

ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック堤の破壊機構

富樫宏由*・平山康志**・杉山正弘***

1. 緒 言

昭和 58 年 5 月の日本海中部地震津波は、はっきりとそれがソリトン分裂津波であることが目視又は影像として記録された、近年では世界的にも珍しい津波であった。これによって秋田県の峰浜海岸では、汀線から 30～50 m 陸側に設置されている、主として 4 t 型 3 連ブロック積の消波ブロック堤の一部が破壊され、ブロックが砂浜上に 100 m 前後に亘って広範囲に散乱した。

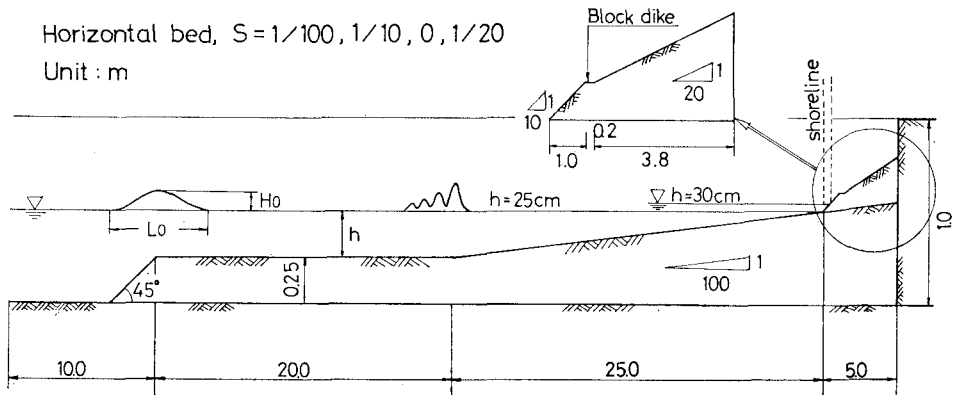
本研究は、このソリトン分裂遡上津波による消波ブロック堤の破壊のメカニズムを実験的に解明することを目的とする。前論文では¹⁾、ブロック堤から飛散して陸上に孤立した 1 個のブロックに作用する波力を調べ、津波の波力によってブロックが転動する可能性のある範囲、即ちブロック最大転動距離（又はブロック遡上長）は、現地海岸で観測されたブロック最大散乱距離（峰浜海岸では上述の 100 m 前後）と略々一致し、ブロックの散乱は波力による転動であり、津波の陸上遡上と密接に関連していることを明らかにした。

次いで本研究では、ソリトン分裂遡上津波による陸上

の消波ブロック堤の安定性に関する水理模型実験を行い、同時にブロック堤の中にあるブロックに働く波力を測定し、従来のハドソン公式による安定限界の評価並びに転倒と滑動に対する安定性の評価等を比較検討し、この種の津波による破壊力は従来の波浪によるものと比べて格段に大きく、消波ブロック堤は本研究で用いた配列例では容易に破壊することを明らかにした。

2. 実 験

対象とする津波は、前論文¹⁾に述べた通りで、分散する前の津波の周期は 10 分程度、沿岸で観測された分裂ソリトンの周期は 10 秒前後、その波高は所によって異なるが、最大 6～8 m であった（首藤の現地調査報告²⁾による）。これに対して用いた実験装置の概要は 図—1 に示す通りであるが、造波性能としての沖合い発生波の波高と周期、水平床上でのソリトン分裂の生成と選り分け増幅、海底斜面上での碎波減衰、連続的な陸上遡上の仕方等からして、実物のソリトン分裂津波の水理模型実験での再現性を考慮すると、縮尺は最大 1/40 程度が限度である。もう一方の異形ブロックの大きさは、実物



図—1 長波実験水槽と模型斜面勾配の概要

4 t 型 3 連ブロックの硬質プラスチック製模型の縮尺が 1/41 であった。従って、この他に波力計の構造と特性等も勘案し、模型縮尺は 1/41 とした。

* 正 会 員 工 博 長崎大学教授 工学部土木工学科
 ** 長崎大学技官 工学部土木工学科
 *** 学生会員 長崎大学学生 工学部土木工学科

模型斜面は、図-1 に示すように、 $s=1/100$ の海底斜面勾配はコンクリート製、陸上斜面勾配は、 $s=1/10$ の前浜はアルミ板製、 $s=1/20$ の後浜はアクリル板製で、その中間に長さ 20 cm の水平小段を設けた複合型であり、現地海岸の縦断地形に出来るだけ相似するように造ってある。ブロック堤を設置する水平小段上とそれに接続する $s=1/20$ の後浜斜面上 2 m には、ブロック堤全体と飛散したブロックの滑り止めのために、一面に砂を接着して粗度をつけた。

ブロック堤の配列の種類は、(1) 突き合わせ 2 層積、(2) 突き合わせ 3 層積、(3) 落とし突き合わせ 3 層積、の 3 つに大別され、その長手方向の中間部(水槽幅 1 m の全面に並べたもの)を切り出した形になる。実験水深は、主として $h=25$ cm としたが、 $h=30$ cm の場合もあるので、実験の種類はこれらの組み合わせとなる。

ブロック堤の被害判定基準は、 D (ブロック 1 個分以上移動) と D_s (ブロック 1/4 個分以上 1 個分以内移動) と定義し、 D 又は $D+D_s$ によって整理した。

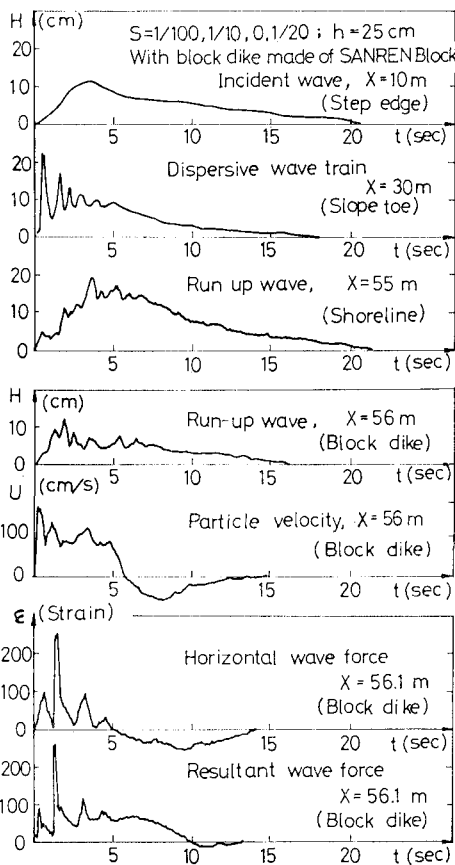


図-2 ソリトン分裂波の測定記録の一例

3. 結果と考察

(1) ソリトン分裂波上津波の特性

図-2 は、沖合い入射波が $H_0/h=0.48$ なる実験波の波形、流速及び波力の測定記録の代表的な一例である。図の一番上に示す、小段上の水平床始端 ($X=10$ m) に入射する分散前の波の特性をアーセル数 ($Ur=gH_0T^2/h^2$) で表わすと、これはブロック堤がない場合の汀線とブロック堤の位置における波高と流速の無次元量である波高水深比 (H/h)、フルード数 ($Fr=U/\sqrt{gH}$) 及びブロックレイノルズ数 ($Re=(U/\nu) \cdot (W/\gamma)^{1/3}$) 等と良く相関し、汀線とブロック堤位置に入射するソリトン分裂波

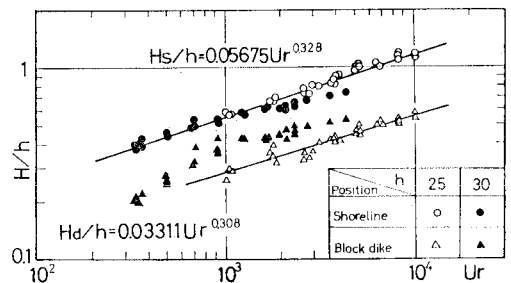


図-3 汀線とブロック堤位置の H/h と沖合い入射波の Ur の関係

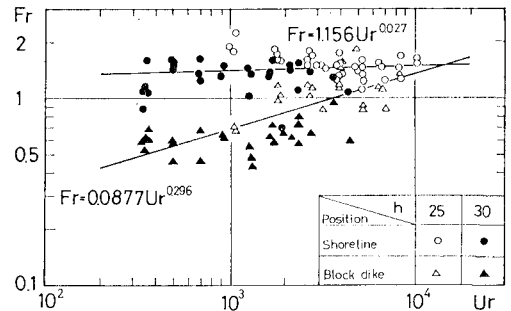


図-4 汀線とブロック堤位置の Fr と沖合い入射波の Ur の関係

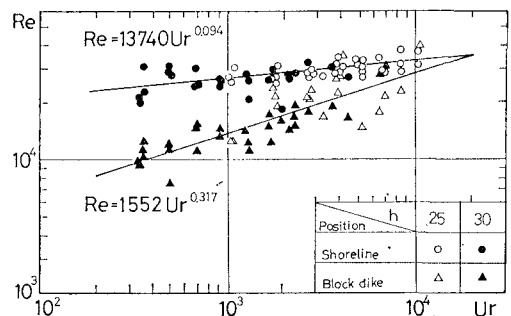


図-5 汀線とブロック堤位置の Re と沖合い入射波の Ur の関係

上津波の特性は、沖合い入射波の U_T によって略々統一的に把握されることがわかる (図-3~5)。

図-3 で、 $h=30$ cm の場合のブロック堤位置の波高は直線上にのらないので敢えて線を書いていないのは、 $U_T \approx 600$ を境にして、先頭ソリトンが 2nd から 3rd に分かれるためである。図-3, 5 に比べて図-4 の F_T のバラツキが多少大きいのは、波高と流速の各々のバラツキが二重になって影響しているためであろう。

(2) ブロック堤の安定限界とハドソン公式

従来、消波ブロック堤の波浪に対する安定性は、表層ブロックの安定限界重量に関するハドソン公式によって検討され設計されているので、この安定性の検討の仕方に倣って、ソリトン分裂週上津波がブロック堤の安定限

界を与える波高と波力及び安定数について、ハドソン公式によって与えられる結果と比較検討する。

a) 波高と波力について

図-6 に示す実験値は、ブロック堤の被害率 $D=2\%$ 以内の安定限界波高であり、波高はブロックに作用する第1波力の最大値に対応する先頭ソリトンの汀線波高である。この汀線波高はブロック堤からの反射波の影響を殆ど受けていない進行波性の強いもので、図-4 に示した $F_T > 1$ なる射流状の波にはほぼ相当するとみなしてよい。

ハドソン公式を適用するに当っては、 K_d 値は現行の $K_d = 10.2$ を用い、またブロックの配列の種類に対応するブロック堤法面勾配を用いているが、 $\cot \theta = 10$ はブロック堤の前浜勾配を適用している。図から明らかなように、4t ブロックに対する津波の安定限界波高は、ハドソン公式による値よりも概して小さい。

一方、図-7 は、図-6 の波高に対応する波力について、実験値とハドソン公式による値を比較したものである。実験値の波力 F_T は、合波力の $\cot \theta$ に垂直な成分波力であるが、ハドソン公式で予測される波力より数倍大きい。従って、図-6, 7 を対比してみると、津波は波浪に比べてより小さい波高でも、逆に波力は格段に大きいことがわかり、ソリトン分裂週上津波の極端な特性を示しているものといえよう。

b) 安定数 (Stability number): $N_s = H/[(S_r - 1) \cdot (W/\gamma)^{1/3}]$ について

図-6, 7 の場合と同様に、図-8 は被害率 2% 以内の安定数について、実験値とハドソン公式を比較したものである。図-6 の波高に対応して、ソリトン分裂週上津波に対する 4t 型 3 連ブロックの安定数は、ハドソン公式による値よりも概して小さく、津波に対してはブロック重量が不足で破壊し易いことを示している。

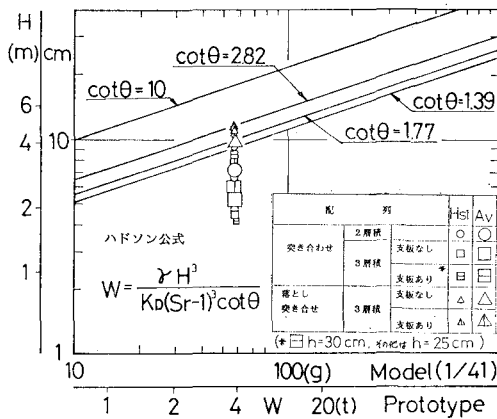


図-6 安定限界の $H \sim W$ に関する実験値とハドソン公式による値との比較

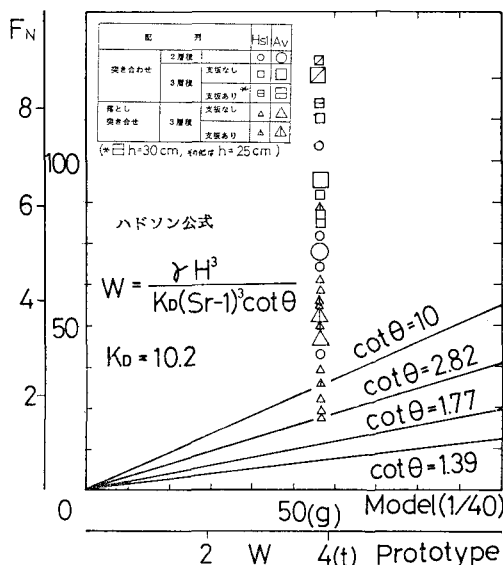


図-7 安定限界の $F_T \sim W$ に関する実験値とハドソン公式による値との比較

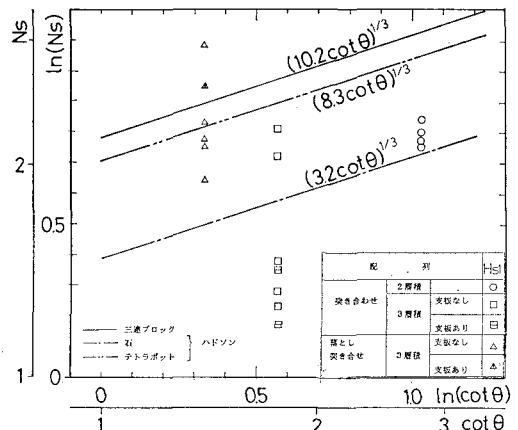


図-8 安定数 N_s に関する実験値とハドソン公式による値との比較

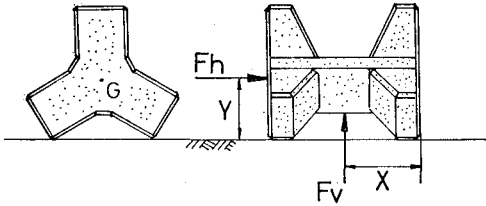
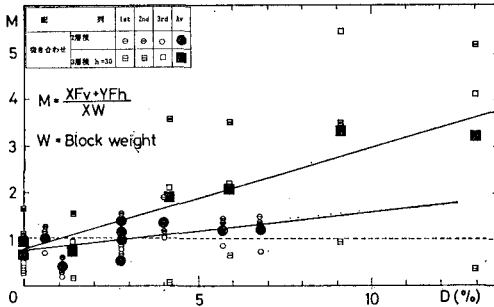
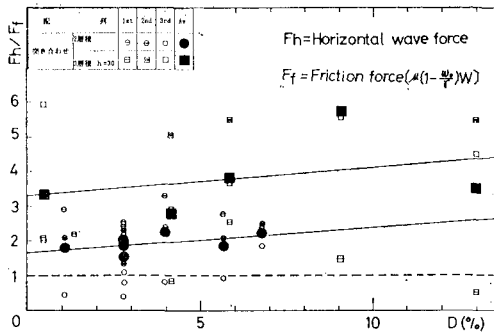


図-9 転倒に対する安定計算図

図-10 $M \sim D$ の関係図-11 $F_h/F_f \sim D$ の関係

(3) 被害率と被害要因による破壊のメカニズム

ブロック堤の安定性と破壊の仕方は、その配列の仕方によって多様で複雑であるが、ビデオ観察によれば、被害の発端は基本的にはやはりブロック堤の中にある1個のブロックに働く波力による転倒と滑動によって起こり、それが次々と波及して(場合によっては殆ど瞬時に)破壊が広がって行くと考えてよいようである。従って、先ずこの初動の波力を探るには、被害率が数%程度の範囲で安定性を検討すればよい。次いでこれとは別に、被害規模を増大させる被害要因を見出すために、被害率を数10%の範囲まで広げてその破壊性を検討した。

a) 転倒による被害

波力測定を伴うブロック堤の安定性実験の結果について、図-9に従って転倒に対する安定計算を行った結果を示したのが図-10である。1回の実験でのブロック堤

に入射する先頭ソリトン(これを新たに1stとする)から連続する2nd, 3rdの3つのソリトンの転倒モーメントの比 $M = (XF_v + YF_h)/XW$ の平均値から実験直線を求めている。安定限界 $M=1$ は概略の目安であるが、2層積では $D=2.8\%$ 、3層積では $D=0.9\%$ が交点となっており、ブロック堤の被害は、上層後列からの転倒によって始まることを示しており、上述のビデオ観察の結果を裏付けている。

また、各実験1回毎の M の大きさは、概して堤高の低い2層積では1st~3rdと次第に減少し、堤高の高い3層積では逆に1st~3rdへと増大する傾向がある。これは堤高と静水深の違いによって、越波と反射重複の仕方が異なること、汀線からブロック堤に衝突するまでの間の1stソリトンに追いつく2ndソリトンの位置が異なること等の理由によるものである。被害は不規則で一律には起こらないが、被災する瞬間は2nd又は3rdソリトンによる場合が多く、時には4thソリトンの場合もある。

b) 滑動による被害

図-11は、滑動による被害を示している。ブロック堤は滑動に対する定安性はよくないようで、容易に被災することがわかる。上図の転倒による被害とは異なり、2層積、3層積共に被害率の大きさと余り関係なく、直線の勾配が緩やかで殆ど平行になっているのは、上層後列のブロックに対する F_h の効き方がほぼ一定であることを示している。ブロック前列の遮蔽効果によるものと思われる。

c) 被害規模を増大する被害要因

i) 汀線における水理量:

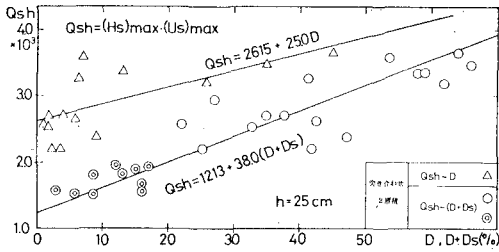
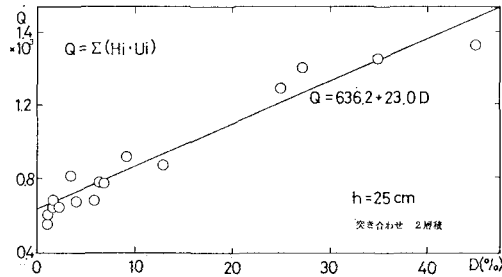
$$Q_{sh} = (H_s)_{\max} \cdot (U_s)_{\max}; \text{ について}^{3)}$$

図-12は、汀線における波高と流速の最大値の積である Q_{sh} と被害率の関係を示す。 $(H_s)_{\max}$ はおよそ汀線における部分重複波の最大波高に相応し、これは図-2からも推測されるように、1stソリトンの $(U_s)_{\max}$ とは位相が異なるので、 Q_{sh} は汀線での最大流量を意味するものではない。ブロック堤を破壊する要因は直接的には勿論波力であるが、被害率が大きくなるとは波力計は使用できないので、そうした破壊的な波力を与える素因の一つとして、 Q_{sh} なる水理量で被害率との関係を求めたものであり、比較的相関はよい。 $(U_s)_{\max}$ は主として滑動に、 $(H_s)_{\max}$ は主として転倒による被害に寄与し、その相乗効果が被害の増大をもたらすと考えられる。

ii) ブロック堤位置における水理量:

$$Q = \sum (H_i \cdot U_i); \text{ について}$$

図-13は、ブロック堤に入射するソリトン分裂週上波の先頭(1st)ソリトンから連続する4つのソリトンについて、各々の波高 (H_i) と流速 (U_i) の積を求め、それら

図-12 $Q_{sh} \sim D, D+D_s$ の関係図-13 $Q \sim D$ の関係

4波の総和(Q)と被害率の関係を示す。前の図-12の Q_{sh} とは異なり、 H_i と U_i は同位相の値であるから、 Q は各ソリトンの最大流量そのものを表わす。即ち、被害規模の大小は、ソリトン分裂週上津波の連続性と密接に関係していることを示しているといえよう。

iii) 汀線とブロック堤の位置における安定数:

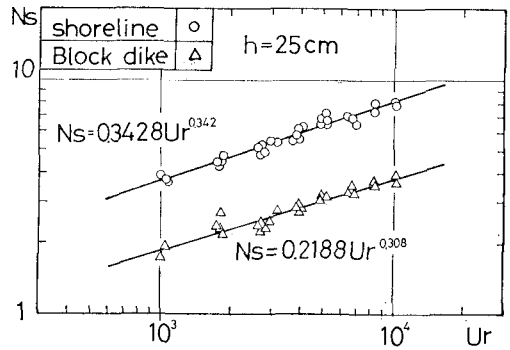
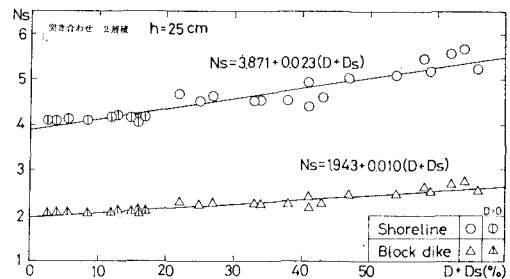
$$N_s = H / [(S_r - 1) \cdot (W/\tau)^{1/3}]; \text{ について}$$

先ず初めに、図-3に示したように、ブロック堤がない場合に汀線とブロック堤位置に入射する波高 H_s 、 H_d と沖合い入射波のアーセル数 U_r との関係がわかっているから、これを図-14に示すようにブロック堤を設けた場合の $N_s \sim U_r$ の関係に見直すと、同じ U_r の波をブロック堤に入射させた時の被害率 D 又は $D+D_s$ との関係が求められるので、 U_r を介して図-15に示す $N_s \sim (D+D_s)$ の関係が得られる。両者の相関は明瞭であるが、被害率による安定数の変化は非常に小さい。型通りに被害率0に相当する安定数を求めれば、汀線では約3.9、ブロック堤位置では約1.9となる。

4. 結 論

(1) 沖合い入射波の分散前の津波特性は U_r 数で代表され、それはソリトン分裂して選り分け増幅・碎波減衰後の汀線とブロック堤位置への入射波の特性量とよく相関し、更にそれがブロック堤の被害特性に影響する。

(2) 4t型消波ブロック堤の被害率2%以内の波高

図-14 汀線とブロック堤位置の N_s と沖合い入射波の U_r の関係図-15 汀線とブロック堤位置の N_s とブロック堤の $D+D_s$ の関係

と波力を安定限界として、これをハドソン公式による値と比較すると、ソリトン分裂週上津波の破壊力は従来の波浪によるものに比べて格段に大きいことがわかった。

(3) 消波ブロック堤は、波力による転倒と滑動によって被害が発生するが、概して先頭ソリトンよりも後続するソリトンによって、特に瞬時に被害が拡がって破壊する場合が多く、ブロックは波と共に飛散する。その被害規模はソリトン津波の分裂状況と連続性に影響される。

謝辞: 本研究は、文部省科学研究費補助金・自然災害特別研究(1)「日本海中部地震津波の発生・増幅機構と破壊力」(研究代表者: 首藤伸夫東北大学教授)による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 富樫宏由, 他: ソリトン分裂週上津波による消波ブロック散乱のメカニズムについて; 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 466~470, 1986.
- 2) 首藤伸夫: 秋田県北部海岸における日本海中部地震津波; 東北大学津波防災実験所研究報告第1号, pp. 12~26, 1984.
- 3) 岩崎敏夫, 他: 日本海中部地震における津波の流体力について; 東北大学津波防災実験所研究報告第1号, pp. 27~40, 1984.