

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

鹿島 遼一*・柿山 勉*・松山 昌史*
関本 恒浩**・京谷 修***

1. 緒 言

港湾の外郭施設には粘り強い構造をとるべきことが指向されてきた歴史的経緯がある(伊藤ら, 1966)。しかし, 数10年に1回程度の通常の設計条件を越えるような外力下での構造物の粘り強さを設計に組み入れることは, 未だ希である。著者の1人は, 沖合人工島の外郭施設の設計について, 構造耐力を考慮した設計の考え方を提案し, その技術的な概略見通しを示した(鹿島ら, 1988; 鹿島・阿部, 1992)。この概念は, 通常の設計波に対しては現行の設計法を満足し, それを越える極めて希な外力に対しては, 消波工の多少の変形は許容し, 人工島に要求される機能を維持するとするものである。捨石堤に関しては, 平衡断面を考慮した設計法(樺木・柳, 1983)や動的安定性に基づく設計法(van der Meer・Pilarczyk, 1986; Ahrens, 1990)が提案されている。

そこで本研究では, 外洋からの波が直接作用する人工島の護岸(防波護岸)を想定し, 安定限界を越える外力に対する消波工の変形過程と防波機能の変化特性について水理実験で得た基礎的なデータに基づいて述べる。

2. 実験方法と実験条件

ブロック重量 W に対してハドソン式から算定される波高 H_D (ここでは算定限界波高と呼ぶ) の2倍以上の波を作用させるため, 入手可能なブロックと造波能力を勘案し, 現地換算値で $H_D=7.86\text{ m}$ と $W=36.8\text{ t}$ を得た。ただし, K_D 値としては非砕波時のテトラポッドの値 10.2 (海岸保全施設設計便覧, 1969)を用いた。

実験は大型模型実験(縮尺 $\lambda=1/15.4$)と中型模型実験($\lambda=1/85.5$)の2種類について水路幅をも相似に行った。実験条件を表-1に示す。大型実験では消波ブロック重量 $W=10\text{ kg}$, 中型実験では $W=59\text{ g}$ を使用した。周期は現地換算値で $T=16\text{ s}$ の一定とし, 防波護岸の天端高さは波高 H_D に対して, 現地換算越波

流量が $0.05\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ となるように定めた。実験に用いた消波ブロック被覆ケーソン式護岸を図-1に示す。護岸設置水深は H. H. W. L. で 22.5 m とした。

実験では, 消波工の断面形状を波の作用時間 $t/T=250$ 毎に水路幅方向を4等分する3測線について測深した。大型模型実験ではレッドを用いて 0.05 m 間隔, 中型模型実験ではタッチセンサー式砂面計3台を用いて 0.01 m 間隔で測深した。ここでは3測線の平均値を用いて議論する。消波工の変形量の検討に当たっては, 図-2に示す van der Meer (1987) が捨石堤に対して導入した被害レベル $S=A/D_{n50}^2$ を用いた。ここに, A は侵

表-1 実験条件

	原型換 算 値	大型模 型実験	中型模 型実験
縮 尺 λ	1.0	1/15.4	1/85.5
ブロック重量 W	36.8t	10kg	0.059kg
算定限界波高 H_D (m)	7.80	0.506	0.091
進行波高・ 算定限界 波高比 H/H_D	規則波 1.6~2.3 不規則波 0.8~1.6	1.6~2.3	1.6, 2.3 0.8~1.6
ブロック重量 W	24.8t	6.8kg	
算定限界波高 H_D (m)	6.86	0.344	
進行波高・ 算定限界 波高比 H/H_D	規則波 1.6~2.6 不規則波	1.6~2.6	
周 期 T (s)	16.0	4.08	1.73
護岸設置水深 h (m)	22.5	1.46	0.263
天端高さ h_c (m)	9.0	0.58	0.105
海底勾配	1/100		
法面勾配	3/4		

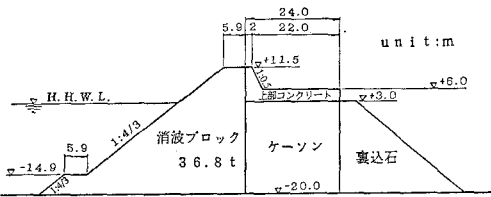
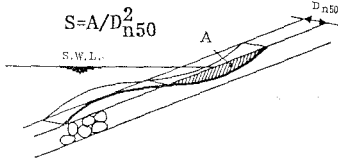


図-1 実験に用いた護岸断面形状

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所
** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
*** 正会員 東京電力(株)原子力建設部

図-2 Van der Meer (1987) の被害レベル S の定義

食面積, $D_{n50} = (W/\gamma_r)^{1/3}$ である。また, 移動個数も同時に数えた。 S を約 3.44 倍すればハドソン式に基づく被害率 D (静水面士 H の範囲で移動した個数と表層 2 層のブロック数の比) に換算することが出来る。さらに, 越波流量, 反射率の経時変化を調べ, 消波工の変形にともなう防波機能の変化を調べた。

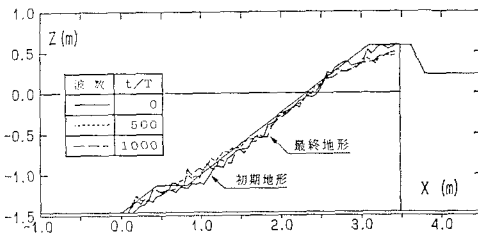
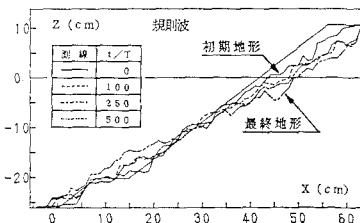
大型実験では規則波を, 中型実験では不規則波を対象に実験を行い, さらにブロックの安定性のスケール効果について規則波実験も行った。大型実験では算定限界波高 H_D の 2.3 倍 (護岸設置水深での発生限界波高) の波高の波を 1000 波作用させても顕著な変形が生じなかったために, これより小さい重量 $W = 6.8 \text{ kg}$ のブロックを用いて追加実験を行った。この重量に対する算定限界波高は $H_D = 6.86 \text{ m}$ で, この波高の 2.6 倍までの波を作用させることができた。

3. 変形過程と防波機能の変化に関する結果と考察

3.1 規則波実験による実験スケール効果

消波ブロックの安定性に関して, 実験スケール効果が確認されている (島田ら, 1986; 榊山・鹿島, 1989)。そこで, 消波工の変形に対してもこの影響を調べた。

図-3 は波高 H_D に対して 2.3 倍の波高を作用させた

(a) 大型実験 ($Wm = 10 \text{ kg}$, $\lambda = 1/15.4$, $H/H_D = 2.3$)(b) 中型実験 ($Wm = 0.059 \text{ kg}$, $\lambda = 1/85.5$, $H/H_D = 2.3$)図-3 護岸消波工の変形過程 (規則波実験, $Wp = 36.8 \text{ t}$)

場合の消波工の変形過程を示したものである。図-3(a) は大型実験結果で波の作用時間は $t/T = 1000$, また 図-3(b) は中型結果で, $t/T = 510$ まで作用させた。移動個数ならびに断面形状の変形量の両者とも中型実験のほうが大きく, 実験スケールの影響が認められた。

図-4 に波高比 $H/H_D = 1.6$ と 2.3 の被害レベル S の経時変化を示した。最終変形量が小さい場合には変形は初期に生じ, その後はほとんど変形が進まない。図中の ■ 印の結果は増加の傾向を示しているが, $t/T = 250$ から 500 にかけてブロックの移動は認められなかった。変形量が少なく測深誤差の範囲の変動であり, この場合も平衡断面に達した。変形量の大きい中型実験の ○ 印の結果は $t/T = 510$ においても変形は収束しなかった。

図-5 に越波流量 q の経時変化を示す。図-4 に示

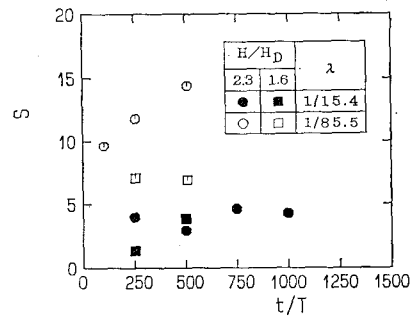
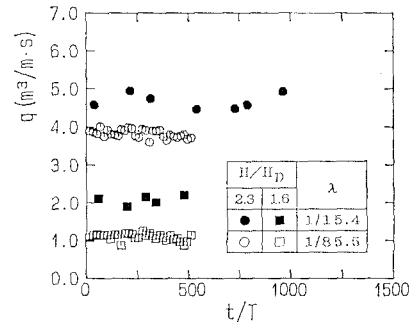
図-4 被害レベル S の経時変化と実験スケール効果

図-5 越波流量の経時変化と実験スケール効果

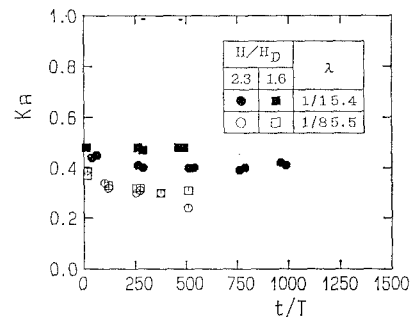


図-6 反射率の経時変化と実験スケール効果

したように、中型実験の波高比 $H/H_D=2.3$ の結果を除き、消波工の変形が生じなかったために、越波流量の時間的な変化はほとんどない。断面変形がある程度顕著に生じた○印の越波流量の経時変化も他のケースと同様にほぼ一定であり、被害レベル $S=15$ 程度では越波量流の機能維持に及ぼす影響は認められない。

また、波高比 $H/H_D=1.6$ と 2.3 とも大型実験結果が大きめの値を示している。越波流量の実験スケール効果に関する研究はほとんどなく、岩垣ら (1968) が鉛直堤の越波流量に関して検討しているのみである。被覆層がある場合には被覆層内における波のエネルギー損失が越波現象に影響を及ぼすため、鉛直壁の越波とは異なり、実験スケールの影響を受け易いものと考えられる。

図-6 に反射率に関する大型と中型実験結果との比較を示す。中型実験では波の作用にともなう消波工の断面変形が進行したため、反射率が緩やかに減少している。これに対して、大型実験は変形量が小さいため、それぞれの波高条件で反射率は時間の経過によらずほぼ一定である。そこで、変形が小さい初期の反射率を比較すると、大型実験のほうが越波流量が大きいにもかかわらず、反射率は大きめの値を得た。

越波流量、反射率とも大型実験のほうが大きくなったことは、大スケールの実験の抗力が相対的に小さく、エネルギー損失が小さいことと符合し、既往の安定性、反射率・透過率に関する実験スケール効果と同一の概念で説明できるものと思われる。しかし、越波流量に関しては測定精度の問題もあり、定量的な議論を含め、今後データの蓄積を計るとともに検討を必要とする。

3.2 規則波による大型模型実験

以上のように、 $W=10\text{ kg}$ のブロックを用いた大型実験では、 H_D の 2.3 倍の波高を継続して作用させても消波工の顕著な変形が認められなかった。そこで、これより小さいブロック ($W=6.8\text{ kg}$) を用いて追加実験を行った。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実験を実施した。

図-7 に波高比 $H/H_D=2.6$ での消波工の断面形状の経時変化を示す。時間の経過とともに変形が進行し、パラペット前面での侵食、法先での堆積が明瞭に生じた。侵食と堆積部分の境界が時間に依らず一定の水深で生じている。最終的な落下個数は正確には確認できなかったが、 $t/T=250$ で落下した個数は71個で、パラペットを乗り越えた総数は28個であった。

このような顕著な変形を生じた場合には、変形は水路の一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次元断面で実験を終了した。

図-8 に各波高条件での被害レベルの経時変化を示す。波高の大きさと最終変形量、平衡断面に達する時間

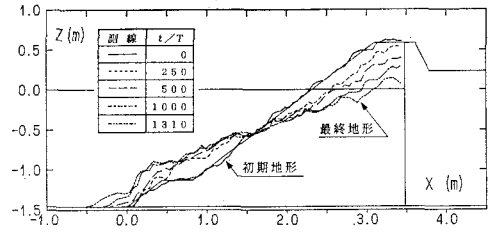


図-7 顕著な変形を生じた場合の護岸消波工の変形過程 (規則波実験, $Wm=6.8\text{ kg}$, $\lambda=1/15.4$, $H/H_D=2.6$)

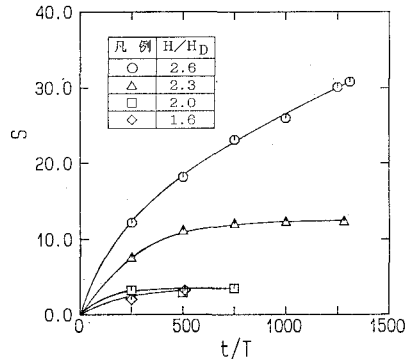


図-8 被害レベル S の経時変化 (規則波実験, $Wm=6.8\text{ kg}$, $\lambda=1/15.4$)

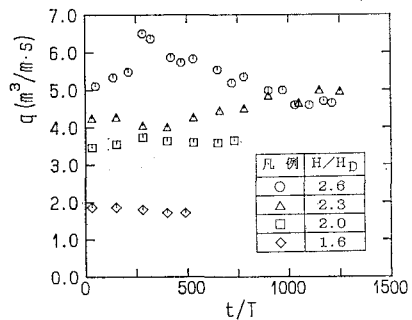


図-9 消波工の変形にともなう越波流量の経時変化

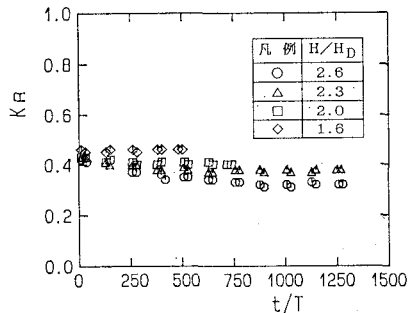


図-10 消波工の変形にともなう反射率の経時変化

との関係が明瞭に表されている。 $H/H_D=2.3$ では緩やかに変形が進行し、 $t/T=750$ で変形が収束した。 $H/H_D=2.6$ では $t/T=1000\sim1250$ 間で護岸ケーソンに

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-9 に越波流量の経時変化を示す。変形量が小さい範囲では越波流量の変化は認められない。 $H/H_D=2.3$ では初期に $q=4\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ であったのが、変形が進むにしたがって増加し最終断面では $q=5\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ となった。また、 $H/H_D=2.6$ では $t/T=250$ で越波流量がピークを示し、その後減少した。初期地形では法肩にブロック2個幅の消波工があるが、 $H/H_D=2.3$ では最終地形で、また、 $H/H_D=2.6$ では $t/T=250$ で、パラペット先端から直線的な斜面となり、波が遇上し易くなった。 $H/H_D=2.6$ では、さらに変形が進行し、パラペットの直立部が露出し、波が鉛直上向きの運動に変えられ、越波量が減少したものと判断できる。

本実験条件での、越波流量は最大で $6.5\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ を得た。この値は御坊発電所の最大波に対する許容越波流量 ($8\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) と同程度であり大規模な越波排水路で対応可能な値であるが、許容越波流量、越波排水路、天端高さの合理的な関係について検討を加える必要がある。

図-10 に反射率の経時変化を示した。図-9 と対応させると、入射波高が大きくなり、越波流量が増加するにしたがって、反射率は減少することが確認できる。断面変化のほとんどない $H/H_D=1.6, 2.0$ では反射率は波の作用中にほとんど変化しない。越波流量が20%程度増加した $H/H_D=2.3$ においてもほとんど変化が認められない。また、 $H/H_D=2.6$ では、反射率が0.4から0.3程度に緩やかに減少したのみで、 $t/T=250$ の越波流量の最大時に対応する反射率の変化はみられない。

図-11 に安定限界を越える波の波高比 H/H_D と被害レベル S との関係を示した。被害レベル S は算定限界波高の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。ハドソン式に基づく被害率に換算すると、 $H/H_D=2.0$ で約12%、 $H/H_D=2.3$ では65%でこの範囲では断面の変形は平衡に達した。しかし、 $H/H_D=2.6$ では平衡断面に至らなかった。

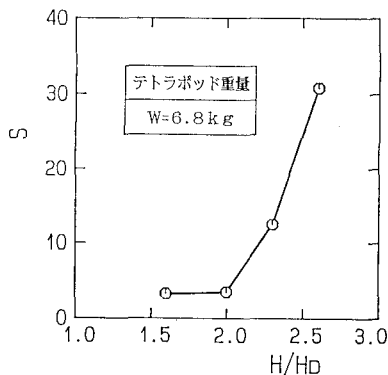


図-11 限界波高以上の波高と被害レベル S との関係

3.3 不規則波による中型模型実験

不規則波による消波工の変形過程を、Wallops 型スペクトルを用いて入射波スペクトル形状を変えて調べた。

図-12 に不規則波実験結果の1例として、Wallops 型スペクトルの形状母数 $m=5$ (Bretschneider・光易型のスペクトルに一致) で有義波高比 $(H/H_D)_{1/3}=1.6$ の場合の消波工の変形過程を示す。規則波実験と同様に侵食と堆積の境界がほぼ一定水深で生じている。また、形状は安定形状といわれるS字型 (Bruun and Johannesson, 1976) とは異なり直線的である。これは天端高さが低く、ブロックの移動が天端にまで及んだためである。天端高さを高めた補足実験では、S字型の断面が得られた。

図-13 に被害レベルの経時変化について、母数パラメータ $m=5$ のケースを示した。断面の変形は、図-9 の重量 $W=6.8\text{ kg}$ の規則波の結果と同様に、初期段階で変形が終了し、その後は安定となる場合と、波の作用とともに変形が進行する場合の2つのパターンがみられる。これは入射波高の大きさに依存し、前者のパターンは波高比 $H/H_D=0.8\sim 1.4$ の条件で生じ、後者は $H/H_D=1.6$ の条件で生じた。

図-14 に母数パラメータ $m=3$ と5の $t/T=3000$ での被害レベル S と波高比 H/H_D との関係を示す。 S は $H/H_D=1.4$ までは緩やかに増加し、変形に対して粘り強い性質を示している。しかし、 $H/H_D=1.6$ を越すと変形は急激に増加する。この結果から波高比 $H/H_D=1.4$ までは被害率に換算するとブロックの移動は約

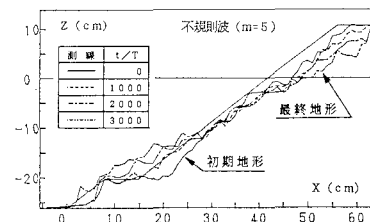


図-12 不規則波実験での護岸消波工の変形過程 ($Wm=0.059\text{ kg}$, $\lambda=1/85.5$, $m=5$, $H/H_D=1.6$)

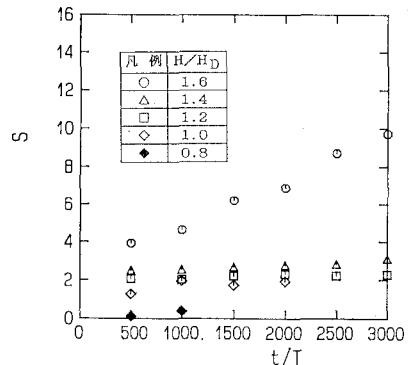


図-13 不規則波実験での被害レベル S の経時変化 ($Wm=0.059\text{ kg}$, $\lambda=1/85.5$, $m=5$)

13.5% 以下で、安定形状に収束することが分かった。

図-15 は $t/T=3000$ での越波流量と波高比との関係を示したものである。 $H/H_D=1.6$ の条件になると急激に越波量が多くなる。これは消波ブロックの変形が進むにつれて越波量が増えるため、消波ブロックの変形が $H/H_D=1.6$ の波高比で急激に進むためと考えられる。

図-16 に規則波と不規則波の被害レベル S の比較を示す。規則波では比較的早く平衡状態に達するため、不規則波実験の $t/T=500$ での結果を示した。同じ波作用時間では、規則波の方が大きめの結果となる。しかし、不規則波のほうが変形が長時間におよび 図-14 に示した最終被害レベルは規則波の 1.5 倍程度となり、既往の

成果と一致した (van der Meer and Pilarczyk, 1986)。

5. 結 言

本研究では、消波工の変形過程と防波機能の変化について水理実験に基づいて検討を加えた。現行の設計法に基づく限界波高を越える波に対して変形の進行と機能の低下が一気に進むものではないことが明らかになり、この裕度を見込んだ設計法が成立する可能性が確認された。今後は、不規則波を対象として大型模型を用いた確認実験を行うとともに、中型模型を用いて波浪ならびに護岸構造の形状が変形過程と機能維持に及ぼす影響について詳細な実験を実施し、構造耐力を考慮する設計概念の成立性についてさらに検討を進める予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり、土木学会原子力委員会海域分科会（主査 合田良実 横浜 国立大学教授）、同耐波浪設計 WG（主査 西村仁嗣 筑波 大学教授）の主査ならびに委員、メンバーの各位には数多くの貴重な助言を賜りました。また、実験、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

- 伊藤喜行・藤島 陸・北谷高雄 (1966): 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻, 第14号, 134 p.
- 岩垣雄一・井上雅夫・金田孝之 (1968): 海岸堤防の越波実験における縮尺効果について, 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 282-286.
- 鹿島遼一・高階實雄・島田真行・今泉正次・植田和哉 (1988): 沖合人工島外郭施設の設計の考え方について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 602-606.
- 鹿島遼一・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.
- 関西電力株式会社 (1984): 越波排水路の設計, 御坊発電所工事誌人工島を築く, 2-3-9, pp. 186-222.
- 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.
- 榊木 亨・柳 青魯 (1983): 捨石防波堤の複合断面設計に関する基礎的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 361-365.
- 島田真行・藤本稔美・斎藤昭三・榊山 勉・平口博丸 (1986): 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 442-445.
- Ahrens, J. A. (1990): Dynamic revetments, Proc. 22nd ICCE, pp. 1837-1850.
- Bruun, P. and P. Johannesson (1976): Parameters affecting stability of rubble mound, ASCE, J. of the Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division, Vol. 102, No. WW2, pp. 141-164.
- Van der Meer, J.W. and K.W. Pilarczyk (1986): Dynamic stability of rock and gravel beaches, Proc. 20th ICCE, pp. 1713-1726.
- Van der Meer, J.W. (1987): Stability of breakwater armour layers design formulae, Coastal Engineering, 11, pp. 219-239.

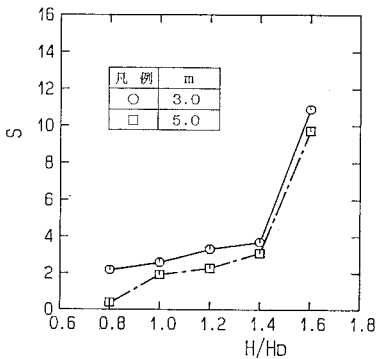


図-14 限界波高以上の波高と被害レベル S との関係

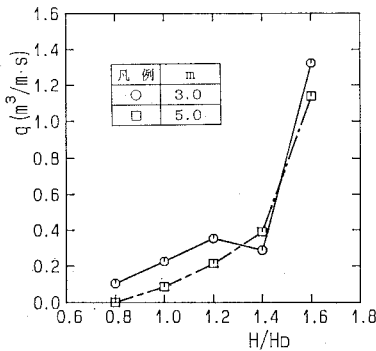


図-15 限界波高以上の波高と越波流量との関係

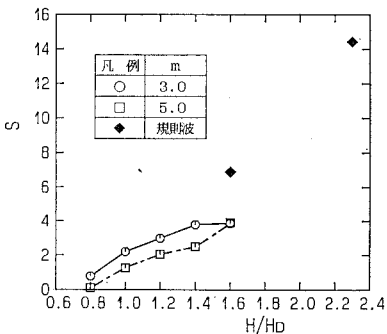


図-16 被害レベル S に及ぼす規則波と不規則波の影響