

不規則波を用いたカーテンウォール構造物の波浪特性

国栖 広志*・洞谷 邦弘*・関本 恒浩**・清水 虎重*

1. ま え が き

カーテンウォール構造物と波の相互作用に関する研究は、従来 Ursell¹⁾、Wiegel²⁾、森平³⁾、中村⁴⁾によって行われている。このうち前二者は伝達波、反射波に対する理論的検討であり、後者は波力特性に関する検討も行っている。

このうち、中村らの研究は作用波力をグリーン関数を用いたわき出し分布法によりかなり精度良く算定できることを示している。

本研究は作用波力の算定が、伊藤⁵⁾の提案した固定浮体に対する近似式を修正することによって求めることができることを示すとともに、実験による検証を行った。また、主に不規則波を用いた実験により、カーテンウォール構造物の波力、伝達波、反射波、前面遡上高に対する検討を行った。

2. 作用波力の算定方法

伊藤は固定浮体の水平波力が速度ポテンシャルの減衰的定常項を省略した式 (1) になることを示した。

$$P_H = \rho g d (\eta_a - \eta_b) \frac{\sinh kh - \sinh k(h-d)}{kd \cosh kh} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_H : 水平波力、 η_a , η_b : 浮体前面と背面の水位波形、 k : 波の波数、 d : 水没水深、 h : 水深。

しかし、カーテンウォールのように薄板の場合には伊藤の近似式で伝達率を算定すると常に 1.0 となり実際の現象と合わない。

そこで、本報告では上記の難点であるカーテンウォール前面と背面の波形を以下の考え方で算定する。カーテンウォール前面と背面の波形は反射波と伝達波と位相を考慮して式 (2)、式 (3) のように示す。ここでは反射波の位相は入射波とほぼ等しいものと仮定し、カーテンウォールを原点 ($x=0$) とした。

$$\eta_a = a_i \cos(kx - \sigma t) + a_r \cos(kx + \sigma t + \varepsilon_r)$$

$$= \frac{H_i}{2} (1 + K_r) \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_b = a_t \cos(kx - \sigma t + \varepsilon_t)$$

$$= \frac{H_i}{2} K_t \cos(\sigma t - \varepsilon_t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 a_i , a_r , a_t : 入射波、反射波、伝達波の振幅、 σ : 角周波数、 ε_r , ε_t : 反射波、伝達波の位相差。

以上より式 (2)、式 (3) において K_r , K_t , ε_t がわかれば前・背面の水平波力の算定が可能となる。

まず、伝達率は Ursell が無限水深で求めたものを森平が有限水深に適用できるように改良した式 (4) を用いる。

$$K_t = \frac{F(d/L) - F(h/L)}{1 - F(h/L)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに

$$F(x) = \frac{K_1(2\pi x)}{\sqrt{\pi^2 I_1^2(2\pi x) + K_1^2(2\pi x)}}$$

I_1 , K_1 : 次数 1 次の第 1 種、第 2 種変形ベッセル関数。

一方、反射率はカーテンウォールによるエネルギー損失が無いものと仮定し式 (5) を適用する。

$$K_r = \sqrt{1 - K_t^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

位相差は Ursell が無限水深の条件で求めた式 (6) を用いる。

$$\varepsilon_t = \tan^{-1} \left[\frac{\pi K_1(dk)}{K_1^2(dk) + \pi^2 I_1^2(dk)} \times \frac{\{I_1(dk) + L_{-1}(dk)\}}{\left[\frac{\pi}{2} \{I_1(dk) + L_{-1}(dk)\} \right]^2} \right] \quad \dots\dots (6)$$

ここに

$$L_{-1}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2n}}{\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) \Gamma\left(n + \frac{3}{2}\right)}$$

$$\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{(2n)!}{2^{2n} n!} \sqrt{\pi}$$

$L_{-1}(x)$: Struve 関数 $\Gamma(x)$: ガンマ関数

以上より式 (2)~式 (6) を式 (1) に代入することによってカーテンウォールの水平波力を求めることができる。

* 正会員 五洋建設 技術研究所
** 正会員 工務 五洋建設 技術研究所

3. 実験装置と実験方法

3.1 実験装置

実験水槽は幅 5m, 高さ 1.2m, 長さ 34m の片側を幅 60cm に仕切って使用した。仕切板の端部は再反射波を軽減するために、造波機側の 4m 区間を開放してある。

造波機は油圧サーボ制御方式によるピストン型造波機である。

カーテンウォール模型は厚さ 10mm のアクリル樹脂板を用いたが、水没水深の大きい場合は波力によるたわみを考慮して 20mm のものを用いた。

3.2 実験方法

実験によって検討した項目は、波力、伝達波、反射波、前面迎上高である。実験に用いた波は規則波と不規則波である。ただし、本報告における規則波の実験結果は、波力算定式の検証、および、マウンドが波力に及ぼす効果の検討のときのみ使用した。

カーテンウォールに作用する波力は、図-1 に示すように六分力計と波圧計による計測から求めた。また、式(1)を検証する目的でカーテンウォール前・背面の近傍に波高計を設置した。伝達波および反射波は図-2 に示す位置に波高計を設置して求めた。伝達率は 2 地点の平均値とした。反射率は、模型の前面 1 波長以上離れた点に間隔 $\Delta l=10$ cm, 20 cm に波高計を 3 台設置し 2 点フーリエ解析法を用いて算定した。

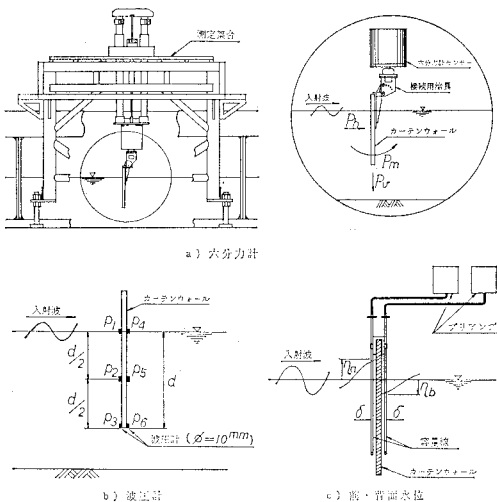


図-1 波力の測定

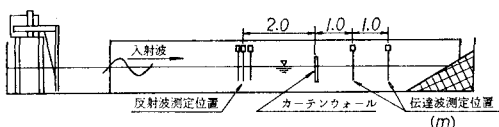
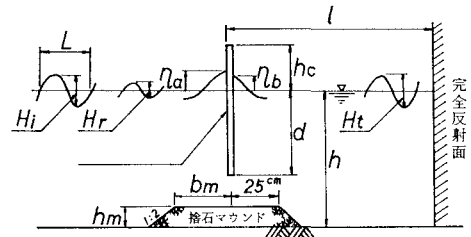


図-2 反射率・伝達率の測定

実験は、基本的にカーテンウォールの後方には碎石による消波装置を設置して行ったが、背面反射の検討では図-3 に示すように完全反射面を設置して行った。図中に本論文で用いた記号を示す。



記号	構造諸元	記号	波浪諸元
hc	カーテンウォール先端高	H_i	入射波高
d	水没水深	L	入射波長
hm	マウンド高	H_r	反射波高
bm	マウンド幅	H_t	伝達波高
l	反射面距離	η_a	前面波形
h	水深	η_b	背面波形

図-3 模型構造および波浪諸元

実験に用いた規則波は、波高 5.0cm 一定で 0.8 秒～3.0 秒の 6 種類とした。また、不規則波は表-1 に示すように 4 種類とした。

全ての測定項目について同時計測されたデータは、A/D 変換した後、電算機で処理解析を行った。

表-1 不規則波の諸元

名 称		波 浪 の 統 計 量			
設定値	有義波周期 $(T_{1/3})_D$	1.0 sec	1.5 sec	2.0 sec	2.5 sec
	有義波高 $(H_{1/3})_D$	5.0 cm	5.0 cm	5.0 cm	5.0 cm
実測値	有義波高 $H_{1/3}$	5.00 cm	5.03 cm	4.98 cm	5.01 cm
	平均波高 $\bar{H}$	3.23 cm	3.22 cm	3.18 cm	3.06 cm
	1/10 最大波高 $H_{1/10}$	6.38 cm	6.34 cm	6.19 cm	6.68 cm
	最大波高 H_{max}	8.15 cm	8.84 cm	8.31 cm	10.00 cm
	有義波周期 $T_{1/3}$	1.06 sec	1.55 sec	2.08 sec	2.54 sec
値	平均波周期 $\bar{T}$	1.06 sec	1.48 sec	1.77 sec	2.07 sec
	1/10 最大波周期 $T_{1/10}$	1.02 sec	1.47 sec	2.17 sec	2.53 sec
	最大波周期 T_{max}	1.05 sec	1.20 sec	2.30 sec	3.20 sec

4. 実験結果と考察

4.1 波力特性

(1) 波力算定式の検証

六分力計と波圧計で計測した波力と式(1)に前・背面波形を代入して求めた波力を図-4 に示す。実験条件は、 $h/L=0.138$, $d/h=0.6$, $H=5.0$ cm である。また、図には、前面波形 η_a , 背面波形 η_b , 前背面水位差 $\eta_a - \eta_b$ の波形も示した。図の縦軸は、それぞれ六分力計で計測された波力 P_{max} および前面波形 $\eta_{a,max}$ で無次元化して示した。

この図から、六分力計の値に比べて波圧計および式(1)の計算値はやや大きめの値をとるが、位相としては一致することがわかった。また、波力と $\eta_a - \eta_b$ の波形の位相が一致していた。以上のことは他の実験ケースについても同様である。すなわち、式(1)によって算定される波力はほぼ妥当なことがわかった。

次に実測値から求めた η_a と η_b の位相差と式(6)から求まる位相差に関して検討をした。実測波の位相差の解析には3波分(サンプリングタイム 1/20sec)のデータを用いたが、不規則波の場合は1024個一定とした。なお、位相差は、FFTによるクロススペクトルの計算から求めた。

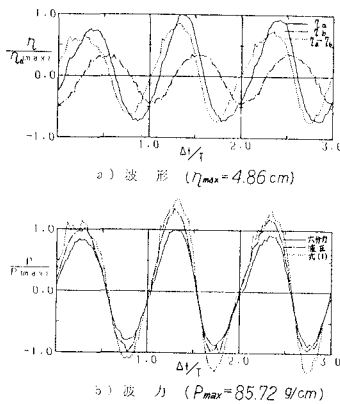


図-4 前・背面水位と波力 ($h/L=0.138$, $d/h=0.6$)

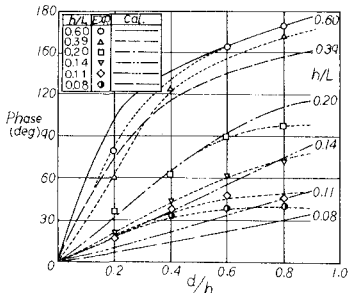


図-5 前・背面水位の位相差(規則波)

図-5に規則波を作用させたときのカーテンウォール前・背面水位の位相差の実験値と理論値を示した。図は相対水深をパラメータに整理した。ただし、式(6)における波長 L は、実験水深 h のものを用いた。この図からわかるように、実測値と理論値はかなり一致していた。ただし、 $h/L=0.11$ 以下の場合実測値の方がやや大きい値を示した。これは、式(6)が無限水深に対する式であるのに対し、水深の有限性が影響したものと考えられる。また、不規則波については、多少のばらつきはあるものの規則波と同様の傾向を示した。

以上の検討から、式(1)によりカーテンウォールに作用する波力が求められるものと考えられる。そこで、相

対水没水深 d/h をパラメータに、相対水深に対するカーテンウォールに作用する波力を式(1)で求めたのが図-6 a), b) である。図の縦軸は平均波力 $\bar{P} = P / \{(d + H_i/2)B\}$ (H_i は波高, B はカーテンウォールの幅) を計算し、入射波高で除した波力係数 $\bar{P}/w_0 H_i$ (w_0 は水の単位体積重量) で示した。図には同じ条件のときの実験結果およびサンフルー波式で透過部分を差し引く、いわゆる修正サンフルー式の結果も示した。

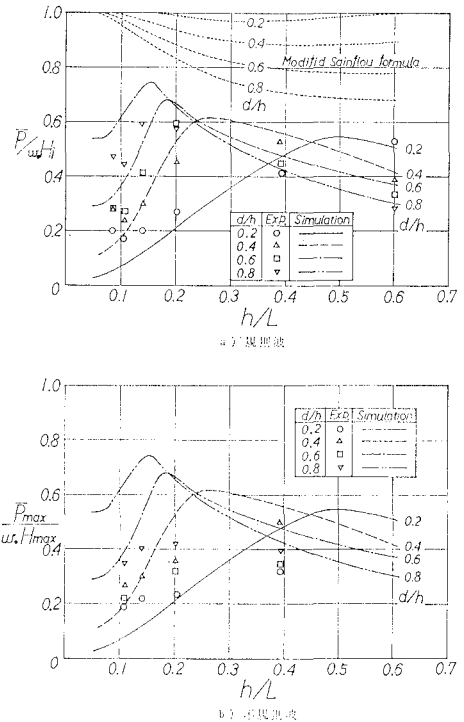


図-6 波力の計算値と実験値の比較

この結果から波力係数は、ある相対水深 h/L でピークを示しており、実験値の方がやや小さめの値であったが、傾向はほぼ一致し実際の現象を良く説明していることがわかった。これに比較して修正サンフルー式の波力係数は実験値に比べてかなり大きな値となり、相対水深の小さい領域では増減が全く逆の傾向を示し、実験での現象を良く説明できないことがわかった。

一方、不規則波による波力特性は規則波の場合とほぼ同様の傾向を示した。しかし、波力係数の大きさは、最高波高 H_{max} で無次元化すると、規則波の波力と等しいか、やや小さめの値を示した。これは、最大波力発生時の前背面水位の位相差は、直接最高波に関係するのではなく、ある程度平均化されたものとなり、規則波のような著しい水位差とならないためと考えられる。

以上のことから、不規則波の場合、波力は式(1)により、波高として最高波高を用いて計算すれば十分であると考えられる。ただし、 $d/h=0.2$, $h/L=0.2$ 以下では、

理論値に比べて実験値が大きいので、この範囲で式 (1) を適用する場合には注意を要する。

(2) 背面に完全反射面を有するとき

カーテンウォールに作用する波力は前述のように前背面の水位が重要な要素である。実際の港湾では背面に護岸等による反射面があり、設置位置によっては背面の波形の方が大きくなる増幅も考えられる。そこで、本研究ではカーテンウォール背後に完全反射面がある場合の波力特性について実験的に検討した。

実験は d/h を 0.6 一定とし周期と反射面距離を変化させて行った。反射面の距離は各周期に対して $4L/16 \sim L$ まで $L/16$ ピッチとし、 $2L$ の点にも設置した。

目視観測によると、背面の水位変動は、多重反射系が形成され、反射面距離によっては前面の水位変動量より大きくなる場合もあった。図-7 に η_b および $\eta_a - \eta_b$ の変動量を示す。図の縦軸は入射波高で無次元化してある。

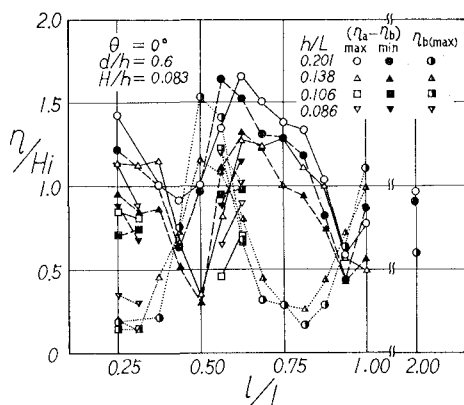


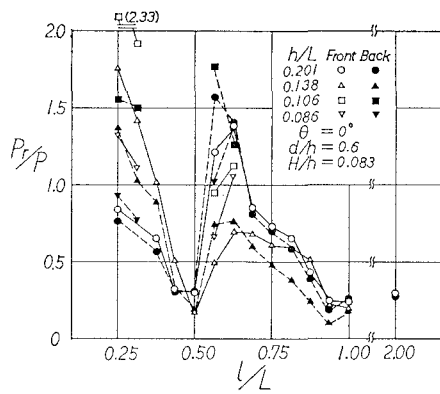
図-7 反射面を有する場合の水位変動量 (規則波)

この図から背面の水位変動は $L/4$, $3L/4$ の場所で極小となり $L/2$ で極大値を示した。一方、 $\eta_a - \eta_b$ の変動は $L/2$ を少し過ぎた点で最大値を示した。

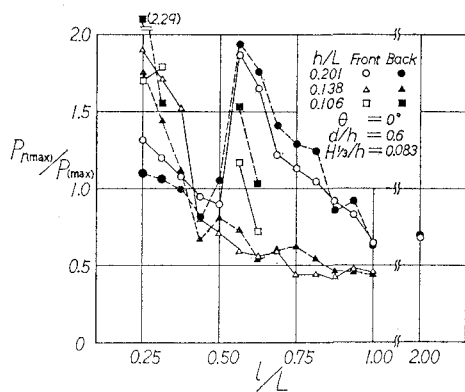
図-8 a), b) は波力特性を示したものである。図 a) は規則波, b) は不規則波の結果である。図から規則波, 不規則波ともほぼ同じ位置で波力は増減した。また、周期の長い波の方が増加の割合は小さかった。これは、長周期の波は背面から前面へ再透過する量が多く、重複波が十分形成されないためと考えられる。波力は $L/L=0.5$ を少し過ぎた所で極大値を示しており、図-7 に示した水位変動特性の $\eta_a - \eta_b$ と同じ位置であることがわかった。以上の結果から、カーテンウォールの背面に反射面を有する構造形式の場合には通常の場合に比べて波力が増大することが考えられ注意を要する。

(3) 捨石マウンドのある場合

実験で捨石マウンドの長さを変化させた場合の波力特性について検討した。実験は重複波の範囲内で行



a) 規則波



b) 不規則波

図-8 反射面を有する場合の波力と反射面距離の関係

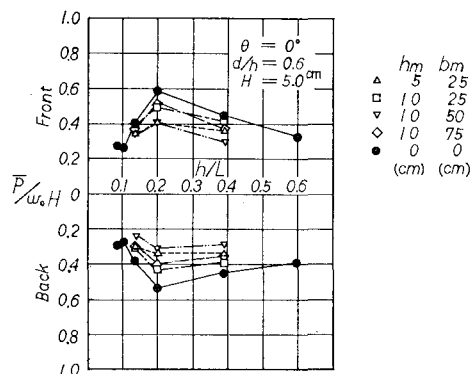


図-9 捨石マウンドを有する場合の波力係数

った。この結果から、図-9 に示すように h/L の特性はマウンドが無い場合と同様であるが、波力の値は 10~20% 程度小さかった。この原因としてマウンドの消波効果により前面合成波が小さくなるためと考えられる。以上より捨石マウンドにより波力が大きくなるケースは無かった。

4.2 伝達波・反射波特性

図-10 は不規則波を作用したときの伝達波特性について検討した結果である。図には Wiegel と Ursell の修

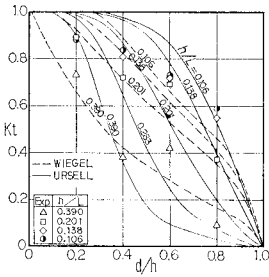


図-10 不規則波の場合の伝達率

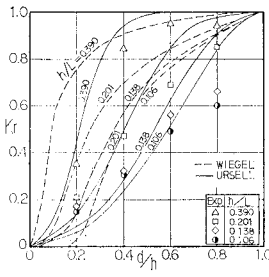


図-11 不規則波の場合の反射率

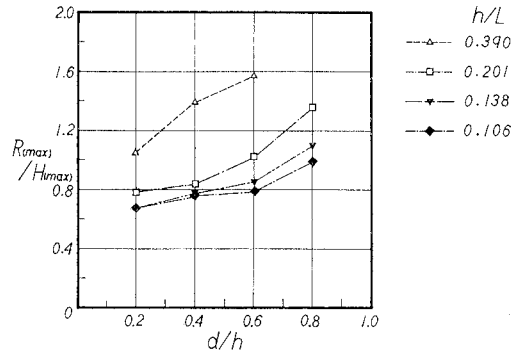


図-13 前面遡上高(不規則波)

正式による理論値を示した。この結果から不規則波の伝達率特性は Wiegell の式に近かった。これは規則波の場合が Ursell の修正式と一致することと異なる。すなわち、不規則波の場合種々の周期が重なったものであることから長周期の波は比較的伝播され易く、短周期では伝播され難いため全体としては平均された形として現われるためと考えられる。

図-11 は反射率特性を示した。図中の線はエネルギー損失がないとした場合の Wiegell と Ursell の式を示した。

実験より反射率は両理論より小さい値を示した。この原因として開口部に発生する渦の影響等が考えられる。

そこで、式(7)によりエネルギー逸散について検討を行い、その結果を図-12 に示した。

$$\epsilon = 1 - (K_t^2 + K_r^2) \dots\dots\dots (7)$$

この結果から、エネルギー逸散は $h/L=0.1\sim0.2$ でやや大きかった。これは、長周期の波が作用するとカーテンウォール下端で強い渦が生じるためと考えられる。

4.3 前面遡上高

波の遡上高に対する検討は規則波と不規則波について行った。この内、不規則波の結果を図-13 に示す。遡上高 R_{max} は最高波高 H_{max} を用い、無次元化して整理

した。この結果から規則波と不規則波の遡上高はほぼ同じ特性を示した。

すなわち、 d/h が大きくなるにつれて遡上高は増加した。また、短周期の波ほど遡上高は高かった。これは、短周期の波はカーテンウォール下端から透過されず完全重複波となるのに対し、長周期の波は下端から透過するため前面で部分重複波となるためである。

5. 結 語

カーテンウォールの波力算定法を示し実験による検証を行った。その結果式(1)による算定方法は実験値を良く説明しており、有効であることを確認した。また、不規則波による実験から波力、伝達波、反射波、遡上高に関して検討した結果、現地により近い条件での水理特性が明らかとなった。

最後に、本研究を行うに当たって東京電力株式会社本店原子力建設部土木建築課および新潟原子力建設所土木課の諸氏に貴重な御助言をいただきました。紙面をかりて深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ursell, F.: The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water, Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol. 43, pp. 374~382, 1947.
- 2) Wiegell, R. L.: Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier, Proc. of ASCE, J. of Waterways and Harbors Division, Vol. 86, No. WW1, pp. 1~13, 1960.
- 3) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実: カーテン防波堤とその特性について、港湾技術研究所報告, Vol. 3, No. 1, 1964.
- 4) 中村孝幸: カーテンウォール型防波堤まわりの波変形と作用波力に関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 512~516, 1984.
- 5) 伊藤喜行・千葉 繁: 浮防波堤の水理に関する近似理論と応用, 港湾技術研究所報告, 第11巻第2号, pp. 137~166, 1972.

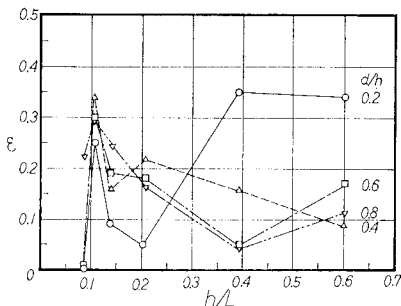


図-12 カーテンウォールのエネルギー逸散率