

リーフ上に架設された橋梁に作用する波力特性 に関する検討

WAVE FORCE ON PIER AND GIRDER OF CONCRETE BRIDGE CONSTRUCTED ON REEF

渡辺元¹・木村克俊²・山本泰司³・名越隆雄⁴・清水敏明⁵
Hajime WATANABE, Katsutoshi KIMURA, Yasuji YAMAMOTO
Takao NAKOSHI and Toshiaki SHIMIZU

¹学生会員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

²正会員 博(工) 室蘭工業大学 教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

³正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-2)

⁴正会員 株式会社ドーコン 防災保全部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1-5)

⁵ 日本データサービス株式会社 水工部 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)

Two-dimensional hydraulic model tests and numerical calculations were conducted to reveal the stability of concrete bridge on reef against storm waves. The characteristics of standing wave were examined for different reef conditions by the numerical calculation with CADMAS-SURF. Based on the numerical test results, the patterns of wave run-up were disclosed for several reef conditions.

The bridge girder failure at Ohmori Coast, Kamoenai, Hokkaido in 2004 was predominant at the loop of standing wave condition, and the same damage pattern was confirmed by the wave force tests. The characteristics of horizontal wave force on bridge pier were also studied to be critical at the node of the standing wave.

Key Words : Concrete bridge, Wave force, Reef, Hydraulic model test, Numerical calculation

1. はじめに

2004年9月8日に北海道西岸を北上した台風18号により、北海道積丹半島西岸を通る国道229号の大森大橋の延長429mのうち159m区間において、図-1のようにコンクリート製橋桁が脱落する災害が発生した。この台風による高波は積丹半島沖で $H_0=7.6\text{m}$ と推定され、ほぼ50年確率波に相当する。また小樽港においては最大潮位偏差0.6mが記録され、北海道各地において1954年の洞爺丸台風以来と言われる極めて大きな被害をもたらされた。

大森大橋の高波被害については、岡田ら¹⁾が橋梁の損傷状態から被災メカニズムを推定している。また本間ら²⁾は、2次元水理模型実験により被災の再現を行い、大森大橋の被災は橋梁背後からの反射波と入射波が重合した重複波による揚圧力が原因であることが明らかにしている。さらに応急復旧に用いた仮橋を対象としては、木村ら³⁾が現地観測と水理模型実験結果との比較を行っている。

この様なリーフと急峻な崖で構成される地形条件は全国に少なくなく、同様の災害が起こることも

懸念される。既に施工された橋梁の安全管理や、新規に橋梁の配置や桁高を決定するためには、こうした条件に対するさらなる知見の蓄積が必要となる。

本研究においては、まずリーフ上の水面形に関する数値計算を行う。さらに、2次元造波水路を用いた水理模型実験を行い、橋桁および橋脚に働く波力特性を明らかにするものである。



図-1 大森大橋の被災状況
(北海道開発局小樽開発建設部提供)

2. 被災箇所の周辺地形

大森大橋はリーフ上に建設されたコンクリート橋梁で、図-2および図-3に示すように橋梁前面には急な海底勾配があり、橋梁背後には湾状の崖が位置している。

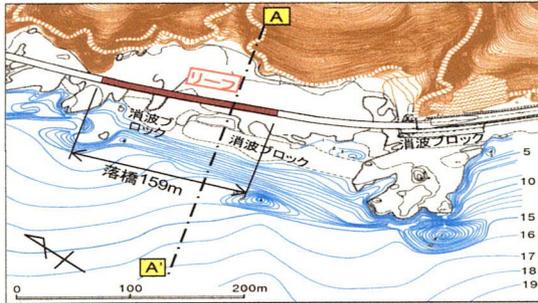


図-2 被災箇所の周辺図
(本間ら²⁾による)

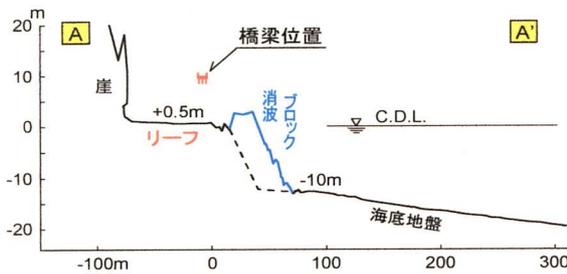


図-3 被災箇所の断面形状
(本間ら²⁾による)

被災箇所のリーフ幅は約70mであり、橋梁はリーフ前面から約30mの地点に位置している。この複雑な地形が橋梁に作用する波力に影響を及ぼしたと考えられている。また、近隣の漁港において岸壁の冠水が報告されていたことから、被災時の大森大橋の周辺では潮位の異常上昇が発生したと考えられる。

3. リーフ上の水面形に関する数値計算

数値波動水路 CADMAS-SURF⁴⁾を用いてリーフ上の水面形の数値計算を行った。計算に用いた断面条件を図-4に示す。これは、被災した大森大橋の代表的な地形を再現したものである。沖側の海底地形の勾配は1:20とし、現地水深約10mから静水面付近まで1:1の急勾配で立ち上げ、そこから先は平坦なリーフ地形を再現した。さらにリーフ背後には勾配1:0.5の崖を配置した。ここでは、現象を単純化するために現地でリーフ前面に設置

されていた消波工および橋梁は省略している。なお、後述する水理模型実験との比較をしやすいように、以下においては縮尺1/25の諸元を用いて説明する。

リーフ前面から後方の崖までの距離をリーフ幅 D と定義する。ここでは D を1.0mから4.2mまで、0.2m間隔で17種類に変化させた。また、崖からの距離を X_0 とし、リーフ上水深 W は16cmで一定とした。

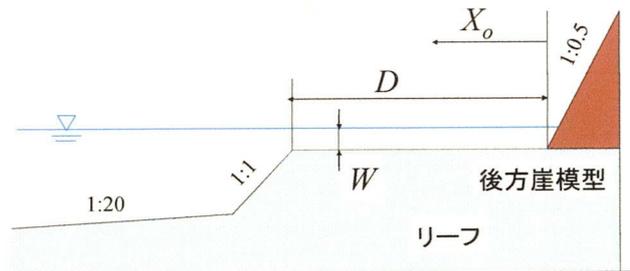


図-4 断面形状

数値計算はすべて規則波を用い、周期 T は2.4s、沖波波高 H_0 は24cmでそれぞれ一定とした。解析対象は第2波目以降の重複波が発生している部分とした。リーフ前面より後方の崖まで0.2m間隔で測定点を設置し、水位変化を計算した。計算時間は25s、計算間隔は0.05sとして時系列のデータを得た。

図-5はリーフ幅 $D=2.8$ mの条件における後壁からの距離 X_0 をリーフ上の波長 L で無次元化した値と水面形の計算結果の関係である。

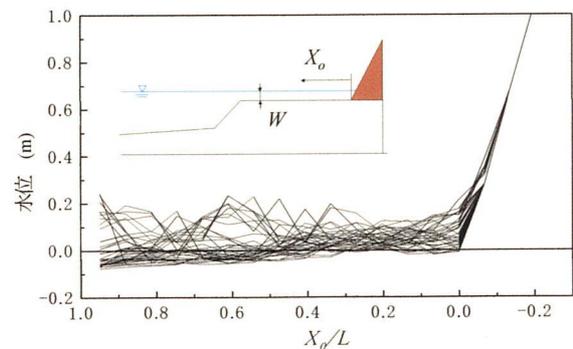


図-5 リーフ上の水位分布

$X_0/L=0.6$ 付近では水位の振幅が大きい。これはこの位置が沖からの入射波と後壁からの反射波による重複波の腹に相当するためである。また、 $X_0/L=0.7$ および $X_0/L=0.4$ 付近では水位の振幅が小さく、これは重複波による節に相当するためと考えられる。

以下、リーフ上を基準とした最高水位を R と定義し、打ち上げ高さと呼ぶこととする。

図-6は、波長 L で除して無次元化したリーフ幅 D と

打ち上げ高さ R との関係を示している。 $D/L=0.8$ 付近でピークを示していることが分かる。この条件は被災時の現地水位が4mと仮定したときの現地における被災箇所付近のリーフ幅に相当する。

リーフ幅が小さい $D/L=0.4$ の条件では、リーフより沖側で重複波が発生するために打ち上げ高さ R が小さくなる。リーフ幅が大きい $D/L=1.0$ 以上の条件では、碎波の影響により波浪の減衰が生ずるため R が小さくなる傾向がみられた。

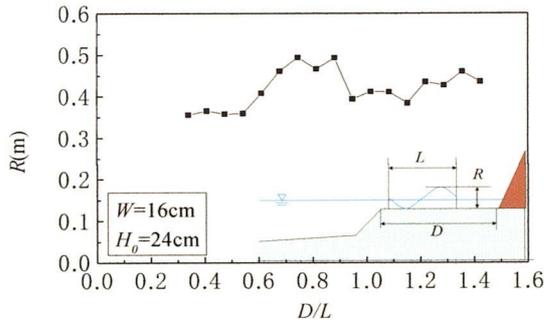


図-6 リーフ幅と打ち上げ高さの関係

図-7は、リーフ幅 D を1.4~3.0mの5種類に変化させた場合の、打ち上げ高さ R の空間分布を示している。打ち上げ高さ R は $X_0/L=0.5$ 付近でピークを示している。この条件は理論上の重複波の腹の位置に相当するためである。これに対し、理論上の重複波の節の位置に相当する $X_0/L=0.25$ および $X_0/L=0.75$ では打ち上げ高さ R が小さい傾向がみられた。

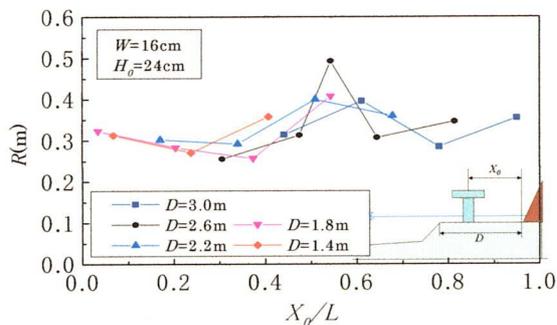


図-7 打ち上げ高さの空間分布

4. 橋桁および橋脚に働く波力特性

(1) 実験方法

実験は長さ22m、幅0.8m、深さ2mの二次元造波水路を使用し、すべて規則波で行った。周期 $T=2.4$ s、沖波波高 $H_0=24$ cm、リーフ上水深 $W=16$ cm、リーフ幅 $D=2.6$ mで一定とし。実験対象波は、造波開始から2波目と3波目とし、その重複波に着目した。波力データの測定間隔は0.002sとした。

橋梁は橋桁部分と橋脚部分に分けて縮尺1/25の模型を製作し、それぞれ別個に実験を行って波力を測

定した。

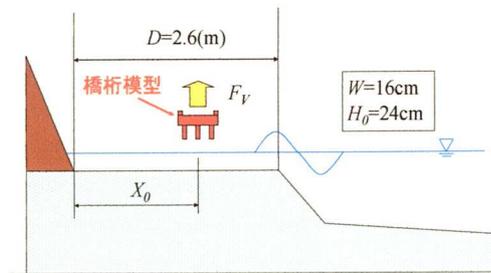


図-8 橋桁の実験断面

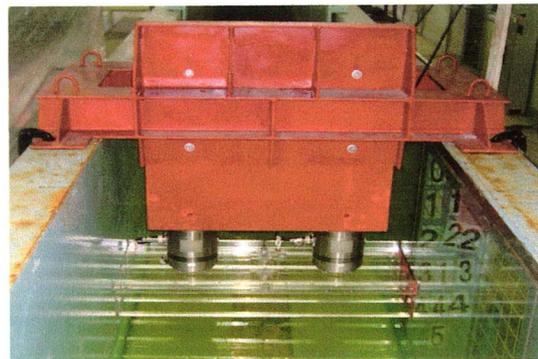


図-9 橋桁模型

図-8は、橋桁模型を設置した際の実験断面を示している。リーフから橋桁までのクリアランスは24.5cmとした。後壁から橋桁までの距離 X_0 は0.9m, 1.4m, 1.9m, 2.4mの4種類に変化させた。なお、後壁から橋桁模型までの距離が1.4mの条件は、現地の被災箇所に対応している。この条件では波圧計を用いて橋桁に作用する波圧分布を測定した。

橋桁模型は図-9に示すように上方から2台の分力計を用いて固定し、鉛直波力 F_V を測定した。また、橋桁の水平部分および鉛直部分に、それぞれ4箇所ずつ波圧計を設置した。

図-10に橋脚模型を設置した際の実験断面を示す。模型の設置条件は橋桁と同様とした。図-11は水路内に固定された橋脚模型を示している。橋脚模型は直径14cm、高さ42cmの円筒型であり、模型下端から7cm, 21cm, 35cmの位置に、水平波力を測定するための分力計が設置されている。ここでは、各測点をそれぞれ3ch, 2ch, 1chと呼ぶ。橋脚模型は水路と上部工で固定し、得られた水平波力を受圧面積で除して水平波圧 f_H を求めた。

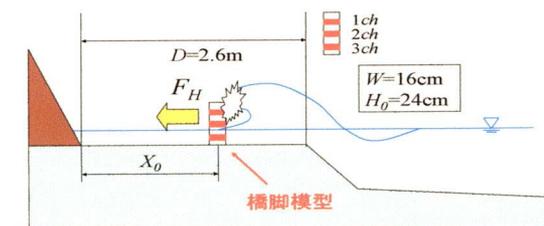


図-10 橋脚の実験断面

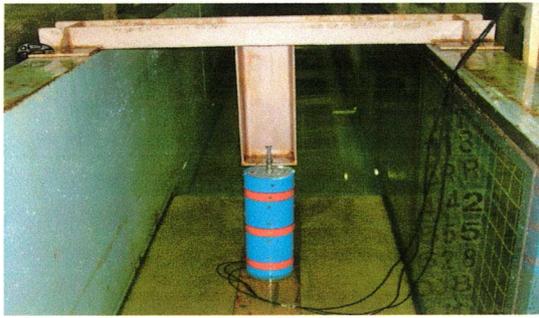


図-11 橋脚模型

(2) 橋桁に作用する波力

図-12に橋桁への波の作用状況を示す。①では、橋桁の右側に前傾した入射波が、左側には後壁からの反射波が位置している。②は、橋桁の直下で入射波と反射波が重複し、橋桁に揚圧力が作用している状況である。その後③では、橋桁は飛散した水塊や飛沫に覆われた状態となる。

図-13は、 $X_0=1.4\text{m}$ の位置に橋桁を設置したときの各部に働く波圧分布を示している。水平方向の波圧では3chが、鉛直方向の波圧では4chが比較的大きな値となっている。この部分は隅角部になるため波力が集中したものと考えられる。

水平方向と鉛直方向の平均波圧はほぼ等しいが、受圧面積の大きい鉛直方向波力のほうが橋桁の安定性に関しては支配的であると考えられる。

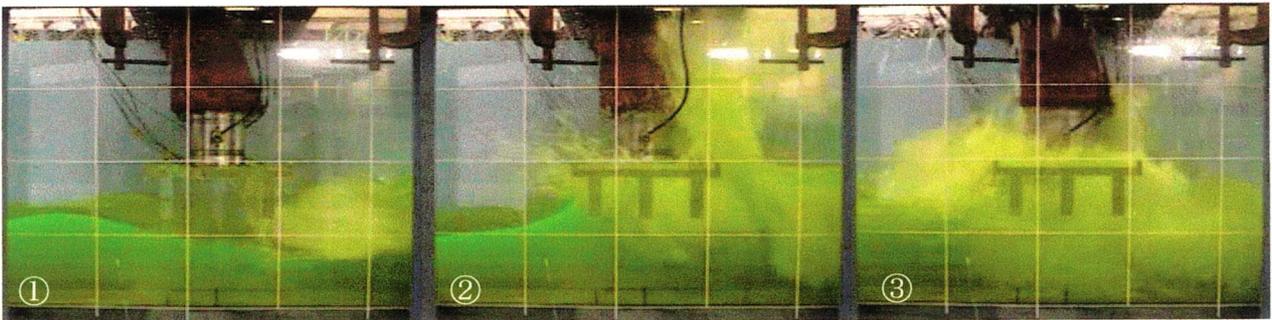


図-12 橋桁に作用する波の状況

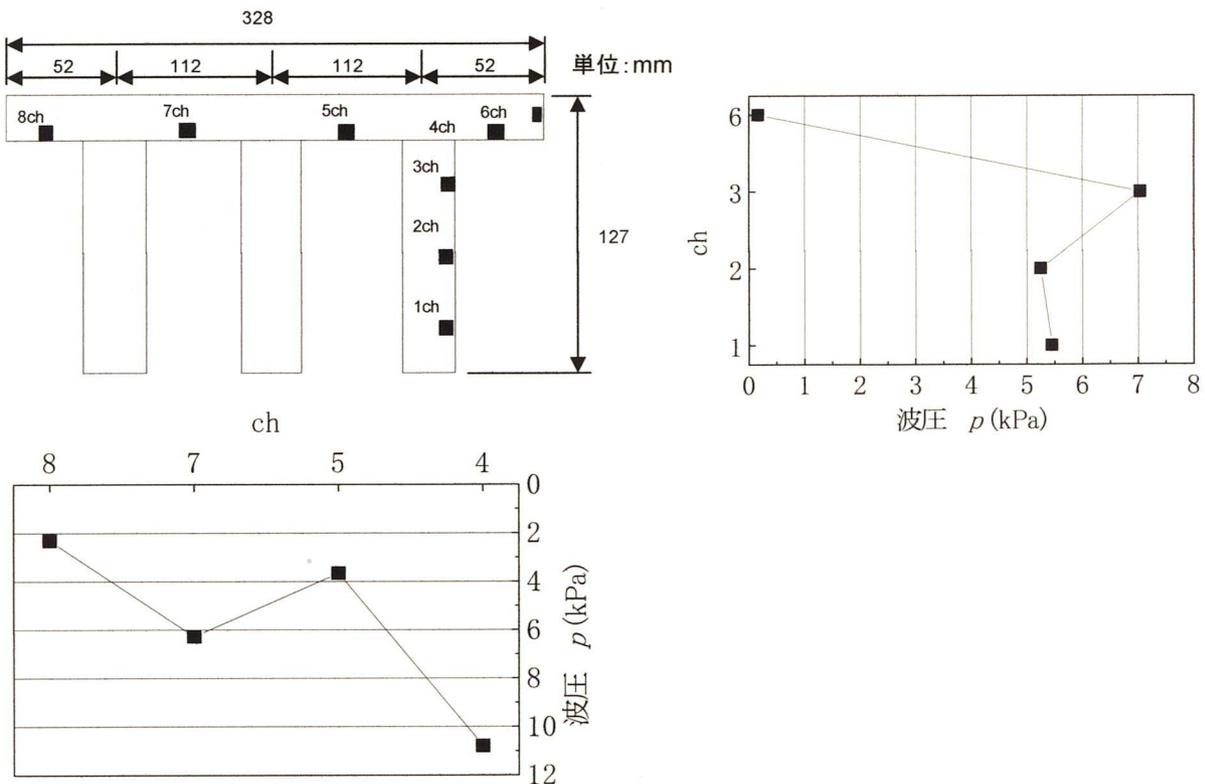


図-13 橋桁に作用する波圧分布

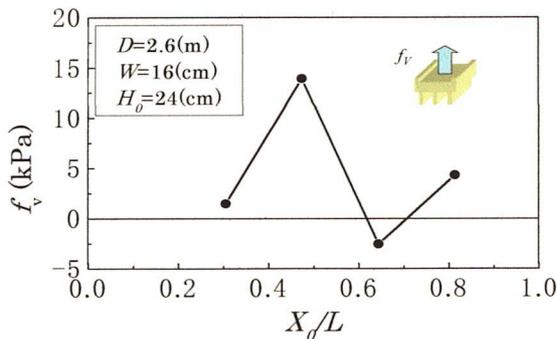


図-14 橋桁位置と鉛直波力の関係

図-14に、橋桁に作用する鉛直波力と X_0/L の関係を示す。なお縦軸は、測定された鉛直波力を投影面積で除した波圧 f_v を表している。 f_v は、重複波の腹に相当する $X_0/L=0.5$ 付近でピークを示した。これはCADMAS-SURFにより計算した打ち上げ高さの空間分布（図-7）で示されたピークの位置とほぼ一致する。また、現地の被災箇所地形条件に $X_0/L=0.5$ に相当しており、落橋に至った要因として重複波による鉛直方向の波力の影響が大きいと考えられる。

(3) 橋脚に作用する水平波力

図-15は $X_0=0.9\text{m}$ における橋脚模型への波の作用状況を示している。このように後壁を遡上した波が戻り流れになって橋脚に作用する場合には冲向きの波力が生じるが、波力の絶対値としては進行波方向の力が卓越する。



図-15 橋脚に作用する波の状況

図-16は、後壁からの距離 X_0 を4種類に変化させた場合の橋脚に働く波圧分布を示している。なお、沖からの進行波が進む方向の力を正とする。 $X_0=1.9\text{m}$ では作用波圧が最も大きくなっている。これは、進行波が砕波となって直接橋脚に衝突するためである。これに対し $X_0=0.9\text{m}$ および $X_0=2.4\text{m}$ では作用波圧が小さい。 $X_0=0.9\text{m}$ では砕波後の流れが作用したためであり、 $X_0=2.4\text{m}$ は波高増大が生ずる前の状態で波が作用したためである。

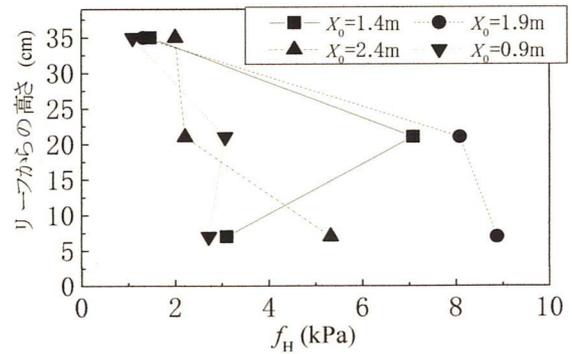


図-16 橋脚に働く水平波力の分布

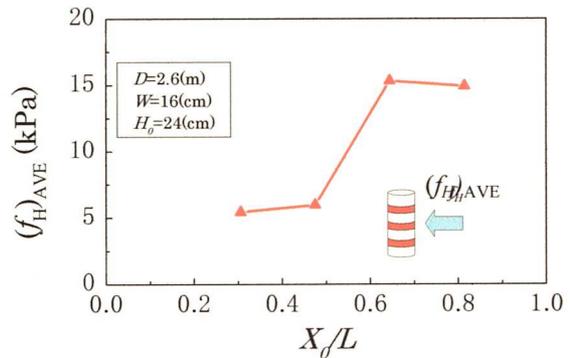


図-17 橋脚位置と水平波力の関係

図-17に、橋脚に働く水平波圧の平均値 $(f_H)_{AVE}$ と X_0/L の関係を示す。 $X_0/L=0.7$ では $(f_H)_{AVE}$ が大きく、 $X_0/L=0.5$ では $(f_H)_{AVE}$ が小さい結果が得られた。CADMAS-SURFによる計算では、これらは節と腹の位置に相当し、重複波の水粒子速度が橋脚に作用する波力に影響を及ぼしたものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) CADMAS-SURF を用いた数値計算により、リーフ上において入射波と崖からの反射波による重複波が発生することを示した。リーフ幅と打ち上げ高さの関係を求め、重複波の腹となる位置で波の打ち上げが顕著となることを明らかにした。
- (2) 橋桁に作用する水平および鉛直波圧の分布を明らかにした。橋桁の位置を変化させたときの鉛直波力の変化特性を検討し、重複波の腹の位置で橋桁に作用する鉛直波力が増大することを示した。
- (3) 橋脚に作用する水平波圧分布を明らかにし

た. 橋脚の位置を変化させたときの水平波圧の変化特性を検討し, 重複波の節の位置で橋脚に作用する水平波圧が増大することを示した.

- (4) 2004 年台風 18 号による高波で被災した大森大橋について, コンクリート製橋桁の被災箇所は, 数値計算や水理模型実験によって明らかになった重複波の腹の位置にほぼ一致することを確認した.

参考文献

- 1) 岡田慎哉, 石川博之, 三田村浩: 台風 0418 号による大森大橋の被災メカニズムおよび応急復旧について, 北海道開発土木研究所月報, pp.52-58, No.626, 2005.
- 2) 本間大輔, 窪内篤, 山本泰司, 畑山朗, 木村克俊: 台風 0418 号による大森大橋の被災メカニズムと応急復旧対策について, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.927-932, 2005.
- 3) 木村克俊, 渡辺元, 山本泰司, 岡田務, 名越隆雄, 三船竜二: リーフ上に建設された海岸橋梁の高波時の安全管理について, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.926-930, 2007.
- 4) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余錫平, 榊山勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣 勤・秋山実, 大山洋二: 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp.321-326, 1999.