

栈橋構造物に作用する多方向不規則波の揚圧力とその対策

小松原 徹*・堤 洋一**・池谷 毅***・南 誠信****

1. 結 論

岸壁の前面に建設される栈橋（横栈橋）においては、岸壁前面に形成された重複波が、栈橋上部工（床版や横桁）に作用する際に発生する揚圧力が問題となることがある。標準的な栈橋構造について、揚圧力の発生機構や圧力の推定法について、谷本ら（1978）や榎木・後野（1987）の研究がなされ、揚圧力の発生原因として、水塊が床版に接触する際の運動量変化（Wagner型）や、封じ込まれた空気の圧縮（Bagnold型）が知られている。しかしながら、中村ら（1991）によれば、一般的な構造形態に対し、揚圧力を精度良く算定するための実用的な式はなく、なるべく床版に強大な揚圧力が作用しないように配慮し、その上で、どうしても揚圧力を考慮しなくてはならない場合には、水理実験により詳細な外力を把握することを推奨している。

本論文で対象とする栈橋構造物は、円筒形の海上立坑に近接して建設される一辺約50mの四角形をした沖合い大型栈橋である。また、その機能上の制約から、床版を波の作用が及ばない高さとすることはできない。

したがって、本構造物に作用する揚圧力を従来の知見だけから正確に評価することは困難である。そこで、本論文では、円筒周辺に設置された栈橋構造物に作用する揚圧力を水理模型実験を通して明らかにし、考察を加えるものである。特に、構造物に要求される機能を満足し、揚圧力を最小とする構造物配置、揚圧力の特性、揚圧力を低減させるための構造上の工夫について論ずる。

2. 実験条件

(1) 海上立坑と栈橋構造物

図-1に検討の対象とした構造系を示す。海上立坑は、直径16.5mの円筒である。栈橋は、円筒に近接して建設され、50m×47.5mの長方形である。栈橋床版は、約7m間隔の桁で支持され、さらに多数の杭により海底面に固定されている。模型では、杭による波の変形の影響は

小さいとして、これを再現していない。

(2) 相似則と模型縮尺

榎木・後野（1988）によれば、揚圧力の実験における相似則としては、Wagner型の揚圧力が発生する場合にはフルード相似則を、空気の圧縮性が介在するBagnold型の場合には、バクノルド相似則を採用することが望ましいとしている。今回の実験では、床版桁の間隔が7mと大きく波頂部が容易に構造物と接触すること等から、縮尺1/25のフルードの相似則を用いた。

(3) 波浪条件

水深は、潮汐、高潮の影響を考慮して、18.1mと設定した。波浪条件は、波浪推算結果から、有義波高3.5m、有義周期5.7sを想定した。実験では、規則波、一方不規則波、多方向不規則波を用いた。本論文では、主として多方向不規則波に対する結果を示す。不規則波のパワースペクトルには、プレットシュナイダー・光易型を、また、方向関数には、光易型を用いた。方向集中度パラメータ S_{max} は、25とした。また、波向きについては安全を考え、栈橋の長手方向とのなす角0度、22.5度、45.0度の3方向（SE, SSE, Sと呼ぶ）とした。

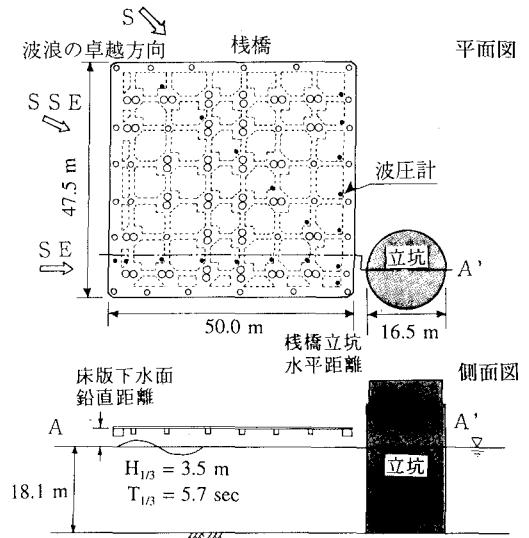


図-1 構造物の概要

* 正会員 工修 東京ガス株式会社 生産技術部
 ** 正会員 東京ガス株式会社 生産技術部
 *** 正会員 工博 鹿島 技術研究所
 **** 正会員 工修 鹿島 建設総事業本部

(4) 実験ケースと目的

主要な実験ケースは以下の通りである。

a) 波高分布計測

波高分布計測では、円筒前面海域の波高分布、波頂高さの特徴を知ることが目的とした。

b) 揚圧力全体分布計測

揚圧力の全体分布計測では、栈橋に作用する揚圧力が栈橋全体でどのように分布するかを知ることが目的とした。立坑と栈橋との水平距離、栈橋と静水面との鉛直距離を変化させて、揚圧力分布に与える影響を調べた。全体分布計測の揚圧力計測点を、図-1に示す。各リブブロック（桁で囲まれた床版の部分（榎木・後野，1987））内での揚圧力計測位置は、水が激しく床版に当たると思われる最も立坑寄りの位置とした。

c) 揚圧力詳細分布計測

全体分布計測で揚圧力が大きかったリブブロック内における揚圧力の分布を調べることを目的とした。

d) ハンチ効果確認計測

桁と床版の接合部にハンチを設けた場合の、揚圧力の低減効果の確認を目的とした。

3. 実験方法

(1) 実験装置

実験には、鹿島技術研究所海洋水理実験場大型平面水槽（幅20m、長さ58m、深さ1.6m）を用いた（図-2参照）。造波には、平面水槽の一端に設置されているリンク型ピストン式のパネルセグメント型造波装置を用いた。多方向不規則波の造波信号の作成にあたっては、広い有効造波領域を造り出すことができるように側壁からの反射波を考慮した方法（今井ら，1990）を用いた。

(2) 計測装置

波高の計測には、容量式波高計を用いた。波圧の計測には、三計エンジニアリング社製完全防水型半導体式圧

力計P310型を用いている。応答周波数はカタログ性能で3.4kHzである。

実験での、データ収集周波数は、揚圧力の全体分布計測で100Hz、詳細分布計測で500Hzとした。データ収集時間は、規則波の場合50秒、不規則波の場合8分間とした。ただし、揚圧力の詳細分布計測の場合には、大きな揚圧力の発生する時間帯をデータ収集の対象とした。

4. 実験結果・考察

(1) 波高・波頂高分布

波高を計測した領域（実験水槽内で3.25m×4.0mの範囲）において、立坑模型を設置しない状態で、入射波検定を行った。模型設置位置における有義波高は、目標値と良く一致した。また、波高計測領域内の有義波高の変動についても、規則波の場合は最大10%とやや大きい

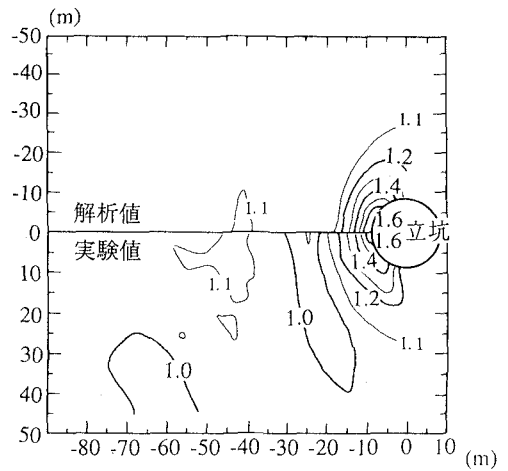


図-3 多方向不規則波に対する円筒前面の波高分布 (上：解析値，下：実験値)

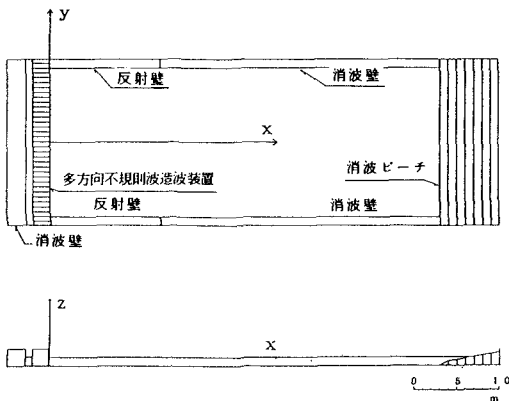


図-2 実験水槽の概要

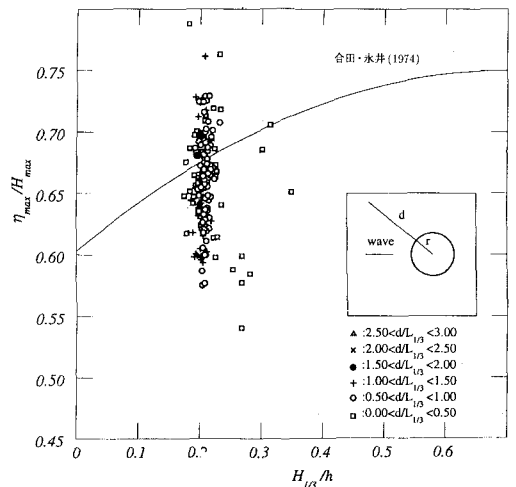


図-4 有義波高と最大波頂高さとの関係

場合もあるが、不規則波の場合は、変動は数%以下であり一様性は良好であった。

立坑を設置した状態で、現地換算 6 m から 12 m 間隔で、総計 181 点の計測点で水面変動を計測した。波高分布の一例として、多方向不規則波に対する有義波高分布を入射有義波高に対する倍率として、図-3 の下半面に示す。同図上半面には、円筒回りの線形回折波理論解を方向スペクトルに応じて重ね合わせて算定した（池谷ら、1993）有義波高分布をあわせて示す。

これを見ると、多方向不規則波に対する立坑前面の波高分布は、円筒の直前面領域と円筒中心から 40 m 程度の領域で入射有義波高の 1.1 倍以上となる。規則波に対しては、波高の大きい領域と小さい領域が広範囲にわたり、繰り返して存在するが、不規則波の場合はこれとは大きく異なる。線形理論解と実測値を比較すると、波高分布のパターンは概ね一致するものの、定量的には、実験結果の方が理論解に比べて波高の変動がやや大きくなっていることがわかる。

有義波高 $H_{1/3}$ と最大波頂高 η_{max} との関係を図-4 に示す。同図の横軸は有義波高水深比 $H_{1/3}/h$ 、縦軸は最大波頂高最大波高比 η_{max}/H_{max} を表す。最大波頂高は確率量であるためかなりばらつくが、最大波頂高は概ね最大波高の 0.6 倍から 0.7 倍で評価できることがわかる。これらの値は、図中に実線で示した合田・永井（1974）の実測値と、ばらつきは大きいが似た数値となる。

なお、円筒の前面の波は、円筒直前面では、重複波状の波であるが、円筒から少し離れると進行波状の波であることが観察された。

(2) 揚圧力の全体分布

計測された、揚圧力の一例として、多方向不規則波に対する平均最大揚圧力値の分布を図-5 から図-7 に示す。平均最大揚圧力は、揚圧力の最大値を複数回（全体分布計測では 3 回）の計測に対して平均した値である。図-5 に示す、立坑と栈橋の離れ 2.75 m、床版下静水面距離 3.6 m の場合、立坑前面側の大波高領域で、非常に大きな揚圧力を示す。図-6 に示す、立坑栈橋離れを 10

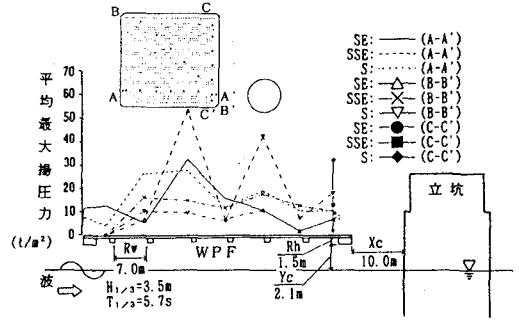


図-6 揚圧力の全体分布
(立坑栈橋離れ 10.0 m, 床版下静水面距離 3.6 m)

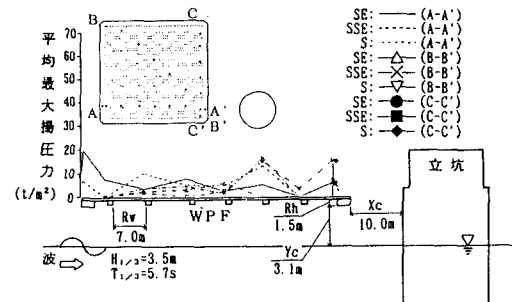


図-7 揚圧力の全体分布
(立坑栈橋離れ 10.0 m, 床版下静水面距離 4.6 m)

m とした場合、立坑側の大波高領域での極端に大きな揚圧力は発生しなかったが、全体に揚圧力の値が大きい。図-7 に示す、立坑栈橋離れ 10 m、床版下静水面距離 4.6 m の場合には、揚圧力の値は、前のケースに比べて全体的に小さくなる。すなわち、波高の大きい場所に床版を設置することをできるだけ避け、また栈橋を機能上許されるまで高い位置に設置することが揚圧力を低減させる上で重要であることが確認された。

(3) 揚圧力の詳細分布

全体分布計測の結果、最も揚圧力が大きくなった立坑近隣の一つのリップブロック内における揚圧力の詳細分布の計測例を図-8 に示す。図-8 には、15 回の計測に対する平均最大揚圧力が示されている。これを見ると、平均最大揚圧力は桁近傍で大きな値をとるが、桁から離れるにしたがって小さくなる傾向があることがわかる。

これは、床版に作用する水塊の観察より、波頂部がリップ側面に当り、これにより水塊は上方に跳ね上がり、これが床版に当たり向きを変え側方に広がったためと考えられる。上述の最大揚圧力分布の特徴は、こうした水の運動に起因するものと理解される。

また、図-9 に計測された最大揚圧力の 15 回の計測に対する頻度分布を示す。これより、各計測回の最大揚圧

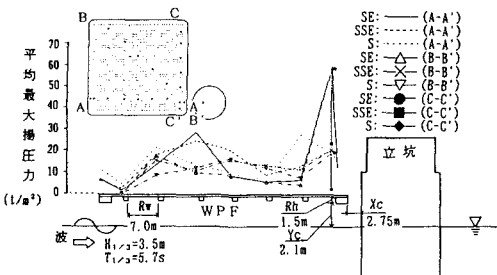


図-5 揚圧力の全体分布
(立坑栈橋離れ 2.75 m, 床版下静水面距離 3.6 m)

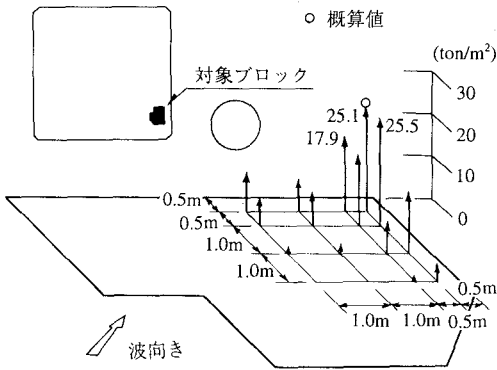


図-8 リブブロック内の最大揚圧力の詳細分布 (立坑棧橋離れ10.0m, 床版下静水面距離4.6m)

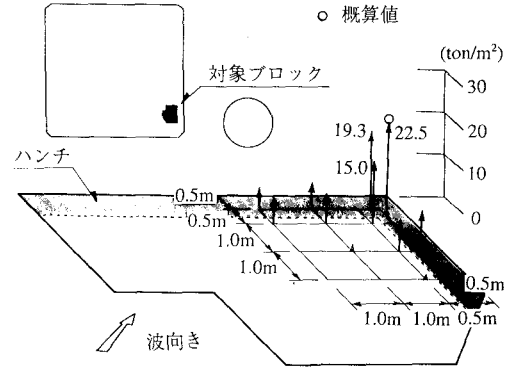


図-10 ハンチを設けた場合のリブブロック内の最大揚圧力の詳細分布 (立坑棧橋離れ10.0m, 床版下静水面距離4.6m, 多方向不規則波)

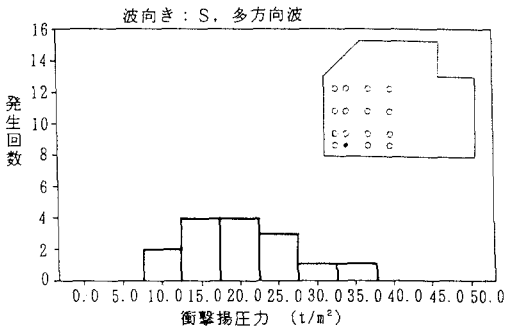


図-9 揚圧力の頻度分布 (立坑棧橋離れ10.0m, 床版下静水面距離4.6m)

力は計測回毎にかなりばらついていることがわかる。

(4) 揚圧力低減のための構造

一つのリブブロック内の揚圧力の分布を調べた結果、波頂高さ付近に設置された床版に関しては、桁沿いの限られた場所で、大きな揚圧力が作用することがわかった。

そこで、桁沿いに上昇した水塊が床版に沿って周囲にひろがりやすくして、揚圧力を低減させることを期待して、桁と床版との接合部に、ハンチを取り付けることを考えた。ハンチは、床版の剪断耐力を増加させるので、構造上も都合がよい。

図-10に勾配1:1.25, 深さ0.3mのハンチを設けた場合の、15回の計測に対する平均最大揚圧力分布を示す。図-10とハンチを設けない場合の揚圧力分布図-8を比較することにより、1割程度ではあるが、揚圧力が低減されていることがわかる。

5. 揚圧力の概算モデル

水理実験で得られた円筒周辺に設置された設置高さの大きい桁上の棧橋床版に作用する揚圧力に関する知見を反映させ、揚圧力の概算をするためのモデル化を試みる。

はじめに、棧橋設置海域の波の多方向不規則波に対する最高波頂高さを求める。ここでは、実験結果を基に、線形重ね合わせにより、円筒の周辺の有義波高分布を求める。次に、これをわが国の混成防波堤の設計で使われる様に、1.8倍して最高波高とし、さらに非線形性を考え最高波高の0.7倍を最高波頂高さとする。

図-11(a)に示すように、最高波頂高さを持った波が波速cで桁に接近する状態を考える。波速cは有義周期と水深から分散関係方程式により求める。

次に、桁の側面に衝突した水塊が上昇する過程を考える。簡単のため、二次元性を仮定する。図-11(b)に示すように、壁に衝突する流れの、衝突前後の質量とエネルギーの保存を考える。

$$\rho v_1 h_1 = \rho v_2 h_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + z_1 \dots\dots\dots (2)$$

もちろん、水塊の上昇現象はかなり非定常性の強いものであるが、ここでは、簡単のため定常状態で考えた。

ここで、桁の下端から上の波頂部の水塊が桁に衝突し、桁に沿い上昇すると考え、水塊厚さ h_1 は $h_1 = \eta_{max} - z_0$ と

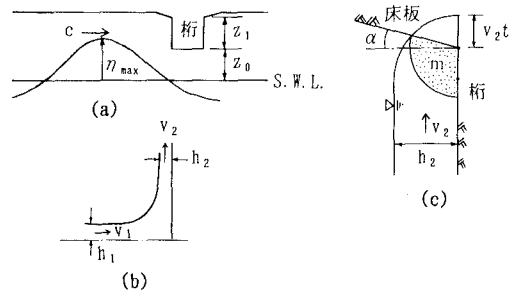


図-11 桁によりはね上げられた水塊の床版への衝突の模式図

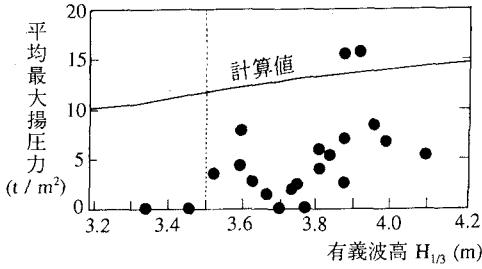


図-12 揚圧力の実測値と計算値との比較
(立坑栈橋離れ 10.0 m, 床版下静水面距離 4.6 mm)

する。また、接近流速 v_1 は、波速 c に等しいと仮定する。
式(1)及び(2)と上記の仮定より、上昇水の速度と厚さは以下の式で与えられる。

$$v_2 = \sqrt{c^2 - 2g(z_0 + z_1 - \eta_{\max})} \dots\dots\dots (3)$$

$$h_2 = \frac{c(\eta_{\max} - z_0)}{v_2} \dots\dots\dots (4)$$

最後に、床版に作用する揚圧力を推定する。図-11(c)に示されるように、速度 v_2 、厚さ h_2 の水塊が角度 α 傾斜した床版ハンチ部に衝突する場合を考える。ここで、水塊の先端は、図-11(c)に示すように1/4円を考える。

このとき、上昇する水塊は床版にあたるとハンチと直角方向の運動量を失うと考える。運動量保存則

$$F = \frac{d}{dt}(mv) \dots\dots\dots (5)$$

より、床版に作用する力を概算することができる。ここに、 m は付加質量、 v はハンチと直角方向の水の速度である。水塊が、一定速度で上昇するとすれば、

$$v = v_2 \cos \alpha \dots\dots\dots (6)$$

となる。

付加質量 m は、図-11(c)に示すように、床版と桁との接合点を中心に、水塊が変形しないときの水塊と床版との接触長さを半径とする円内の水が付加質量となると仮定すると幾何学的な関係から、次式を得る。

$$m = \rho \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) \{ h_3 - (h_2 - v_2 t) \sin \alpha \}^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$h_3 = \sqrt{h_2^2 - (h_2 - v_2 t)^2 \cos^2 \alpha} \dots\dots\dots (8)$$

床版に作用する力は、式(5)、(6)、(7)より、

$$F = \rho \left(\frac{\pi}{2} + \alpha \right) v_2^2 \cos \alpha \{ h_3 - (h_2 - v_2 t) \sin \alpha \} \cdot \left\{ \frac{h_2^2 - v_2 t}{h_3} \cos^2 \alpha + \sin \alpha \right\} \dots\dots\dots (9)$$

いま、簡単な場合として、 $\alpha=0$ の場合を考えれば、 $t=0$ のときに最大の力が作用することとなる。いま、実験結

果と比較するために、最大作用力を上昇水塊の厚さ h_2 で割り圧力とし、実験値と比較した。結果を図-12に示す。図中の実験値は、全体計測で得られた3回の計測に対する平均最大揚圧力であるため、ばらつきはかなり大きい。上記の通り計算方法は簡便なものであり、改善の余地を多く残すものであるが、実測値の概略の傾向を示しており、揚圧力のオーダーを知ることができる。

6. 結 論

円筒構造物に隣接して建設される沖合い栈橋構造物に働く揚圧力に関して、多方向不規則波を用いた水理模型実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 円筒構造物前面の有義波高分布は、その概略を線形理論の重ね合わせで表現できる。また、最高波頂高さは最大波高の0.6倍から0.7倍となった。
- 2) 栈橋構造物に作用する揚圧力は、波高の大きい場所ほど大きくなる。よって、栈橋の設置位置を波高の小さい場所とすることが重要である。
- 3) 最大波頂高さ付近に床版を設置した場合、揚圧力の発生機構は、桁に当たった水塊が上昇し、これが床版に衝突して、揚圧力を発生する。
- 4) 一つのリップブロック内において、揚圧力の大きな領域は、桁に沿った領域となる。
- 5) 桁と床版の接合部にハンチを取り付けると、揚圧力を低減させることができる。
- 6) 円筒周辺の最大波頂高さ付近に置かれた栈橋に作用する揚圧力を概算する方法を示した。

謝辞：本研究を実施する途上において、埼玉大学工学部谷本勝利教授より、貴重な御助言を賜りました。ここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

池谷 毅・岩瀬浩二・南 誠信 (1993): 多方向不規則波浪場における大口径円筒周辺の波高分布について、第48回土木学会年講, II, pp. 876-877.
 今井賢爾・池谷 毅・岩瀬浩二 (1990): パネルセグメント型造波装置の造波特性、鹿島技術研究所年報, 第38号, pp. 147-154.
 合田良実・永井康平 (1974): 波浪の統計性質に関する調査・解析、港研報告, Vol. 13, No. 1 pp. 3-37.
 榎木 亨・後野正雄 (1987): 栈橋床版に作用する揚圧力特性に及ぼす空気層の効果に関する研究、土木学会論文集第381号, II-7, pp. 141-149.
 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、第35回海岸工学講演会論文集, pp. 677-681.
 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、第25回海講論文集, pp. 352-356.
 中村孝幸・榎木 亨・後野正雄・青木伸一 (1991): 海域利用構造物, 第7章, 波と漂砂と構造物 (技報堂), pp. 332-340.