各種ケーソン式防波堤の反射・伝達率特性

PROPERTIES OF THE REFLECTION AND TRANSMISSION COEFFICIENT FOR SEVERAL TYPES OF BREAKWATERS

本田秀樹¹・塩崎禎郎¹・堀内 博²

Hideki HONDA, Yoshio SHIOZAKI and Hiroshi HORIUCHI

¹正会員 工修 NKK 基盤技術研究所 都市工学研究部 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田1-1)

²正会員 工修 NKK 鉄構建設部 港湾技術室 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

Recently, it has increased the case to be constructed the breakwaters where the water depth is deeper and the wave height is greater. The authors developed a new type of breakwater. This breakwater consists of wave absorbing caisson and sloping top caisson. Through the model experiments, the wave force formula, the reflection coefficient, and the wave overtopping quantity were defined. However, it was not defined the relation between the crown height and the transmission coefficient of this breakwater. When the crown height of the breakwater is higher it can be tranquil. Otherwise, the breakwater width must be extended because of the wave force increased. Then, it is important to define the relation between the crown height of the breakwater and the transmitted wave height and find the appropriately crown height of the breakwater.

In this paper, the authors carried out the experiments for several types of breakwaters by using irregular waves, and defined the formula for the transmission coefficient and the crown height of the breakwater to be required.

Key Words : breakwater, reflection and transmission coefficient, crown height

1. はじめに

港湾の沖合展開に伴い、大水深・高波浪域で防波堤を建設する機会が増えてきている。この様な背景のもと、筆者らはコスト縮減が可能な新形式防波堤として、直立消波堤と上部斜面堤の長所を組み合わせた上部斜面消波堤(図-1参照)の開発に取り組んできた。波力算定式、および、反射率、越波流量に関しては既報¹⁾の通りであるが、今回は上部斜面消波堤の天端高さを決めるために必要となる波高伝達率特性に着目した実験を実施した。

防波堤天端高さは、現行の技術基準²⁾によると、直立堤の場合は、朔望平均満潮面(H.W.L.)上、有義波高($H_{1/3}$)の概ね0.6倍以上、もしくは、特に越波量を極力低減したい場合には1.25倍以上とされている。一方、上部斜面堤に関しては、H.W.L.+ $1.0H_{1/3}$ としたときに、直立堤の $0.6H_{1/3}$ と波高伝達率が同程度となることから、 $1.0H_{1/3}$ で設定される場合が多いようである。いずれにしても天端高を高くすることで、港内静穏度は向上するが、その分、堤体に作用する波力も増大するため、堤体幅が広くなり建設コストが増大してしまう。したがって、天端高を適切に定めることは非常に重要である。今回の実験では、上部斜面消波堤の波高伝達率を把握することが第一

の目的であるが、他の代表的な構造との相対的な比較検討を行うため下記の5形式を検討対象とした。

- a) 直立堤
- b) 上部斜面堤
- c) 直立消波堤
- d) 上部斜面消波堤
- e) 消波ブロック被覆堤

また、反射率に関しても、波高伝達率に影響を与えるため合わせて検討を行っている。

図-1 上部斜面消波堤

図-2 水路図

2. 実験概要

(1) 実験水路, および堤体模型

a) 実験水路

本実験は, 吸収制御式の2次元造波水路(長さ13.5m×高さ0.8m×幅0.9m)を用いて実施した. 水路図を図-2に示す. 水路内には, 1/50勾配の水路床を設け, 造波装置から7.3mの地点に堤体模型を設置した. 波高計は, 造波装置から3.5mの地点にH1, H2を30cm間隔で設置し, 堤前にH3を設置した. 堤体の背後には1.0m間隔で波高計H4, H5を設置した.

b) 堤体模型

堤体模型は, 水深-15mに設置される防波堤を想定し, 縮尺1/60でモデル化した. 実験対象とした各モデルの断面図を図-3に示す.

a) 直立堤 b) 直立消波堤

c) 上部斜面堤 d) 上部斜面消波堤

e) 消波ブロック被覆堤

図-3 模型断面図

模型の堤体部分はアクリルで製作し, 直立消波堤, 上部斜面消波堤のスリット開口率は30%, 上部斜面堤, 上部斜面消波堤はL.W.L.の水位から45度の斜面とした. 消波ブロック被覆堤は, 2.55N/個のモルタル製の消波ブロック(実物で64t型相当)を天端2列並びで1:4/3の勾配で乱積みにした.

(2) 実験条件

表-1に実験条件を示す. 実験縮尺は1/60であり, フルード相似則に基づいて実験条件を決定した. 実験波は, 不規則波を用いることとし, 反射率測定実験では比較的波高の小さな常時波浪を, 波高伝達率測定実験では激浪時を対象として作成した. 不規則波のスペクトルはBretschneider-光易型を目標として, 造波開始20.0s後から100~130波に相当する波群を作成した. 波高伝達率測定実験では, H.W.L., L.W.L.時の水位に対して, 波高を変化させて, 相対天端高(防波堤天端高/有義波高)と波高伝達率の関係を把握することが目的である. そのため, H.W.L.時では有義波高を2.6~8.4mまでの10種類, L.W.L.時では有義波高を3.9~7.7mの7種類とした.

表-1 実験条件

【反射率測定実験】

水位	L. W. L.
	15.0m (24.9cm)
周期	7.0s (0.9s)
有義波高	2.0, 2.4, 2.8m (3.3, 4.0, 4.7cm)

注) 波高はH1, H2地点における分離入射波高の値

【波高伝達率実験】

実験縮尺	1/60	
水位	H. W. L.	L. W. L.
	17.0m (28.2cm)	15.0m (24.9cm)
周期	10.0s (1.29s)	10.0s (1.29s)
	14.5s (1.88s)	14.5s (1.88s)
有義波高	2.6~8.4m : 10種類 (4.36~13.94cm)	3.9~7.7m : 7種類 (6.42~12.84cm)

注) 波高は通過波高検定の堤前(H3)の値, ()は実験値

(3) 実験方法

実験では, 造波装置より不規則波を発生させ, 水路内に設置した5台の波高計H1~H5を用いて波高データを収録する. データの収録は, 堤体で反射する波がH1に到達する造波開始20.0s後から開始した. 収録した波高データを用いて反射率・波高伝達率を以下に示す方法で算定した.

図-4.1 伝達率図 (H.W.L. 周期10.0s)

図-4.3 伝達率図 (L.W.L. 周期10.0s)

図-4.2 伝達率図 (H.W.L. 周期14.5s)

図-4.4 伝達率図 (L.W.L. 周期14.5s)

a) 反射率の算定

波高計H1, H2で収録したデータを用いて合田の入・反射分離法³⁾で反射率を算定。

b) 波高伝達率の算定

波高計H4, H5の収録したデータから $H_{4/3}$, $H_{5/3}$ を求め、この2地点の平均値を伝達波高とし、通過波高検定で測定した有義波高 $H_{1/3}$ との比から波高伝達率を算定。

3. 実験結果

(1) 反射率特性

表-2は、L.W.L.、周期7.0sにおける直立消波堤、上部斜面消波堤、消波ブロック被覆堤の反射率である。その結果、各構造形式とも反射率は0.4以下となっており、周期7.0s、有義波高2.0~3.0m程度の常時波浪に対して優れた消波性能を有していることがわかる。また、上部斜面消波堤の反射率は直立消波堤と同程度であることから、谷本⁴⁾による直立消波堤の算定式を用いて上部斜面消波堤の反射率を推定することが可能である。

表-2 各構造形式の反射率

	有義波高 (m)		
	2.0	2.4	2.8
直立消波堤	0.33	0.31	0.29
上部斜面消波堤	0.33	0.3	0.29
消波ブロック被覆堤	0.23	0.22	0.21

(2) 伝達率特性

a) 各構造形式における伝達率

図-4.1~4.4は、水位と周期別の各構造形式の伝達率である。横軸は相対天端高 $hc/H_{1/3}$ であり、消波機能の有無によって、直立堤、上部斜面堤 (非消波型) と直立消波堤、上部斜面消波堤、消波ブロック被覆堤 (消波型) に分けて示している。その結果、伝達率は相対天端高に依存し、水位・周期による差は明瞭でなかった。構造形式ごとでは、消波型の方が伝達率は小さくなっている。これは、消波効果により、堤前での波高 (入射波と反射波の合成波高) が小さくなり、越波しにくくなるためである。上部斜面堤、上部斜面消波堤の伝達率は、斜面で越波が促進されるため、それぞれ直立堤、直立消波堤と比較して若干大きな値となっている。また、消波ブロック被覆堤の伝達率は直立消波堤と同等であった。

b) 伝達率の算定式

図-4の非消波型の部分に示した実線・点線は、合田ら⁵⁾⁶⁾、高橋ら⁷⁾が求めた実験式(式-(1),(2))に基づいて今回の実験条件から算定した値である。式中で用いられている係数 α は、相対天端高に対して波高伝達率が減少する比率を表しており、直立堤に対して合田らは $\alpha=2.2$ を用いている。また、 β の値はマウンド上水深 d と水深 h の比で定まり、 d/h が小さい程(マウンド天端が高い程) β の値は小さくなり、同じ相対天端高における伝達率は大きくなる。これは、マウンド天端が高い場合、マウンド上の碎波によって水位が上昇し、越波が増大するためである。今回の条件では、H.W.L.に対しては $\beta=0.385$ 、L.W.L.では $\beta=0.381$ となる。

直立堤、上部斜面堤の波高伝達率の実験値と、実験式から算定した値を比較すると両者は概ね一致しており、今回の実験対象とした断面に対しても実験式が適用できることがわかる。そこで、今回新たに直立消波堤と上部斜面消波堤に対して実験式の適用を試みた。図-4の消波型の部分に示した実線・点線は、直立消波堤と上部斜面消波堤の実験式から算定した値である。今回求めた実験式は、係数 α は直立堤と同じ2.2の値を用い、 β の値をH.W.L.では $\beta=0.705$ 、L.W.L.では $\beta=0.69$ としている。すなわち、消波堤による効果を、低マウンドとして越波を減少させる側の β (低マウンドほど β が小さくなる)を用いることで表現している。実験値と実験式から求めた算定値は良好に一致していることから、直立消波堤、上部斜面消波堤の伝達率は、直立堤、上部斜面堤の伝達率の実験式の β を修正することで算定できることがわかった。

[直立堤]

$$Kt = \left\{ 0.25 \times \left[1 - \sin \frac{\pi}{2 \times \alpha} \left(\frac{hc}{H_{1/3}} + \beta \right) \right]^2 + 0.01 \times \left(1 - \frac{d}{h} \right)^2 \right\}^{0.5}$$

$$\quad : \beta - \alpha < hc/H_{1/3} < \alpha - \beta$$

$$Kt = 0.1 \times \left(1 - \frac{d}{h} \right) \quad : hc/H_{1/3} \geq \alpha - \beta \quad \dots (1)$$

[上部斜面堤]

$$Kt = \left\{ 0.25 \times \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{4.4} \times \left(\frac{hc}{H_{1/3}} + \beta + \beta_s \right) \right) \right]^2 + 0.01 \times \left(1 - \frac{d}{h} \right)^2 \right\}^{0.5}$$

$$\quad : \beta + \beta_s - 2.2 < hc/H_{1/3} < 2.2 - (\beta + \beta_s)$$

$$Kt = 0.1 \times \left(1 - \frac{d}{h} \right) \quad : hc/H_{1/3} > 2.2 - (\beta + \beta_s)$$

$$\beta_s = -0.3 \times [(hc - 2d_c)/H_{1/3} \tan \theta]^{0.5} \quad \dots (2)$$

c) 直立消波堤と上部斜面消波堤に対する必要天端高の検討

現行の技術基準では、直立堤の天端高 hc を設計有義波高 $H_{1/3}$ の0.6倍以上とすることが標準となっている。そのため、直立消波堤の天端高も、直立堤と同様に $0.6H_{1/3}$ が用いられることが多い。しかし、今回の実験結果を用いると、直立堤の $hc/H_{1/3}=0.6$ の伝達率と同等の値とするためには、直立消波堤の $hc/H_{1/3}$ を概ね $hc/H_{1/3}=0.4 \sim 0.5$ とすればよいことがわかる。また、同様に上部斜面消波堤では $hc/H_{1/3}=0.6$ 程度で直立堤と同等の伝達率となる。このように、直立堤の伝達率と同等にする条件では、消波構造とすることで防波堤天端高を低くすることが可能となり、コスト低減に結びつくものと思われる。

4. まとめ

各種ケーソン式防波堤の反射率・伝達率特性を明らかにするため不規則波実験を行い、直立消波堤と上部斜面消波堤の波高伝達率の算定式を求めた。また、この算定式を用いて必要天端高についても考察を加えた。以下に、今回の実験から得られた結論を示す。

- 1) 今回対象とした断面では、常時波浪(周期7.0s, 有義波高2.0~3.0m)における消波型防波堤の反射率はいずれも0.4以下であった。また、上部斜面消波堤の反射率は、直立消波堤の値と同程度で、谷本らの直立消波堤の反射率算定式で推定することができる。
- 2) 同じ波浪条件で比較した場合、直立消波堤・上部斜面消波堤は、遊水室の貯水効果と反射波低減による堤前波高の低下のため、直立堤・上部斜面堤よりも波高伝達率を低く抑えることができる。
- 3) 直立堤・上部斜面堤・直立消波堤・上部斜面消波堤の伝達率を比較した結果、直立堤における合田らの実験式を修正することで、直立消波堤、上部斜面消波堤の伝達率を算定できる。
- 4) 波高伝達率に関して、直立消波堤では $hc/H_{1/3}=0.4 \sim 0.5$ 、上部斜面消波堤では $hc/H_{1/3}=0.6$ 程度とすることで直立堤の $hc/H_{1/3}=0.6$ における伝達率と同等の値となることがわかった。

参考文献

- 1) 本田秀樹, 塩崎禎郎, 堀内 博, 辻岡和男: 高波浪域向け消波型ケーソンの開発, 海洋開発論文集, Vol. 16, pp. 245-250, 2000.
- 2) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 3) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射の分離推定法, 港湾技術研究所資料 No. 248, pp. 1-24, 1976.
- 4) 谷本勝利, 吉本靖俊: 直立消波ケーソンの反射率に関する理論および実験的研究, 港湾技術研究所報告 第21巻, 第3号, 1982.
- 5) 合田良実, 竹田英章: 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 87-92, 1966.
- 6) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治: 不規則波浪実験とその特性について, 第21回海岸工学講演会講演集, pp. 237-242, 1974.
- 7) 高橋重雄, 下迫健一郎: 防波堤の耐波設計, 港湾工学専門技術者水工コース研修テキスト, 1996.