

# 河口部に位置する栈橋構造物に対する流木の危険度評価

## Risk Analysis of Drifting Timber for Jacket-type Structures Located in River Mouth

平石哲也<sup>1</sup>・春尾和人<sup>2</sup>・横田弘<sup>3</sup>・長谷川巖<sup>4</sup>・稲垣茂樹<sup>5</sup>

Tetsuya HIRAISHI, kazuto HARUO, Hiroshi YOKOTA, Iwao HASEGAWA and Shigeki INAGAKI

Large jacket-type structures are employed in the construction of the forth runway, Tokyo International Airport (Haneda). The runway is located at the mouth of Tama River flowing into the Tokyo Bay and the jackets are employed in the one-third part of runway so that the flood from the river may not be disturbed by the runway. Meanwhile many timbers may be floated from the upstream in the flood and they may cause the collision on a pier composing the jacket structures. This paper describes at the first an experiment for the probability of collision by the drifting timber in a basin with the scale of 1/25. The horizontal motion of five model timbers is analyzed using the 3-D video camera tracker. Secondary an experiment for the collision force measurement is carried out in a channel with the scale of 1/10. The model test result shows that the high risk of collision by the drifting timber exists. A calculation formula of collision force is proposed.

### 1. はじめに

現在、東京湾奥で建設されている羽田空港第4滑走路(D滑走路)は、河川流の影響範囲に含まれる西側1000mが河川流を妨げないような栈橋構造になる。図-1に設置現場位置を示す。ここではジャケットと呼ばれる柱状構造物を陸上で製作し、所定の場所に打ち込まれた直立杭に被せることによって短期間で栈橋を建設する工法が採用されている。水面付近の杭間隔は河川流下方向に対して30mであり、河川流は堰き止められずに流下する。ただし、2007年6月には多摩川で戦後最大の出水量を記録した洪水が生じ、河川敷の家屋等や多くの漂流物が河口へ流されたことは記憶に新しい。このような河川からの流下物が栈橋に衝突した場合には、栈橋を破壊することはなくても、塗装を痛め、防衛工を切断し、疲労破壊確率を高める可能性がある。そこで、流木を代表とする河川からの流下物による栈橋部への衝突確率および衝突した場合の衝突荷重を模型実験で求めることにより、空港完成後の維持管理作業計画策定に資することを目的として、平面水槽で模型実験を実施した。

研究は、2つの実験からなる。一つは、1/25縮尺模型を用いた広い範囲で流木運動を調べ、栈橋の直立柱部分に衝突する回数や、直立柱の位置の相違による衝突率の変化を調べた実験である。もう一つは、1/10縮尺模型を用いて1本の流木が直立柱に衝突したときに発生する力を

予測したものである。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、曾我部ら(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滑走路栈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の一部である。

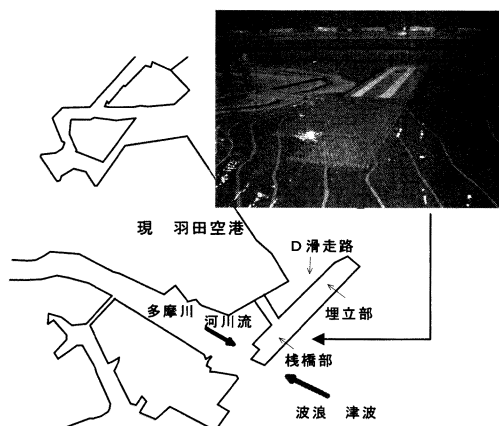


図-1 対象とする栈橋構造の位置

### 2. 平面水槽での衝突実験

#### (1) 滑走路建設の海象条件

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(平石ら, 2007)。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、

1 正 会 員 博 (工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・木工部  
2 (独法)港湾空港技術研究所海洋・木工部  
3 フェロー 博 (工) (独法)港湾空港技術研究所 LCM センター  
4 正 会 員 (株)エコー 沿岸デザイン本部  
5 正 会 員 (株)エコー 沿岸デザイン本部

表-1 D滑走路の設計に用いられる波と流れ

|       |          |                                                |
|-------|----------|------------------------------------------------|
| 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    | 潮位偏差     | H.W.L.<br>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      | $H_{1/3}=1.97\text{m}$ , $T_{1/3}=5.9\text{s}$ |
|       | 施工時      | $H_{1/3}=2.78\text{m}$ , $T_{1/3}=6.9\text{s}$ |
|       | 暴風時      | $H_{1/3}=4.15\text{m}$ , $T_{1/3}=8.3\text{s}$ |

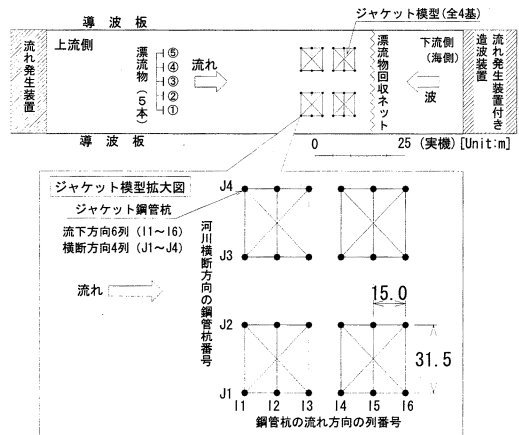


図-2 平面水槽における実験機材の配置

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、栈橋部分に作用する流速は、洪水時の方が大きく、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<sup>3</sup>/s が流下したときに、栈橋部の多摩川よりの端部で生じる流速である。洪水は現地で北から南へ作用し、波向と逆方向になる。

## (2) 平面実験の手法と条件

実験縮尺は1/25であり、複数木材を同時に流下させて衝突時の位置や角度を求める。図-2に波と流れを同時に再現できる平面水槽における栈橋模型（直杭）の配置と番号を示す。直杭は、羽田空港D滑走路の栈橋構造を模擬したジャケット4基に相当するように流下方向に6列、横断方向に4列設置した。間隔は流下方向に15m（実機）、横断方向に31.5mである。実験では、直径が約1m、長さが約11mの漂流木材を想定して、模型量でφ40mm、長さ453mmの丸太を同時に5本流下させた。河川流速は、実験で再現できる最大値でかつ最大出水量にほぼ近い1.2m/s およびその50%とした。また、台風時を想定して、下流側（海側）から波高1mの規則波を作用させた。実験では、杭の頭部、流木の両端にマーカーを取り付け、2台のカメラでマーカー位置を解析するビデオトラッカー装置（株式会社ディテクト、DIPP-Motion Pro）で流木模型の移動速度、衝突回数、衝突時の角度等を求め、杭の位置による衝突の危険性の変化を調べた。

なお、D滑走路周辺の海底地形はほぼ平坦で、平均的な水深17mを実験水深として採用することが望ましい。しかし、1/25の縮尺で現地水深17mを採用した場合、水槽における水深は0.68mと深く、所定の最大流速1.26m/sを発生させることができない。そこで、実験水深は10m（模型量0.40m）に設定し、ジャケット鋼管杭模型の高さは0.6mとした。設計資料に示されているジャケット鋼管杭の直径は1616mmである。1/25模型では約65mmで

表-2 複数漂流物実験の条件

| ジャケット | 漂流物 | 入射角 | 流速       | 波高    | 繰返し |
|-------|-----|-----|----------|-------|-----|
| 4基    | 5本  | 0°  | 1.26 m/s | 波なし   | 5回  |
|       |     |     |          | 1.0 m | 5回  |
|       |     |     | 0.63 m/s | 波なし   | 5回  |
|       |     |     |          | 1.0 m | 5回  |
| 4基    | 5本  | 15° | 1.26 m/s | 波なし   | 5回  |
|       |     |     |          | 1.0 m | 5回  |
|       |     |     | 0.63 m/s | 波なし   | 5回  |
|       |     |     |          | 1.0 m | 5回  |

あるので、模型は外径が約60mmの鋼管を使用し、水平部材や斜材は設置しないものとした。表-2に実験ケースを示す。複数漂流物衝突実験では、ジャケット模型を設置して波や流れを発生させ、波や流れが安定してから漂流物の漂流を開始させた。実験は1ケースにつき5回の繰返し実験を行った。衝突実験では漂流物のCCDカメラ撮影の他に、電磁流速計による流速測定と、容量式波高計による波高測定を実施した。

## (3) 実験の結果

図-3にCCDカメラ画像を解析して求めた複数木材の衝突までの軌跡を示す。図では一例として、流速1.26m/sで波高1mの波を作用させた場合を示す。最も上流側の杭に衝突する回数が多く、2列目以降は回数が少なくなる。また、波を作用させた場合は軌跡が大きくばらつき、1列目に衝突した後に後列に再度衝突する状況が見られた。

同一の条件で5回試験を行い、流木の総数に対して衝突した回数を確率で示したものが図-4である。図に示すように第1列目への衝突確率は15～20%であり、波作用時には後列の衝突確率も10%になり、洪水時に衝突の有無を確認すべき範囲が広がる。図-5は全実験ケースについて、衝突角と衝突率の相関を示したものである。衝突角は木材の長軸と流向の成す角度である。図では、衝突

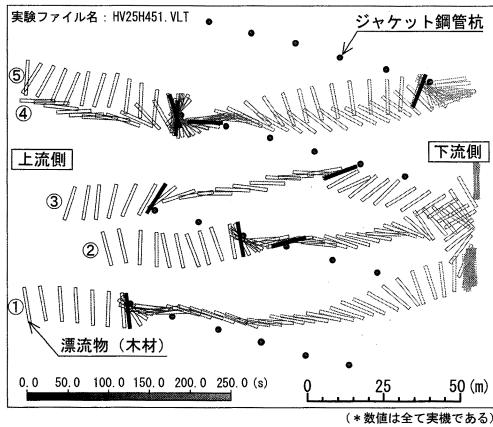


図-3 複数の流木の衝突の様子(左が上流)  
(①-⑤は木材で●が栈橋杭の位置でビデオ解析で衝突回数を調べる)

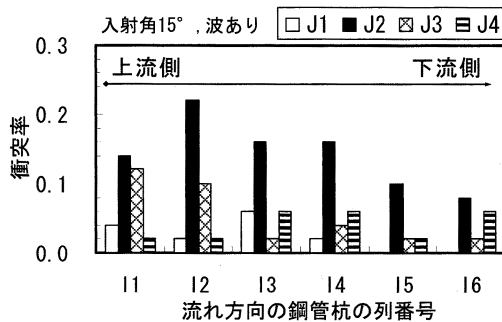


図-4 杭毎の衝突確率(波有り)

(Jは河川横断方向の杭番号, Iは流れ方向の杭番号)

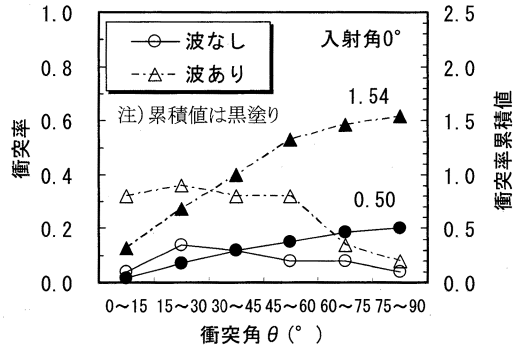
角毎に衝突が生じる頻度を示しており、黒塗の記号で累積値を示し、衝突角75～90°での累積値が最終的な衝突確率になる。累積確率は波が作用した方が、波が無い場合より大きく、入射角が15°のときに衝突確率が多い。

### 3. 衝突力を求める実験

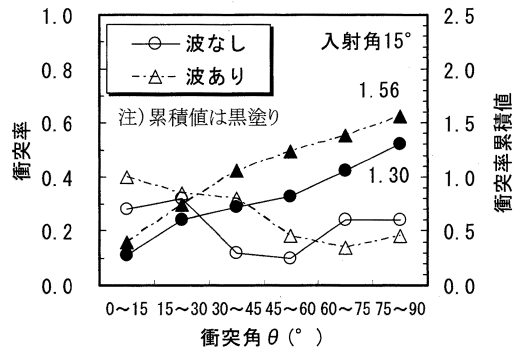
#### (1) 実験手法

前章で用いた同一水槽に幅1.25m、長さ15mの水路を設けて、鋼管で単一の杭模型を設置し、分力計で水平方向の衝突荷重を測定した。実験では流木は1本として、流木に張力を与えないような緩いガイド糸を用いて、流木模型のいずれかの箇所が杭模型に衝突し、水平荷重が測定できるようにした。衝突荷重データのサンプリングタイムは、模型値で0.001sである。現地での河川流速と作用する波の高さは表-2と同じである。また、模型の固有振動周期は現地と異なるので、測定された最大荷重を外力として、海底地盤に支持された鋼管杭をモデル化し、動的な構造解析計算で上端変位とせん断力を推定した。

単位杭の衝突荷重実験では、設置杭は1本だけであり、



(1) 入射角 0°



(2) 入射角 15°

図-5 衝突角と衝突率の関係

上流および下流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-2の下流から造波機を運転することで造波できる。水路内に設置した鋼管模型の取り付け部では、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。栈橋構造部は、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。一つの杭を単純化して、水面との関係を示すと図-6のようになる。

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。

松富ら(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を示している。すなわち、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。

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (1)$$

ここで、 $\delta$ ：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

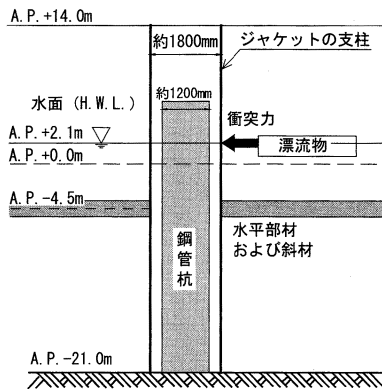


図-6 現地での杭の構造と衝突イメージ

(Nm<sup>2</sup>)で、実験で用いた円筒の場合は次式で示される。

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

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、市販の規格品で $D_1=114\text{mm}$ 、 $D_2=106\text{mm}$ （板厚 $t_1=4\text{mm}$ ）である。実機の鋼管は $D_1$ は約1200mmであり、規格品ではなく、板厚 $t_1$ が40mmになるので $D_2$ 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 $\lambda$ で表す。

$$\lambda = \frac{\delta_m}{\delta_p} = \frac{P_m I_m^3 / 3 E_m I_m}{P_p I_p^3 / 3 E_p I_p} \quad (3)$$

円筒部の直径、板厚は、模型と実機ではほぼ同じ比率で、断面2次モーメントの縮尺を $\lambda^4$ とする。

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{\delta_p}{\delta_m} \frac{I_m^3}{I_p^3} \frac{P_m}{P_p} = \frac{1}{\lambda} \lambda^3 \frac{1}{\lambda^4} \lambda^3 = \lambda \quad (4)$$

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、松富ら(2004)が導いた結論と同一である。鉄（鋼）の曲げ剛性を $\lambda(=1/10)$ 倍したような材質は容易に得られないので、材料の曲げ剛性の縮尺を1とすると、力の関係では次式が成立する。

$$\frac{P_m}{P_p} = \frac{E_m}{E_p} \frac{I_m}{I_p} \frac{\delta_m}{\delta_p} \frac{I_p^3}{I_m^3} = 1 \cdot \lambda^4 \lambda \frac{1}{\lambda^3} = \lambda^2 \quad (5)$$

したがって、実験で測定された力をFroude則で現地換算したときに、(縮尺)<sup>3</sup>倍をした力になるので、今回の実験縮尺( $\lambda=1/10$ )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。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のが、実験のばらつき等も考慮した安全側の数値となる。

## (2) 実験の結果

橋杭に作用する衝突荷重は衝突時に衝撃的に最大値を示した後は0.01sで振動しながら減衰した。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。

運動量 $mv$ は漂流物の質量 $m$ と漂流速度 $v$ から推定できる。作用時間 $dt$ は模型実験では測定が困難であり、後述するように曾我部ら(1981)が提案した数値を用いると、 $F = \alpha mv/dt$ が運動量と作用時間から求めた衝突荷重となる。ここで、 $\alpha$ は付加質量の影響も含めた衝突荷重係数である。実験全体の傾向として、流速や波高が大きければ衝突荷重が大きくなった。杭構造物のまわりの流況について、押村ら(2006)は、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。今回の実験条件では漂流物の漂流速度は水路の平均流速の0.75倍であった。

## (3) 衝突荷重の推定

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、実験での衝突荷重の妥当性を検証した。曾我部ら(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、実機で衝突荷重を測定し、最大荷重は次式で示されることを導いた。

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

ここで、 $m$ ：木材質量、 $v$ ：衝突速度（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。木材が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ある。作用時間 $dt$ は、現地実験では $10^{-3}\text{s}$ 程度であると推測され、 $n(1+e)$ を衝突荷重係数 $\alpha$ とする。

式(6)を用いて、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-7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。図に示されるように、本実験で得られた衝突荷重は、曾我部ら(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。相関係数は、初期の流し方が縦流しおよび横流しの場合で、それぞれ $r=0.95$ 、 $0.98$ で

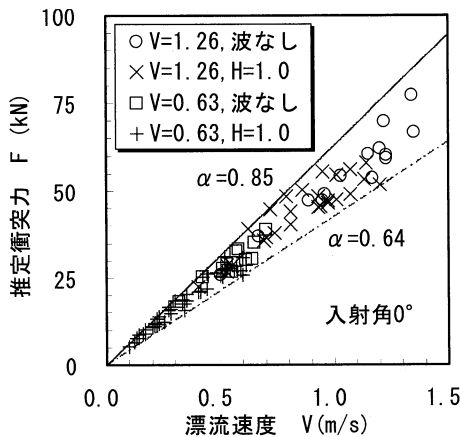


図-7 波有りも含む全ケースの衝突力評価

( $\alpha$ は実験係数で0.64:杭が側面衝突, 0.95:杭の頭が衝突)

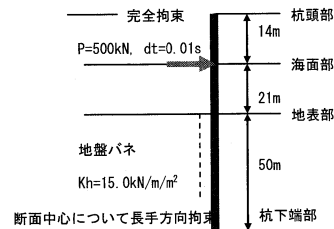
あった。このことから、実験で得られる衝突荷重は、実際に片持ち梁杭に作用する荷重の10倍程度になるものと推定したが、曾我部ら(1981)の現地試験条件である岸壁のようにたわみが生じない壁面に木材が衝突した場合に発生する荷重とオーダーが同じになることがわかった。

#### 4. 漂流木材の衝突時のリスク

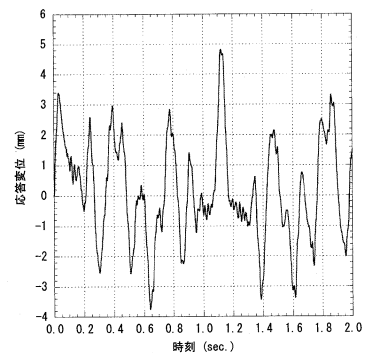
実験結果を活用し、既存の鋼管杭の動的応答解析モデル(横田ら, 1998)を用いて、海底に支持された杭の応答特性を検討した。計算では、直径1200mm、板厚40mmの鋼管杭が図-8(1)のように現地で建設されるものとして、海面で作用する衝撃荷重による応答特性を推定した。鋼管杭の弾性係数(ヤング率) $E=206\text{kN/mm}^2$ 、ポアソン比0.29、密度7820kg/m<sup>3</sup>、地盤バネは $K_h=15.0\text{kN/m}^2$ とした。載荷した荷重は、実験で得られた海面位置の集中荷重500kNとなるものとし、作用時間を0.01sとした。図-8(2)に応答時刻歴の結果を示す。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。(3)の杭頭部での水平方向に作用するせん断力は、海面での衝撃荷重とほぼ等しい。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、衝突荷重よりも1.6倍程度大きい荷重が作用する。本計算では、鋼管中の水がある場合の影響を考慮していないので、詳細な設計が成された場合には、あらためて衝突リスクに対する精査が必要である。

#### 5. まとめ

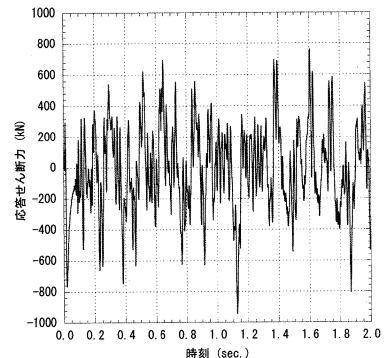
本研究では、縮尺を変化させた2種類の漂流木材の支持杭への衝突実験を行い、複数木材の衝突確率と単杭への衝突荷重を調べた。その結果、河川洪水時には10%以上の衝突確率があること等がわかった。



(1) 計算条件



(2) 応答変位の時刻歴



(3) 杭頭部のせん断力

図-8 応答モデルによる計算結果

#### 参考文献

- 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.
- 曾我部隆久・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突力について, 海岸工学論文集, 第28巻, pp.584-588.
- 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・長谷川巖(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.
- 松富英夫・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.
- 横田弘・竹鼻直人・南兼一郎・高橋邦夫・川端規之(1998): 鋼管杭式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.