60度以上の斜め入射波に対する消波工不連続部の
安定特性に関する実験的研究

Experimental Study on Stability Characteristics of Wave Dissipating Blocks Discontinuous Part
to Obliquely Incident Wave of 60 Degrees or more

内田吉文¹・小椋 進²・藤田智志³・森川高德⁴・吉田 要⁵・池尾 進⁵

Yoshifumi UCHIDA, Susumu OGURA, Satoshi FUJITA
Takanori MORIKAWA, Kaname YOSHIDA and Susumu IKEO

In the port to be deep water area toward an opening there are many examples which take over to the breakwater with wave dissipating blocks and extend upright breakwater. In this case a discontinuous part appears and it is just going to be anxious about a stability decline and wave force increase of the wave dissipating blocks. Therefore, this plane experimental study was clarified the stability characteristic of the wave dissipating blocks when a wave was entered on a discontinuous part at angles more than 60 degrees and the wave force characteristic to be acted to a caisson and we were able to obtain the underlyingly data of the future breakwater design.

1. はじめに

開口部に向けて大水深域となる港湾では、防波堤の建設コスト縮減の観点から消波ブロック被覆工区に続き、直立消波堤の工区を延伸させる事例が多くみられる。このような場合、消波工不連続部が現れ、消波ブロックの安定性低下や波力増大が懸念されるところである。

こうした中、本研究は、消波工不連続部（以降、不連続部と呼ぶ）に60度以上の角度で波が入射した場合の消波ブロックの安定特性及びケーソンに作用する波力特性を平面水理模型実験により明らかにし、今後の防波堤設計の基礎資料を得ることを目的とした。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所伊勢湾水理環境実験センターが所有する長さ30m、幅19m、深さ1.2mからなるピストン型単方向不規則波造波装置（位置制御）が設置された平面水槽のうち、導波板で仕切った幅約12.5m分において実施した（図-1参照）。

(2) 実験条件

実験縮尺は1/60、実験潮位、波浪諸元は表-1のとおり

1	国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 所長
2	国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 先任建設管理官
3	国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課
4 正会員	玉野総合コンサルタント(株) 流域技術部
5	玉野総合コンサルタント(株) 流域技術部

であり、不規則波の周波数スペクトルはプレットシュナイター・光易型を目標とした。

実験に用いた主防波堤の配置は図-1のとおりであり、延長500mで、下手から300m区間（1～15号函）が消波

図-1 実験水槽及び防波堤模型の平面配置

表-1 実験潮位及び波浪諸元

実験名	潮位 (m)	波の種類	波の種類			
			H (m)	T (s)	入射角 (度)	波数 波群
消波ブロック 安定実験	H.H.W.L+2.2	不規則波	8.0	17.3	61.6	1000 3
	L.W.L.±0.0		7.3			
波力実験	H.H.W.L+2.2	規則波	13.8	17.3	61.6	3 -
	L.W.L.±0.0		13.0			

* 消波ブロック安定実験のH、TはH1/3、T1/3である。

ブロック被覆堤，残り200m（16～24号函）が直立消波堤であり，300m地点付近の2函（14,15号函）に不連続部が現れることから（写真-1），次項の方法で，消波ブロック安定実験及び波力実験を実施し，不連続部での安定特性を検討した。

(3) 実験及び解析方法

消波ブロック安定実験では，50t型，64t型，80t型（比重2.3）及び80t型高比重（比重2.6）の各種消波ブロックを不連続部を含む2～15号函前面に配置し（表-2），先の不規則波について，3種類の波群を，各々，1000波以上を作用させた。被害状況は，「被災度」（検査範囲における単位ブロック幅（法線方向）当りの被害個数）として整理し，1ケースに対し，繰り返し回数3回（3波群）の平均を代表値とした。

解析では，許容被災度0.3を指標にその安定性を評価し，許容値を満足する消波ブロックの配置条件を検討した。

波力実験は，消波ブロック安定実験で安定性を確保した消波工条件のもと，不連続部となる14，15号函を対象に図-2のとおり前面各3ライン（計6ライン），底面各2ライン（計4ライン）に波圧計を，背面に三分力計を設置し，先の規則波を連続3波作用させて各部位に作用す

写真-1 消波工不連続部

表-2 安定実験ケース

ケースNo.	消波ブロックの配置条件
1	2～15号:50t型
2	2～13号:50t型、14～15号:80t型
3	2～11号:50t型、12～13号:80t型、14～15号:80t型高比重
4	2～9号:50t型、10～11号:80t型、12～15号:80t型高比重
5	2～5号:50t型、6～9号:64t型、10～11号:80t型、12～15号:80t型高比重
6	2～7号:50t型、8～9号:64t型、10～15号:80t型高比重

注) 斜線は消波ブロック設置範囲を示す

図-2 波圧計及び三分力計の設置位置

る1波当たりの平均波圧強度及びケーソン全体に作用する平均波力を求めた。1ケースに対し繰り返し回数3回とし，その平均を代表値とした。なお，実験では波高計にてケーソン前面・背面の水位変動も測定した。

解析では波圧計より得られた波圧強度とその合力及び合成波力について，既往の波圧式（合田，1973；高橋ら，1992）に基づく計算値と比較しながら不連続部における波圧特性を把握・評価した。また，三分力計より計測した波力の時系列と，ケーソン前面・背面における水位変動の時系列との比較より，波力に及ぼす回折波の影響を検討した。

3. 実験結果及び考察

(1) 消波ブロックの安定特性

図-3は，危険側となるH.H.W.L.+2.2mでの各函における各種消波ブロックの被災度を示したものである。これをみると，全区間50t型のケース1，不連続部の14,15号函を1.5倍の80t型としたケース2では，被災度が許容値0.3を大きく上回って安定性を確保できず，結果的に不連続部を含む10～15号函を80t型高比重，8～9号函を64t型にランクアップした配置（ケース6）で，ようやく，許容被災度を満足する結果となっている。

目視観察によれば，不連続部付近では，斜め入射に起因して，上手（直立消波工区）から発達しながら来襲した沿い波（反射波）と入射波の合成波高が回折波の影響を受けて増大し（写真-2参照），不連続部より下手の消

図-3 消波ブロックの被害特性

写真-2 回折の影響による前面波高の増大

波工天端部を砕波しながら進行して消波ブロックを転落させる状況を確認しており、60度以上という急角度入射がもたらす固有の被害と言える。

(2) 不連続部に作用する波圧特性

a) 時系列特性

図-4は、H.H.W.L.時で、波圧が高くなりやすい「静水面位置 (+2.2 m)」での各ライン (以降、Lと呼ぶ) における対象波3波の波圧時系列を示したものである。これを見ると、赤丸を付けた時刻でやや衝撃的な波圧が作用しているものの、一般に「衝撃砕波圧」と呼ばれるような「腰掛部の5~10倍に至る強大な波圧」はみられない。

これを詳細にみると、消波ブロックが前面にあるL2でもやや衝撃的な波圧が発生している。今回実験は波が60度以上の角度で入射するため、入射方向からみると、「消波工の被覆厚」はなく、消波ブロックの脚とケーソ

ン壁の間には空間が存在する。よって、波作用時にはこの空間の中で、「隅角部で発生する波エネルギーの集中」に似た現象が生じ、それが衝撃的な波形として現れるものと推測される。

また、上手側のL5~6 (15号函) では衝撃的な波形が多くなっている。この要因は、前面に消波ブロックが無いことに加え、「消波ブロックの安定特性」で述べたように、15号函付近では沿い波と入射波の合成により波高増大が生じているためと推測される。

なお、図-4中の黒線は最も下手のL1における各波の波圧ピーク時刻を示しており、上手側 (L2→) へ向かうに従いピーク時刻が徐々に早まり、最も上手に位置するL6のピークとは明瞭な時間差が生じている。この主な要因は、波が60度以上の角度で入射することで法線方向における波圧の作用時間に差が生じるためであり、このことは波力の分散を意味し、斜め入射波が持つ特性の1つと言える。

b) 波圧比分布特性

既往研究 (塩見ら, 1994) によれば、消波工の天端が低く、水中部にとどまる条件では、消波工が疑似的なマウンドの役割 (=高マウンド) を果たし、ケーソン壁に衝撃砕波圧が発生する場合があることが指摘されている。

これを踏まえ、ここでは、不連続部が波圧の増加に寄与しているか否かを検討する。具体的には、各ライン毎に、原則、前面の消波工天端から静水面までの水深を d' 、ケーソン壁から前面の消波工天端法肩までの距離を BM' とみなして (図-5参照)、既往の波圧式 (合田, 1973; 高橋ら, 1992) に基づく計算値を求め、実験値に対する波圧比を算出した。

図-6は、波圧比分布を示したもので、緑丸をつけた部位は、上述のルールに従った場合に波圧計算値が増大した箇所である。この部位の波圧比をみると、1.0を超えるのはH.H.W.L.ではL5の+5m付近の1箇所、L.W.L.ではL2, L5の+5m付近の2箇所にとどまっている。このうち、L2の+5mはH.H.W.L.では1.0を大きく下回っている。L5でも+5m以外の部位は両潮位とも1.0を明確に下回っている。このことから、当該部位の波圧増は、前述のとおり、上手で発生する波高増大の影響、L.W.L.での水位低下・砕波促進に伴う擾乱の激化や砕波水塊の衝突が主要因であり、「消波工が高マウンドの役割を果たす効果」は発

図-4 静水面+2.2mの波圧時系列 (H.H.W.L.)

図-5 不連続部における d' 、 BM' の考え方 (模式図)

図-6 高マウンドによる衝撃碎波圧を考慮した波圧比分布

現していないものと判断される。

(3) 波圧合力及び合成波力の特性

図-7は、ケーソン前面における各ラインの波圧合力(1ライン上の各部位波圧を合算)を示したものである。なお、図中には計算値(不連続部の高マウンド効果は考慮せず)も併記している。これをみると、H.H.W.L.では最下手のL1が最も低く、その後、上手に向けて漸増し、最上手のL6が最も高くなっている。これは、L1では全部位が消波工に覆われ、その後、徐々に消波工の被覆率が低下し、L6では消波工がまったく無くなるためである。これを計算値と比較すると、L1～L4はほぼ同レベルだが、L5、L6は計算値を上回っている。この要因は上手側では沿い波と入射波の合成による波高増大の影響が強く現れることと斜め入射波に起因したケーソン前面マウンド上の強流速(高橋ら, 1991)により最深部の波圧が増大したことによっている。L.W.L.も合力の変化傾向はH.H.W.L.と同様だが、詳細にみると、L2、L3及びL5は計算値を明瞭に上回っている。この要因は、波圧分布特性で述べたように、水位の低下により碎波が促進されることで、消波ブロックとケーソン壁との空間での擾乱が激化したり、碎波水塊の飛出し・衝突により一部の部位で波圧が急増するためである。

図-8は、図-7の波圧合力について、図-9は波圧合力を合算したケーソン全体に作用する合成水平波力について、各々、計算値との比を示したものである。波圧合力

図-7 波圧合力の特性

図-8 波圧合力比の特性

図-9 合成水平波力比の特性

比は、前述した各部位の波圧増により1.0を超える場合が多いが、合力から算出した合成水平波力比は1.0に近似している。これは、波が60度以上の角度で入射することで各ラインの合力ピーク時刻に差が生じるためであり、斜め入射波の優位性となる。

(4) 回折波が波力に及ぼす影響

ここでは、ケーソン全体に作用する波力について、背

面の回折波による影響を検討する。図-10は、不連続部に作用するH.H.W.L.時の滑動合成波力、水平波力、鉛直波力と前面・背面水位の時系列を示したものである。ここに、各波力は三分力計による測定結果である。

これをみると、両函とも、水平波力、滑動合成波力のピーク時刻と前面水位のピーク時刻が一致しており、押し波のピーク時に水平波力が最大になることを示している。次いで、この時刻の背面水位をみると、14号函では押し波時の途中段階、15号函ではほぼ押し波ピーク時となっている。このことは、港内方向への水平波力最大時に背面から港外側へ押し返す波力が作用していることを意味しており、滑動に対して有利な状況といえる。

ここに、開口部からの回折波が前面水位とほぼ同位相となる要因は、波が60度以上の角度で入射するためである。なお、背面水位変動の起動力は回折波に加え、越波の影響も大きいことを目視観察により確認している。これは波が60度以上の角度で入射することで、上手側からの越波水塊の打ち込みと当該ケーソン前面水位のピーク時刻付近が重なるためである。また、15号函の背面水位が14号函に比べて高いのは、上手側が消波ブロック(=摩擦抵抗力)の無い直立消波ケーソン群であり越波水塊の打ち込みが激しいためと推測される。

以上のことより、波が60度以上の角度で入射する本実験条件の場合、回折波(+越波)は滑動抵抗力として作用しているものと判断される。

4. 主要な結論

消波工不連続部に60度以上の角度で入射波が来襲することで以下の特性が確認された。

- ① 沿い波と入射波の合成で波高増大が発生し当初計画を超える80t型高比重の消波ブロックが必要となる。
- ② 波高増大に加え、消波工掘付法線付近での激しい擾乱、マウンド上での強流速によりケーソン前面では計算値を超える波圧が発生する。ただし、「不連続部が高マウンドの役割を果たす効果」は発現しない。
- ③ 波圧合力のピーク時刻は法線方向で差が生じるため、波力のピークは分散・減少する。
- ④ ケーソン背面の回折波は前面波高と同位相となり、滑動抵抗力としてプラス側の影響を与える。

参 考 文 献

- 塩見雅樹・山本 浩・津川昭博・黒沢忠男・永松宏一(1994)：消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 791-795.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利(1991)：斜め入射波に対する混成堤マウンド被覆材の安定重量算定法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 596-600.
- 合田良実(1973)：防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技研報告, 第12巻 第3号, pp. 31-69.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫 健一郎・細山田 得三(1992)：混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 676-680.

図-10 合成各種波力と前面・背面水位の時系列特性