

斜板消波潜堤 (SURF) の揚圧力低減工法

佐藤明美*・上野成三**・斉藤栄一***
宇多高明****・小俣 篤*****

1. はじめに

消波性能に優れ、かつ景観を損なわない海域制御構造物として、筆者らは斜板消波潜堤 (SURF) を提案してきた。重力式の潜堤である SURF にとって、耐波安定上問題になるのは滑動であるが、潜堤のように堤体高の低い構造物は単位堤体幅当りの重量が小さいために、堤体幅を広くとっても滑動安定性は顕著に向上しない。そこで、小山ら (1988) は SURF の滑動安定性を高めるため、底面に圧抜孔を設けて揚圧力を低減する工法を開発した。しかし、この工法は非没水堤体の揚圧力低減法 (藤井ら, 1988) をそのまま利用したものであり、斜板付きの潜堤に適用するには幅広い条件下における効果の確認が必要である。

本研究では、まず、代表的な波浪条件のもとでの波圧・波力・滑動実験を行い、揚圧力低減効果を最大にする圧抜孔の配置諸元を求める。次に、現地海岸を想定した種々の潮位・波浪条件における滑動実験を行い、揚圧力低減工法の適用条件を明らかにする。さらに、矩形潜堤を用いた実験を行い、揚圧力低減のメカニズムを検討する。

2. 実験装置および実験方法

実験は、大成建設㈱技術研究所内の2次元造波水路 (47m×0.8m×1.6m) に、海底勾配 1/10 の斜面と水平床を設置し、斜面ののり肩部に縮尺 1/50 相当の模型を設置して行った (図-1参照)。模型は、測定部分 (幅 40 cm) とその両側に同一断面を持つ2つの固定ダミーとに分けた。堤体模型の断面寸法を図-2に示す。ここで、各圧抜孔は沖側から順に番号①, ②, ③を付けて区別する。

波圧・波力実験では、圧抜孔の岸沖方向の設置位置による効果の違いを比較するため、圧抜孔は堤体の中央の岸沖線上に1列のみ配置した。滑動実験では、堤体重量

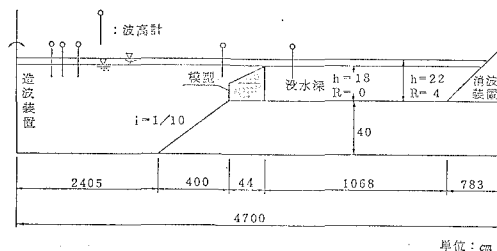


図-1 実験装置

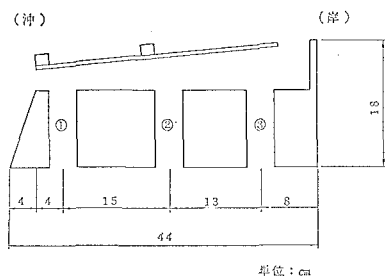


図-2 堤体模型の断面

の低減効果を調べるため、より実構造物に近い配置を想定して格子状に圧抜孔を配置した。

滑動実験は、水平床上に捨石マウンド (長さ 90 cm, 厚さ 4 cm, 粒径約 10 mm) を構築し、その上に模型を置いて行った。ここで用いた堤体は捨石マウンドの厚さ分堤体高を低くして、図-2 で示した堤体の高さとも一致させた。滑動限界重量は以下の方法で求めた。まず、造波開始後 4 波目から 10 波分の変位量をビデオトラッカーにより時系列データとして測定し、谷本ら (1981) にならってこの変位量の中間値 (10 波中の大きい方から 5 番目の値) を滑動量として採用した。そして、この滑動量が 0 となる堤体重量を滑動限界重量とした。

堤体設置水深 h は、没水深 $R=0$ cm, 4 cm を想定し、 $h=18$ cm, 22 cm とした。波浪条件は、波圧・波力実験の場合周期を $T=1.98$ s とし、換算沖波波高が $H_0/ \div 13$ cm (非碎波) と 17 cm (碎波) の 2 種類とした。また、滑動実験では $T=1.13 \sim 2.80$ s とし、波高は非碎波から碎波までの範囲で変化させた。

* 正会員 理修 大成建設(株)技術研究所

** 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所

*** 正会員 工修 (株)間組技術研究所

**** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

***** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

3. 圧抜孔の最適配置の選定

3.1 底面の波圧波形の特徴

基本型, 圧抜型 (①+②+③) の場合における底面の波圧波形 P1~P4 (没水比 $R/h=0$, $H_0'=13.2\text{ cm}$) を図-3 に示す. 基本型の波圧は同位相でピークをとるのに対し, 圧抜型の波圧ではピークに位相差がある. すなわち, 圧抜型では各波圧の最大値が同時刻に発生せず, そのため底面の揚圧力を積分した鉛直上向力が基本型に比べて小さくなる.

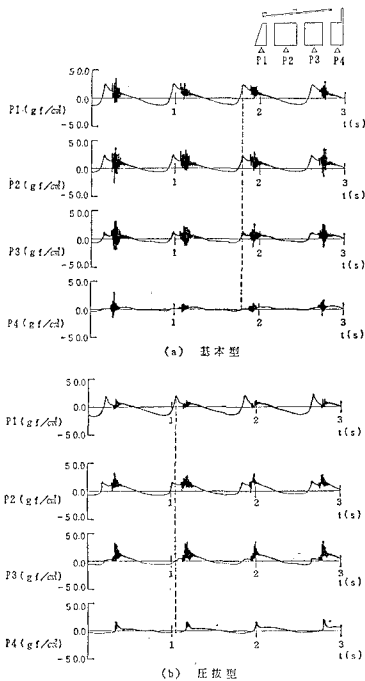


図-3 底面の波圧波形

3.2 圧抜孔の配置と揚圧力低減効果の関係

圧抜孔の配置と, 鉛直力最大時において底面に作用する波圧の岸沖分布の関係 ($R/h=0$, 換算沖波波高水深比 $H_0'/h=0.73$) を図-4 に示す. 波圧 $w_0 H_0'$ (w_0 : 水の単位体積重量 1 gf/cm^3) で無次元化し, 上向きを正とした. 全ての圧抜孔が存在する場合の波圧分布は底面中央部でくぼみ, 圧抜孔無しの場合 (基本型) に比べて揚圧力が大幅に低減されることが分かる. また, 個々の圧抜孔の効果は, ②に比べて①が極端に悪い.

堤体に作用する最大鉛直力 $F_{z\max}$ と圧抜孔の配置および直径の関係を図-5 に示す. ここで, プライム印は圧抜型を意味し, 圧抜型と基本型の比 $F_{z'\max}/F_{z\max}$ をとって圧抜孔の効果調べた. また, 碎波が作用する場合は斜線記号を付けて区別した. $R/h=0$ の場合 (白抜き記号), $F_{z'\max}/F_{z\max}$ は ①+②+③と②+③の配置

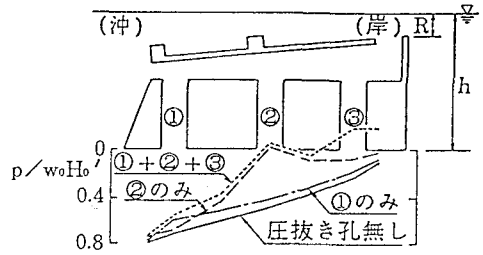


図-4 圧抜孔の配置と底面の波圧分布の関係

ではほぼ等しく, ②のみではやや増加する. また, 碎波, 非碎波の差は小さい. 圧抜孔の直径は各配置毎に $\phi=20\text{ mm}$ ~ 40 mm と変化させて検討した結果, ϕ が大きいほど $F_{z'\max}/F_{z\max}$ は低下する. そこで ϕ の諸元として, 実機を設置する際の施工性を考慮して $\phi=40\text{ mm}$ を採用した. 一方, $R/h=0.18$ (黒塗りの記号) では, 非碎波の場合は $F_{z'\max}/F_{z\max}$ は $0.9\sim 1.0$, 碎波の場合は $0.8\sim 0.95$ となり, $R/h=0$ の場合に比べ揚圧力の低減効果は悪い.

圧抜孔の配置と滑動限界重量比 W_e'/W_e の関係を図-6 に示す. $F_{z'\max}/F_{z\max}$ での比較結果と同じく①+②+③と②+③の W_e'/W_e には大きな差がなく, ②ではやや悪化した. また, いずれの配置でも, $R/h=0$ (白抜き記号) では $W_e'/W_e < 0.8$ となり, $R/h=0.18$ (黒塗り記号) では $W_e'/W_e > 1$ となった.

以上の結果に経済性も考慮して検討したところ, 圧抜孔①は不要であることが確認された. よって, ②+③を最適配置とした. この場合, 開口率 (圧抜孔の全面積/底版の面積 $\times 100$) は 4.4% となる.

4. 揚圧力低減工法の適用条件

第3章で決定した圧抜型 (②+③) と, 基本型に対して幅広い潮位・波浪条件下で滑動実験を行い, 揚圧力低減効果および低減工の適用条件を調べた.

4.1 潮位・波浪条件と揚圧力低減効果の関係

滑動限界重量 W_e と換算沖波波高 H_0' の関係 ($T=1.41\text{ s}$ の場合) を図-7 に示す. 図中の記号は, $\triangle$: 基本型 W_e ($R/h=0$), $\square$: 圧抜型 W_e' ($R/h=0$), $\blacktriangle$: 基本型 W_e ($R/h=0.18$), $\blacksquare$: 圧抜型 W_e' ($R/h=0.18$) である. また, 斜線記号は碎波の作用を意味する. $R/h=0$ (白抜き記号) で非碎波が作用する場合は基本型に対する圧抜型の W_e の低減割合が小さく, 碎波が作用する場合は低減割合が大きい. $R/h=0.18$ (黒塗り記号) では波高の高低によらず圧抜孔は効果がない.

次に, R/h , H_0'/h , 堤体高波長比 h_D/L_0 をパラメータとして滑動限界重量比 W_e'/W_e を整理し, 揚圧力低減効果の特性を調べた (図-8 参照). 潮位による W_e'/W_e の変化は大きく, $R/h=0$ (白抜き記号) では W_e'/W_e

W_c は 0.4~0.9 と揚圧力低減効果が大きい、 $R/h=0.18$ (黒塗り記号) では $W_c'/W_c > 1$ と逆効果である。 W_c'/W_c は、 H_0'/h の増加に対して減少するが、碎波後の波が作用する条件では再び増加する傾向を示す。ここで、 $R/h=0$, $h_D/L_0=0.06$ の場合にのみ、碎波後も W_c'/W_c が減少するが、その理由は、碎波形態が他は巻き波型であるのに対して、このケースでは崩れ波型であるためである。また、ここでは示していないが緩勾配海岸 ($i=1/30$) の条件における効果は低かった。以上のことより、圧抜孔の適用が望ましい条件は、急勾配海岸 ($i=1/10$) において潮位が堤体の天端付近 ($R/h=0$) にあり、そこに碎波限界付近の波が作用する条件であるといえる。また、この条件下では、 $W_c'/W_c \approx 0.5$ と大きな低減効果が発揮される。

4.2 潮位変化がある場合の揚圧力低減効果の評価

圧抜孔の効果は潮位によって大きく影響されるため、堤体重量の設計には潮位変動を考慮する必要がある。図-8 によれば、 $R/h=0$ では $W_c'/W_c < 1$ であるが、 $R/h=0.18$ では $W_c'/W_c > 1$ となり、 $R/h=0.18$ の条件のみで見ると圧抜孔による滑動重量の低減効果はないことになる。しかし、堤体重量で比較すると基本型の $R/h=0$ の重量よりも圧抜型の $R/h=0.18$ の重量の方が小さくなることが多い (図-7 参照)。そこで圧抜孔の効果を潮位変化を考慮して評価するために、次式で示される重量比 γ を定義する。

$$\gamma = \frac{\max(W_{c'}'_{R/h=0}, W_{c'}'_{R/h=0.18})}{\max(W_{c'}_{R/h=0}, W_{c'}_{R/h=0.18})} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\max(a, b)$ は a, b のいずれか大きな値を示す。 γ は、ほぼ同じ波浪条件のもとでの圧抜型と基本型の滑動限界重量比 (= 圧抜型の最大値/基本型の最大値) であり、潮位の違いも考慮されている。式(1)を用いて、周期 $T=1.41, 1.98s$ での γ を求めると表-1 となる。本実験での潮位差は現地換算で約 2m となる。表-1 によれば、圧抜孔は滑動限界重量の低減に対して、非碎波の場合はあまり効果がないが、碎波の場合には 16~18% の低減が可能である。

5. 矩形潜堤による揚圧力低減メカニズムの検討

SURF の圧抜孔による揚圧力低減効果を検討した結果、高潮位ではほとんど効果がなく、波高が低いと効果が小さいという欠点が明らかになった。そこで、SURF

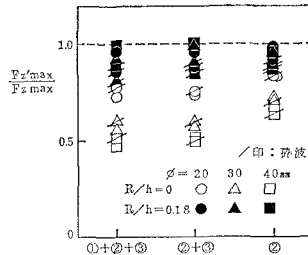


図-5 圧抜孔の配置および直径と最大鉛直力比

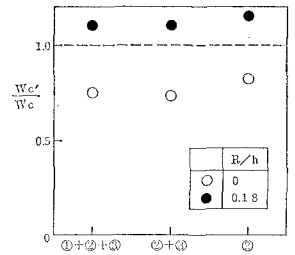


図-6 圧抜孔の配置と滑動限界重量比

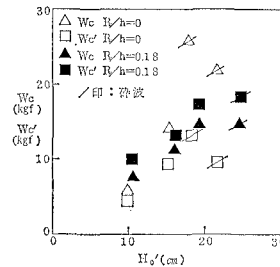


図-7 滑動限界重量と換算沖波波高の関係

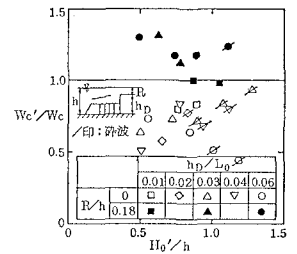


図-8 滑動限界重量比

より単純な構造の矩形潜堤を対象として2次元波力実験を行い、上記の特性が生じる原因を揚圧力低減メカニズムの面より明らかにする。

5.1 実験装置および方法

実験装置は図-1と同様のものを用い、堤体には矩形潜堤 (BOX タイプ) と矩形潜堤に圧抜孔を設けたもの (圧抜タイプ) を用いた。堤体模型および波圧測定点を図-9に示す。測定項目は波高、波圧、水平力および鉛直力である。また、堤体上の水面形をビデオにより収録した。波浪条件は沖波波高 $H_0'=5cm \sim 15cm$ 、周期は $T=2s$ とし、水深は $h=25cm \sim 45cm$ (没水深 $R=5cm \sim 25cm$) と変化させた。

5.2 潮位・波浪条件と揚圧力低減効果の関係

潮位・波浪条件の変化が圧抜孔の効果へ及ぼす影響を調べるために、没水比 R/h と最大鉛直力比 F_{2max}'/F_{2max} の関係を図-10に示す。ここで、プライム印は圧抜タイプを意味し、圧抜タイプとBOXタイプの比をとって圧抜孔の効果を調べた。 R/h の増加に伴い F_{2max}'/F_{2max} は 0.4~0.6 と増加する。また、 $R/h \geq 0.5$ の範囲では $H_0'/L_0=0.024$ と波形勾配の大きい方が F_{2max}'/F_{2max} が小さくなる。一方、図には示していないが最大水平力については、 $R/h, H_0'/L_0$ によらず $F_{xmax}'/F_{xmax} \approx 1$ となり、圧抜孔を設けたことによる F_{xmax} の変化は小さい。以上の結果は、SURF における圧抜孔の揚圧力低減効果の特性と一致する。

表-1 潮位変化を考慮した滑動限界重量比の比較

周期 T (s)	水深 h (cm)	没水深 R (cm)	換算沖波波高 H_0' (cm)	圧抜型 W_c' (kgf)	基本型 W_c (kgf)	γ	碎波 の有無
1.41	18.0	0.0	15.3	9.10 △	14.2 ▽	0.94	非碎波
	22.0	4.0	16.2	13.31	11.4		
	18.0	0.0	21.4	9.56 △	22.0 ▽	0.82	碎波
	22.0	4.0	24.4	18.13	14.8		
1.98	18.0	0.0	13.2	12.94 △	17.7 ▽	0.99	非碎波
	22.0	4.0	13.6	17.59	13.4		
	18.0	0.0	16.0	24.5 ▽	34.0 ▽	0.72	碎波
	22.0	4.0	17.0	22.77	20.4		

△ は、ほぼ同じ沖波で潮位を変えた場合の最大値

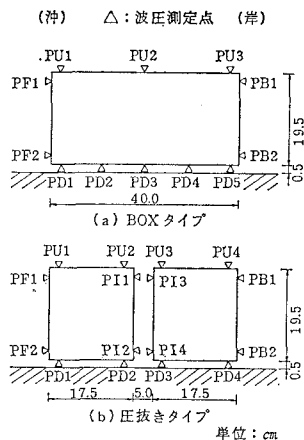


図-9 矩形潜堤の寸法と波圧の測定点

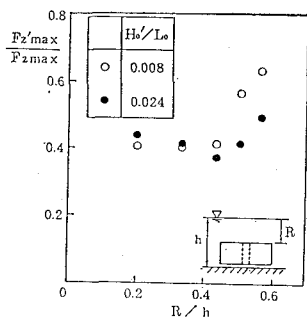


図-10 最大鉛直力比と没水比の関係

5.3 矩形潜堤周辺の波圧分布と水面波形の関形

最大鉛直力作用時における矩形潜堤の上下面の波圧分布および水面形を BOX タイプ、圧抜タイプで比較する (図-11 参照)。図-11 には、揚圧力低減効果が大きい場合 ((a) 没水深沖波波高比 $R/H_0'=0.67$) と小さい場合 ((b) $R/H_0'=1.67$) の両ケースを示した。波圧は $w_0 H_1$ (H_1 : 堤体直前の波高) で無次元化した。

堤体上面の波圧は下向きを、下面の波圧は上向きを正とした。また、水位 η は堤体直前の波高 H_1 で無次元化した。 $R/H_0'=0.67$ では、堤体上面では水面変動に追従した波圧分布を示し、下面では BOX タイプで台形、圧抜タイプでは圧抜孔位置よりも岸側で小さくなる分布形を示す。したがって、圧抜孔は堤体上下面の波圧分布を等しくすることにより揚圧力を低減させるものであることが分かる。また、このような場合、堤体上の水面形は前傾化している。一方、 $R/H_0'=1.67$ では、堤体上の水面形が緩やかなため、上下面の波圧分布の違いが小さい。

このような波圧分布下に圧抜孔を設置しても、下面の波圧分布の変化は小さく、揚圧力低減効果は小さい。

堤体直前の水位 η 、上下面の波圧積分値 $\sum p_u$, $\sum p_d$ 、鉛直力 F_z の時系列を図-12 に示す。ここで η は圧抜孔の有無によりほとんど変化せず、BOX タイプ (実線) と圧抜タイプ (点線) で同様の波浪条件となっている。両タイプの $\sum p_u$, $\sum p_d$ の位相に着目すると、 $R/H_0'=0.67$ の場合、BOX タイプでは $\sum p_d$ の方が $\sum p_u$ より先に最大値をとるが、圧抜タイプでは $\sum p_d$ と $\sum p_u$ の最大値はほぼ同時に発生する。したがって、 $\sum p_d$ と $\sum p_u$ の差である揚圧力 F_z は BOX タイプより圧抜タイプの方が小さくなる。一方、 $R/H_0'=1.67$ の場合、BOX タイプの $\sum p_u$ と $\sum p_d$ の位相差がもともと小さいため、圧抜タイプにしても揚圧力低減効果は顕著にならない。

以上より、圧抜孔は堤体上下面の圧力分布を等しくすることにより揚圧力を低減させ、その効果が大きいのは、圧抜孔が無い場合に上下面の波圧分布が大きく異なる条件、すなわち低潮位、高波浪時に入射波形がより大きく前傾斜する条件であるといえる。

SURF の場合、堤体上の波形を強制的に前傾化させる構造として斜板、背面壁の存在があげられる。そこで、ここではそれらのうち、背面壁の有無による揚圧力低減効果の比較を行った (図-13 参照)。全てのケースで、背面壁有りの場合の $F_z'/\max / F_{z\max}$ は背面壁無しの場合より小さくなる。したがって、背面壁を設置することにより堤体上の波形がさらに前傾化して揚圧力低減効果が大きくなることが確認される。

6. 結 論

本研究の成果は以下のように要約される。

①圧抜孔の揚圧力低減効果を代表的な波浪条件下で調

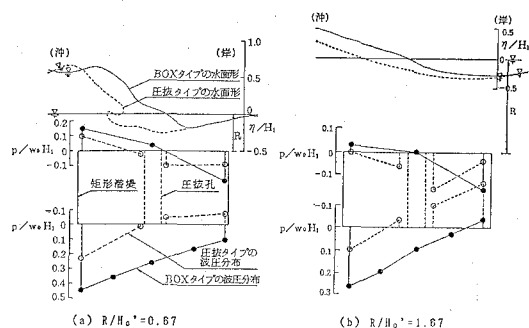


図-11 矩形潜堤の上下面の波圧分布と水面形

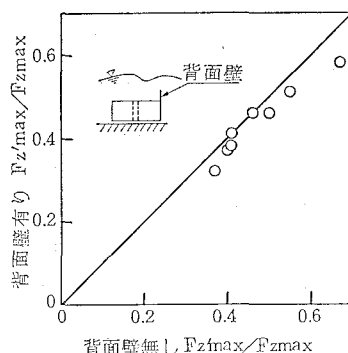


図-13 背面壁の有無による最大鉛直力比の比較

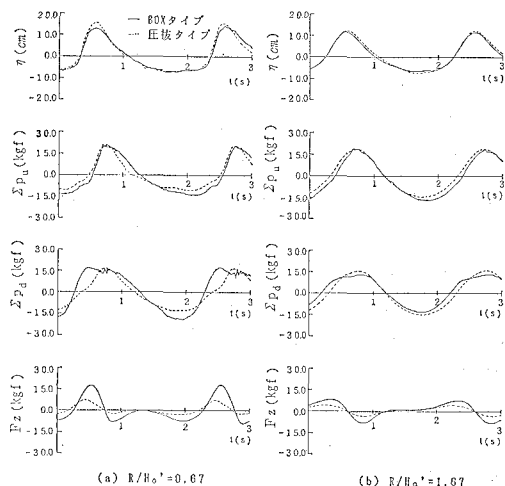


図-12 矩形潜堤の上下面の波圧積分値と鉛直力

べた結果、最適な圧抜孔の配置として、直径 $\phi=40$ mm, 中央, 岸側の2列という結果を得た。

②潮位変化は揚圧力低減効果に大きな影響を与える。滑動限界重量の低減率は没水比 $R/h=0$ の場合 20~50%, $R/h=0.18$ の場合約 -20% となり, $R/h=0$ の場合に効果が大きい。しかし、一般には基本型の堤体重量は $R/h=0$ の場合の方が大きいため, $R/h=0$ での低

減率が大きい圧抜孔は有用といえる。

③緩勾配海岸や急勾配海岸で非碎波が作用する条件では、圧抜孔による揚圧力低減効果は小さいかむしろ悪くなる。しかし、急勾配海岸で碎波が作用する場合、圧抜孔の効果が大きく、基本型では中詰め砂だけでは安定できなかった場所への適用が可能となる。

④圧抜孔は堤体上下面における圧力分布や圧力波形の位相を一致させることにより揚圧力を低減する。よって、本工法の効果が大きくなるのは、堤体上下面の圧力差が大きくなる条件、すなわち堤体上の波形がより大きく前傾化する低潮位、高波浪時の条件である。

参考文献

- 建設省土木研究所 (1991): 海域制御構造物に関する共同研究報告書 (13)「斜板消波潜堤 (SURF) の揚圧力低減孔の効果に関する実験」, 共同研究報告書, 第56号, pp. 103-132.
- 小山文男・清水正巳・中塚健司・宇多高明・村井慎美 (1988): 斜板を有する新型潜堤 (SURF) の開発, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 512-516.
- 佐藤明美・上野成三・勝井秀博 (1991): 潜堤に設けた揚圧力低減孔の効果の検討, 第46回年講演概要集II.
- 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄 (1981): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力の発生と対策について, 港湾技術資料, No. 20, pp. 3-39.
- 藤井俊二・中村孝明・勝井秀博 (1988): 大型ケーソンに働く揚圧力低減対策に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 672-676.