

消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験

有川 太郎*・織田 朋哉**・黒田 豊和***・下迫健一郎****

消波ブロック被覆堤のケーソン壁面被災原因のひとつとして、消波ブロックの壁面衝突があげられる。しかし、その算定方法は明らかではない。そこで、消波ブロックのケーソン壁面衝突力を実験スケール約 1/4 の大規模実験により測定した。まず、ブロックのつり下げ実験を行い、衝突速度と衝突力との関係からその算定式を提案した。次に、ロッキング・転落・水平移動という 3 つのパターンによる衝突力を測定し、速度ならびに質量との関係を調べた。それをもとに現地モデルに適用したところ、転落・水平移動が生じれば、ブロックによって穴があく可能性があることを示した。

1. はじめに

我が国の代表的な防波堤構造の 1 つである、ケーソン前面に消波ブロックを設置した消波ブロック被覆堤に関する被災のうち、ケーソン壁面が破壊に至るケースがいくつか存在する。高橋ら (1998) は、特にケーソン壁面の破壊に着目し、現地の実態をとりまとめている。ケーソン壁面の破壊は、単に穴があくということだけでなく、中詰め砂の流出が生じ、ケーソン重量が減少し、結果的にケーソンの滑動を引き起こす原因にもなりうる。

ケーソン壁が破壊に至る原因として、衝撃砕波力や消波ブロックの衝突力などが考えられている。衝撃砕波力に関しては数多くの研究が存在し、算定方法も確立されつつある。その一方で、消波ブロックの壁面衝突力に関する研究はほとんど存在しない。山口ら (2002) が小型実験水槽を用いて行っているものの、メカニズム、算定方法は明らかではない。また、衝突力は、材質によっても異なってくることから、実験に際し相似則に注意する必要がある。

本研究は、消波ブロックによる壁面衝突力の算定方法の確立をめざし、大規模波動地盤総合水路 (今回は約 1/4 スケールの実験) を用いて基礎的データを取得し、まとめるものである。

2. 衝突力の算定式の検討

(1) 基礎理論

衝突力は運動量保存則から力積を用いて求めることが可能となるが、力の作用時間を定義しなければならない。しかし、力の作用時間 Δt_p に対する一般的な定義はない。松富 (1999) は、漂流物による壁面衝突力に対し、衝突速度 v_p 、 Δt_p および衝突物の塑性変形長 α_p の関係を、 $v_p \Delta t_p \sim \alpha_p$ と考え、衝突力の算定式を求めている。 $v_p \Delta t_p \sim \alpha_p$ の関係式は理論的考察も含めて実験より決定している。しかし、これは壁面に対して衝突物が柔らかい場合

の変形を考慮したものであるため、ここでは、落石などの評価 (日本道路協会, 2000) でよく用いられている Hertz の弾性接触理論を用いて衝突力を定義する。

互いに向かい合う 2 つの物体が衝突し、接触した瞬間に圧縮力が相互の物体に作用したとする。そのときの物体 m_1 、 m_2 の運動方程式は、それぞれ、

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -F, \quad m_2 \frac{dv_2}{dt} = F \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。ただし、物体 m_1 が運動している方向を正とする。接触点で生じた局部変形によって 2 球の重心が近づく距離を a とすると、

$$\ddot{a} = -\frac{F}{m_1} - \frac{F}{m_2} = -\frac{1}{\bar{m}} F \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 $\bar{m} = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ とする。

静的に接触する 2 つの物体の圧力問題として解いた場合、 F と a の間には、

$$F = \chi \cdot a^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が成立する。ここで、 n および χ は、衝突する接触面の形状によって異なり、

$$\text{球と平面} \quad \chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \quad n = \frac{3}{2}$$

$$\text{円柱底面と平面} \quad \chi = \frac{2r}{\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \quad n = 1$$

ここで、 $k_1 = (1 - \nu_1^2) / \pi E_1$ 、 $k_2 = (1 - \nu_2^2) / \pi E_2$ であり、 a は球の半径、 r は円柱の半径、 E_1 、 E_2 はそれぞれのヤング率、 ν_1 、 ν_2 はポアソン比である。

式 (3) を式 (2) に代入し、 $\dot{a}$ を両辺に掛け、 $t=0$ にて $\dot{a} = v_0$ として t に関して積分し、 $\alpha_{\max}$ を求め、式 (3) に代入すると、

$$F_{\max} = \chi^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n}{n+1}} \bar{m}^{\frac{n}{n+1}} v_0^{\frac{2n}{n+1}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、球と平面の衝突と考えた場合、衝突力は速度の 1.2 乗に比例し、松富 (1999) の漂流物による壁面衝突力の評価式における速度のべき乗数と一致する。

(2) 実験による妥当性の検討

次に実験により式 (4) の妥当性を検討する。

a) 実験方法 実験は図-1 のようなつり下げ衝

* 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所
シバタ工業株式会社
九州地方整備局 関門航路事務所
(独法) 港湾空港技術研究所
** 正会員
*** 正会員
**** 正会員

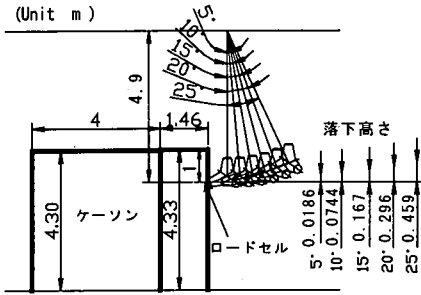


図-1 つり下げ実験断面図

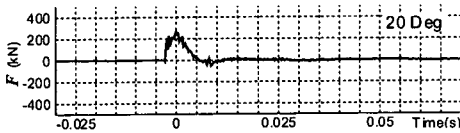


図-2 時系列波形の1例 (空中・20度)

突実験を行う。ワイヤーで消波ブロックをつり下げ、適当な角度をつけ勢いをつけずに放した。実験ケースは、空中・水中で、振り角を5, 10, 15, 20, 25度と変え、それぞれの角度で平均30回程度試行した。水中で行う場合は、静水位を5 mとし、消波ブロックが水中から出ないようにした。

消波工として、コンクリート(比重2.3)を材質とする重さ500 kgのテトラポッドを用いた(脚の半径10 cm)。本研究では消波工によるケーソン壁面の破壊ではなく、衝突力を測定することに主眼を置いているために、ケーソン壁は鋼製で制作し、またケーソン前面の板には穴を開け、その穴にロードセルを差し込み設置した。図-1からもわかるように、ロードセルを設置するケーソンの後ろにもう一つ大きなケーソンを置いて頑強に固定した。ロードセル(固有周波数7 kHz、定格容量500 kN)は鋼製で作製した。これは支柱となっている部分にひずみゲージを貼り、防水加工を施したものである。受圧部は15 cm角となっている。ロードセルによる測定のサンプリングは4 kHzとした。

b) 実験結果 図-2は、時系列波形の一例である。

空中における最大衝突力の度数分布およびその平均値を図-3に示す。ここで、度数分布は1目盛りが1回である。これより、極端なばらつきは少なく、適切に測定できていることがわかる。水中での測定結果は、空中の結果よりさらにばらつきは少なかった。

ここで、式(4)を検討するために、平均最大衝撃力と速度の関係を調べた。図-4は、横軸に $\sqrt{2gH_r}$ を用いて換算した速度 v を、縦軸に空中および水中における平均最大衝突力をとっている。 H_r は落下高さである。図中の直線は、線形回帰直線であり、空中では、 $F_{\max}=1.31 \times$

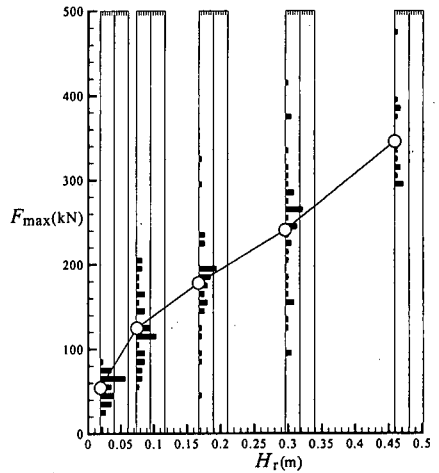


図-3 最大衝突力の度数分布 (空中)

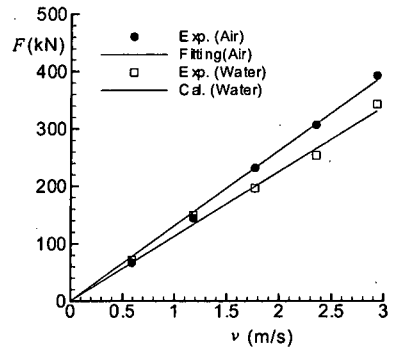


図-4 最大衝突力と換算速度の関係 (空中・水中)

$10^5 v$ で、相関係数は0.9953となった。また、速度の6/5乗との関係は、 $F_{\max}=1.10 \times 10^5 v^{6/5}$ で、相関係数は0.9941であった。速度を大きくし確認する必要があるが、これ以上の高さにおける実験は、消波ブロックが破壊しそうで危険と判断して中止した。そこで今回は、松富(1999)にならない速度の6/5乗則を採用する。

その場合、式(4)は、

$$F = \chi^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5\tilde{m}}{4} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}} \quad (5)$$

となる。ここで、壁面側はブロックに比べ硬く($E_2 \gg E_1$)、かつ質量も十分重い($m_2 \gg m_1$)として考え、

$$\chi = \frac{4}{3} \sqrt{a} \frac{E}{1-v^2}, \quad \tilde{m} = m \quad (6)$$

とした。添え字の無い量はブロックの諸量とする。 a を決定するためには、衝突領域を正確に計測する必要があるが、今回の実験では、衝突部位を正確に判別することが出来なかった。そこで、実用性をふまえ、ブロックの脚の半径 R 程度とし、 $a=R/2$ から a を5 cmとした。コンクリートのポアソン比を0.2、ヤング率はその強度に

よっても違うが、平均 $2.5 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$ とすると、係数は 4.3×10^5 となり、実験結果より 4 倍弱の大きさになることがわかる。これは、測定値のばらつきもあるが、コンクリートが欠けたりする塑性効果にも起因すると考えられる。現時点ではそれを純理論的に考察することは困難であるため、それらの効果を含めた係数 γ_p を用いて、最大衝突力の算定式を最終的に、

$$F = \gamma_p \gamma_p^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5m}{4} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}} \dots\dots\dots (7)$$

とした。 γ_p は本研究の範囲では 0.25 を採用する。

水中においては、 $F_{\max} = 9.6 \times 10^5 v^{6/5}$ であった。本来は、水の抗力による速度の減少、浮力、慣性力を考慮しなければならないが、本研究ではそこまで言及することができないために、同じ高さであれば、空中からの衝突力を越えないことを確認したということにとどめ、水中においても、式 (7) を用いることとする。

3. 想定実験

算定式 (7) を用いるためには、衝突パターンと、衝突時の見かけの速度および見かけの質量の関係を明らかにする必要がある。そこで、実際に起きている可能性が高いと考えられる現象を取り上げ、人工的にその現象を作り実験を行った。また、乱積みされた消波ブロックに波が作用した場合の接触力も測定した。

(1) 衝突パターン

ロッキング衝突、転落衝突、水平移動衝突の 3 つを取り上げた。それぞれの概念を図-5 に示す。参考として図では最上部にあるブロックが移動しているが、これは中間層でもゆるみ具合によっては起こりうると考えられる。それぞれの説明を以下で簡単に行う。

a) ロッキング衝突 かみ合わせによっては、消波ブロックが不安定な状態になり、そのときに、水位の変動や水塊の衝突によりロッキング現象を起こすと考えられる。また、その見かけ質量は小さくなると考えられる。

b) 転落衝突 ケーソンの滑動などにより、一時的に消波ブロックとケーソンの間に隙間ができてしまった場合、その隙間にブロックが転落するということが考えられる。

c) 水平移動衝突 消波ブロック全体が沈下すれば、不完全被覆状態になり、完全被覆状態に比べ消波ブロックの天端上に碎波した波が激しくぶつかることが多くなると考えられる。そのようなときに、高波浪が来襲した場合、ブロックの積み方によっては、最上段の消波ブロックが水平方向に走るように移動することが考えられる。この場合の衝突速度は、波速に比例するであろうと予想される。

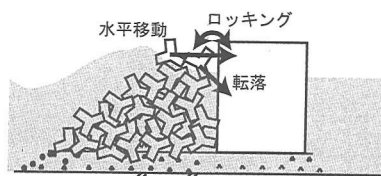


図-5 衝突パターンの概念

(2) ロッキング衝突実験

a) 実験方法 人工的にロッキングが発生しやすいように、図-6 のようにブロックを積んだ。波浪条件は、周期 3 ～ 10 秒、沖波入射波高 50 cm ～ 200 cm の規則波とした。ブロックの半分程度が水没しているときにもっともロッキングが生じやすかったために、水深は 360 cm とした。

写真-6 は実験前の様子であり、ロードセルとブロック先端との距離は約 12 cm であった。また、実験は再現性を重視し、下の基礎部分が波によって崩れないように注意し、ブロックを同じ位置に戻してロッキング実験を行った。

b) 実験結果 図-7 は、水深 360 cm、波高 50 cm、周期 4 秒のロッキングによる衝突力の時系列を拡大図とともに示したものである。

図-8 に入射波高が 50 cm、水深 360 cm のときの周期とロッキング衝突力の平均値との関係を示す。このケースでは波は碎波せずに、重複波となるだけであった。ビデオ画像を用いて衝突速度を求めたところ、0.5m/s ～

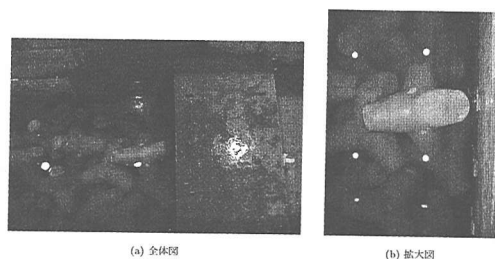


図-6 ロッキング実験前の様子

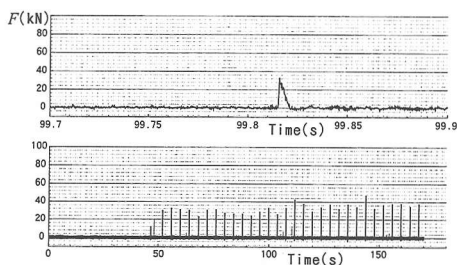


図-7 ロッキング衝突力時系列 (上: 拡大図)

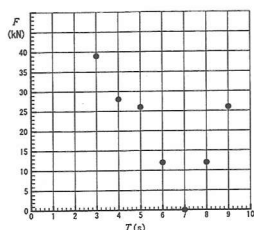


図-8 周期とロッキング衝突力の関係 (入射波高 50 cm)

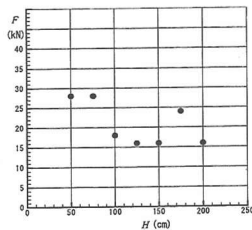
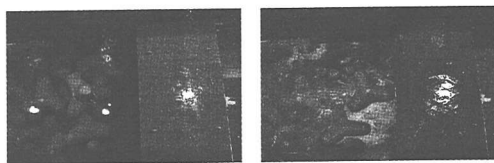


図-9 入射波高とロッキング衝突力の関係 (周期 4 s)



(a) 転落前 (b) 転落後
図-10 転落実験前後写真

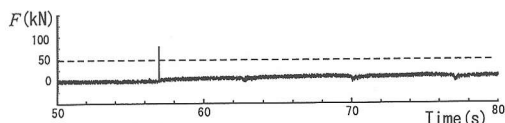


図-11 転落衝突力時系列

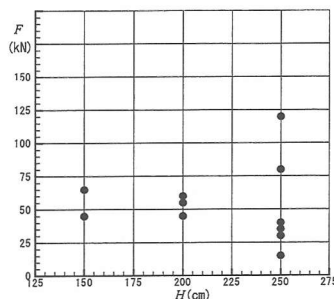


図-12 入射波高と転落衝突力の関係

0.7 m/s程度であった。これは波面の上昇速度に依存すると考えられる。波面の上昇速度は平均として $2H_i/(T/2)$ で与えるものとする。ここで、 H_i は入射波高を表す。ただし、周期 8 秒以降は波の非線形性が効いており、より波が尖るために、見かけの上昇速度が増加するものと考えられる。また、周期 7 秒のケースは、ロッキングはしていたものの壁面に衝突しなかった。

次に、図-9 に周期が 4 秒のときの入射波高と、ロッキング衝突力の最大値平均との関係を示す。入射波高が 1 m よりも小さい場合は、水位の上下変動によりロッキングが生じ、入射波高が 1 m より大きい場合は碎波するために碎波後の水塊によってロッキングが生じていた。碎波後の水塊によるロッキングでは画像から衝突速度をもとめることが出来なかったが、実験結果より、同程度の速度であることが予想される。波速は 6.7 m/s ~ 7.4 m/s 程度であるため、ロッキング速度は、波速の 1/20 ~ 1/10 程度であることがわかる。

よって、ロッキング衝突速度は、非碎波時には $2H_i/(T/2)$ 、碎波時には波速の 1/10 とする。

衝突速度 0.6 m/s を用いて、算定式 (4) から衝突速度を求めると、61.3 kN となる。今回のケースでは平均 25 kN 程度であるために、これは衝突時の見かけの質量が軽くなっていることが考えられる。そこで、脚が 4 本あることから均等割りし、ロッキング時の見かけの質量は $m/4$ とする。

(3) 転落衝突実験

a) 実験方法 ブロック 1 個分の高さから転がりながら落下するときの衝突力を測定した。水深はロッキング時と同じく 360 cm とした。波浪条件は、入射波高 150 cm, 200 cm, 250 cm, 周期 7 s の規則波とした。高いところから転落させるとロードセルに当たる確率が低くなるため、1 個分の高さとした。

b) 実験結果 図-10 に転落前と転落後の様子を示す。

波浪の作用によりバランスを失い、その後自重により回転落下するケースがほとんどであった。図-11 は、入

射波高 250 cm, 周期 7 秒の結果である。

図-12 は、入射波高と衝突力の関係を示している。入射波高が 250 cm のときは、ばらつきが大きいのが、平均的には入射波高に依存していないことがわかる。これは、一旦転落し始めると波の影響をほとんど受けないということになる。重心位置としては、10 ~ 20 cm 程度の落下であるために、つり下げ実験の結果より 120 kN ~ 200 kN の衝突力になると考えられるが、今回の結果はそれよりも平均すると 30% ~ 50% 程度になっていると考えられる。よって衝突速度は自然落下速度の 0.3 ~ 0.5 倍程度と考えられ、安全側をとり 0.5 倍とする。

(4) 水平移動実験

a) 実験方法 図-13(a) のように、消波ブロックを設置し、有義波高 150 cm, 有義周期 6 s, 水深 450 cm の不規則波を造波した。ロードセルの位置がケーソン天端より 1 m 下にあるために、移動による衝突力の測定はできないが、ビデオより波速とブロックの移動速度を計測した。

b) 実験結果 図-13 に、移動している様子を示す。ビデオ画像より、ブロックを通過する波速は 8.8 m/s, ブロックの移動速度は最大で 1.1 m/s であった。よってブロックの移動速度は波速の約 12% となる。これは抗

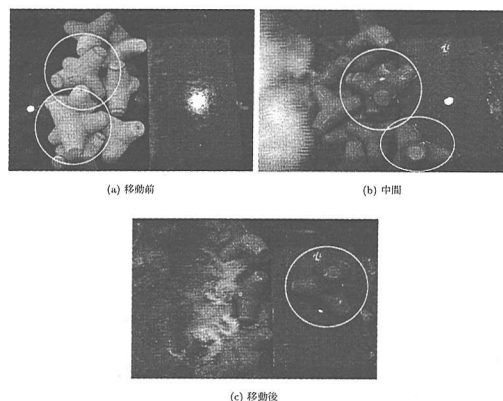


図-13 水平移動実験の様子

力との関係であり、榊山・鹿島 (1989) によるとレイノルズ数が増すにつれて係数が下がることから、水平移動時の衝突速度は、波速の15%とする。

(5) 乱積みによる接触力測定実験

a) 実験方法 事前に、3mを越える波をブロックに作用させたが、小型実験と違いブロックがほとんど動かなかったために、ブロックをあらかじめロードセルに接触させておいて、その接触力を測定することとした。波浪条件は、水深360cm、周期7sおよび4s、波高50cm、100cm、150cmの規則波および、有義波高50cm、100cm、有義周期4s、6sの不規則波とした。

b) 実験結果 ほとんどブロックの動きがないために、まさに波力によってブロックが押される現象であるが、接触力は最大でも7kNであった。よって、今回の実験範囲内では、接触力はロッキング衝突力の1/4程度であることがわかった。

(6) まとめ

衝突パターンと見かけの衝突速度および質量の関係について表-1にまとめた。仮想質量係数を質量に掛けて見かけの質量とする。

表-1 衝突パターンと仮想衝突速度・質量の関係

パターン	仮想衝突速度	仮想質量係数
ロッキング	波速の0.1倍または $4H_i/T$	1/4
転落	自然落下速度の0.5倍	1
水平移動	波速の0.15倍	1

4. 現地への適応

A港においてケーソン壁の穴あき被災が生じた際、原因と考えられている時期の波高を調べると、有義波高としては3.5m程度であったが、最大で8mを超える波が

来襲していた。前面の水深を h 、波高を H として、ケーソン壁前面における波速を、 $v=\sqrt{g(h+H)}$ で表すと、前面水深が16mであったことから、波高が8mのときは、波速約15m/sとなる。A港でのケーソン壁の押し抜きせん断耐力は、厚さ40cmで約2900kN、ブロックの大きさは50tであった。

波速が15m/s程度であるので、この場合表-1より、ロッキング衝突の場合は衝突速度が1.5m/s程度、水平移動衝突の場合、衝突速度は2.25m/s程度、また、転落の場合、重心位置で0.5m落下したとすると、衝突速度は1.56m/s程度となる。ブロック脚先端の直径から a を15cmとすると、衝突力は、それぞれ、ロッキング衝突：1320kN、転落：3160kN、水平移動：4540kNとなることがわかる。これより、ロッキング衝突の場合、1000回以上当たったと仮定しても、計算による疲労押し抜きせん断耐力を超えることはない。一方で、0.5mの高さからの転落があったと仮定した場合や水平移動があったと仮定した場合は、それぞれ穴あきが生じる可能性がある。

5. 結 論

消波ブロックのケーソン壁面衝突力を、約1/4スケールという大規模な実験を用いて検討した。つり下げ実験の結果から衝突力が速度に比例することがわかり、それを用いて算定式を提案した。次に、ロッキング・転落・水平移動という3つの代表的な衝突パターンを調べ、それぞれにおける算定条件を提案した。最後に、提案した算定方法を現地モデルに適用したところ、転落・水平移動が生じれば、ブロックによって穴があく可能性があることを示した。今後の課題の一つとして、水の抗力やブロックの塑性効果を考慮したモデル化があげられる。

本研究の実施にあたり、近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所のご協力ならびにご助言を頂いている。ここに深甚なる感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 榊山 勉・鹿島遼一 (1989): 消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 653-657.
- 高橋重雄・津田宗男・下迫健一郎・横田 弘・清宮 理 (1998): 防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃砕波力について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 751-755.
- (社)日本道路協会 (2000): 落石対策便覧(改訂版), (社)日本道路協会, pp. 272-274.
- 松富英夫 (1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-46, pp. 111-127.
- 山口貴之・上野紗代・林建二郎・大野友則 (2002): 消波ブロック被覆堤におけるブロックの動揺・衝突現象の解明のための水理模型実験, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 407-412.