波は第 2 波以降徐々に大きくなり最大津波高さは約 3.7m、図-3.17 のように浮体上面が係留杭の杭頭レベルに達しなかったため係留杭の倒壊や浮体流出を免れたものと推察される。

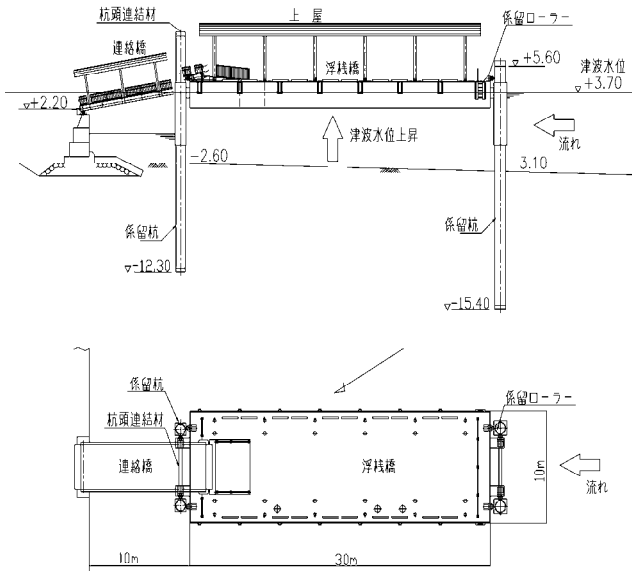


図-3.17 係留配置図（野野島漁港）

ただし、第 1 波の津波水位は 1m 程度と低い最大流速 7m/s を越えていることから、浮体長さ方向からの流速による水平荷重は $F_H=700kN$ 以上と予想され、係留ローラーは耐力を越え破損した可能性が高い。ところが図-3.13 の流速が速いことから実験結果のように浮体傾斜が起これ、その影響で杭頭と浮体の接触や、実験で再現した部分冠水や転覆が生じてもおかしくないが、係留杭のその痕跡や大きな損傷は見られなかった。

あくまで推測であるが、浦戸諸島の複雑の地形が野野島漁港内の浮体設置地点では十分に再現できなかった結果、数値計算における津波流速が大きくなった可能性が考えられる。

3.3 まとめ

STOC による 3 地点の漁港の津波高と流速を求め、実験結果の値を用いて係留杭の引抜き力の計算と被災メカニズムの検討をすすめた。

- ① 東日本大震災の断層モデルを用いて津波シミュレーションを行い、GPS の計測値と比較を行ったところ良好な一致となり、概ね信頼性があると推定される。
- ② 杭係留方式において、津波高さが係留杭天端レベルを超えた場合、浮体の余剰浮力が杭頭部に作用し係留杭に対して上向きの力（引抜き力）がかかる。許容引抜き力を越えた場合は、杭の引抜き・倒壊による浮体流出など被害が大きくなる。
- ③ 実験結果と数値計算を用いて、杭係留方式の浮体の被災メカニズムを説明することができた。

4. 係留杭の設計手法の検討

係留杭の一般的な設計フローを図-4.1 に示す。

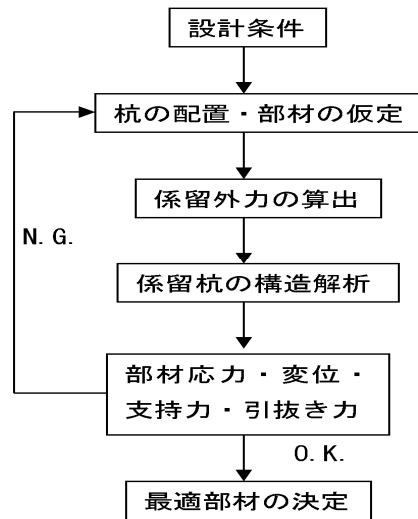


図-4.1 係留杭の設計フロー

係留杭の設計では、まず設計条件（湾内波高や風速・流れ、接岸力、土質条件等）を整理し係留杭の配置・本数と部材寸法、根入れ長さを仮定する。次に浮体に作用する外力成分として、船の接岸力やけん引力、波力、風圧力、流れの力を求め、荷重の組み合わせや方向などを考慮した係留外力を算出する。係留杭の構造解析では、各部位ごと（地中部や水中部など環境条件によって腐食代や防食の考え方が異なる）に応力照査や杭の変位量、支持力、引抜き力の照査をおこない、杭径・肉厚・長さなど最適部材が決定される。

係留杭の解析モデル例（図-4.2）に示すように係留外力の向きが水平方向成分のため、従来の係留杭の設計において杭自重も考慮すると、杭基礎に大きな引抜き力は発生しないことがほとんどであり、杭の根入れ長は土質条件を反映した支持力で決まることが多い。

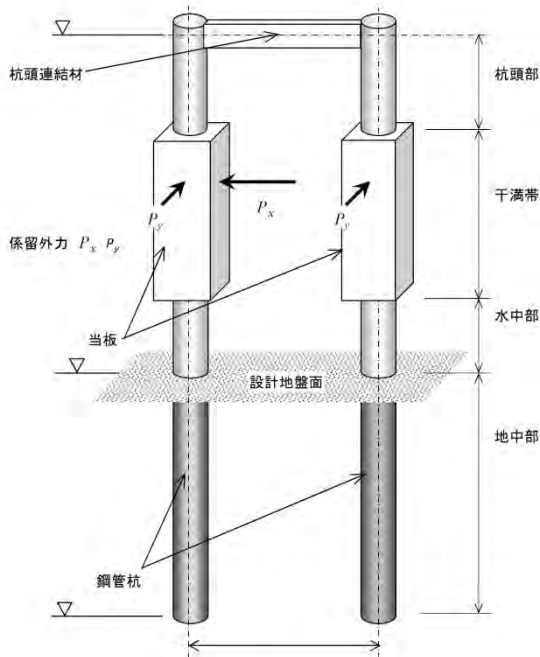


図-4.2 係留杭の解析モデル例

今回の実験で検証したように津波が発生した場合は流れによる外力も作用するが、水位上昇により浮体の余剰浮力が係留杭に作用した場合、大きな引抜き力となることがわかった。係留杭に引抜きや倒壊が生じた場合、浮体流出による被害拡大につながるため、係留杭の引抜き抵抗力をあげ、杭と浮体が現位置に残存することが重要である。

そこで津波を考慮した杭係留方式の浮体の設計や計画をおこなう場合、係留杭の設計において以下に示す留意が有用といえる。

- ① 津波高さ、流速を設計条件として用いる。
津波の値は入力条件となる地形データにも影響されるため注意が必要である。
- ② 係留杭の杭頭天端高さの決定にあたっては津波水位の高さを考慮する。
単杭方式では浮体が杭上方から抜け出しやすいため津波水位より高い杭頭レベルの設定が有用である。
連結杭方式でも津波水位より高い杭頭レベルの設定が有用であるが、津波水位により杭頭連結材と浮体（連絡橋）が接触するときは、浮体の余剰浮力による杭の引抜き力を計算、海底地盤への杭の根入れを長く

するなど引抜き抵抗力をあげることが望ましい。

また、杭頭連結材や係留金物など津波水位により接触する可能性がある部位は、十分な部材強度を確保する必要がある。

- ③ 流速が速い場合は浮体傾斜による余裕高さの配慮とともに、流体力による係留外力が大きくなる場合があるため、使用する係留ローラーや係留杭の材料設定に反映することが有用である。
- ④ 洗掘などの影響により海底地盤の水深が変わる場合、沈下量を考慮し杭の根入れ長さを決定することが望ましい。
- ⑤ 係留ローラーは一般的には浮体の上段（水面上）にあるものを下段（浮体重心より下）に設置することや、杭頭への浮体接触を想定する場合は係留杭の間隔は広くすることで、流速に対する浮体の傾斜角を小さくすることができる。

5. おわりに

杭係留方式浮体の被災メカニズムについて、実験と数値計算から外力や挙動を推定し、設計手法と津波対策案の検討をおこなった。本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 実験から杭係留方式の浮体の水平反力は動圧に比例し、浮体最大高さで無次元化した抗力係数は1.2程度である。
- (2) 鉛直反力は杭頭に係留ローラーが接触すると生じ、その大きさは浮体が全没したときの余剰浮力と同程度である。
- (3) 実験をおこなった浮体諸元において、浮体転覆に至るメカニズムは流速が重要な役割を果たしている。杭頭に接触しない状況では津波の水平流速が2.5~3m/s程度で転覆（または触底）するが、浮体が全没するような状況では転覆に至ることはない。
- (4) 係留ローラーは浮体重心より下段に設置することや、杭頭への浮体接触を想定する場合は係留杭の間隔をできるだけ広くすることで、流速に対する浮体の傾斜角を小さくすることができる。
- (5) 杭係留方式では、津波高さが係留杭天端を超え浮体没水による余剰浮力が杭頭に作用した場合、係留杭に対して大きな引抜き力が発生する。設計時に津波水位を考慮した杭天端高の設定や海底地盤への根入れを長くするなど抵抗力をあげることが有用である。また杭頭連結材や係留金物など津波水位により接触の可能性のある部位は、十分な部材強度を確保する必要がある。

(2014年12月12日受付)

参考文献

- 有川 太郎・中野 訓雄・城戸崎 新・三上 隆・西 和宏
(2013) : 港内に設置された浮体構造物の津波による被災メカニズムの研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69 No. 2 pp.866-870.
- 全国漁港漁場協会(2003):漁港・漁場の施設の設計の手引, pp. 210,211,486,487.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011):2011年東北地方太平洋沖地震津波に関する合同現地調査の報告, 津波工学研究報告
- 富田孝史・柿沼太郎(2005):海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第44巻第2号, pp. 83-98.
- 内閣府(2012):南海トラフの巨大地震モデル検討会,
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>

- W : 浮体重量
 W_P : 杭の自重
 w : 海水の単位体積重量
 α : 杭間隔
 β : ローラー水平距離
 θ : 傾斜角
 ρ : 流体密度

記号表

- A : 浮体の投影面積
 B : 浮体幅 (水路長手方向)
 C_D : 抗力係数 (=2.0;喫水で無次元化)
 C_{P1} : 前後面圧力係数 (=1.2;浮体深さで無次元化)
 C_{P2} : 上面,底面圧力係数 (=3.5)
 D : 浮体最大高さ (浮体深さ)
 d : 喫水
 d_m : 最大喫水 (浮体傾斜時)
 F_1 : 前後面に作用する流圧力の和
 F_2 : 上面, 底面に作用する流圧力の和
 F_B : 浮力
 F_R : 係留反力
 F_S : 安全率
 f : 初期乾舷 (浮体深さ-初期喫水)
 g : 重力加速度
 H : 波高
 h : 水深
 L : 浮体長 (水路幅方向)
 l : 上面冠水長さ
 l_1 : 上段ローラー中心と浮体上面の距離
 l_2 : 下段ローラー中心と浮体上面の距離
 N : 杭の根入れ長に対する地盤のN値
 P_1 : 浮体の余剰浮力による引抜き力
 P_2 : 流圧力の転倒モーメントによる引抜き力
 R_a : 杭の許容引抜き力
 R_u : 杭の極限引抜き力
 V : 流速
 V_m : 最大流速

港湾空港技術研究所資料 No.1299

2015. 3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2015) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。