ＩＳＳＮ１３４６－７８４０

港湾空港技術研究所資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1170　　December 2007

漂流木材の杭構造物への衝突実験

平石　哲也
春尾　和人

独立行政法人　港湾空港技術研究所

Independent Administative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目　　次

要　旨 ………………………………………………………… 3

1. まえがき ……………………………………………………… 4

2. 実験の内容 …………………………………………………… 4
2.1　対象とする流れおよび波浪 ……………………………… 4
2.2　実験装置と模型 …………………………………………… 5
2.3　計測方法 …………………………………………………… 6

3. 実験の結果 …………………………………………………… 9
3.1　衝突荷重の特徴 …………………………………………… 9
3.2　外力条件による衝突荷重の変化 ………………………… 10
3.3　衝突荷重の推定法 ………………………………………… 13

4. 結論 …………………………………………………………… 16

参考文献 ………………………………………………………… 17
記号表 …………………………………………………………… 17

Experiment on Collision Force of Drifting Timber to Offshore Pier

Tetsuya HIRAISHI*
Kazuto HARUO**

Synopsis

A large offshore airport runway is under construction in the Tokyo Bay. A part of runway is composed of numerous piers supporting a flat plate. The pier part is employed at the mouth of a river with purpose of keeping the smooth flash of river water in flood. Meanwhile numerous drifting bodies like timbers are brought in the river flood and some of them may hit the piers. The evaluation of impulsive force generated by the drifting bodies becomes important to maintain the safety of piers. In the paper an experiment to evaluate the impulsive force acting on a vertical pier is carried out. The experimental results demonstrate the acting force is determined by the mass of drifting body and the drift-velocity.

Key Words: Column-type structure, Jacket-type jetty, Drifting timber, Impulsive force, Model experiment

---

* Head, Wave Division, Maritime and Hydraulic Engineering Department
** Member, Wave Division, Maritime and Hydraulic Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-8445042 Fax : +81-46-8413888 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

漂流木材の杭構造物への衝突実験

平石　哲也*
春尾　和人**

要　　旨

東京湾奥に位置する羽田空港において，新たにＤ滑走路が建設されている．滑走路の一部は，鋼管杭で平板を支える桟橋構造で製作される．桟橋構造の部分は，隣接する河川からの出水時の流下を妨げないように，計画されたものである．一方，河川からの洪水が生じた場合には流木などの漂流物が多数流れて，それらのいくつかは桟橋部に衝突する危険性がある．漂流物による衝撃荷重の推定は，杭の安定性を保つために重要である．そこで，直杭に作用する漂流物の衝撃荷重を調べるために水理模型実験が実施された．実験の結果，衝撃荷重は，漂流物の質量と漂流速度から推定できることが判明した．

キーワード：杭構造物，ジャケット式桟橋，漂流木材，衝突力，模型実験

---

* 海洋・水工部波浪研究室長
** 海洋・水工部波浪研究室員
〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042　Fax：046-841-3888　　e-mail:hiraishi@pari.go.jp

1. まえがき

2006年度に現地施工が開始された東京国際空港（羽田空港）Ｄ滑走路は，河川からの流れが妨げられないように，河口に位置する1km区間がジャケット形式による栈橋構造で製作される（平石ら，2007）．波消しブロック等で防護された緩傾斜護岸で囲まれた埋め立て部に比べると桟橋構造は，漂流小型船舶や木材による衝突によって，その一部が破損する危険性が高い．今後は，漂流物の衝突危険性が高まれば，防衝杭や膜式防護ネット等による防護を検討する必要がある．

小型船舶や木材が漂流する現象は，河川洪水や津波による場合が多い．東南海・南海地震による津波対策計画においても木材の流出対策が明記されており（大阪市，2007)，海岸の防潮林が流出し，被害を与える危険性も指摘されている（首藤，1985)．

陸地から流出したり，貯木場から漂流を始める木材の構造物への衝突については，曽我部ら(1981)が現地試験に基づいて基礎的な考察を行っている．しかし，その後水槽実験等で定量的な検討はなされておらず，港湾の技術基準（日本港湾協会，1998）においても，適切に検討するようにと指示はされているが，明確な算定式は提示されていない．本研究は，羽田空港Ｄ滑走路桟橋部において衝突防止工を計画するための基礎的な検討として，漂流木材が桟橋支柱に衝突したときの衝撃的な荷重を模型実験で考察したものである．

津波による漂流物としては，近年，港内のコンテナが注目されており，実験（水谷ら，2005）や数値計算（熊谷ら，2006）が実施されている．その結果，コンテナの衝突力は漂流姿勢によって大きく変化することがわかっている．本実験でも，漂流姿勢の影響を衝突角度の差として評価し，角度の差による力の変化を調べた．

2. 実験の内容

2.1　対象とする流れおよび波浪

羽田空港Ｄ滑走路の設計に際しては，あらかじめ波浪や津波計算が実施され，桟橋部に作用する波と流れの諸元が決定されている（関東地方整備局，2004)．波浪は，東京灯標で観測された年最大波浪を用いて，100年確率波が設定された．津波は，1923年南関東地震の震源を緯度方向に移動させて，東京湾内で最も津波高が大きくなる震源を決め，その位置で南関東地震が生じたときの津波計算結果（安田ら，2003）をもとに設計値が定められている．

表-1 Ｄ滑走路の設計に用いられる波と流れ

自然条件	潮位	H.H.W.L.	A.P.+4.0m
		H.W.L.	A.P.+2.1m
		M.W.L.	A.P.+1.2m
		L.W.L.	A.P.+0.0m
		L.L.W.L.	A.P.−0.6m
	高潮	潮位	H.W.L.
		偏差	1.9m
	多摩川洪水	流速	1.3m/s
		流向	滑走路に直角
	津波1	津波高	0.5m
		津波流速	0.9m/s
	津波2	津波高	0.6m
		津波流速	0.6m/s
	波浪	供用時	$H_{1/3}$=1.97m $T_{1/3}$=5.9s
		施工時	$H_{1/3}$=2.78m $T_{1/3}$=6.9s
		暴風時	$H_{1/3}$=4.15m $T_{1/3}$=8.3s

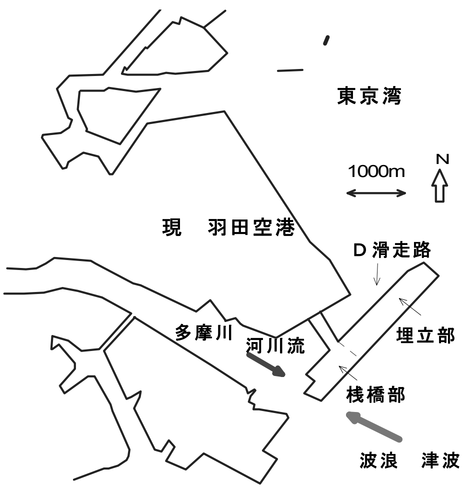


図-1 対象とする桟橋構造の位置

表-1にＤ滑走路の設計で用いられる波と流れの値を整理した．Ｄ滑走路周辺の波と流れの特徴は，模型実験でも検討され，設計で用いられた数値の検証がなされている（平石ら，2007)．**図-1**に，桟橋部を有するＤ滑走路が建設される羽田空港周辺の概要地形を示す．

表-1の**津波1**および**津波2**は，1923年関東地震津波の断層位置を移動させたときに東京湾奥で津波の作用が最大となるケースを検討したときに，それぞれ津波流速および津波高が最大となるケースを示す．表から，桟橋部分に作用する流速は，最大で1.3m/sになることがわかる．これは，多摩川の将来高水流量7000m^3/sが流下したときに，桟橋部の多摩川よりの端部で生じると考えられる流速である（平石ら，2007)．洪水は現地で北から南へ作用し，波向と逆方向になる．津波は南側から作用するので，波

向と同一である．そこで，実験条件としては，波と同じ方向から流れが作用する場合（順流）と逆方向から作用する場合（逆流）を想定して，暴風時波浪と洪水に相当する流れが作用するケースを検討した．

2.2 実験装置と模型

桟橋に衝突すると考えられる木材は，建設資材として供給されているもので，その大きさは規定されている．ただし，今後，小型船舶や円筒状の建設資材についても漂流衝突などの場合に実験結果を応用できるよう喫水や比重の異なる資材についても検討した．ここでは，容易に入手できる塩化ビニル製の円柱を用いて内部に重りを載せ全体の比重を変化させた．建設資材として用いられる木材の寸法を**表-2**に示す（建設物価調査会，2006）．

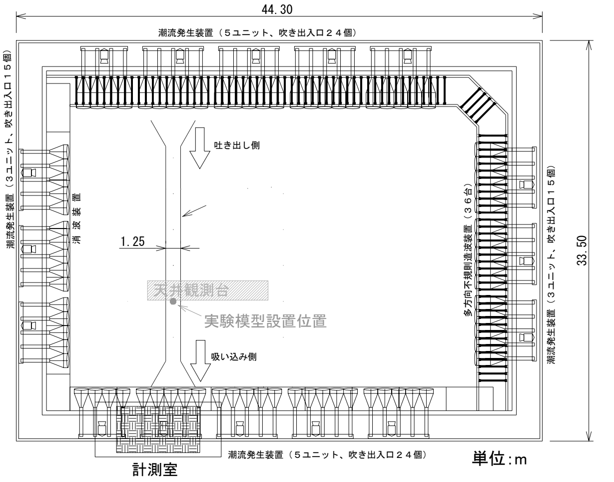
図-2 に実験で用いた環境インテリジェント水槽(Hiraishi, 2007)の平面図を示す．流れの再現は，水槽の一部を隔壁で仕切った水路内で行い，水路の上流（図の上方）および下流（図の下方）における流れ発生装置を運転して，水路内の流れを再現した．波は，図中の上方の造波機を運転することで造波できる．

図-3 は，水路内に設置した木材模型の取り付け部で，H 形鋼で架台を作成して分力計を取り付け，その下方に模型円柱を固着させた．模型縮尺λは1/10である．

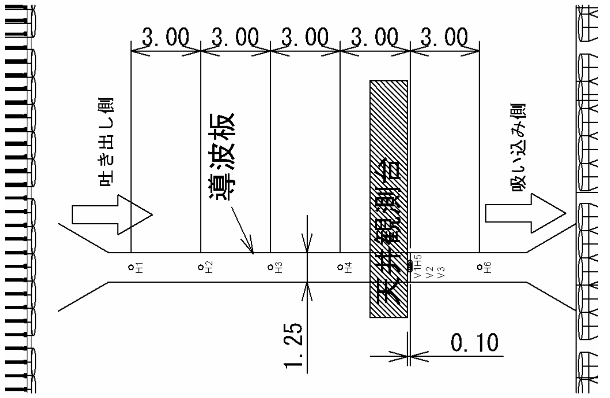
桟橋構造部は，鋼管杭を現場で打ち込んだ後に，6 本の杭を一体化させるジャケットを設置し，鋼管杭とそれを覆うジャケットの円筒部をモルタルで一体化させる．**図-4** に現地で計画されているジャケット部の完成図を示す．一つの杭を単純化して，水面との関係を示すと**図-5** のようになる．

表-2 建設資材として用いられる木材

種類	区分	長さ L(m)	直径 D(m)
杉丸太	1	3.6-4.0	0.105-0.13
	2	3.6-4.0	0.14-0.22
	3	3.6-4.0	0.24-0.28
	4	3.6-4.0	0.3
	5	6.0	0.14-0.22
松丸太	1	3.6-4.0	0.105-0.13
	2	3.6-4.0	0.14-0.22
	3	3.6-4.0	0.24-0.28
	4	3.6-4.0	0.3
	5	6.0	0.46
切丸太	1	1.8	0.06
	2	2.0	0.06
	3	2.0	0.075
	4	3.0	0.06
	5	4.0	0.06
最大		6.0	0.46



(1) 水槽全体図



(2) 実験水路詳細平面図

図-2 環境インテリジェント水槽における模型の配置

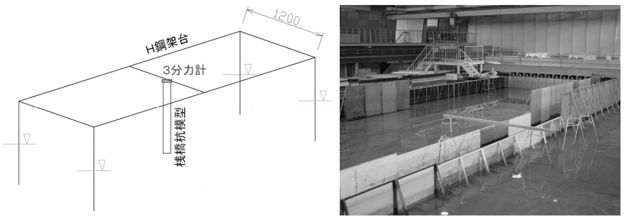


図-3 円柱模型設置用の架台

(写真仮設水路の中央に架台を取り付けた．)

図-5 に示すように，現地の構造は複雑で，鋼管杭は，そのものは片持ち梁として海底から自立している．ただしジャケット構造として一体化されており，上端には滑走路用の水平材が設置される．鋼管杭の直径，ジャケットの部材諸元は実験開始時には決定されておらず，これらの構造を正確に模型実験で再現することは困難であるため，実験では直径 1200mm(実機)の単一の杭に漂流物が衝突するもの

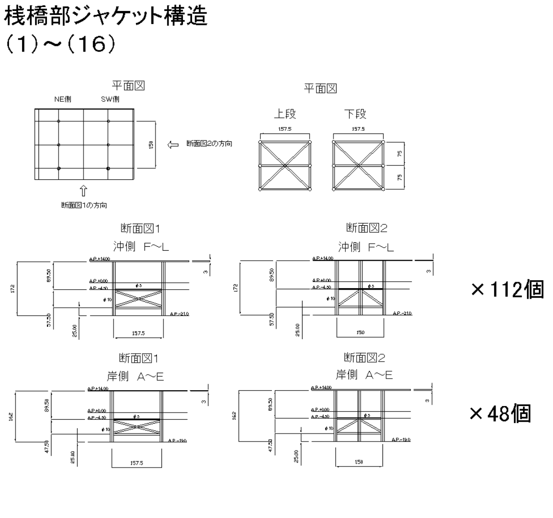


図-4 栈橋構造を支えるジャケット部（(平石ら，2007)より）

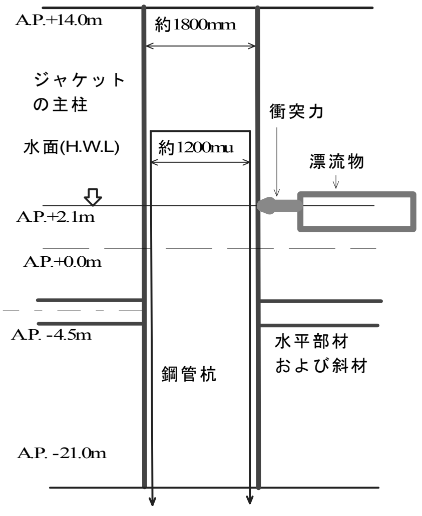


図-5 ジャケット構造の設置イメージ図

とした[*1].

また，水平力が上下に分散して作用すると計測装置が複数個必要になるため，できるだけ荷重計測点と衝突点が近い剛な片持ち梁として水平荷重の最大値が直接計測できるような実験装置配置とした.

図-2(2)に示すように，水路の詳細図で流速計，波高計などの配置を示している．水路に沿って波高計(H1～H6)を設置し，円柱設置場所に電磁流速計を鉛直方向に離して3本設置し，円柱設置前に流れと波の状況を調べた.

[*1] 2007年8月に建設担当者にヒアリングしたところ，杭等のサイズとして以下の諸元が挙げられている.
直杭：直径1600, 1422, 1320mmの3種類．板厚は荷重条件と深さ方向で変化し32～57mm.
ジャケットのレグ部：直径1616～1964mm.

2.3 計測方法

(1) 流れと波の設定

流れを発生させるポンプの運転開始と同時に模型設置点で流速計測を開始した場合の流速変化を図-6に示す．ポンプの運転速度は，装置の最大値の40%とし，発生装置のバルブは100%開放した．ポンプ運転開始から模型設置点までに流れが到達するまでに時間差があり，その後100s間で流速が増大し，200s程度で流れの増加はとまり定常になる．振動は生じているが，その振幅は5cm/s以内で，平均値が18cm/sになる．図-6では，水深方向に異なる3本の流速計の値を示しており，それぞれの平均値の差は生じておらず，水深方向にほぼ一様な流れが生じているのが判る.

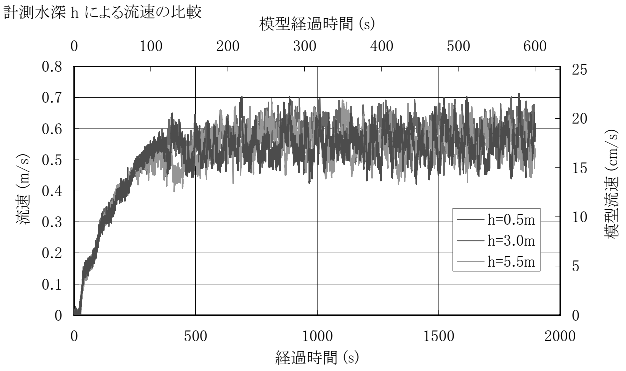


図-6 水路内での流速の変化

水槽では，あらかじめ，ポンプの運転速度と模型設置予定位置における平均流速の関係を求めておくことによってポンプ開度の調整結果から作用流速を変化させることが可能である．そこで，模型に作用する衝突荷重を測定する前に，模型の無い状態で，流れと波を作用させ実験水路内における流速と波高の関係を調べた．また表-3に水路内における測定波高を示す．表中の距離は，模型円柱設置点を0として下流側を正として測定した水路中の流速計位置（実機）である.

(2) 実験のケース

これらの波と流れの作用の下で，円柱模型を設置して衝突力を測定する．実験で漂流させた模型は，比重が異なる塩ビ管および木材であり，波と流れの外力の組み合わせを表-4のように設定した.

表-3 水路内における規則波高

(1) 平均波高 H=1.0m

距離 (m)	平均波高 H (m)				
	波のみ	順流1.26m/s	順流0.63m/s	逆流1.26m/s	逆流0.63m/s
120	1.082	0.779	0.854	1.448	1.289
90	1.175	0.648	0.802	1.223	1.163
60	0.946	0.779	0.812	1.056	1.128
30	1.123	0.675	0.803	0.934	1.097
0	1.002	0.877	0.837	0.788	1.166
-30	0.959	0.569	0.732	0.735	1.013

(2) 平均波高 H=0.5m

距離 (m)	平均波高 H (m)				
	波のみ	順流1.26m/s	順流0.63m/s	逆流1.26m/s	逆流0.63m/s
120	0.531	0.388	0.435	0.537	0.677
90	0.585	0.325	0.402	0.429	0.706
60	0.443	0.449	0.426	0.382	0.756
30	0.552	0.372	0.427	0.326	0.667
0	0.49	0.427	0.43	0.3	0.606
-30	0.473	0.363	0.358	0.323	0.633

表-4 衝突実験のケース

<table>
<tr><th>実験種類</th><th>構造物</th><th colspan="2">漂流物</th><th>流速</th><th>波高</th></tr>
<tr><td rowspan="36">衝突実験</td><td rowspan="36">あり</td><td rowspan="27">塩ビ管</td><td rowspan="9">浮力 A
（比重 0.188）</td><td rowspan="3">流速 A
（1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速 B
（0.63m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速-A
（-1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="9">浮力 B
（比重 0.349）</td><td rowspan="3">流速 A
（1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速 B
（0.63m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速-A
（-1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="9">浮力 C
（比重 0.797）</td><td rowspan="3">流速 A
（1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速 B
（0.63m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速-A
（-1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="9">木材
（丸太）</td><td rowspan="9">丸太
（比重 0.676）</td><td rowspan="3">流速 A
（1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速 B
（0.63m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">流速-A
（-1.26m/s）</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>波高 1m</td></tr>
<tr><td>波高 0.5m</td></tr>
</table>

(3) 荷重の測定

桟橋杭の模型はH形鋼の架台から3分力計を介して固定してある．この3分力計を使用して，漂流物の衝突によって杭に作用する荷重の測定を行った．漂流物衝突時に衝撃的に大きな圧力が発生する可能性があるので，データ収集間隔は0.001s間隔とした．衝突実験では漂流物を流し始めてから衝突し終えるまでの計測を行うこととして，順流では収集データ数を30000データ（計測時間は模型量で30s），逆流では収集データ数を15000データ（計測時間は模型量で15s）とした．実験水位から3分力計までの高さは，**図-7**に示すとおり512mm（現地換算では5.12m）である．また分力計は水面から512mm（現地換算では5.12m）の高さに取り付けてあるので，計測される力は，杭模型がたわむために，水面付近で作用する実際の荷重と異なる可能性が

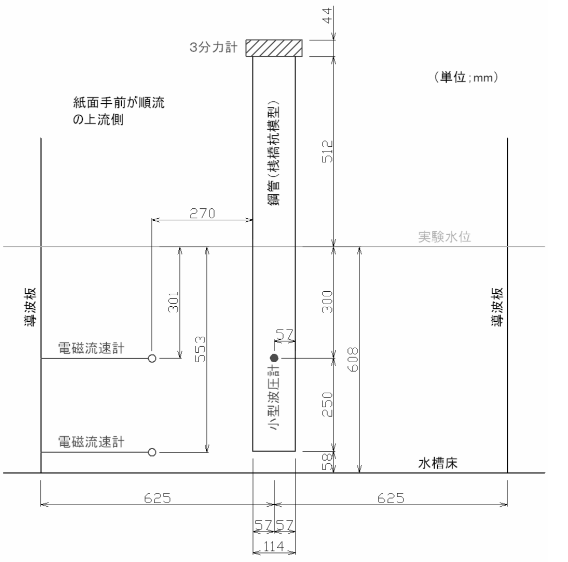


図-7 桟橋模型の取り付け状況

図-8 漂流木材の桟橋模型への衝突状況

ある．そこで 2 種類の腕の長さで静的荷重をかけて，計測される荷重との関係を調べた．その結果，作用させた荷重（重りの質量）と計測値の関係が異なった．そこで，分力計での計測値を実際の荷重に変換するための換算係数と腕の長さの関係を求めて，衝突実験での水平力は，３分力計での計測値に 0.877 を掛けた値とした．

(4) 漂流速度の測定

衝突実験では漂流物を流すので桟橋杭設置位置に容量式波高計を設置することができない．そこで，漂流物が衝突する心配がない実験水位から 300mm（現地量では 3m）の深さで桟橋杭に小型波圧計を設置して水圧変動の測定を行い，水圧変動を水面変動に換算して作用波を確認した．

その他に，模型設置位置の真上から漂流物が衝突する状況をビデオに撮影し，衝突直前の漂流物の漂流速度を確認した．**図-8** にビデオで撮影した画像例を示す．これらの写真は衝突直前の静止画をビデオ画像から抜き出したものである．桟橋杭の模型は H 形鋼架台の下に隠れているので，桟橋杭位置を示す●印を H 形鋼架台の上に書いておく．桟橋杭の上流側には 10cm 間隔で白い糸を設置してあるので，この白線を漂流物が通過する時間間隔を調べて漂流物の漂流速度を解析した．

なお，実験では白線 10 本程度（本数はケースによって異なる）を通過する時間間隔を調べた．したがって，本実験で定義した漂流速度は，衝突直前の約 10m（実機換算）程度の漂流物の移動速度を示し，海域全域での平均した移動速度ではない．

(5) 衝突位置と角度

漂流物が桟橋杭に衝突する際の角度や衝突する場所についてもビデオ画像から解析した．角度は流れの方向（導波板と平行）を 0°とし，その直行方向を 90°とした．なお 0°から漂流物が左右のどちらに傾いても同じ正の値で表示するものとした．衝突位置は，漂流物の先端から衝突位置までの長さと漂流物の全長の比で表した．

(6) 測定荷重の換算

松冨ら(2004)は，植生による津波力低減効果を調べる実験において，模型実験で用いる材料と縮尺の関係について議論をしている．ここでも，松冨ら(2004)にしたがって，実験で測定される衝突荷重を現地換算値とするために考慮すべき縮尺効果について考察する．

片持ち梁の一端に集中荷重 P が作用したときのたわみは次式で表される．

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} \tag{1}$$

ここで, δ: たわみ, l: 固定点から作用点までの長さ, E: 部材の曲げ弾性(Pa)，I : 部材の断面 2 次モーメント(Nm^2)である．断面 2 次モーメントは，実験で用いた円筒の場合は次式で示される．

$$I = \frac{\pi}{64}\left(D_1^4 - D_2^4\right) \tag{2}$$

ここで，D_1: 円筒の外径（直径），D_2: 円筒の内径とする．実験で用いた鋼管は，市販されている規格品で D_1=114mm, D_2=106mm（板厚 t_1=4mm）である．実機の鋼管は D_1=約 1200mm であり，規格品ではなく，板厚 t_1 が 400mm になるものとし，この結果 D_2 は約 1120mm になる．

模型での値に添え字 m を, 実機での値に添え字 p を付け，模型縮尺をλで表すと次の関係が成り立つ．

$$\lambda = \frac{\delta_m}{\delta_p} = \frac{P_m l_m{}^3 / 3E_m I_m}{P_p l_p{}^3 / 3E_p I_p} \tag{3}$$

ここで，円筒部の直径，板厚は，模型と実機でほぼ同じ比率である．したがって断面 2 次モーメントの縮尺がλ^4で表されるので，以下の関係が成立する．

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{\delta_p}{\delta_m}\frac{l_m{}^3}{l_p{}^3}\frac{I_p}{I_m}\frac{P_m}{P_p} = \frac{1}{\lambda}\lambda^3\frac{1}{\lambda^4}\lambda^3 = \lambda \tag{4}$$

上式は，実験で測定された力を Froude 則で現地での値に換算するためには，模型の曲げ剛性Eを実際の値よりも小さくする必要があることを示しており，松冨ら(2004)が導いた結論と同一である．**表-5** に主な建設材料の曲げ剛性を示す．

表-5 主な材料の曲げ剛性E (Pa=N/m^2) (2006 年版理科年表)

材料	×10^{10}Pa
木材	1.3
鉛	1.61
スズ	4.99
金	7.80
鉄(鋼)	20.1-21.6
鉄(鋳鉄)	15.23

表-5 から鉄(鋼)の曲げ剛性をλ(=1/10)倍したような材質は容易に得られないことが判る．今回の実験では，市販されている円筒を用いており，模型材質を適切に変化させることはできなかった．材料の曲げ剛性の縮尺を 1 として，力の関係を示すと次式が成立する．

$$\frac{P_m}{P_p} = \frac{E_m}{E_p}\frac{I_m}{I_p}\frac{\delta_m}{\delta_p}\frac{l_p{}^3}{l_m{}^3} = 1\cdot\frac{1}{2}\lambda^4\lambda\frac{1}{\lambda^3} = \frac{1}{2}\lambda^2 \tag{5}$$

したがって，実験で測定された力を Froude 則で現地換算する場合は，今回の実験縮尺(λ=1/10)から推定すると，実際の力より約 10 倍大きい値となっている可能性がある．ただし，現地においては，水平部材や斜材の存在，鋼管杭とジャケットの密着性の影響で，現地部材の断面２次モーメントは単純な円筒部材から推定される値より大きくなる可能性が高い．断面 2 次モーメントの縮尺がより小さくなれば，実験値から換算された力と実際に作用する力の差は小さくなる．そこで，今回の実験結果は現地で発生する力より，1 オーダー程度大きいが，実験のばらつき等も考慮した，やや安全側の数値として採用できるものと考えた．

3. 実験の結果

3.1 衝突荷重の特徴

(1) 衝突荷重の抽出方法

桟橋杭に作用する衝突荷重を計測した例を**図-9** 示す．この波形は流れの方向の荷重 F_x と直行方向の荷重 F_y から $\sqrt{F_x{}^2 + F_y{}^2}$ で求めた合力とした．この方法で合力を求めると全て正の値となるが，F_xが負の場合には$-\sqrt{F_x{}^2 + F_y{}^2}$ として負の値で表してある．

計測を開始してから漂流物が衝突するまでの間に作用している荷重は，流れによって桟橋杭に作用する荷重である．衝突した後に桟橋杭から漂流物が離れて再び衝突することもある．場合によっては 2 回目の衝突のほうがピーク値が大きいこともありえるが，そのような場合にも 1 回目の衝突のピーク値を解析した．

漂流物衝突後には衝突荷重の波形が正と負に往復する振動を生じ，時間の経過と共にその振動が減衰している．桟橋杭は上端を分力計で固定して下端は自由端としてあるので，漂流物の衝突によって桟橋杭が振動し，その振動が荷重として計測されているものである．前述のように，実験装置の制限もあり，本実験では荷重作用点と支持点の距離をできるだけ小さくした片持張りとして杭を設置しており，振動周期は両端を固定された杭構造とは異なっている．

衝突速度，衝突角度，衝突位置は前述のようにビデオ画像の解析から求めた．また，運動量 mv を漂流物の質量 m と漂流速度 v から計算した．なお，作用時間 dt は，模型実験では測定が困難であり，後述するように曽我部ら(1981)が提案した数値を用いた．この結果，F=mv/dt は運動量と作用時間から求めた衝突荷重となる．

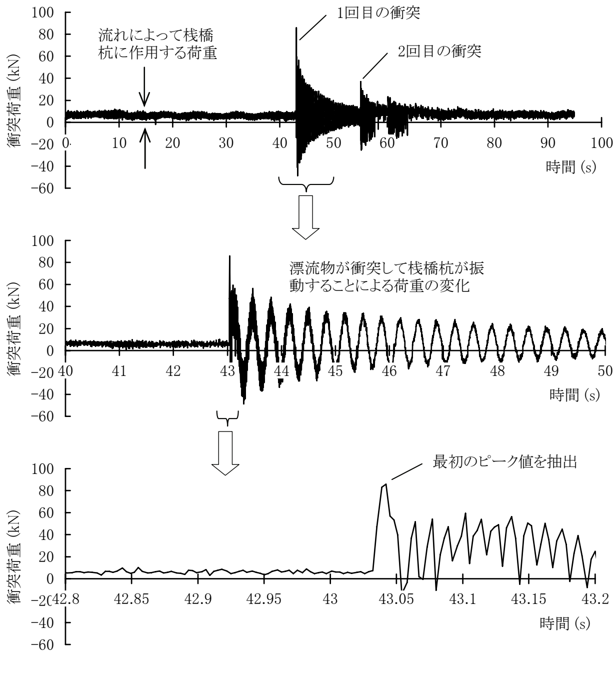


図-9 桟橋模型上端の荷重計で得られた波形

(2) 作用力と衝突荷重

衝突実験で得られた外力と衝突荷重の関係を**図-10** に示す．この図は 4 種類の漂流物，3 種類の流速，3 種類の波高の全てのケースについて示してあるのでややバラツキが認められるが，全体の傾向として，流速や波高が大きければ衝突荷重が大きいと言う傾向が現れている．

外力と衝突荷重の関係を，漂流物の比重で分けて表示した結果が，**図-11** である．**図-10**(3)および**図-11**(1)に示されるように，漂流速度は漂流物の比重に関係なく，流速よりも小さくなる．漂流開始地点から桟橋位置までの距離を十分長くしたため,漂流運動はほぼ定常状態になっているが,漂流速度は衝突直前の 10m 程度の平均移動速度である．杭構造物のまわりの流況について，押村ら(2006)は，ドップラー流速計で杭近傍の流速を測定し，杭の側面に沿って速い流れが生じ，杭の正面では，流速の絶対値が側面に比べて小さくなることを明らかにしている．したがって，杭構造物の設置によって流速場が変化し，衝突直前の漂流速度は，杭がない状態で測定した平均流速とは一致しないものと考えられる．今回の実験条件では漂流物の漂流速度は流れの速度（流速）の 0.75 倍であった．

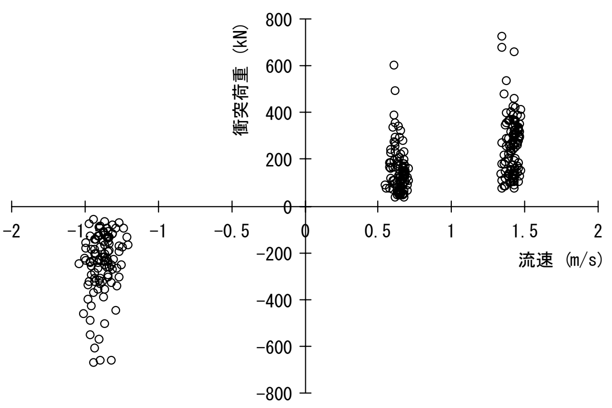
図-11(2)から，比重が大きいほど衝突荷重が大きい傾向が認められるけれども，塩ビ管の比重 0.797 の場合は，比重が大きい割には衝突荷重が小さめである．そのため，図(3)では，塩ビ管の比重 0.797 は漂流物の質量 m と漂流速度 v から求めた運動量 mv が大きくても，衝突荷重が小さくなっている．この原因は，比重がほぼ 0.8 と大きく完全な水没状態に近いので，衝突時に漂流物と桟橋杭の間の水がクッション材のように作用して衝突力が小さくなっている可能性が考えられる．実際の漂流物を考えると 0.8 は比重がやや大きすぎるので，このケースを除外して漂流物衝突力の評価を行うこととした．

3.2 外力条件による衝突荷重の変化

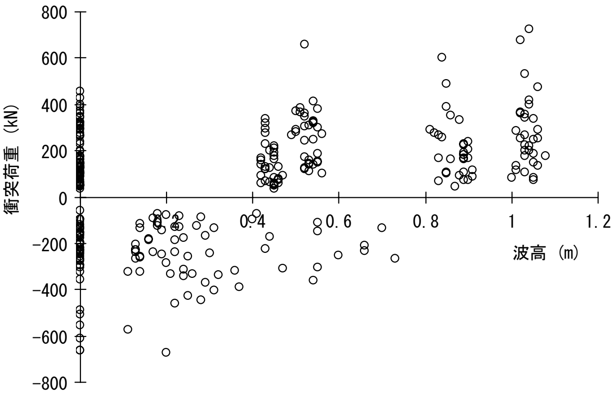
(1) 流れの向きによる変化

外力と衝突荷重の関係を順流と逆流に区別して表示すると**図-12** のとおりである．順流とは流れの向きが波の進行方向と同じ条件（流速 A および流速 B のケース）で，逆流とは流れの向きが波の進行方向と反対の条件（流速-A のケース）である．順流方向を正としているので，逆流は負の値で示してある．同様に衝突荷重も順流方向が正の値で，逆流方向が負の値である．

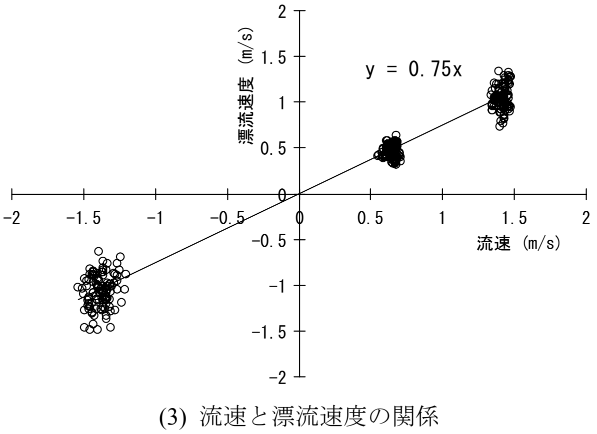
図(1)に示した順流と逆流の場合を含む漂流速度と衝突荷重のグラフを見ると，当然ではあるが順流の場合には正の衝突荷重が発生し，逆流の場合には負の衝突荷重が発生している．波高と衝突荷重のグラフ，波の位相と衝突荷重のグラフで横軸 0 にプロットされているのは波なしのケースである．順流の場合，波高が大きいと衝突荷重も大きいケースが見られるけれども，波高と衝突荷重の相関関係はあまり強くない．逆流の場合には，波高が小さいほど衝突荷重の絶対値が大きい傾向が認められる．逆流は流れと波の進行方向が異なるので，波高が大きいと波による流れで流速が減じられて衝突荷重が小さくなるものと考えられる．



(1) 流速による衝突荷重の変化

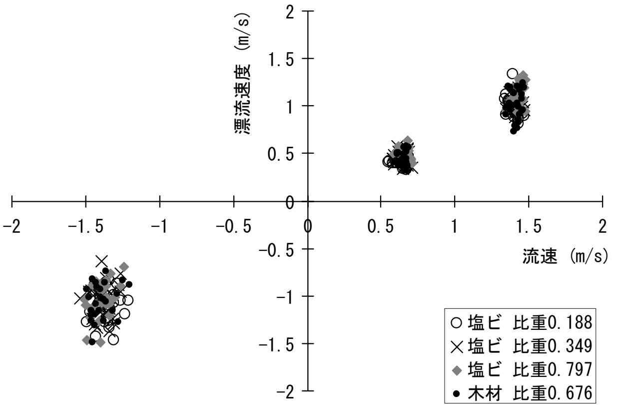


(2) 波高による衝突荷重の変化

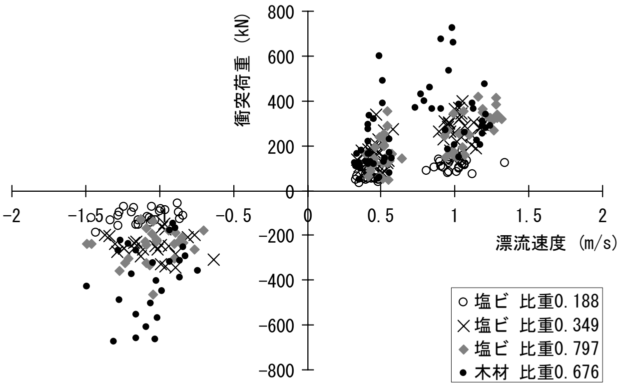


(3) 流速と漂流速度の関係

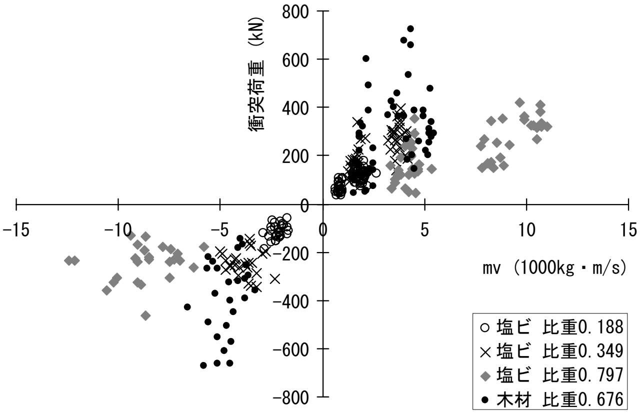
図-10 作用する漂流物と荷重の関係



(1) 漂流速度

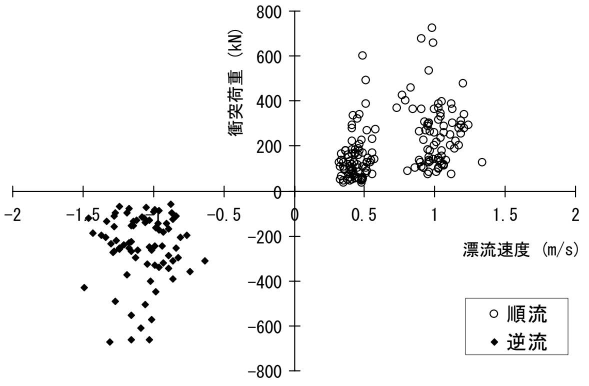


(2) 衝突荷重

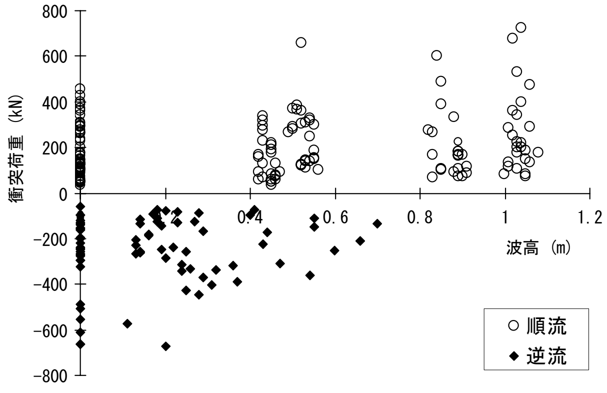


(3) 運動量による衝突荷重の変化

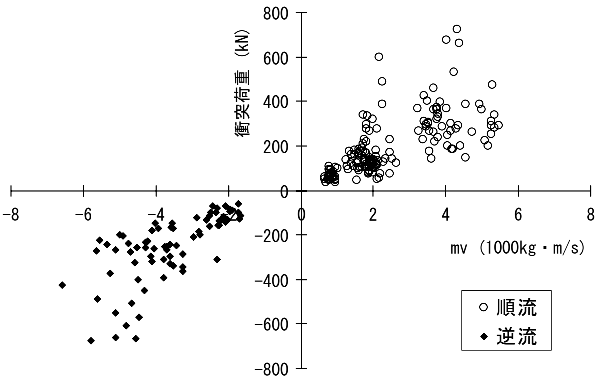
図-11 漂流物比重による衝突状況の変化



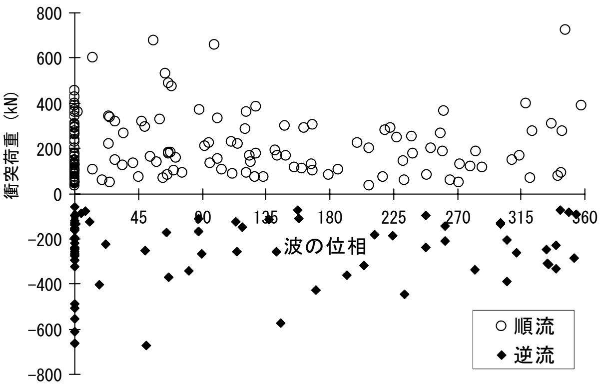
(1) 漂流速度による変化



(2) 波高による変化



(3) 運動量による変化



(4) 波の位相による変化

図-12 順流および逆流による衝突荷重の変化

波の位相と水粒子の水平運動速度は 90° しか位相が相違しないので，順流の場合には流れの方向と水粒子の運動速度の方向が 0° （360° も同じ）では一致して衝突力が大きくなり，180° で逆になるので衝突力が小さくなることを予想していた．しかし，実験結果によるとそのような傾向

は認められない．逆流の場合にはその逆で，180°で衝突力が大きくなることを予想したが，実験結果ではそのような傾向は認められない．

(2) 波による衝突力の変化

外力と衝突荷重の関係を波なしと波ありを区別して表示すると**図-13** のようになる．流速や漂流速度が正，すなわち *mv* が正の条件において'波なし'より'波あり'の衝突荷重がやや大きい傾向が見られる．ただし，この傾向は漂流速度 0.5m/s 程度ではやや明確に現れているが，漂流速度 1m/s 程度ではこの傾向に当てはまるデータは少ない．

なお，この漂流速度は約 10m 区間の平均的な速度を解析したものであるので，衝突時の波の位相が考慮されたものではない．すなわち衝突時の波による水粒子の運動成分は考慮されていない．

角度が初期の角度から 90°以上ずれることはなかった．そこで，本実験では，初期の角度と衝突時の角度は大きく変化しないものとして，初期の位置によって，衝突荷重の場合分けを行った．

また，縦流し・順流（0°付近の正の衝突荷重）では波ありの衝突荷重が大きいが，その他の条件では波ありと波なしの違いが明確ではなかった．

横流しの場合には，漂流物の側面のどの位置が桟橋杭に衝突するかによって，衝突荷重が異なる可能性が考えられる．そこで，衝突位置と衝突荷重の関係を**図-16**(2)に示す．衝突位置は，衝突点と漂流木材の端部との距離を，漂流木材全長で除した値を示す．横流しの場合，漂流物の先端から全長の 0.2 倍から 0.6 倍の位置で衝突を生じており，この範囲において衝突位置と衝突荷重の間に強い相関関係は認められない．

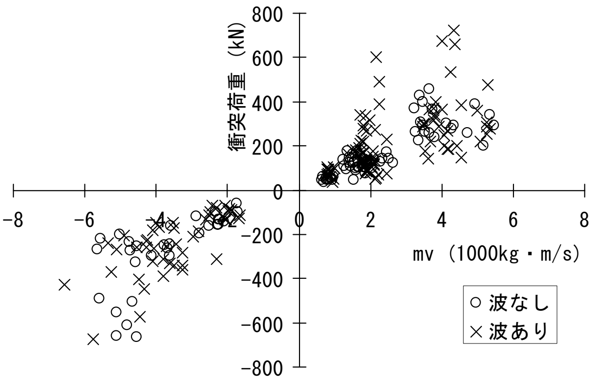


図-13 波の有無による衝突荷重の変化

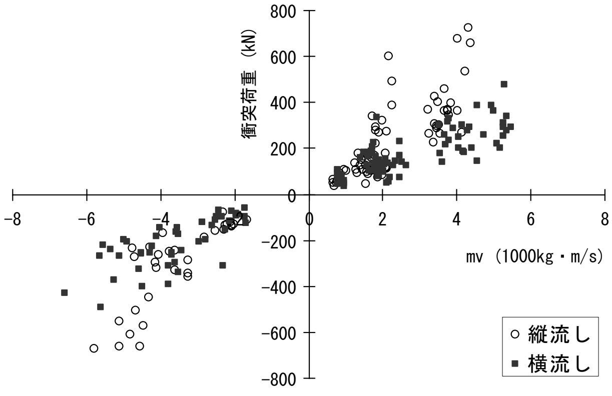


図-14 縦流しおよび横流しによる衝突荷重の変化

(3) 衝突角度による力の変化

外力と衝突荷重の関係を縦流しと横流しで区別すると**図-14** のとおりである．縦流しと横流しの違いによる荷重変化を**図-15** に示す．運動量の変化と衝突荷重の関係を示すグラフを見ると，縦流しが横流しより衝突荷重の絶対値が大きいことがわかる．流し始めは縦と横に向けているけれども，桟橋杭の位置に到達するまでに漂流物の向きが変わってしまう．

そこで，衝突直前の漂流物の角度で衝突荷重を整理したものが，**図-16**(1)である．この図において衝突角度が 0°に近いのは縦流しで，90°以上は横流しである．この図より，縦流しの 0°に近い条件で衝突荷重が大きい傾向が認められる．横流しでは 90°から 145°の範囲において衝突角度の違いによる衝突荷重の違いは認められない．また，本実験で定義をした'縦流し'および'横流し'は，漂流を開始させる初期位置での位置関係を示したものであるが，衝突時の

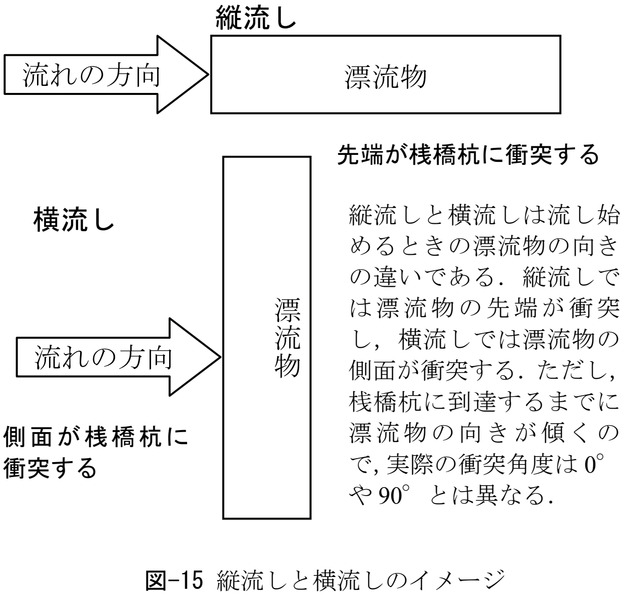
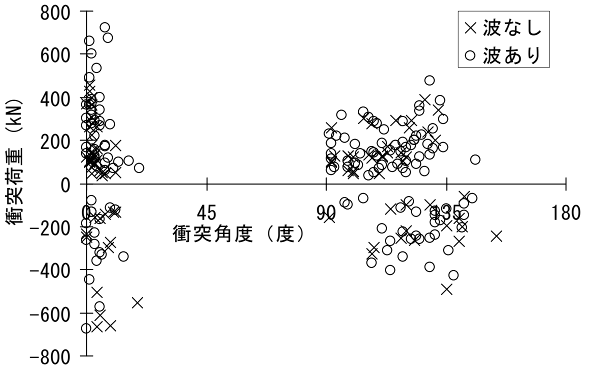
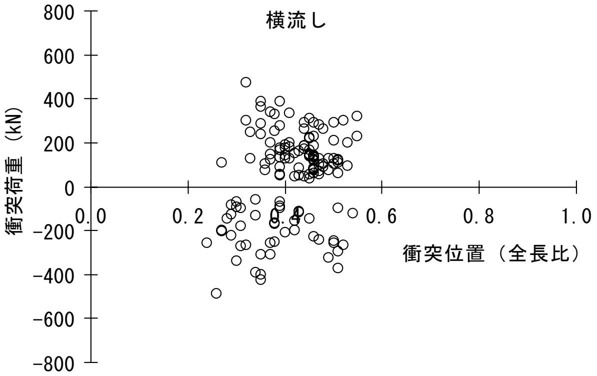


図-15 縦流しと横流しのイメージ



縦にあたると0度　横にあたると90度

(1)　衝突角度による変化



(2) 衝突位置による変化

図-16 衝突時の位置・角度による荷重の変化

(5) 漂流物の比重による荷重変化

前出の**図-11** に外力と衝突荷重の関係を，漂流物の比重で分けて検討した．これを見ると，**図-11**(1)に示すとおり，漂流速度は漂流物の比重に関係なく流速によって決まることがわかる．また，比重が大きいほど，衝突荷重がやや大きい傾向が認められる．漂流物の質量 m と衝突速度 v から求めた運動量 mv と衝突荷重の関係をみると，やや変動幅はあるものの強い相関関係があると言える．

3.3 衝突力の推定法

(1) 運動量による推定

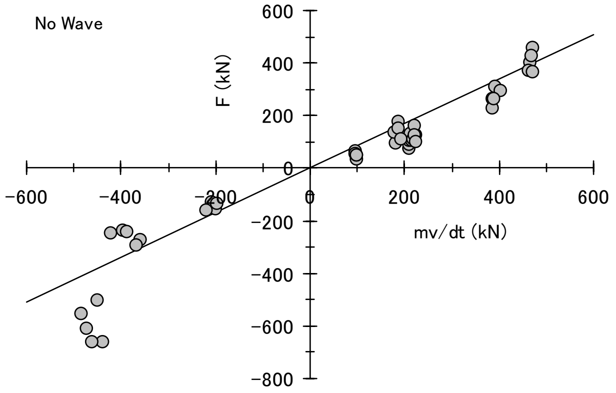
3.2 における観察から衝突荷重は，漂流物の比重によって大きく変化し，また衝突速度によって，その値が決まることが判った．そこで，運動量の変化から力 F を求める手法を検討した．

波高の大きさによる衝突荷重の変化は，波による力のばらつきと考えて，ここでは既存の研究結果と今回の実験結果を比較して，実験で得られた衝突力の妥当性を検証した．

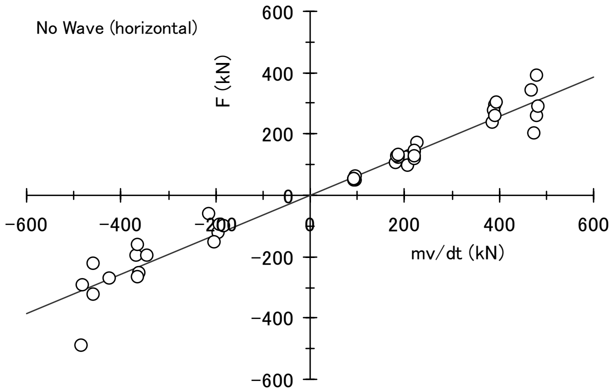
曽我部ら(1981)は，岸壁上と岸壁前面の海面で木材を引っ張ってコンクリート壁に衝突させ，実機で衝突力を測定している．その結果，衝突力の最大値は次式で示されることを導いた．

$$F = n(1+e)\frac{mv}{dt} \tag{6}$$

ここで，m：木材質量，v：衝突速度（本実験では漂流速度に相当する），n：衝撃加速度の分布形による係数，e：衝突時の反発係数，dt：衝突力の作用時間である．衝撃加速度の分布形は，衝突速度の時間による変化を示し，ほぼ一定の速度で衝突する場合は n=1 とされている．e は衝突材料と衝突速度から決まる係数で，曽我部ら(1981)は，e=0.6 を提案している．本実験では，杭に衝突した後に，木材の漂流が妨げられたり，上流側へ戻ることがないので反発による力の増大は小さいと考え，e=0 とした．作用時間 dt は，現地実験では 10^{-2}s 程度であると推測されている．本実験結



(1)　縦流しの場合（図の直線は *F=0.85mv/dt* を示す）



(2) 横流しの場合（図の直線は *F=0.64mv/dt* を示す）

図-17 衝突荷重 F と運動量 mv の関係

果についても，曽我部ら(1981)に従って次式で衝突荷重を表す．

$$F=\alpha\frac{mv}{dt} \tag{7}$$

ここで，α は実験によって求まる係数である．式(7)中の係数 α は，曽我部式での $n(1+e)$ に相当し，衝撃速度と材質に関係する係数で，縦流しと横流しの条件で異なる．

なお，松冨(1999)による直径 20～30cm の流木の衝突実験においても，衝突力作用時間は 10^{-2}s 程度の値が導かれている．

式(7)を用いて，測定値のばらつきが小さい波のないケースについて，実験で得られた運動量 mv と衝突荷重 F の相関を調べた．図-17 は，縦流しと横流しの場合について，比重 0.188 および 0.349 の塩ビ管，比重 0.676 の木材を用いて F と mv の相関を調べた結果を示す．

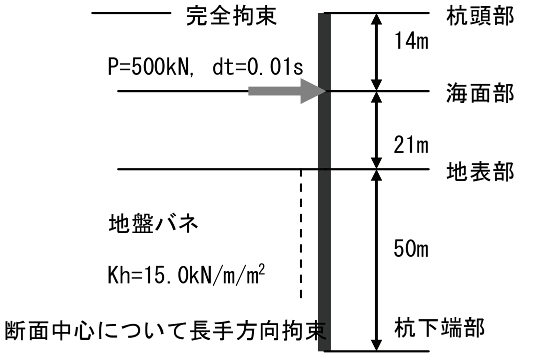
図-17 に示されるように，本実験で得られた衝突荷重は，曽我部ら(1981)による推定式の係数を修正することで近似的に計算できることがわかる．推定式と測定値の相関係数は，縦流しおよび横流しの場合で，それぞれ r=0.95，0.98 であった．このことから，本実験で得れた衝突荷重は，実際に片持ち梁杭に作用する荷重の 10 倍程度になるものと推定されていたが，その値は，曽我部ら(1981)の現地試験条件である，岸壁のようにたわみが生じない壁面に木材が衝突した場合に発生する荷重とオーダーが同じになることが判った．現地において杭の直径が大きくなったり，ジャケット構造によって断面２次モーメントが増加していけば，衝突荷重は大きくなるので，本実験で得られた荷重は，安全側の最大衝突荷重と考えることができ，現地の設計で採用することができる．

(4) 既存モデルによる衝撃応答解析

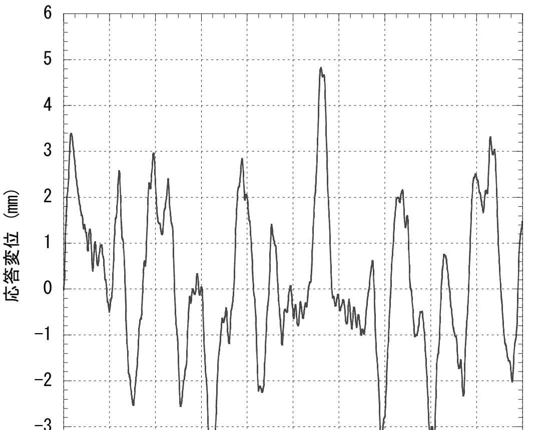
ここでは，既存の鋼管杭の動的応答解析モデル（横田ら，1998）を用いて，杭の固定位置の差による応答特性の変化を検討した．計算では，直径 1200mm，板厚 40mm の鋼管杭が図-18(1)のように現地で建設されるものとして，海面で作用する衝撃荷重による応答特性を推定した．鋼管杭の弾性係数（ヤング率）E=206kN/mm^2，ポアソン比 0.29，密度 7820km/m^3，地盤バネは Kh=15.0kN/m/m^2 とした．載荷した荷重は，海面位置の集中荷重とし，時間とともに増加して最大値 500kN となるものとし，作用時間を 0.01s とした．

図-18(2)に応答時刻歴の結果を示す．海面での応答変位は最高で 4.8m となり，平均して 0.2s 周期の振動が生じることが判った．前出した図-7 の実験で得られた応答では，最下図に約 0.1s 周期の荷重波形に振動が見られており，鋼管杭の固定状況は異なるが，現地における振動状況も模型実験で再現できていたと考えられる．また，杭の頭部での水平方法に作用するせん断力は，海面の作用点と杭頭部の距離が杭の全長に比べて相対的に小さく，最大値で 400～800kN が現れていたので，海面での衝撃荷重と杭頭部に作用する水平せん断力の平均値は，ほぼ等しいといえる．ただし，瞬間的に最大値として 800kN が出現しており，杭の振動の影響により，衝突荷重として海面で与えた荷重よりも，1.6 倍程度大きい荷重が瞬間的に杭頭部にせん断力として作用することを実機の設計で考慮しておいた方がよい．

このような衝突力に対する対策としては，桟橋杭そのものに衝撃力緩衝用の防舷材を取り付けることが考えられる．あるいは，永井ら(1973)が提案したような衝突防止ブイや，衝突を受けるための杭を新たに桟橋の外側に設けることも考えられる．

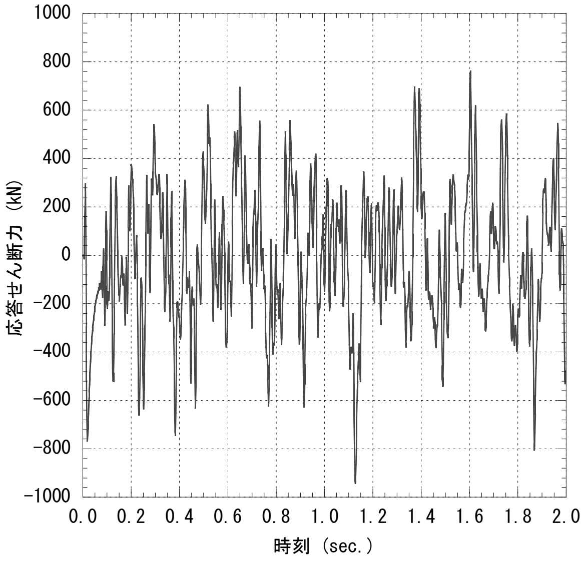


(1) 計算条件



(2) 応答変位の時刻歴

図-18 応答モデルによる計算結果



(3) 杭頭部のせん断力

図-18 応答モデルによる計算結果

(3) 重回帰分析による推定

衝突荷重を推定する方法として，重回帰分析による検討を行った．重回帰分析では漂流物の比重，漂流速度，波高を変数として衝突荷重に対する線形回帰分析を行った（山口，1986）．縦流しに対する分析結果は**表-6** のとおりである．表の中の係数から次式が得られる．

$$衝突荷重\ F = 608\,S + 264\,v + 102\,H - 273 \tag{8}$$

ここに，S : 漂流物比重，v : 漂流速度(m/s)，H : 波高(m)，である．**図-19** に予測値と観測値を比較した．重相関は 0.83 とそれほど大きくなく，グラフに灰色記号で示した予測値が白丸の実測値と一致しないような誤差がある．

横流しに対する分析結果は**表-7** のとおりである．表の中の係数から次式が得られる．

$$衝突荷重\ F = 608\,S + 264\,v + 102\,H - 49 \tag{9}$$

ここに，S : 漂流物比重，v : 漂流速度(m/s)，H : 波高(m)，である．縦流しと同様に重相関を求めると，0.71 とやや小さくなった．

表-6 縦流しに対する重回帰分析

回帰統計	
重相関 R	0.83120257
重決定 R2	0.69089771
補正 R2	0.68143539
標準誤差	97.8492088
観測数	102

分散分析表

	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	3	2097259.85	699086.617	73.0157165	6.8786E-25
残差	98	938297.832	9574.46767		
合計	101	3035557.68			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
切片	-237.32906	36.5809463	-6.487778	3.57E-09	-309.92275	-164.73536	-309.92275	-164.73536
漂流物比重	607.818979	47.3924401	12.8252307	1.0914E-22	513.770226	701.867731	513.770226	701.867731
漂流速度	264.217979	31.6496184	8.34822005	4.5588E-13	201.410343	327.025615	201.410343	327.025615
波高	102.390932	27.7196899	3.69379788	0.00036372	47.3821106	157.399753	47.3821106	157.399753

表-7 横流しに対する重回帰分析

回帰統計	
重相関 R	0.71545969
重決定 R2	0.51188257
補正 R2	0.500531
標準誤差	71.1038378
観測数	133

分散分析表

	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	3	683946.007	227982.002	45.0935554	5.3368E-20
残差	129	652192.492	5055.75575		
合計	132	1336138.5			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
切片	-49.450127	23.2977346	-2.1225294	0.0357044	-95.545265	-3.3549892	-95.545265	-3.3549892
漂流物比重	270.217936	30.5893195	8.83373478	6.3182E-15	209.696219	330.739653	209.696219	330.739653
漂流速度	136.355874	20.127562	6.77458471	3.9933E-10	96.5329998	176.178747	96.5329998	176.178747
波高	16.2259898	16.8037507	0.96561714	0.33604256	-17.020642	49.4726217	-17.020642	49.4726217

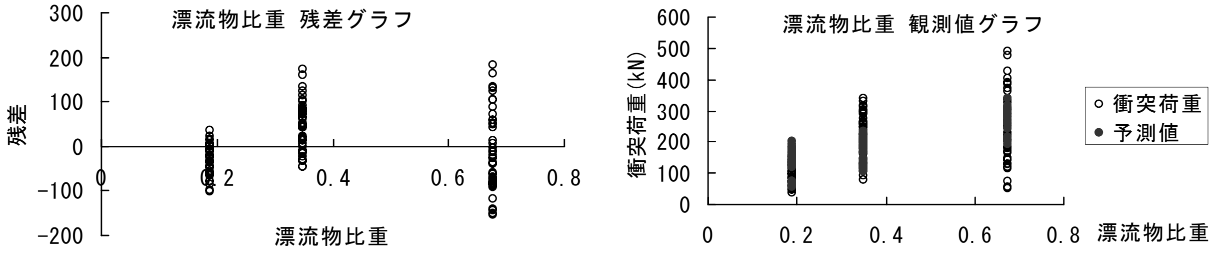


図-19 (続く)

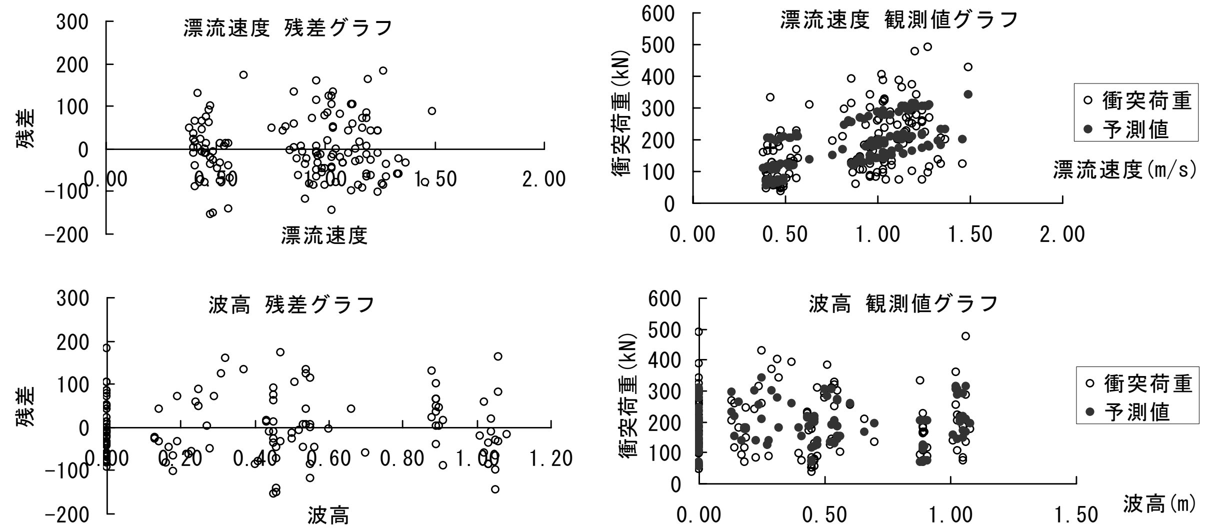


図-19 予測値と観測値の比較

4. 結論

栈橋杭に漂流物が衝突するときの衝突荷重を把握するために，平面水槽において水理模型実験を実施した．実験では漂流物の質量（比重），流れの向きと流速，波高，漂流物を流す方向（縦流しと横流し）を変更して，衝突荷重との関係を解析した．実験によって得られた成果は以下のとおりである．

① 衝突直前の漂流物の移動速度を漂流速度と定義する．漂流物の漂流速度は流れの速度に比例する．今回の実験条件では漂流物の漂流速度は流れの速度（流速）の 0.75 倍になった．これは，杭周辺の流れが一様になっていないためと考えられる．

② 漂流物の質量 m と漂流速度 v が大きいほど衝突荷重が大きくなる．したがって，衝突荷重は漂流物の運動量 mv に比例する．ただし両者の関係には変動幅がある．

③ 変動の要因として波高，衝突時の波の位相（波の山で衝突するか，谷で衝突するかなど），衝突時の漂流物の角度，衝突位置，などの違いが考えられる．実験結果の解析においてもこれらが影響している様子は認められたが，衝突荷重の変動を説明できるだけの強い相関は認められなかった．

④ 縦流しと横流しの場合分けを行うことによって，衝突荷重を運動量と作用時間から求めることができる．推定された衝突荷重は，曽我部ら(1981)が示した現地観測値とオーダーが等しく，安全側の値として使用できる．

本実験は，国土交通省関東地方整備局からの受託研究の一環として行ったものであり，実験条件に関する資料を提供していただいた関係者の皆様に感謝いたします．また，当所研究主監横田弘博士からは，杭の構造解析についてご教示いただいたことに感謝いたします．

(2007.9. 30 受付)

参考文献

大阪市(2007)：津波対策計画，大阪市ホームページ５章，pp.137-138.

押村嘉人・平石哲也・永瀬恭一(2006)：数値波動水槽を用

いた構造物に作用する流体力検討技術，海岸工学論文集，第53巻，pp.866-870.

関東地方整備局(2004)：東京国際空港Ｄ滑走路建設外工事要求水準関係資料，関東地方整備局，617p.

熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹(2006)：津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性，海岸工学論文集，第53巻，pp.241-245.

建設物価調査会(2006)：建設積算資料，建設物価調査会，300p.

首藤伸夫(1985)：防潮林の津波に対する効果と限界，海岸工学論文集，第32巻，pp.465-469.

曽我部隆久・布施谷寛・福家敬泰・四宮征一・麻植政行(1981)：海岸構造物への木材衝撃力について，海岸工学論文集，第28巻，pp.584-588.

永井荘七郎・小田一紀(1973)：海中構造物に対する船舶衝突防止施設に関する研究，海岸工学論文集，第20巻，pp.263-270.

日本港湾協会(1998) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，下巻，pp.609.

平石哲也・野口孝俊・宮田正史・長谷川巌(2007)：複合型空港島周辺の流況に関する模型実験，海洋開発論文集，第23巻，pp.793-798.

松冨英夫(1999)：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No.621/II-47，pp.111-127.

松冨英夫・大沼康太郎・今井健太郎(2004)：植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則，海岸工学論文集，第51巻，pp.301-305.

水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史(2005)：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第52巻，pp.741-745.

安田誠宏・平石哲也(2003)：模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価，港湾空港技術研究所報告，第42巻，第3号，pp.111-156.

山口正隆(1986)：重回帰分析に基づく波浪の統計的特性の検討，海岸工学論文集，第33巻，pp.139-143.

横田弘・竹鼻直人・南兼一郎・高橋邦夫・川端規之(1998)：鋼管杭式桟橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察，港湾技術研究所報告，第37巻，第2号，pp.75-130.

Hiraishi, T., M. Okuno and T. Endo(2007)：Directional random wave experiments on motion and tension of elastic floater, Technical Note of the Port and Airport Research Institute, No.1151, 18p.

主要記号表

D ：円柱直径(m)

dt ：作用時間(s)

E ：曲げ弾性(Pa)

F ：構造物に作用する力(N)

$H_{1/3}$：有義波高(m)

I ：断面モーメント(Nm^2)

m ：質量(kg)

$T_{1/3}$：有義波周期(s)

v ：漂流速度(m/s)

α ：衝突荷重に関する実験係数

λ ：縮尺

ρ ：漂流物比重

港湾空港技術研究所資料　No.1170

2007．12

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 ポートサイド印刷

Copyright Ⓒ（2007）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。