

# 床版下に消波工を有する栈橋の水理特性について

木村克俊\* · 渡部 裕\*\* · 上久保勝美\*\*\*  
 山本泰司\*\*\*\* · 半沢 稔\*\*\*\*\*

床版下に消波工を有する栈橋（消波型栈橋）を対象として系統的な模型実験を行いその水理特性を調べた。消波型栈橋においては、通常型栈橋に比べて揚圧力を大幅に低減でき、その低減率を構造および波浪条件をパラメーターとして定式化した。また、反射率の低減効果を確認し、港内静穏度向上のために有効な構造であることを示した。一方、栈橋完成後の消波ブロックの補修が困難であることから、耐波安定性の確保が重要である。このため分力計を用いて床版下の消波ブロックに働く波力特性を明らかにした上で、安定実験結果に基づいて消波ブロックの安定数を新たに提案した。

## 1. はじめに

栈橋は軟弱地盤に適した係留施設であり、耐震性も高いことから、近年とくに大水深条件に対する採用事例が増加している。一方、港内施設である係留施設に対しても、反射波を低減できる消波機能の付加が求められる場合が多く、重力式岸壁に対してはスリットケーン構造が各地で適用されている。栈橋構造に対しては、図-1 に示すような床版下に消波ブロックを設置した構造形式が提案され、すでにいくつかの施工事例がある。しかしながら、栈橋床版に働く揚圧力に及ぼす消波工の効果や、消波ブロックの安定性については、十分な検討が行われていないのが現状である。

本研究では、こうした床版下に消波工を有する栈橋（以下「消波型栈橋」という）について、系統的な水理模型実験を実施し、その水理特性と耐波安定性に関する知見をとりまとめるものである。

## 2. 実験方法

実験は 2 次元造波水路（長さ 24 m、幅 0.6 m、高さ 1.0 m）に海底勾配 1/30 の水路床を設置して行った。図-2 に示すように、消波型栈橋の直杭を省略し床版のみを再現した。消波工の法勾配は 1:1 を標準とした。また比較のために消波工のない通常型栈橋についても実験を行った。栈橋の設置水深  $h$  は 28.0 cm で一定とし、静水面から床版までのクリアランス  $s$  を 4.4 cm とした。

反射、揚圧力および消波ブロックの安定実験においては不規則波を用い、有義波高  $H_{1/3}$  を 3.2~6.4 cm に変化させた。消波ブロックに働く波力測定実験では規則波を用い、波高  $H$  を 7.0~13.0 cm に変化させた。実験周期は 1.40~2.60 s の範囲で 3 種類に変化させた。なお、模型縮尺としては 1/25 を想定している。

栈橋床版には、前出の図-2 に示すように、水路中央線に沿って波圧計を 6 個等間隔で設置し、サンプリングタイム 5 ms で揚圧力を計測した。消波ブロックに働く波力は分力計を用いて水平および鉛直の 2 方向成分の測定を行い、サンプリングタイムは 10 ms とした。消波ブロックの安定実験では 1 波群を 1000 波とし、1 波群の作用終了後に消波ブロックの積み替えを行わずに被害を累積した。消波ブロックの被災の程度は高橋ら (1998) と同様に被災度  $N_0$  で表した。

## 3. 反射特性

図-3 は、 $h/L_{1/3} = 0.089$  の条件に着目して、反射率  $K_R$

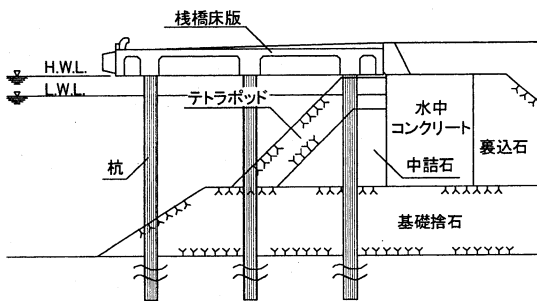


図-1 消波型栈橋

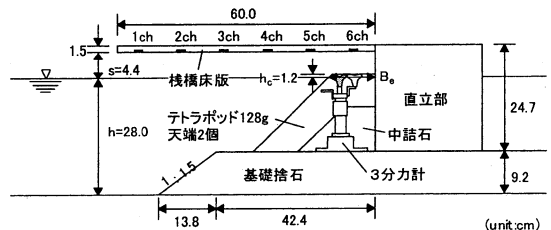


図-2 実験模型の断面形状(消波型)

- \* 正会員 博(工) 室蘭工業大学助教授 建設システム工学科
- \*\* 正会員 工修 東洋建設(株)東京支店
- \*\*\* 正会員 国土交通省北海道開発局苫小牧港湾事務所 第2計画課設計係長
- \*\*\*\* 正会員 博(工) (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室 副室長
- \*\*\*\*\* 正会員 工修 (株)テトラ ブロック事業本部

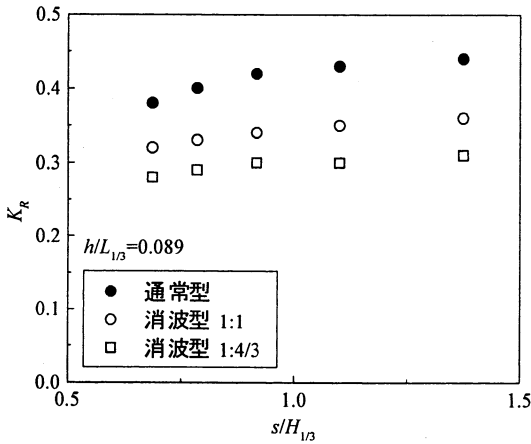


図-3 相対クリアランスの影響

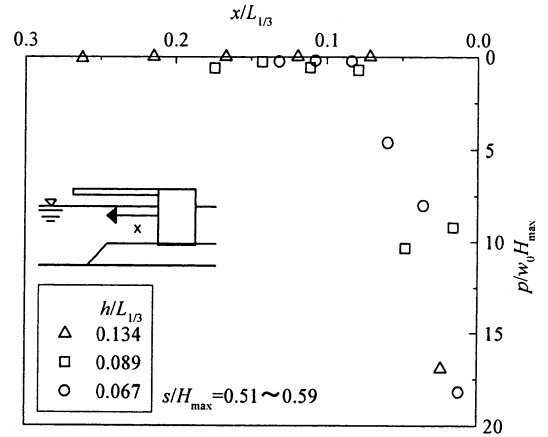


図-5 波圧の空間分布(通常型)

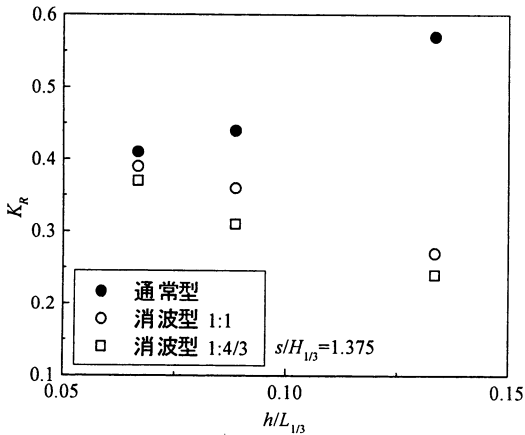


図-4 周期の影響

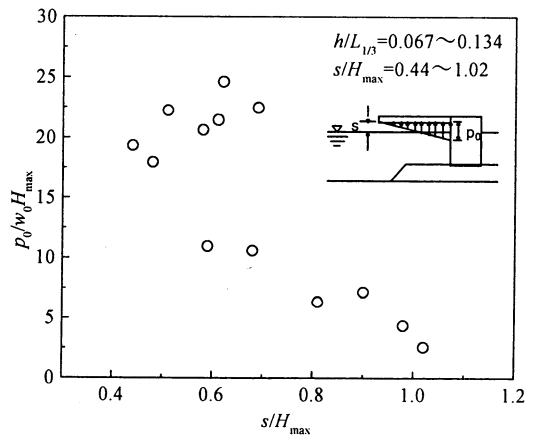


図-6 波圧と相対クリアランスの関係(通常型)

に対する相対クリアランス  $s/H_{1/3}$  の影響を示している。 $s/H_{1/3}$  が小さいほど波面が床版に衝突しやすくなるため、波のエネルギーが減衰されて反射率が低下する。また、消波ブロック法面が急な勾配 1:1 のほうが通常の勾配 1:4/3 に比べて反射率が高い傾向がある。

図-4 は、 $s = 4.4 \text{ cm}$ 、 $H_{1/3} = 3.2 \text{ cm}$  の条件に対して、反射率  $K_R$  と相対水深  $h/L_{1/3}$  の関係を示している。通常型においては、周期の長い条件ほど波エネルギーの減衰が大きくなり反射率も小さくなる。一方消波型においては、周期の短い条件ほど相対的に消波ブロックの被覆幅が大きくなることから反射率が低くなると考えられる。

#### 4. 揚圧力特性

##### (1) 通常型栈橋に働く揚圧力

渡部・木村 (2004) は通常型栈橋に働く揚圧力について実験を行い、波圧は三角形分布となることを確認していることから、揚圧力合力  $P$  の算定式を以下のように

表した。

$$P = \lambda \times \frac{1}{2} \times b \times p_0 \dots \dots \dots (1)$$

$$b = \alpha L_{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

$$p_0 = \beta \left( 2.0 - \frac{s}{H_{\max}} \right) w_0 H_{\max} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\lambda$  は消波ブロックによる波力低減率、 $b$  は揚圧力の作用幅、 $p_0$  は直立壁直前位置での揚圧力強度で、 $L_{1/3}$  は波長である。 $p_0$  の式形に関しては、伊藤・竹田 (1967) が提案した渡版に働く揚圧力の算定式を参考にした。

図-5 は  $s/H_{\max} = 0.51 \sim 0.59$  の条件に着目して無次元波圧  $p/w_0 H_{\max}$  の空間分布を  $h/L_{1/3}$  ごとに示したものである。ここで  $x$  は栈橋岸端から沖側への距離である。各周期とも波長  $L_{1/3}$  のおよそ 10% の位置まで波圧が作用していることがわかる。

図-6 は、 $h/L_{1/3} = 0.067 \sim 0.134$ 、 $s/H_{\max} = 0.44 \sim 1.02$

の条件において、直立壁前面の波圧 $p_0/w_0H_{max}$ と $s/H_{max}$ の関係を表している。 $s/H_{max}$ が大きいほど波面が床版に衝突しにくくなり $p_0/w_0H_{max}$ も小さくなる。

以上の実験結果に基づいて、式(2)中の $a$ を0.1に、式(3)中の $\beta$ を10.0とした。なお $\lambda$ は通常型では1.0とし、消波ブロックの効果については以下において検討する。

(2) 消波型棧橋に働く揚圧力

図-7は $h/L_{1/3}=0.067$ 、 $s/H_{max}=0.48$ の条件における無次元波圧 $p_{max}/w_0H_{max}$ の空間分布を示している。通常型では床版岸側での波圧が大きいのにに対し、消波型では消波ブロックの効果により波面上昇が抑えられるため波圧が減少している。

図-8は消波型棧橋における波力低減率 $\lambda$ を示している。横軸には、天端高 $h_c$ 、天端幅 $B$ 、静水面での被覆幅 $B_e$ 、クリアランス $s$ および波長を $L_{1/3}$ を用いて、静水面における相対被覆幅を $h_c(B+B_e)/2sL_{1/3}$ を示している。この値が大きいほど波力の低減効果が顕著となる

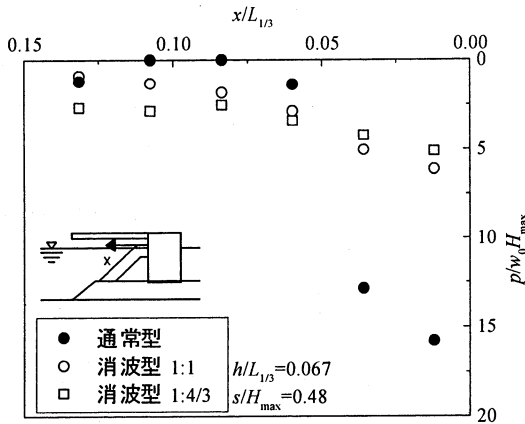


図-7 波圧の空間分布(消波型)

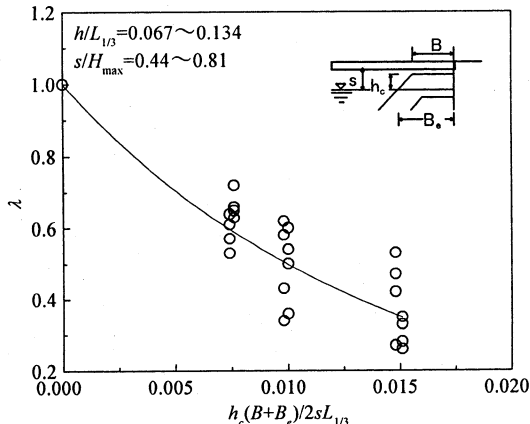


図-8 波力低減率

分かる。

ここでは実験値の平均的な傾向に着目して、式(1)中の $\lambda$ を以下のように定式化した。

$$\lambda = \exp\left[-70\left(\frac{h_c(B+B_e)}{2sL_{1/3}}\right)\right] \dots\dots\dots (4)$$

5. 床版下の消波ブロックの耐波安定性

(1) 消波ブロックに働く波力

図-9は $h/L=0.067$ 、 $H/h=0.37$ の条件における消波ブロックに働く波力の時間変化を表している。床版があるケースでは、床版がないケースに比べて消波ブロックに働く斜め下向きの波力が大きい。次に $F_x$ と $F_z$ の時系列データから合波力 $F_{xz}$ を計算した。図-10は、 $h/L=0.067$ の条件に対して、消波ブロックに働く合波力 $F_{xz}$ を消波ブロックの水中質量 $W'$ で除した無次元波力 $F_{xz}/W'$ と、波高水深比 $H/h$ の関係を示している。ここでは $H/h$ が大きくなるほど、 $F_{xz}/W'$ が大きくなる傾向がある。

図-11は $H/h=0.37$ の条件に対して合力 $F_{xz}$ に対する

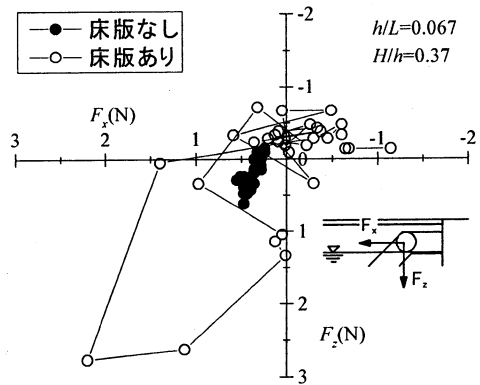


図-9 波力の時間変化

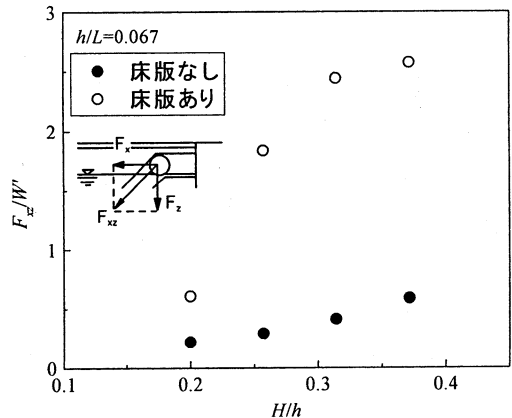


図-10 波力と波高水深比

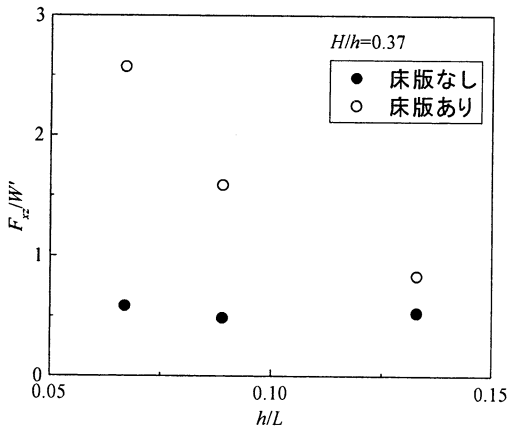


図-11 波力と相対水深

周期の影響を示している。床版がない場合には  $h/L$  の影響はほとんど見られないが、床版がある場合には周期が長くなるほど消波ブロックに働く波力が大きくなるのが分かる。

(2) 消波ブロックの安定性

a) 安定数算定の基本式

消波ブロックの必要質量  $M$  は、以下に示す安定数  $N_s$  を用いたハドソン式により算出される。

$$M = \frac{\rho_r H_D^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \dots \dots \dots (5)$$

$$N_s^3 = K_D \cot \theta \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $\rho_r$  は材料の密度、 $H_D$  は設計有義波高、 $S_r$  は海水に対する消波ブロックの比重、 $K_D$  は消波ブロックの形状などによって定まる係数、 $\theta$  はブロック法面が水平面となす角度である。また、高橋ら (1998) は波数  $N_w$  と被災度  $N_0$  をパラメータに取り入れた安定数の算定式として以下のように提案している。

$$N_s = a (N_0 / N_w^{0.5})^{0.2} + b \dots \dots \dots (7)$$

ここに  $a$ 、 $b$  はブロックの種類や斜面勾配で決まる定数である。一般的な消波ブロックの安定数に対しては、 $N_w = 1000$ 、 $N_0 = 0.3$  を基準値とすることが定められている。しかしながら栈橋床版下に消波ブロックを設置する構造では、いったん被災した場合にこれを補修することは非常に難しいと考えられる。このため安定数の決定においては、通常の基準値よりも厳しい条件を設定する必要があり、本研究では  $N_w = 5000$ 、 $N_0 = 0.3$  を採用することとした。

b) 床版の影響

図-12 は、 $M = 128 \text{ g}$ 、 $\cot \theta = 1$  の条件に対して、 $T_{1/3} = 2.60 \text{ s}$ 、 $H_{1/3} = 8.8 \text{ cm}$  の波を連続して作用させた後の状態を示している。波面が床版に衝突する際および水塊が落下する際に、消波ブロックに働く下向きの力によ

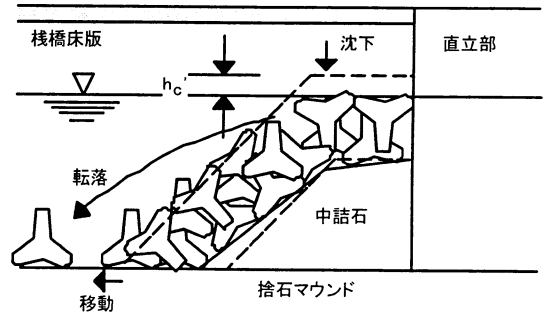


図-12 被災の様子

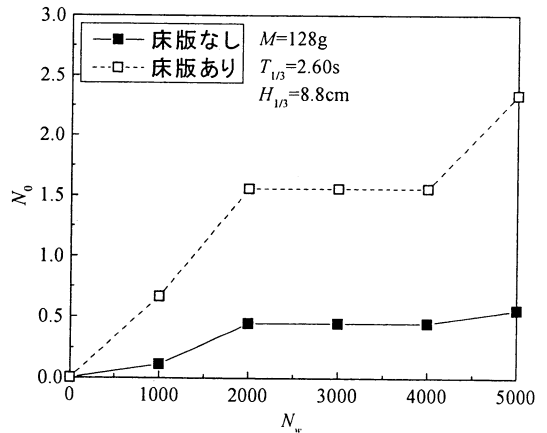


図-13 床版の影響

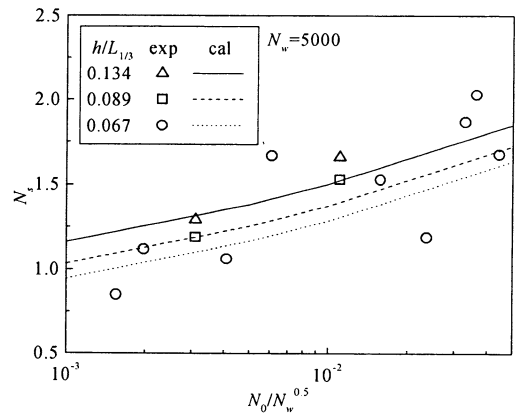


図-14 消波ブロックの安定数

て、法肩の消波ブロックの転落や法先の消波ブロックの前方への移動が生ずる。

これと同一の条件に対して、波数と被災度の関係を構造別に示したのが図-13 である。床版がある場合には下向きの波力によって沈下が進み、被災も大きくなる。5000波終了時には消波ブロックの天端はブロック1/2個分沈下し、完全に水没した状態となった。沈下がこま

で進むと式(4)中で $h_c=0$ となり、消波ブロックによる波力低減が期待できなくなる。

c) 周期の影響

前述した消波ブロックの波力実験結果から、周期の長い波が作用するほどブロックの必要質量は増大することが明らかとなった。図-14は、縦軸に安定数 $N_s$ 、横軸に被災度 $N_0$ を作用波数 $N_w$ の1/2乗で除した $N_0/N_w^{0.5}$ をとり、周期ごとに記号を変えて示したものである。実験値の平均的な傾向に着目して、栈橋床版下の消波ブロックの安定数を以下のように定式化した。

$$N_s = 2.32 \left( \frac{N_0}{N_w^{0.5}} \right)^{0.2} + 0.71 \times \left( \frac{h}{L_{1/3}} \right) + 2.14 \dots (8)$$

6. 試設計

表-1に示す-12m対応の栈橋に対して、消波工を設置する場合の検討を行った。揚圧力合力 $P_{max}$ は、通常型で $3.1 \times 10^3$  [kN/m]、消波型で $2.4 \times 10^3$  [kN/m]となった。標準的なハドソン式による計算質量である1.0tの消波ブロックを使用した場合には、作用波数の増大とともに被害が進行し、図-15に示すように消波工による波力低減効果が発揮されなくなる。一方、作用波数 $N_w = 5000$ 、基準被災度 $N_0 = 0.3$ の条件に対しては、式(8)から $N_s = 1.49$ と求められる。式(5)による計算質量は3.47tとなり、適切な質量割増の必要性が明らかとなった。

表-1 波浪および構造条件

構造条件		
床版部	床版長 $l$ (m)	20.0
	H.W.L.時の水深 $h$ (m)	13.5
	クリアランス $s$ (m)	1.4
消波ブロック	種類	テトラポッド
	$\cot \theta$	1
	質量 $M$ (t)	1.0
	天端高 $h_c$ (m)	0.3
	天端幅 $B$ (m)	1.7
被覆幅 $B_c$ (m)	2.0	
波浪条件		
周期 $T_{1/3}$ (sec)		10
波長 $L_{1/3}$ (m)		104.58
有義波高 $H_{1/3}$ (m)		2.1
最大波高 $H_{max}$ (m)		3.7

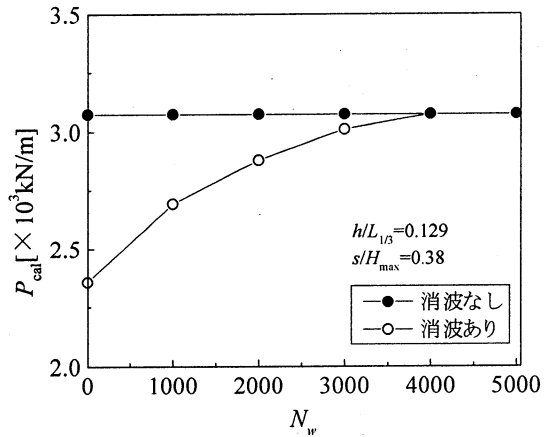


図-15 波力の増大

7. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- ①消波型栈橋の反射特性を明らかにし、通常型栈橋に比べて反射率を低減できることを示した。
- ②消波型栈橋の床版に働く揚圧力について検討し、通常型に対する揚圧力の低減特性を明らかにした。さらに栈橋の構造および波浪条件を変化させた場合の波圧算定法を提案した。
- ③栈橋床版下に設置した消波ブロックに働く波力特性と被災特性を明らかにし、これらを考慮した安定数を提案した。さらに具体的な消波型栈橋に対して試設計を行った。

参考文献

伊藤喜行・竹田英章(1967)：栈橋に作用する波の揚圧力，港湾技術研究所報告，第6巻，4号，pp. 37-68。  
 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利(1998)：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量，港湾技術研究所報告，第37巻，第1号，pp. 3-32。  
 渡部 裕・木村克俊(2004)：栈橋床版に働く揚圧力特性に関する水理模型実験，土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文集，第60号，pp. 442-445。