

## 急勾配海底条件に対するコンクリート底板を有する鋼製栈橋の耐波安定性

Study on wave force and stability of a steel pier structure with a concrete bottom plate for steep foreshore conditions

室蘭工業大学大学院

○学生員

内山 太公 (Taku Uchiyama)

室蘭工業大学大学院 教授

フェロー

木村 克俊 (Katsutoshi Kimura)

(国研)土木研究所寒地土木研究所

正会員

上久保 勝美 (Katsumi Kamikubo)

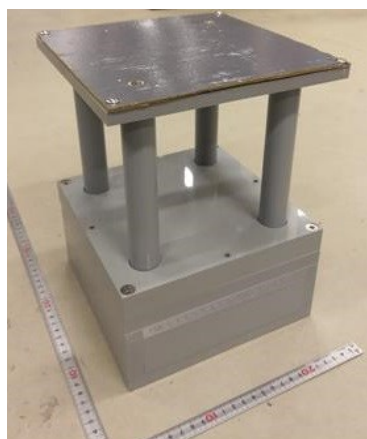
## 1. はじめに

離島においては、環境保護等の観点から、現場打ちコンクリートや杭打ちの施工が禁止されていることが少なくない。こうした場所において係留施設を設置するために、コンクリート製の底板上に鋼製栈橋を一体化させた構造が有効となる。これまでの研究では、海底勾配が 1/30 の条件に対し、基礎的な性状として、堤体の形状効果 (内山ら<sup>1)</sup>)、底板の最適形状 (内山ら<sup>2)</sup>) について実験による検討を行っている。

本研究では、このような構造物の現地における急勾配海底条件での耐波安定性を向上させることを目的として、海底勾配 1/15 の条件において水理模型実験により床板の開口率の影響と消波工の効果を検討した。

## 2. 実験方法

2次元造波水路(長さ 24.0m, 高さ 1.0m, 幅 0.6m)内に、勾配 1/15 の海底地形を作製し、鋼製栈橋を模型縮尺 1/30 で再現した。実験波は、周期  $T$  を 3 種類 (10.0s, 12.0s, 14.0s) 使用し、換算沖波波高  $H_0^*=1.0\sim6.0\text{m}$  の 6 種類に変化させた 1 波群 150 波の不規則波を用いた。使用した模型(写真

写真-1 実験模型 (開口率  $\varepsilon=0\%$ )

-1)は、堤体幅  $B$  および奥行を 6.0m, 底板厚  $D$  を 3.3m で一定とし、内部に鉛球(直径 2mm)を最大で 15kg 入れることによって堤体質量を調節することができる。図-1は、堤体設置位置の断面図であり、マウンドを砕石

(平均的な諸元は、現地量で直径 0.45m, 重量 350kg)で構成し、堤体との摩擦係数  $\mu$  は静的引張試験により 0.5 とした。

滑動実験では、消波工設置前後での滑動限界質量  $M_L$  の比較を行った。はじめに、設置前の条件で、図-2 に示すように床板の開口率  $\varepsilon$  を 4 種類 (0%, 20%, 42%, 64%) に

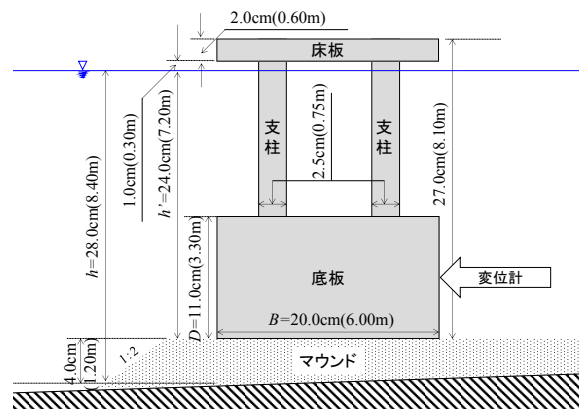


図-1 堤体形状

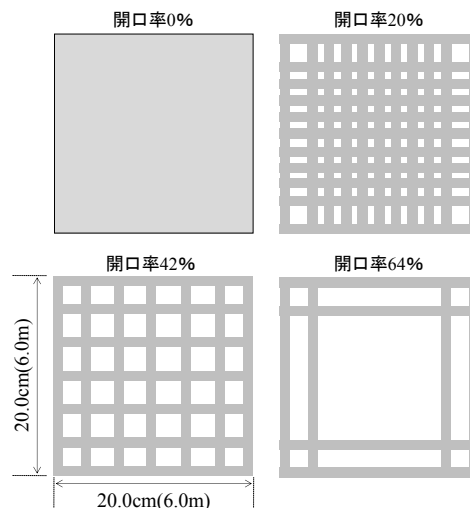


図-2 床板の平面形状

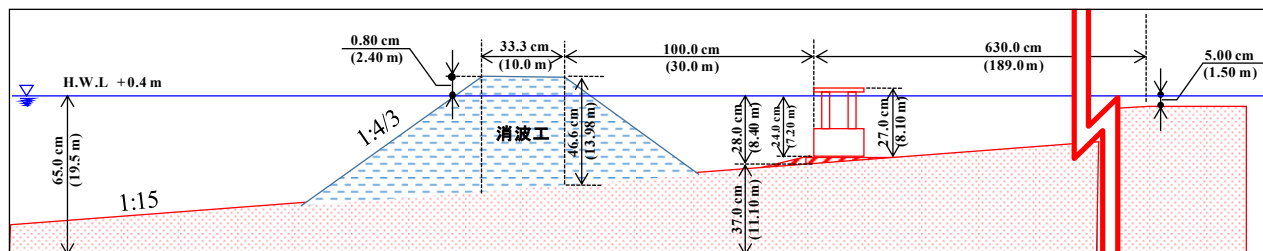


図-3 水路断面図

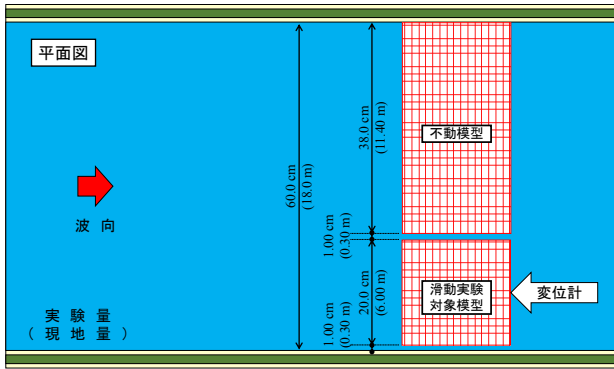


図-4 水路平面図

変化させたときの影響を確認した。現地において、床板が開口部を有している場合、上面にエキスパンドメタルを設置することを想定しているが、実験では省略している。次に、図-3に示すような位置に消波工(現地量 16.2t 型)を設置し、消波工の効果を確認した。また、図-4に示すように、波向直角方向に模型を2つ並べ、手前を実験対象としており、背後に設置した変位計により計測された変位量が1mm(現地換算で3cm)を超えたときを滑動としている。

### 3. 耐波設計に用いる波圧分布

内山ら<sup>1)</sup>は、床板が不透過条件に対して、図-5に示す波圧分布を提案している。合田式による波圧分布は以下の式で表される。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta)H_{\max} \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta)\rho g H_{\max} \quad (2)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (3)$$

$$p_4 = p_1 \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left( \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)^2 \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left( 1 - \frac{1}{\cosh kh} \right) \quad (7)$$

ここに、 $\eta^*$ : 静水面上で波圧強度が0となる高さ、 $p_1$ : 静水面での波圧強度、 $p_3$ : 堤体前趾での波圧強度、 $p_4$ : 天端

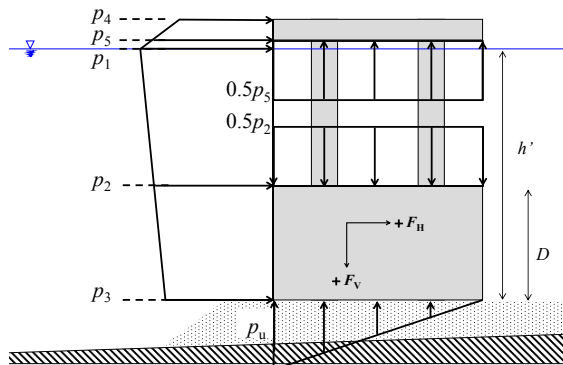


図-5 耐波設計に用いる波圧分布

での波圧強度で、従来の式による計算で求める。また、提案した波圧分布では、 $h'$ : マウンド上の水深、 $D$ : 底板厚、 $p_2$ : 底板上面での波圧強度、 $p_5$ : 床板下面での波圧強度としている。 $p_4$ ,  $p_5$ から床板に作用する水平波圧、 $p_5$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ から支柱に作用する水平波圧、 $p_2$ ,  $p_3$ から底板に作用する水平波圧、 $p_5$ から床板への揚圧力を求めている。このとき、底板に作用する波圧は、合田式による波圧強度  $p_2$  および  $p_3$  に(8)式より求める低減係数  $\beta$  を掛けて計算を行うものとする。

$$\beta = 1 - \frac{1}{5.694(D/h')} \quad (8)$$

ここに、 $h'$ は底板基面を基準とした水深であり、 $D/h'$ が小さくなるほど、波圧が小さくなることを表している。

内山ら<sup>2)</sup>は、床板に作用する揚圧力は、合田式で求める波圧強度  $p_5$  に(9)式に示す床板の幅をパラメータとした補正係数  $\tau$  を掛けて計算を行うものと提案している。

$$\tau = \exp[(4.5B/L)] \quad (9)$$

ここに、 $B$ は堤体の幅、 $L$ は堤体設置位置での波長であり、 $B/L$ が大きくなるほど、波圧が大きくなることを表している。また、円柱部材に働く波圧は、一般的にモリソン式で計算されるが、ここでは合田式によって一括で計算できるように設定している。

### 4. 床板開口率の効果

#### 4.1 開口率が滑動パターンに及ぼす影響

図-6は、 $T=14s$ ,  $H_0=4m$  に対して、開口率 0%と 64% について、堤体から 66.5cm 沖側における水位と滑動変位

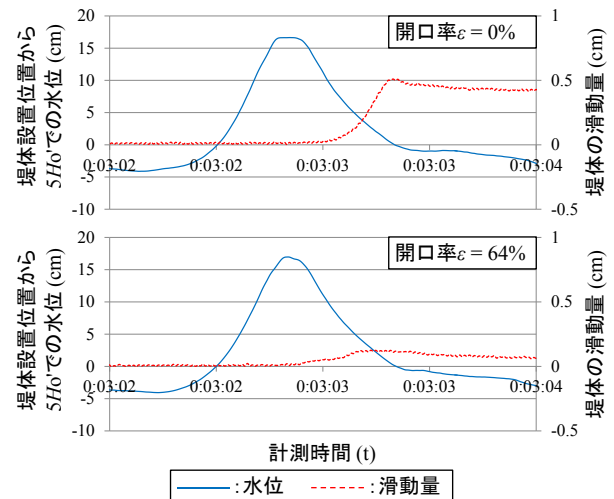


図-6 前面水位と滑動変位の関係



写真-2 床板への波の作用状況

の関係を示したものである。なお、ここでは堤体質量を軽くして、滑動をしやすくしている。また、不規則波群中の最高波に相当する1波による堤体の変位を例示している。堤体の滑動はほぼ同一のタイミングで開始しているが、開口率64%の場合はすぐに収まり、最終的な滑動量は開口率0%のおよそ1/5になる。写真-2には、 $T=14s$ 、 $H_0'=3m$ での開口率0%と20%における堤体に対する波の作用状況を示している。開口率20%の場合には、開口部からの水の噴き出しが発生しており、揚圧力の低減に寄与しているものと考えられる。

#### 4.2 開口率と滑動限界質量の関係

滑動限界を1mmと設定して、滑動限界質量 $M_L$ を求めた。図-7は周期を3種類に変化させて、換算沖波波高 $H_0'$ と滑動限界質量 $M_L$ の関係を示す。床板は開口率を不透過

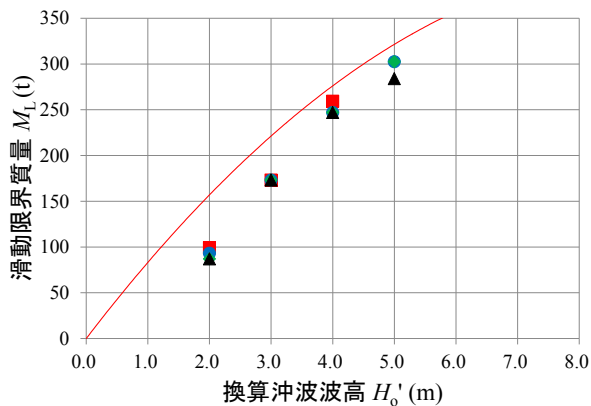


図-7(a) 床板開口率の効果 ( $T=10s$ )

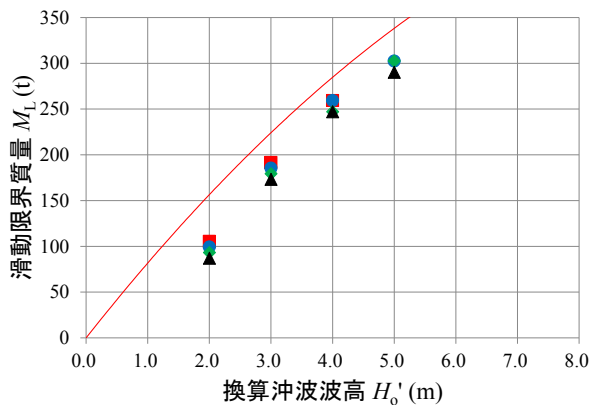


図-7(b) 床板開口率の効果 ( $T=12s$ )

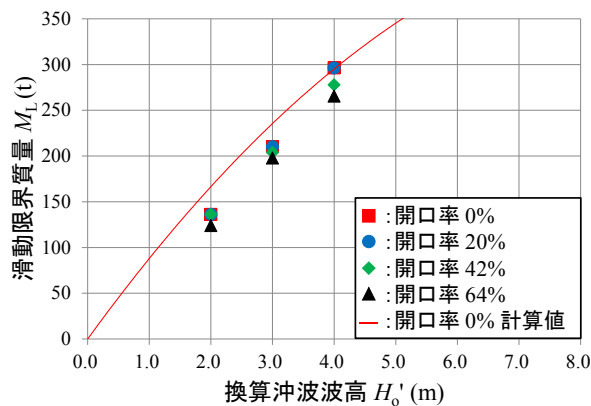


図-7(c) 床板開口率の効果 ( $T=14s$ )

(開口率0%)な場合と透過(開口率20, 42, 64%)にした場合の計4種類に変化させた。全ての周期について波高とともに滑動限界質量は大きくなるが、周期が長いほど開口率の影響が現われる傾向がある。例えば、 $T=14s$ 、 $H_0'=4m$ に着目すると、開口率64%とすることで、0%と比較し、必要となる質量は300tから260tまでおよそ10%低減することができる。なお、図中の実線は不透過条件に対する計算曲線を示しているが、周期が長いほど実験値と一致する傾向がある。

図-8は、横軸に開口率、縦軸に開口率0%を分母とし、それぞれの開口率に対する滑動限界質量の比 $M_r$ を示している。 $H_0'=2m$ および $3m$ では開口率の影響が現れているが、 $H_0'=4m$ では、床板上への越波水塊の打ち込みによる影響が卓越するため開口率の影響は小さいものと考えられる。全体的な傾向としては、開口率 $\varepsilon$ と滑動限界質量比 $M_r$ には直線的に低減する関係がある。

#### 5. 消波工の効果

##### 5.1 波高の低減効果

写真-3は、消波工を設置した場合の $T=14s$ 、 $H_0'=2m$ における最高波が作用した際の滑動実験の状況を示している。消波ブロックの天端上で砕波が発生し、その後、堤体へ作用している。

図-9は、換算沖波波高 $H_0'$ と波高低減係数 $\lambda$ (消波工設



写真-3 消波工による砕波の状況

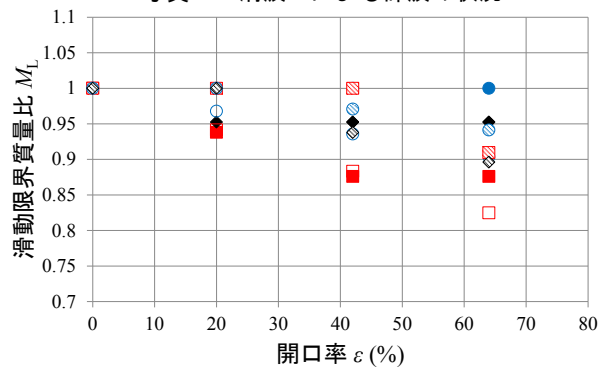


図-8 開口率が滑動限界質量におよぼす影響

置時の有義波高  $H_{B1/3}$  を消波工未設置時の有義波高  $H_{1/3}$  で除した値)の関係を示している。波高低減係数は波高が大きく、周期が短くなるほど小さくなる傾向にあることがわかる。また、図-10は、最高波高での波高低減係数  $\lambda$  を示している。有義波高と同様に、波高の低減率は平均的な傾向よりおよそ0.5程度と読み取れる。このことから、消波工を設置することにより本検討に用いた断面において、波高を半減できることがわかる。

## 5.2 換算沖波波高と滑動限界質量の関係

図-11は換算沖波波高  $H_o'$  と滑動限界質量  $M_L$  の関係を周期ごとに示している。消波工を設置することにより必要質量を半減させることが可能になり、 $H_o'=6\text{m}$  においても安定性を確保できることがわかった。さらに、透過性床板(64%)を用いることによっておよそ2割の必要質量の低減を見込める。

図中の計算曲線は、消波工による波高低減係数  $\lambda$  を0.5として求めたものであり、実験値の傾向とはほぼ一致している。なお、波高低減係数  $\lambda$  の値は波高によって変化しているがここでは計算の簡略化のため、平均的な傾向である用いて必要質量を求めている。

## 6. まとめ

- (1) 鋼製栈橋の床板を透過性にすることで耐波安定性を向上できることを示した。
- (2) 消波工による波高低減率を求め、これを用いた波圧

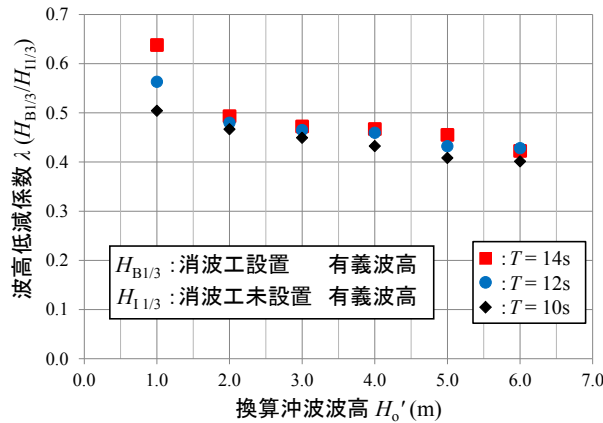


図-9 有義波高の低減係数

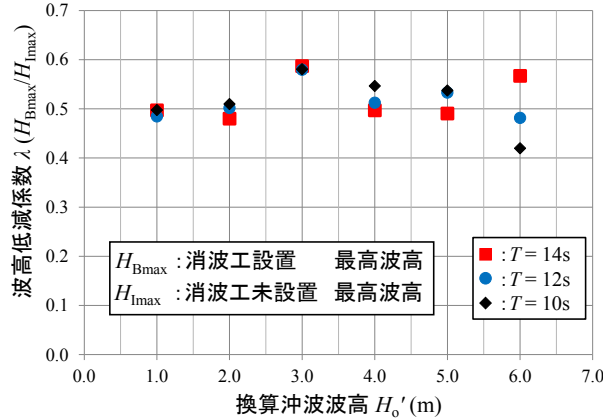


図-10 最高波高の低減係数

の計算値の妥当性を滑動実験により確認した。

- (3) 消波工を設置し、透過性床板( $\varepsilon=64\%$ )にすることによって、 $H_o'=6\text{m}$  まで耐波安定性を確保できることがわかった。

## 参考文献

- 1) 内山太公, 木村克俊: コンクリート底板を有する鋼製栈橋の耐波安定性に関する検討, 土木学会北海道支部論文報告集 Vol. 73, B-56, 2016
- 2) 内山太公, 木村克俊, 上久保勝美: コンクリート底板を有する鋼製栈橋の最適形状に関する実験的検討, 土木学会第72回年次学術講演会, II-211, 2017

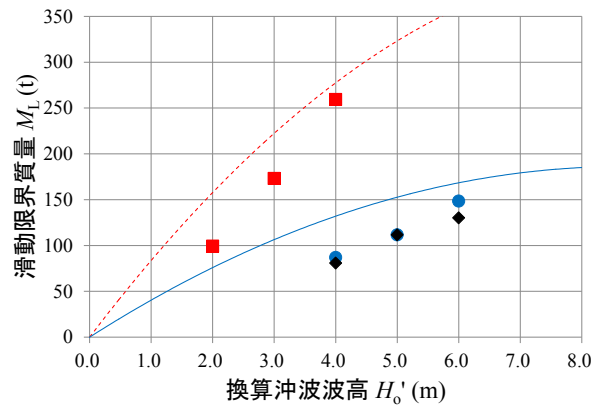


図-11(a) 消波工と開口率の効果 ( $T=10\text{s}$ )

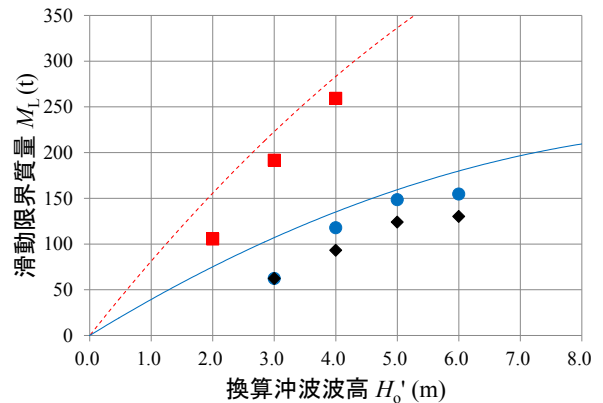


図-11(b) 消波工と開口率の効果 ( $T=12\text{s}$ )

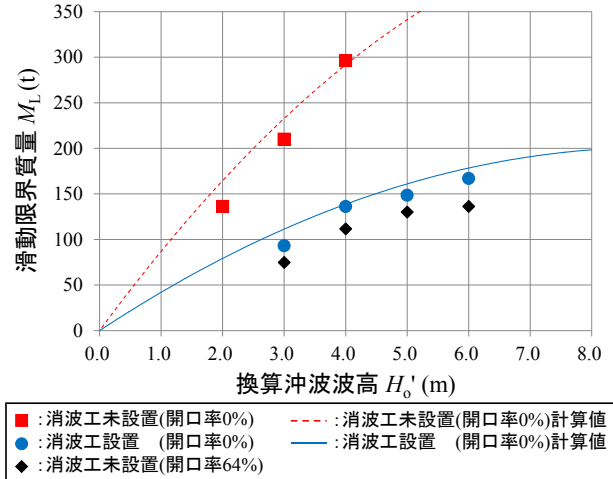


図-11(c) 消波工と開口率の効果 ( $T=14\text{s}$ )