

ここに、 D_{n50} は、消波ブロックの代表長さであり、 γ_r は消波ブロック単位体積重量である。ただし、消波ブロックの移動を被災ではなく変形とみなすので、本研究では S を“変形レベル”とよぶことにする。変形レベル S は消波ブロックの代表長さ D_{n50} 幅当たりの移動個数を意味する。実験では可能な限り移動個数も同時に数えた。変形レベル S とハドソン式に基づく被害率 D (静水面 $\pm H$ の範囲で移動した個数と表層2層のブロック数の比)との関係を実験結果から求め、 $D = 3.4 \times S$ で被害率 $D\%$ に換算することが出来る。

波圧は、消波ブロックで被覆されたケーソンの壁面上に図-1に示した位置に9個の波圧計を設置して測定した。波高、波圧のサンプリング周波数は100Hzである。測定した各瞬間の波圧の鉛直分布の積分値から波力波形を求め、最大波力、その作用点を算出した。以下の解析で示す波圧、波力の最大値は10波の平均値を用いる。

防波護岸位置(水深 $h = 1.46\text{m}$)での周期 $T = 4.08\text{s}$ の波の発生限界波高は $H = 1.16\text{m}$ で、算定限界波高 $H_D = 0.445\text{m}$ の2.6倍に当たる。実験では波高比 $H/H_D = 1.6, 2.0, 2.3, 2.6$ の4段階の波高について、消波工の変形が安定し、平衡断面に達するまで測定を行うことを目標に消波工の変形量、変形にともなう波力の変化を波の作用時間 $t/T = 250$ 毎に測定した。

直立堤に作用する波圧を合田の波圧式から求め、実験により得られた消波工背後のケーソンに作用する波圧との比較から、変形をとまなう消波工の波圧低減効果の変化を調べる。

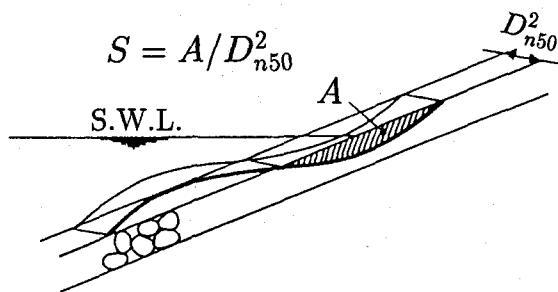


図-2 van der Meer の変形レベル S

3 実験結果と考察

3.1 断面変形形状

図-3から図-6に各ケースの消波工の断面形状の経時変化を示す。波高比 $H/H_D = 1.6$ のケースでは図-3にみられるように初期断面との差がほとんどみられない状態で断面形状が安定した。図-4の波高比 $H/H_D = 2.0$ のケースでは静水位近傍の消波ブロックが落下し、図-3よりも変形が大きくなり、 $t/T = 0$ の初期断面からの差が認められる。図-5の波高比 $H/H_D = 2.3$ のケースではさらに顕著に変形が進み、パラペット前面の法肩の消波ブロックが移動した。消波ブロックの移動形態には斜面を落下するものとパラペットを乗り越えるものの2種類みられた。波作用時間 $t/T = 1280$ で消波ブロックの移動が生じなくなり、平衡断面に達したと判断した。図-6に示した波高比 $H/H_D = 2.6$ の条件ではパラペット前面での消波ブロックが移動し静水面近くまでケーソンが露出した。侵食と堆

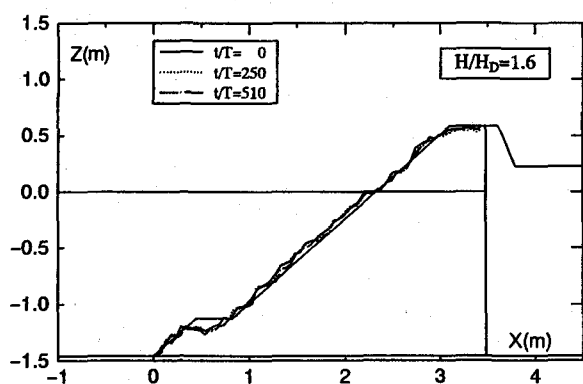


図-3 断面変形, $H/H_D = 1.6$

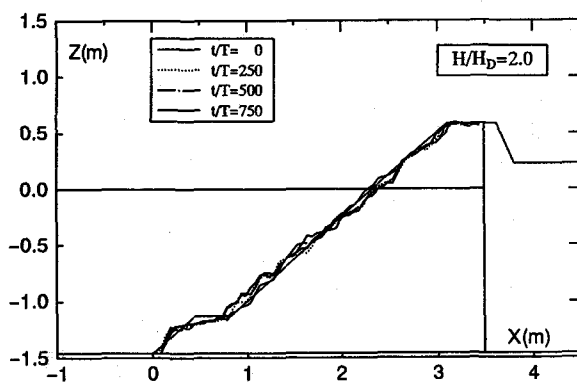


図-4 断面変形, $H/H_D = 2.0$

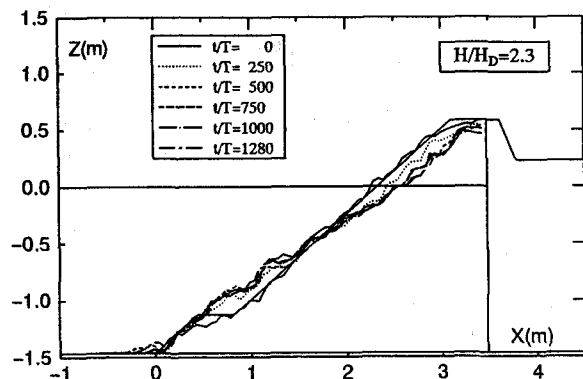


図-5 断面変形, $H/H_D = 2.3$

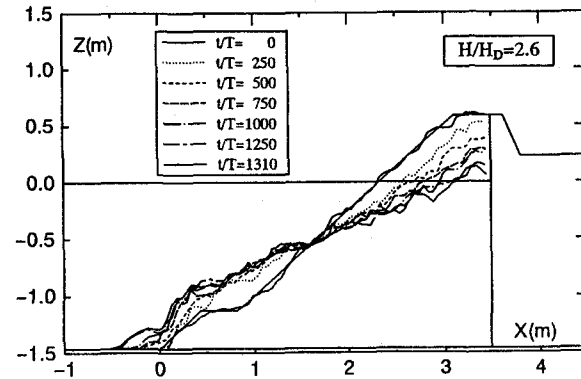


図-6 断面変形, $H/H_D = 2.6$

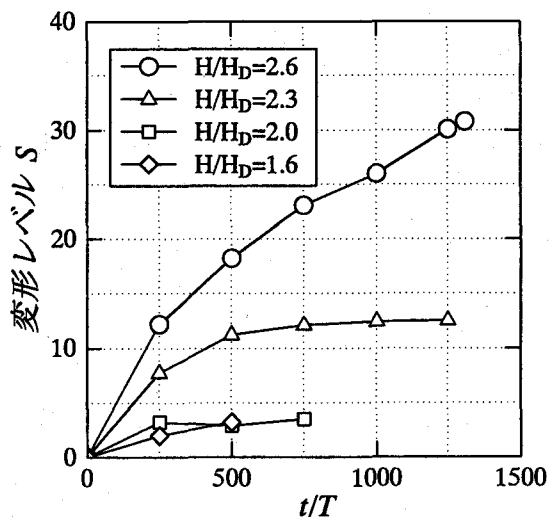


図-7 変形レベル S の経時変化

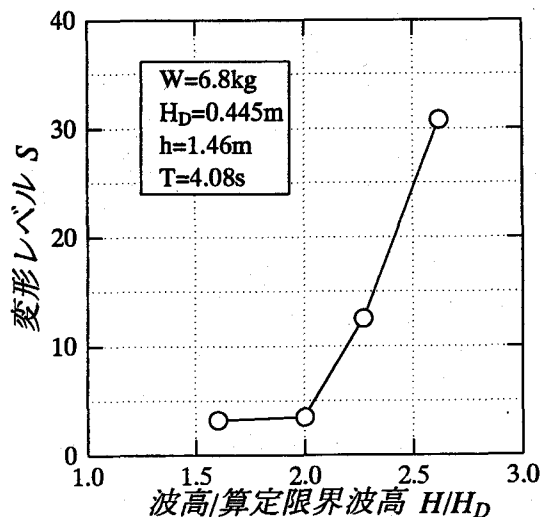


図-8 変形レベル S と波高比 H/H_D との関係

積部分の境界が時間に依らず一定の水深で生じている。 $t/T = 0 \sim 250$ 間での移動個数は 71 個で、この個数を被害率に換算すると $D = 20\%$ となる。最終的な落下個数は正確には確認できなかったが、 $t/T = 1000$ での移動個数は 219 個 ($D = 62\%$) で、このうち、パラペットを乗り越えた消波ブロックの個数は 28 個で、この個数を被害率に換算すると $D = 8\%$ となる。このような顕著な変形を生じた場合には、変形は水路の側面の片方から始まり他方へ進むという変形の進行過程で 3 次元性が観察された。しかし、最終的には図の最終断面に見られる程度のほぼ 2 次元的断面で実験を終了した。 $H/H_D = 2.6$ の条件では $t/T = 1310$ の作用時間範囲においてさえも変形が収束したとはみなせないが、 $t/T = 1000 \sim 1250$ 間でケーソンに作用する波力が増大しケーソンが滑動し始めたために $t/T = 1310$ で実験を中止した。

図-7は、図-3から図-6の消波工の変形過程から算出した変形レベル S の経時変化を示したものである(鹿島ら, 1992)。波高の大きさと変形レベルの大きさ、さらに平衡断面に達する時間との関係が明瞭に表れている。波高比 $H/H_D = 1.6$ 、と $H/H_D = 2.0$ のケースでは変形レベル S は小さく、それぞれ $t/T = 500$ 、 $t/T = 750$ 程度で平衡断面に達した。 $H/H_D = 2.3$ では緩やかに変形が進行し、 $t/T = 1000 \sim 1250$ で変形速度がほぼ 0 になった。この時の変形レベルの大きさは $S = 12$ である。 $H/H_D = 2.6$ の条件では変形速度が大きく、 $t/T = 1250$ で $S = 30$ に達し、 $t/T = 1310$ の作用時間範囲においてさえも変形が収束しなかったが、前述のように $t/T = 1000 \sim 1250$ 間でケーソンが滑動し始めたためにその後 $t/T = 1310$ で実験を中止した。

図-8に安定限界を越える波高と算定限界波高との比 H/H_D と変形レベル S との関係を示した(鹿島ら, 1992)。変形レベル S は算定限界波高 H_D の 2 倍までは小さく、 $H/H_D = 2.0$ から 2.6 の間で急激に大きくなる。変形レベル S を従来から使われているハドソン式に基づく被害率 D に換算すると、 $H/H_D = 1.6$ では $D = 11\%$ 、 $H/H_D = 2.0$ で $D = 12\%$ 、 $H/H_D = 2.3$ では $D = 35\%$ でこの範囲では断面の変形は平衡に達した。しかし、 $H/H_D = 2.6$ では被害率 D に換算すると 100% を越えることになり、かつ平衡断面に至らなかった。

以上より規則波を用いた場合、消波ブロックの安定限界を越える波浪による消波工の変形は、ある波高までは顕著な変形は生じないが、この波高を越えると急激に変形が増加する。ただし、不規則波による消波工の変形レベルと波高との関係では、規則波のような傾向とは異なり波高の増加にしたがって変形レベルは単調に増加した(鹿島ら, 1993)。

3.2 波圧分布

前節で示した消波工の変形にともなうケーソンに作用する波圧、ならびに全波力とその作用点の変化を検討する。まず、図-9に消波工の変形の無い初期 ($t/T = 0 \sim 20$) における各測定点における波圧のピーク値の鉛直分布を 4 種類の波高について示した。また、図-10は、各波高を用いて合田の波圧式より波圧を求め、消波工による波圧低減係数 λ として標準的に用いられている $\lambda = 0.8$ を乗じた結果である。計算結果は λ を一定にしているために波圧の値は波高に比例し、波圧分布も相似形になる性質をもつ。これに対して、実験結果の波圧分布は波高と非線形の関係にあることがわかる。

表-2 合田波圧式による全波力の比較

波高比 H/H_D	実験値 $F_{XE}(\text{tf/m})$	合田式 $F_{XG}(\text{tf/m})$	実験値/合田式 F_{XE}/F_{XG}
1.6	1.00	1.13	0.88
2.0	0.97	1.44	0.67
2.3	1.12	1.65	0.68
2.6	1.16	1.93	0.60

全波力の比較を表-2に示した。ただし、表-2中の合田式による全波力 F_{XG} は消波工のない場合の計算結果 ($\lambda = 1.0$) である。実験値 F_{XE} との比を同表中に示した。本実験で用いた消波工は 1 種類の大きさの消波ブロックからなり、純

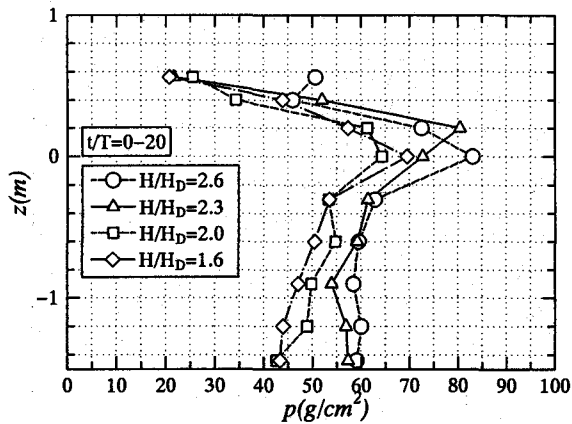


図-9 初期 ($t/T = 0 \sim 25$) における波圧分布

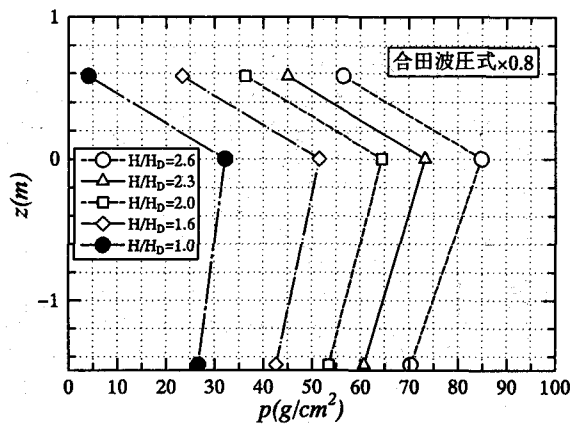


図-10 合田波圧式 $\times 0.8$ の波圧分布

粹に λ に及ぼす波高の影響を表している。本実験結果は波高の増加にしたがって $\lambda = 0.88$ から 0.60 に減少し、高橋ら(1989)の得た傾向と一致した。谷本・小島(1983)は波高低減係数を相対水深の関数として実験式を得ているが、消波工における波のエネルギー減衰は抗力に比例するから波高の増加にしたがって波力低減係数が減少するのが妥当である。

表-3は全波力 F_x の作用点 l_z の比較を示したものである。ただし、 l_z はケーソン底面からの高さを意味する。波圧分布には、図-9と図-10に示したような差があるものの、全波力の作用点にはそれほど顕著な差はなく、高々5%程度の差である。したがって、ケーソンの転倒に対する波力モーメントの大きさは消波工の変形がない状態に対して、合田式を用いて算出する場合波力の値に依存する。これに対して、消波工の変形がある場合には後述するように波圧の鉛直分布が顕著に変化し作用点が高くなるために、波力モーメントの増加

表-3 波力の作用点の比較

波高比 H/H_D	実験値 $l_{zE}(\text{m})$	合田式 $l_{zG}(\text{m})$	実験値/合田式 l_{zE}/l_{zG}
1.6	1.03	0.98	1.05
2.0	1.00	1.00	1.00
2.3	1.00	1.01	0.99
2.6	1.04	1.01	1.03

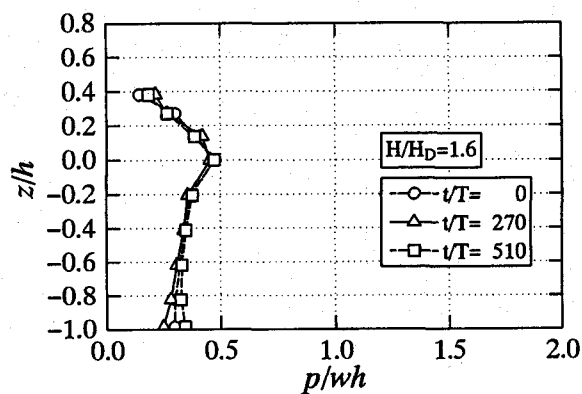


図-11 波圧分布, $H/H_D = 1.6$

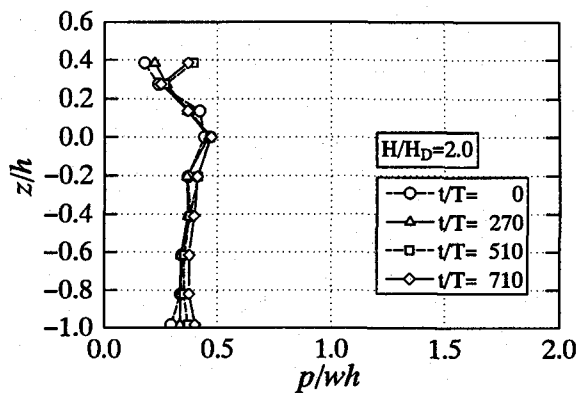


図-12 波圧分布, $H/H_D = 2.0$

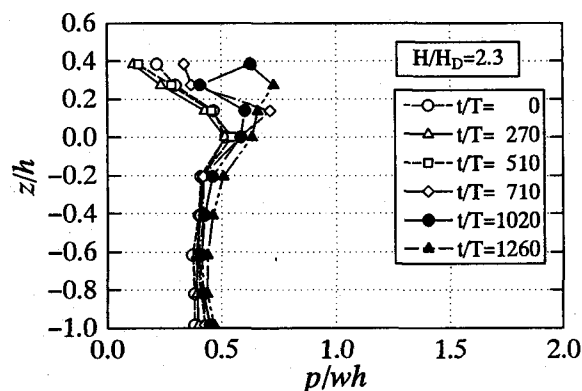


図-13 波圧分布, $H/H_D = 2.3$

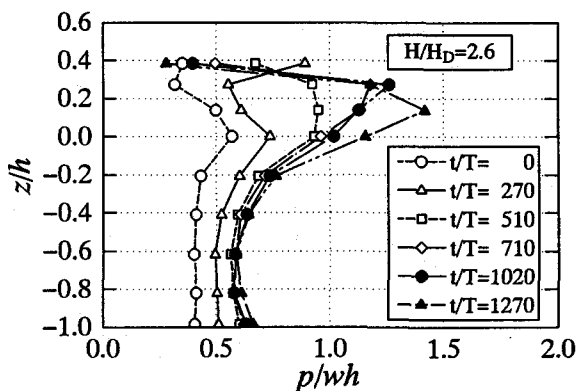


図-14 波圧分布, $H/H_D = 2.6$

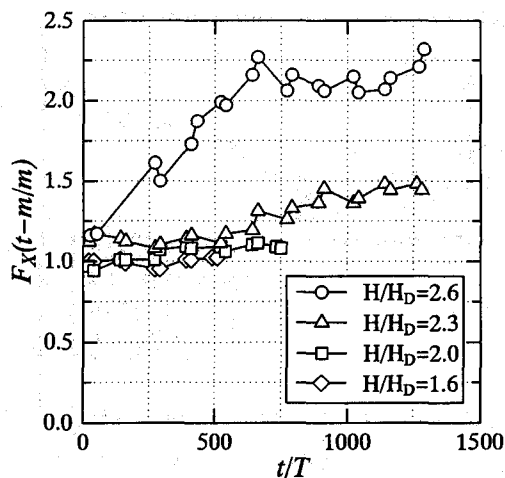


図-15 波力 F_X の経時変化

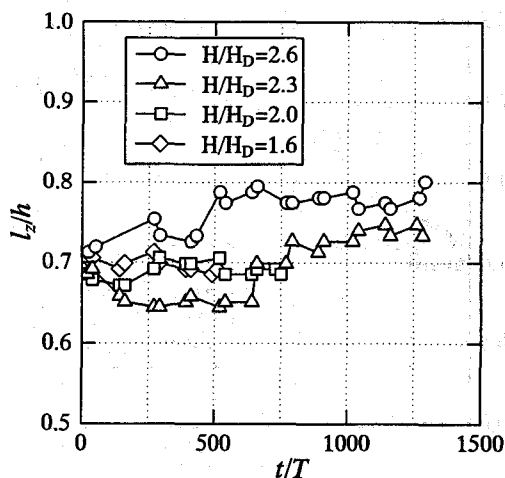


図-16 波力 F_X の作用点 l_z の経時変化

に影響を及ぼす。

図-11から図-14に各波高での波圧の鉛直分布の時間的な変化を示した。図-11の $H/H_D = 1.6$ の結果では変形レベルは最大で $S = 3.2$ (被害率 $D = 11\%$) であり、波圧分布の変化はほとんどない。図-12の $H/H_D = 2.0$ ではほとんど同じ $S = 3.5$ (被害率 $D = 12\%$) で、波高が大きいために消波工の薄い天端近傍の波圧の増加がみられる。いずれの場合でもこの程度の消波工の変形はケーソンに及ぼす波力の増加に影響を及ぼさない。

図-13に示した $H/H_D = 2.3$ では消波工の変形により静水面上の波圧が明瞭に増加した。静水面以下の波圧も僅かながらに増大している。さらに、図-14の $H/H_D = 2.6$ になると、図-6にみられたようにパラペットが露出するまでに消波ブロックが移動し、変形後の消波工の天端高さがほとんど静水位まで低下したためにパラペット近傍では消波工がある場合の約3倍の波圧が作用し、静水面以下の領域でも波圧が約50%増加した。

図-15と図-16に消波工の変形にともなう波力 F_X ならびにその作用点 l_z の経時変化を示した。ここで、作用点 l_z は海底面からの高さであり、図-16では水深 h で無次元化して示した。波高比 $H/H_D = 1.6$ では変形量が僅かであったため、波力の増加ならびに作用点の変化はほとんど認められない。波高比 $H/H_D = 2.0$ では波力の増加が僅かに認められ、その増加率は約10%であった。さらに、波高比 $H/H_D = 2.3$ のケースでは、波作用の経過とともに波力 F_X が単調に増加し初期の波力の1.5倍程度までに増加した。波高比 $H/H_D = 2.6$ のケースでは t/T までは直線的に増加し、その後変化率は小さくほぼ一定になっているが、初期の波力に比べて約2倍にまで増加した。波力の作用点の変化は、最も変化の大きい波高比 $H/H_D = 2.6$ のケースでも水深の20%程度であるが、波力の増加にしたがって作用点が高くなるために波力モーメントは非線形的に増大することになる。

図-17に消波工の変形レベル S と波力 F_X との関係を示した。波高と算定限界波高との比 $H/H_D < 2$ の範囲では変形レベル S が6程度であり、消波工の変形による波力の増加はほとんどみられない。また、 $H/H_D = 2.3$ の場合にも $S \sim 10$ までの変形の範囲では波力の増加はほとんどない。しかし、この条件でも変形レベル S が10を越えると波力が急激に増加する。さらに、 $H/H_D = 2.6$ のケースでは消波工の変形により変形レベル S が増加するにしたがって波力が線形的に増加し、 $S \geq 30$ で初期の波力の約2倍にまで増加した。この状況のもとでケーソン模型の滑動が生じたために実験を中止した。

図-18は、図-17の実測の波力を消波工のない条件での合田の波力値で無次元化し波力低減係数 λ で表したものである。今回の実験結果によると $S \sim 10$ までの消波工の変形量の範囲では波力の増加はほとんど認められない。 $H/H_D = 2.3$ の $S > 10$ の場合と $H/H_D = 2.6$ でみられるように顕著な消波工の変形は、逆に消波工がない場合よりも大きな波力を作用させることになる。

本実験で波高比 $H/H_D = 2.6$ の条件で消波工の変形が進行し、図-6で示したようなパラペット前面の消波ブロックがなくなった形状の時にケーソンが移動した。この時の波力(厳密には透過波力)は、10波の平均値で図-15に示したように $F_X = 2.32tf$ であった。一方、単位幅当たりのケーソンの水中重量 W'_C は $W'_C = 5.63t/m$ であり、波力 F_X との比は $F_X/W'_C = 2.32/5.63 = 0.41$ となる。摩擦係数 $\nu = 0.4$ 程度で移動したことになるが、1波1波の波力を調べてみると、 $t/T = 1250$ 以降当たりから10波平均値の約2倍の波力が作用していることがわかった。ケーソンはコンクリート製で水路内に作製した水平コンクリート床に直接設置した。このため、コンクリート面同士の摩擦係数は通常用いられているケーソン底面と捨石との摩擦係数 $\nu = 0.6$ よりも大きいものと考えられる。また、消波ブロック荷重(消波ブロックの寄掛力と消波ブロックを介して作用する波力)の寄与に関しては本実験では検討していないが、高橋ら(1989)によると波高が大きい場合にはブロック荷重は小さくなる。以上の考察より、本実験では衝撃的な波力により滑動したのと考えられる。

本実験では、消波ブロック重量に対してハドソン式から算出される安定限界波高の2.6倍の大きさの波高を作用させて消波工の変形を生じさせた。この波高に比して天端高さが相対的に低くなったために、顕著な越波が生じるとも

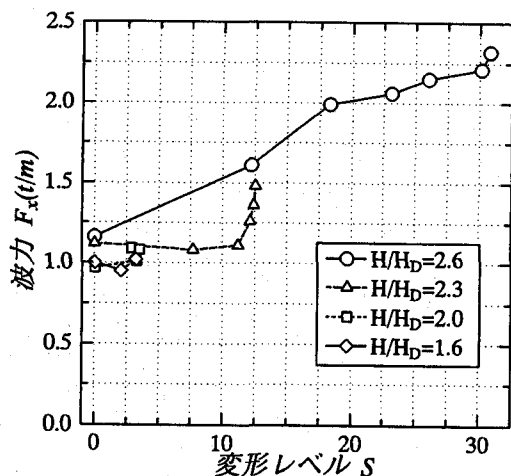


図-17 変形レベル S と波力 F_x との関係

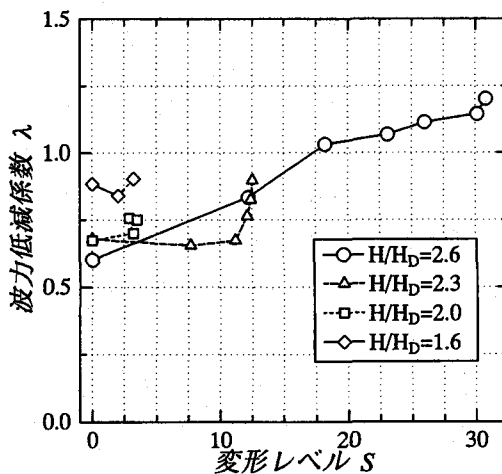


図-18 変形レベル S と波力低減係数 λ の関係

に消波ブロックの移動が天端にまで及んだ。消波工の変形は安定な“S字型断面”に落ち着くことが報告されている (Bruun and Johannesson, 1976)。越波による伝達波を抑制するためにも天端高さをより高くする必要がある。これにより越波による伝達波を低減すること、および消波工の変形形状は静水位近傍のみの消波ブロックの移動による安定な断面である“S字型断面”になることが期待できる (鹿島ら, 1993)

4 おわりに

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下の通りである。

1) 消波工の波圧低減効果

消波工の波圧低減係数 λ は、消波工の変形がない場合には $\lambda = 0.9 \sim 0.6$ 程度で、波高が大きくなるにしたがって λ は減少する。

2) 消波工の変形にともなう波圧の変化

消波工の変形レベル S が $S < 10$ (被害率 $D < 34\%$) の範囲では顕著な波圧の変化は認められなかった。しかし、パラベット前面の消波ブロックが転落し、消波工の高さが静水面近くまで低下すると急激に波力が増大し、ケーソンの滑動を引き起した。

3) 許容される消波工の変形形状

消波工の厚さが薄い天端近傍の変形が防波堤の安定性に及ぼす影響が強いことが明らかになり、消波工の変形は静水面近傍に止め、天端まで及ばない程度にする必要があることがわかった。

4) 防波堤の構造耐力を踏まえた設計に関する見通し

防波護岸の場合には、消波工の変形により越波流量が増大する場合があるが、越波排水路により処理可能な見通しが得られている。防波堤の場合には、変形により波圧が増大するが、背後にも消波ブロックや石を設置して反力をとる手段が期待できることや、耐用年数の間の滑動量の累積値を算定し、機能上支障の無い滑動量に収められることを評価することによって、消波工の変形を許容した防波堤の合理的な設計法が成立するものと考えられる。

最後に、本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の1部として実施したものであることを付記する。また、実験ならびに図面作成には(株)八重洲土木技術センター吉岡武男氏と(株)CRS千代大介氏に協力して頂きました。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 鹿島達一・阿部宣行(1992): 沖合人工島外郭施設の耐波設計について, ウォーターフロント開発シンポジウム講演論文集, pp.251-256.
- 鹿島達一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1992): 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について, 海岸工学論文集第39巻, pp.671-675.
- 鹿島達一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集第40巻(印刷中).
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎(1989): 消波ブロック被覆堤ケーソンの波力と滑動に関する実験的研究, 海岸工学論文集第36巻, pp.594-598.
- 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砕波力の発生と対策について, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第2号, pp.3-39.
- 谷本勝利・小島朗史(1983): 傾斜堤上部工およびブロック式混成堤に働く波力, 港湾技術研究所資料, No. 450, 32p.
- Bruun, P and P. Johannesson(1976): Parameters affecting stability of rubble mound, ASCE, J. of the Water ways, Harbors, and Coastal Engineering Division, Vol.102, No. WW2, pp.141-164.
- Van der Meer, J.W.(1987): Stability of breakwater armour layers design formulae, Coastal Engineering, 11, pp.219-239.