

橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性

Characteristics of Horizontal and Vertical Tsunami Force Acting on Bridge Beam

荒木進歩¹・坂下友里²・出口一郎³

Susumu ARAKI, Yuri SAKASHITA and Ichiro DEGUCHI

The horizontal and vertical components of tsunami force acting on a model bridge beam are measured in two-dimensional experiments. The wave pressure acting on the model bridge beam is also measured at the offshore, upper and lower sides of the model bridge beam. A horizontal plate is used as the model bridge beam in order to investigate the basic characteristics of the tsunami force acting on it. The authors show the measured tsunami force and wave pressure, comparing the tsunami force and wave pressure acting on the model bridge with relatively complicated cross section. In the comparison, the authors mention the role of reducing the vertical tsunami force by air under the model bridge beam.

1. はじめに

紀伊半島沿岸域は東南海・南海地震による津波の来襲が予想される地域であるが、山地が海岸付近にまで迫る急峻な地形のため主要国道が海岸沿いを通り、河川の河口付近に橋梁が架けられている場合が多い。このような地域では津波により橋桁が流出することも考えられるが、急峻な地形のため迂回路の確保が困難な地域も多い。そのため、橋桁が流出した場合の影響が大きく、被災地の復興にも支障が生じるため、現状の調査および対策を立てる必要に迫られている。

2004年に発生したスマトラ沖地震津波では、インドネシアやスリランカの沿岸部に架けられた河川橋梁が多数、流出したこともあり、それ以降、河川を遡上する津波による橋桁への作用波力の検討も行われている（例えば、片岡ら，2006；庄司・森，2006；荒木ら，2007，2008）。また、対象は橋桁でなくても、栈橋への作用波力の検討は類似点が多く、重要である（例えば、谷本ら，1978；中村，1985，榎木・後野，1988；下迫ら，2008）。より現実に近い形状の橋桁で検討を行うことは重要であるが、本研究では単純化した橋桁モデルとして水平版を用い、水平版（橋桁模型）に作用する津波波力の基本的特性を検討し、今後の具体的な橋桁形状の検討を行う際の基礎データとすることを目的とした。

2. 水理実験

水理実験は紀伊半島南部に見られる川幅20m程度の小河川を想定し、大阪大学の長さ41.0m，幅0.7mの断面2次元水路で行った。図-1にその概要を示す。水路内には

勾配1/40の固定床（岸側は勾配1/100）が設置されており、水深 $h=17.0\sim 19.0\text{cm}$ となる地点に橋桁模型を配置した。桁下のクリアランスは $h_c=5.0\sim 7.0\text{cm}$ とした。縮尺は1/40～1/50程度を想定した。水路端の造波機により孤立波状の波（橋桁直前での最大水位上昇量 $a=6.4\sim 11.3\text{cm}$ ）を発生させ、橋桁模型に作用する水平および鉛直方向力 F_x および F_z 、および橋桁模型に作用する波圧を測定した。また、橋桁模型の沖側7.9m，2.0m，0.1mの地点において、容量式波高計により水位変動を測定した。

図-2に水平版の橋桁模型の詳細を示す。前述の通り、単純化した矩形の水平版を橋桁模型として測定を行った。橋桁模型に作用する波力は、片持ち梁式の波力計により測定した。また、波圧は図-2に示す橋桁模型の上面、下面および前面の計8ヵ所に取り付けた波圧計（P1～P8）により測定した。データのサンプリング間隔は0.001秒とした。図-3には、模型橋桁周りの諸量を示した模式図、および F_x 、 F_z の向きを示す。写真-1には、水槽内に設置された橋桁模型と片持ち梁式の波力計を示す。

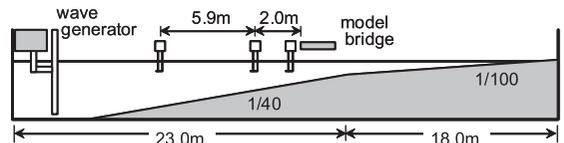


図-1 実験水槽

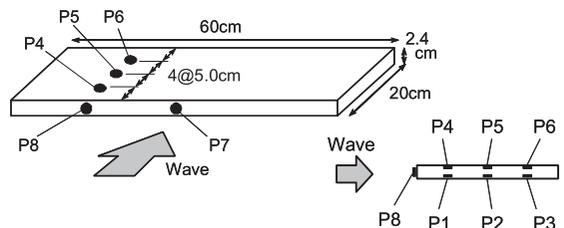


図-2 橋桁模型と波圧測定点

1 正会員 博(工) 大阪大学 准教授 大学院工学研究科
2 正会員 工博 大阪大学 大学院工学研究科
3 正会員 工博 大阪大学 教授 大学院工学研究科

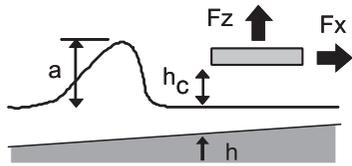


図-3 橋桁付近の模式図

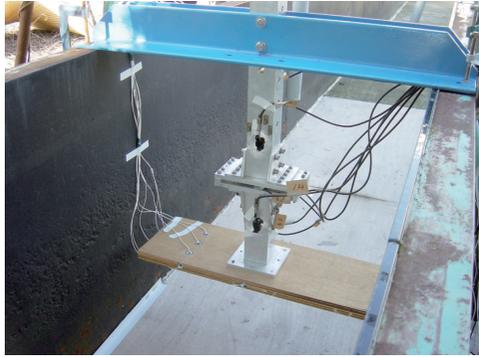


写真-1 橋桁模型と波力計

$a=8.9\text{cm}$, 桁下高さ $h_c=5\text{cm}$ のケースで測定された水平および鉛直方向波力, 橋桁下面の波圧計 P1~P3 および橋桁上面の波圧計 P4~P6 で測定された波圧 p の時系列を示す。橋桁下面では, 沖側から順 (P1, P2, P3 の順) に衝撃的な波圧が作用しており, それぞれのピーク値を比べると沖側の P1 より岸側の P3 のほうが大きくなっている。橋桁下面の波圧は鉛直上向きの力に相当するが, 鉛直波力 F_z を見ると, 橋桁沖側下面に波圧が作用し続けるにつれて大きくなり, 橋桁岸側下面に波圧が作用する頃に最大値をとる。一方, 橋桁上面では, 橋桁下面岸側の波圧 P3 の立ち上がり (衝撃的なピーク) から約 0.1 秒遅れて, 沖側から順 (P4, P5, P6 の順) に波圧が作用している。橋桁上面の波圧には, 橋桁下面の波圧に見られるような鋭いピークは見られない。橋桁上面の波圧は橋桁を鉛直下向きに押さえる力に相当するため, 鉛直方向波力 F_z の時系列に見られる負の鉛直方向力を発生させる要因となっている。なお, 水平方向波力 F_x は鉛直方向波力 F_z よりも小さいが, これは受圧面積の違いによるものであり, 波圧の大きさは同程度である。

3. 実験結果

(1) 測定結果の時系列

測定結果の代表例として, 図-4 に最大水位上昇量

図-5 に, 最大水位上昇量 $a=10.2\text{cm}$, 桁下高さ $h_c=7\text{cm}$ のケースで測定された水平および鉛直方向波力, 橋桁下面の波圧計 P1~P3 および橋桁上面の波圧計 P4~P6 で測定された波圧 p の時系列を示す。橋桁上面および下面の波

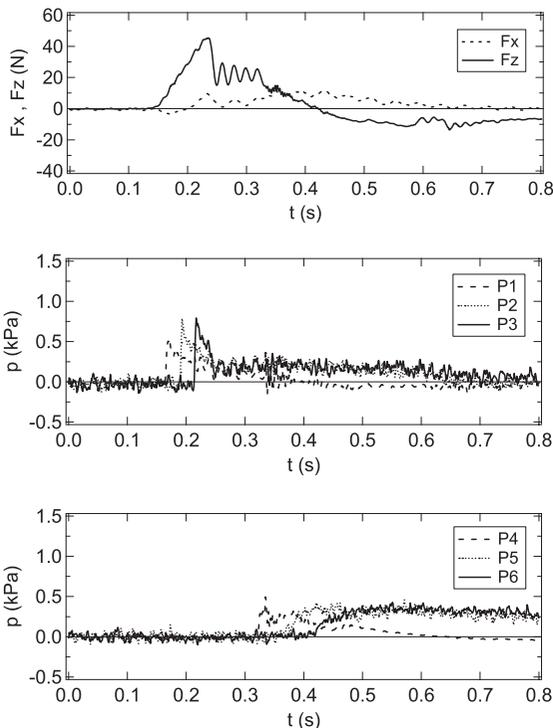


図-4 波力および波圧の時系列 ($a = 8.9\text{cm}$, $h_c = 5.0\text{cm}$)

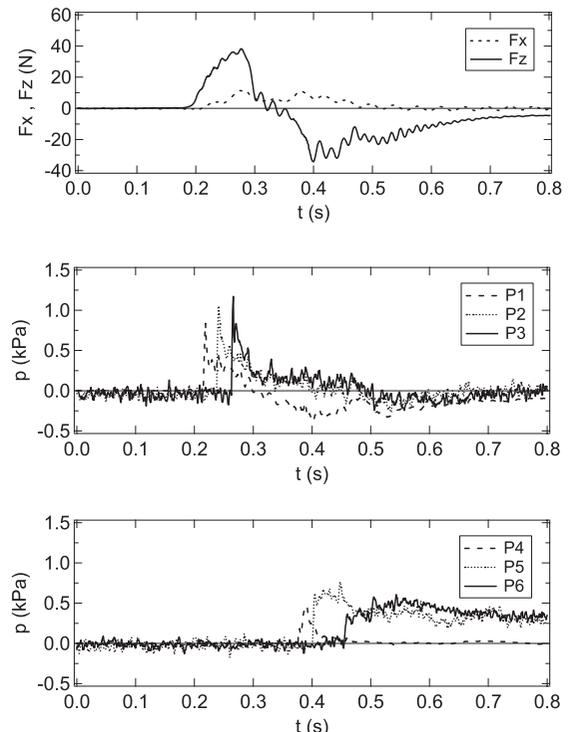


図-5 波力および波圧の時系列 ($a = 10.2\text{cm}$, $h_c = 7.0\text{cm}$)

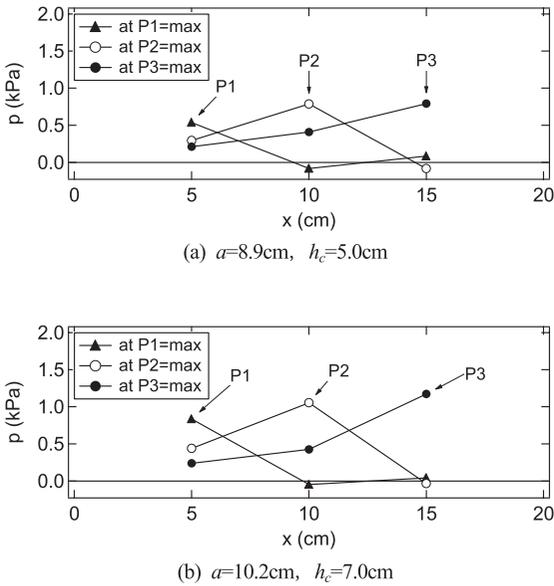


図-6 橋桁下面の同時波圧分布

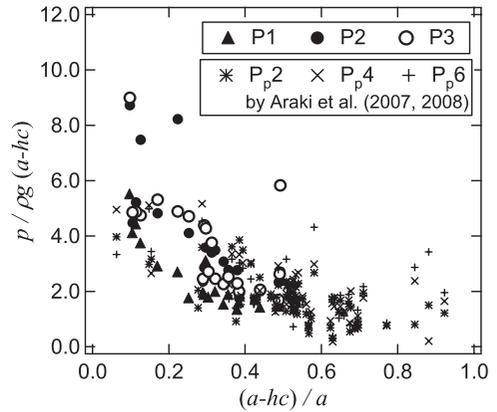


図-7 橋桁下面に作用する波圧

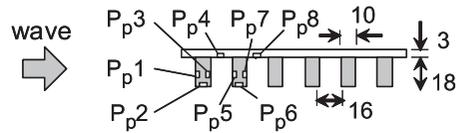


図-8 既往の研究で用いた橋桁模型 (単位; mm)

圧, また水平および鉛直方向波力の特徴は図-4のケースとほぼ同様であるが, 橋桁下面に作用する波圧の継続時間がやや短い. 同様に, 鉛直方向波力 F_z のピーク値に続く準静的な波力の継続時間も短い. これは水位上昇量と桁下高さの違いが影響していると考えられる. また, 鉛直下向きの波力 (負の値) が大きくなっている.

(2) 橋桁下面の同時波圧分布

図-6に, 波圧P1, P2およびP3がそれぞれピークとなる瞬間に, 橋桁下面に作用している波圧の分布を示す. 横軸は橋桁の沖側端を原点とする岸向き座標 x である. 図-6 (a) は図-4に示したケース, 図-6 (b) は図-5に示したケースである. どちらのケースにおいても沖側から順にピークとなり, 各波圧測定点でピーク値が計測された後は波圧が低下し, 最も岸側の波圧P3がピークとなる瞬間においては, 波圧の大きさはP3, P2, P1の順に小さくなっている.

(3) 橋桁下面および沖側端に作用する波圧

図-7に, 橋桁下面に作用する波圧P1, P2およびP3のピーク値と, 橋桁上の最大水位の関係を示す. 各波圧は橋桁上の水位によって橋桁に作用する静水圧 $\rho g(a-h_c)$ で無次元化し (ρ : 水の密度, g : 重力加速度), 橋桁上の最大水位 $a-h_c$ は a で無次元化している. これらの橋桁下面に作用する波圧は鉛直上向きの力に相当する. 図中には, 著者ら (荒木ら, 2007; 荒木ら, 2008) の既往の実験結果も併せて図示している. 既往の実験では, 図-8に示すように橋桁断面および波圧計の設置状況が異なっており, ここでは橋桁下面に位置する波圧 P_{p2} , P_{p4} および

P_{p6} を図示している. 橋桁下面に作用する波圧は, 無次元の橋桁上水位が小さくなるほど大きい. これは, 波の峰付近が橋桁に作用した場合に大きな波圧が生じることを意味しており, 既往の実験結果と共通の傾向である. また, 既往の実験における波圧 P_{p4} は, 橋桁断面の形状から空気塊によるクッション効果も期待されるが, 水平版として測定を行った今回の波圧実験結果と有意な差は見られない. 空気塊によるクッション効果は空気室の高さが高いほど大きいことから, 既往の実験結果においては波高に比べて空気室の高さが小さかったのではないかと考えられる.

図-9には, 橋桁沖側端に作用する波圧としてP7とP8のピーク値の平均と橋桁上の最大水位の関係を示す. 橋桁沖側端に作用する波圧は水平方向岸向きの力に相当する. 両軸の無次元化は図-7と同じであり, 同様に既往の実験結果を併せて図示している. 橋桁下面の沖側端に作用する波圧にはばらつきは大きいものの, 全体的には無次元の橋桁上水位が小さくなるほど大きくなっている. 今回の実験結果は, 既往の実験結果と比べると小さい波圧が多いが, 既往の実験結果においても今回と同程度の大きさの波圧も計測されていること, また, 横軸が0.2前後の条件においては今回の実験でも大きな波圧が計測されていることなどから, 砕波点近傍であるか否かなどによる波面の角度の違い等に起因するばらつきの範囲内と考えられる.

片岡ら (2006) は, 橋桁模型に作用する水平方向波力

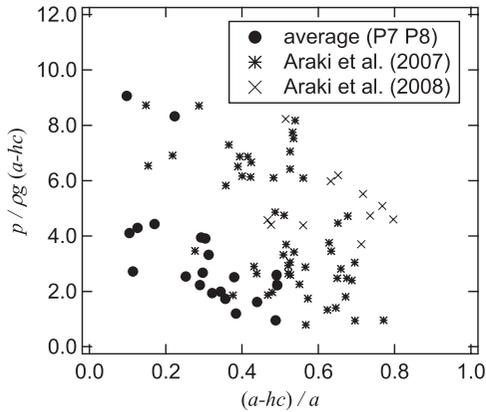


図-9 橋桁沖側端に作用する波圧

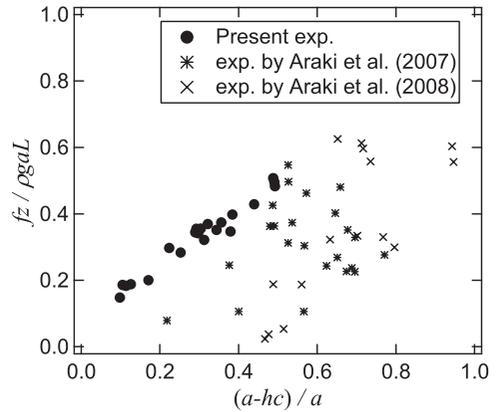


図-11 鉛直方向波力の特性

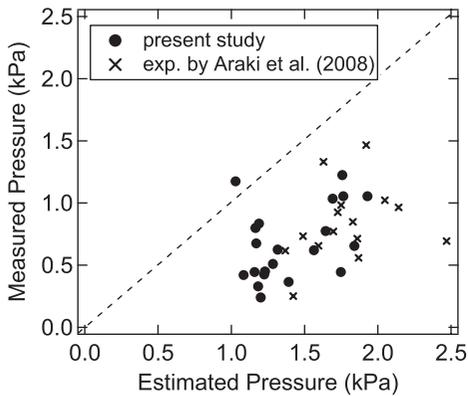


図-10 橋桁沖側端に作用する波圧の準静的成分

の準静的な成分に対して、合田式の長周期側の極限をとった式による算定値との比較を行っている。それによると、算定値は実験値の上限を与え、安全側の評価ができるとしている。本研究においても、橋桁沖側端で測定された波圧の準静的な成分に対して同様の検討を行った。算定方法は(社)日本港湾協会(2007)の通りで、入射津波の高さとしては、実験において橋桁模型の沖側10cmの地点で測定された津波高さをを用いた。ただし、津波高さの2倍が津波波高に等しいと仮定して算定した。図-10にその結果を示す。横軸は橋桁沖側端での波圧算定値、縦軸は橋桁沖側端で測定された波圧の準静的成分の値である。片岡ら(2006)の水平方向波力に対する検討と同様に、本実験条件の範囲内においては、ほぼ全てのケースにおいて算定値は実験値を安全側に見積もった。

(4) 鉛直方向波力

図-11に、単位幅当たりの鉛直上向きの波力のピーク値 f_z と、橋桁上の最大水位の関係を示す。鉛直方向波力 f_z は最大水位上昇量 a 、橋桁模型の幅 $L (=20.0\text{cm})$ 、 ρ 、 g

により無次元化している。図中には、既往の実験結果も併せて示している。鉛直方向波力のピーク値 f_z は、無次元の橋桁上水位が大きくなるほど大きい。既往の実験結果と比較すると、今回の実験結果は全体のほぼ上限に位置している。鉛直上向きの力に相当する波圧は図-7に示したように、今回の実験結果と既往の実験結果に有意な差は見られなかった。中村(1985)は、波高に対して空気室の高さが小さい場合、空気塊によるクッション効果は波圧に対しては小さく、波力に対してはやや大きい結果を示している。このことから、空気塊によるクッション効果がわずかながら現れたとも考えられる。

(5) 橋桁上面の波圧

図-12に、橋桁上面に作用する波圧 P_4 、 P_5 および P_6 の最大値と、橋桁上の最大水位の関係を示す。各波圧は橋桁上の水位によって橋桁に作用する静水圧 $\rho g(a-h_c)$ で無次元化し、橋桁上の最大水位 $a-h_c$ は a で無次元化している。これらの波圧は鉛直下向きの力に相当する。

橋桁上面の波圧は、無次元の橋桁上水位が小さくなるほど大きくなる傾向も見られるが、全体的にはばらつきは大きい。また、多くのケースにおいて縦軸の無次元波圧の値が1より大きい、すなわち静水圧より大きい。鉛直方向波力 F_z の時系列には鉛直下向きに作用する波力も見られ、前述の通り、橋桁上面に作用する波圧が影響を及ぼしていると考えられるが、このうち橋桁上面に作用する波圧は、多くのケースにおいて静水圧よりも大きな圧力で橋桁を押さえつけていることが分かる。橋桁を鉛直下向きに押さえつける力は、橋桁の流出を抑制する作用があるが、図-4および図-5の波力時系列に示されているように鉛直上向きおよび岸向きの波力が作用した後に発生しているので、直接、橋桁の流出抑制に効果を発揮することはない。

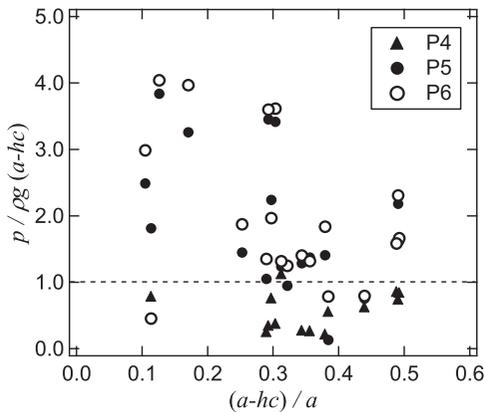


図-12 橋桁上面に作用する波圧

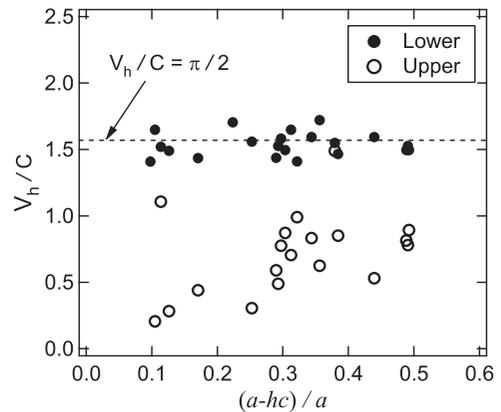


図-13 橋桁上・下面での波面の移動速度

(6) 橋桁付近での波面の移動速度

橋桁の上下面の各点で測定された波圧から、橋桁付近での波面の移動速度を算定した。波圧の各測定点での時系列において、波圧ゼロの状態からピークへと立ち上がる時刻の差と、各波圧測定点の距離から算定した。図-13に算定結果を示す。縦軸は算定された波面の移動速度 V_h を橋桁設置位置での長波の波速 C により無次元化している。横軸は橋桁上の最大水位の無次元量で、LowerおよびUpperはそれぞれ橋桁下面および上面の波圧データから算出した波面の移動速度である。

橋桁下面に作用する波圧P1, P2およびP3から求めた波面の移動速度は長波の波速のほぼ $\pi/2$ 倍になっている。これは谷本ら(1978)の結果と一致している。一方、橋桁上面に作用する波圧P4, P5およびP6から求められた波面の移動速度にはばらつきがあるが、全体的には橋桁上の最大水位が大きくなるほど大きい傾向が見られる。橋桁上面に作用する波圧の時系列では、波圧ゼロの状態からピークへの立ち上がりが明瞭でないことから算定誤差も大きいと考えられるが、橋桁上の最大水位が小さい(横軸の値が小さい)ときは波の峰付近が橋桁に作用することになり、橋桁沖側端で乱された状態での水塊の移動となっていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、単純化した橋桁模型を用いて作用波力および圧力を測定した。比較的、複雑な底面形状を持つ橋桁模型に作用する波力および波圧を測定した既往の結果との比較を行いながら、波力および波圧の特性を調べた。

橋桁下面の空気塊による鉛直方向波力のクッション効果については、既往の研究との比較では明瞭には現れなかった。これは既往の研究で用いた橋桁模型の空気室の高さが小さかったためと思われる。今後は、本研究で得られた結果を、より現実的で複雑な形状の橋桁への作用波力の検討に生かしていく所存である。

参考文献

- 荒木進歩・中嶋 悠・田中邦彦・出口一郎・伊藤禎和(2007): 橋桁に作用する津波流体力に関する実験的研究, 土木学会全国大会第62回年次学術講演会講演概要, pp. 535-536.
- 荒木進歩・中嶋 悠・出口一郎・伊藤禎和(2008): 河口付近の橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 866-870.
- 片岡正次郎・日下部毅明・長屋和弘(2006): 津波衝突時に橋桁に作用する波力, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 154-157.
- 榎木 亨・後野正雄(1988): 栈橋床版に作用する揚圧力の水理模型実験における相似則に関する一考察, 海岸工学論文集, 第35巻, pp. 677-681.
- 下迫健一郎・G. Cuomo・高橋重雄(2008): 臨港道路栈橋部に作用する揚圧力とそれに及ぼす空気塊の影響, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 861-865.
- 社団法人 日本港湾協会編(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 237-238.
- 庄司 学・森 洋一郎(2006): 桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 801-805.
- 谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和(1978): 水平版に働く揚圧力に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 17, No. 2, pp. 3-47.
- 中村孝幸(1985): エアークッション効果を利用した栈橋揚圧力の減勢法とそのモデル則に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 599-603.