

カーテンウォールを有する大型円筒構造物の3次元水理特性

長谷川明機*・大石嗣雄*・中塚健司**

1. ま え が き

東京湾横断道路では、トンネルの換気筒として、湾央の水深 28m の地点に円筒状の川崎人工島が建設される。

施工時、人工島外周には、構造物壁面に作用する波力を低減するために、カーテンウォール（以下防波板と称す）が取付けられ、人工島は、外径 200m の大型円筒構造物となる（図-1 参照）。

防波板を有する大型円筒構造物の場合、打上げ高、波力、越波は、構造物周辺の散乱波、沿い波、および防波板と構造物壁面に挟まれた遊水部の3次元的な共振などの影響を受ける。そのため、従来の2次元の防波板に関する知見では、上述の現象を考慮した十分な設計ができない。また、従来の打上げ高、越波の研究は、海岸堤防護岸を対象としており、水深 28m の大水深でかつ波形勾配の大きい条件での検討はなされていない。

本研究は、平面水槽実験により、大水深に設置された防波板を有する大型円筒構造物の打上げ高、波力、越波の3次元的な水理特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験は、平面水槽（幅 17.0m、高さ 1.6m、長さ 35.5m）の中央に縮尺 1/50 の模型を設置して行った。水槽

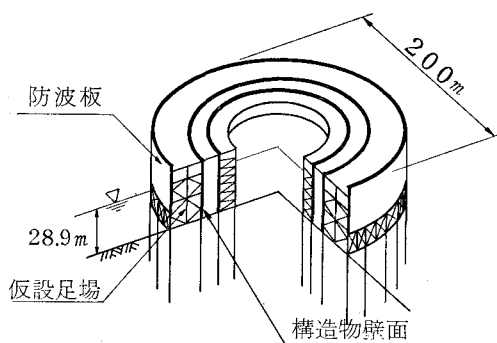


図-1 川崎人工島（施工時）

内には造波機側に整波装置、他端には消波装置を、また構造物からの散乱波による多重反射を低減するために、側壁にはステラシートによる消波工を設けた。

防波板の喫水深さ d は、本実験の前に検討を行い、 $d=10.3\text{m}$ ($d/h=0.357$) とした（石野ら, 1989）。

防波板前・背面、構造物壁面への打上げ高、および波力は、図-2 に示すように、容量式波高計と波圧計による計測から求めた。また、防波板と仮設足場を合せた構造に作用する波力は、円周方向に 19.0° の幅をもつブロックに作用する波力として、4分力計により求めた。計測は、波の入射方向 ($\theta=0^\circ$) から、円周方向にわたって、 22.5° ピッチで $\theta=180^\circ$ まで行った。

越波量の計測は、図-3 に示すように越波低減のために防波板前面に水平板を取付け、防波板天端高を変化させて行った。計測は、構造物背後に設けた越波量測定により、円周方向に 12° あたりの越波量 $\theta=0^\circ$ を中心として、 $\theta=60^\circ$ まで行った。

水深は、打上げ高、波力の計測では、 $h=28.9\text{m}$ (H.W.L.) とし、越波量の計測では異常高潮位 1.0m を考慮し $h=29.9\text{m}$ とした。実験波は、波高 $H=1.8\sim 6.0\text{m}$ 、周期 $T=4.0\sim 7.0\text{s}$ の規則波、および $H_{1/3}=2.8\sim 3.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.3\sim 7.0\text{s}$ のプレットシュナイダー・光易型の不規則波である。

3. 実験結果と考察

3.1 防波板前面の打上げ高、および波力特性

a) 規則波作用時の防波板前面の打上げ高

防波板前面の打上げ高を入射波高で無次元化した η_0/H の円周方向分布を図-4 に示す。図-4 から、 η_0/H は、周期 $T=7.0\text{s}$ 以外の波作用時では、 $\theta=0^\circ$ で最大となる。 η_0/H の最大値は、従来の2次元での防波板に関する実験結果の傾向と同様に、作用波の周期が長いほど、また同じ周期の波浪条件では波高の大きい方が大きくなる。特に、実験波中、波形勾配が最大である $H=6.0\text{m}$ 、 $T=6.1\text{s}$ ($H/L=0.104$) では、 $\theta=0\sim 45^\circ$ で $\eta_0/H \geq 1.5$ となり他の波に比べ大きい。なお、 η_0/H の最大値 1.68 は、海岸堤防における水塊を完全に阻止するための所要天端高の標準値 $1.5\sim 2.0 \times H$ （森平ら、

* 東京湾横断道路(株)設計部設計二課

** 正会員 大成建設(株)技術研究所

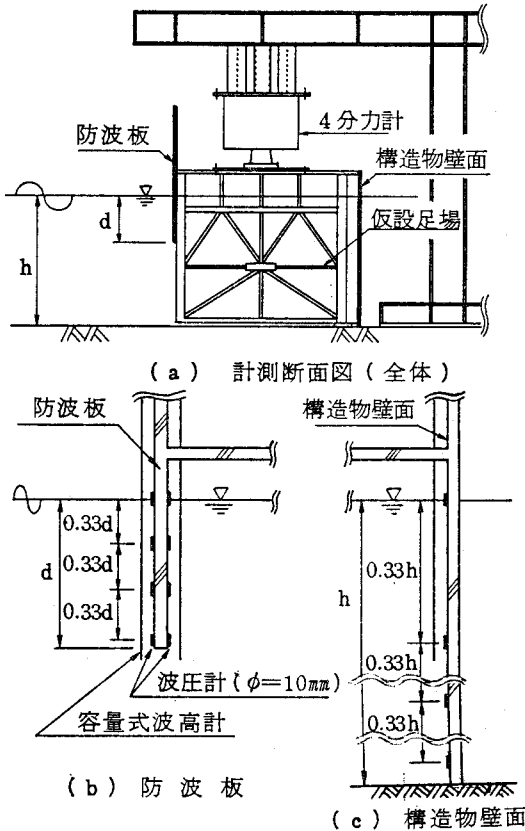


図-2 計測断面

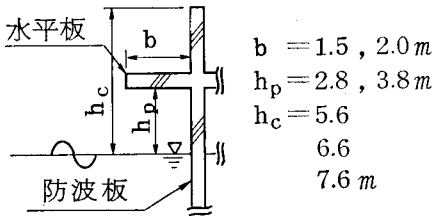


図-3 越波低減の水平板諸元

1964) にはほぼ等しい。

一方、 $T=7.0 \text{ s}$ の波作用時では、全体的に η_b/H は小さくなり、 η_b/H の最大値は $\theta=22.5 \sim 45.0^\circ$ で発生し 0.8 となる。これは、入射波周期が、防波板と構造物壁面の距離から計算される遊水部の断面 (半径) 方向の一次共振周期 $T_p=7.1 \text{ s}$ に近いため、入射波エネルギーが遊水部に伝達され η_b/H が小さくなることによる。

b) 規則波作用時の防波板に作用する波力

防波板に作用する波力の円筒方向分布を図-5に示す。

図-5の縦軸は、実験結果の最大値を計算値 $F_{b \text{ cal}}$ で除した値 F_b^* をとってある。計算値 $F_{b \text{ cal}}$ は、図-6に示す方法で、2次元直立防波堤を対象とした合田式を

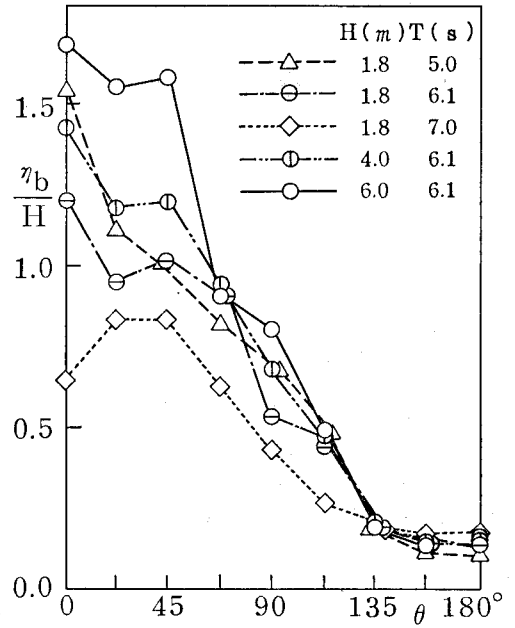


図-4 防波板前面の打上げ高 η_b/H

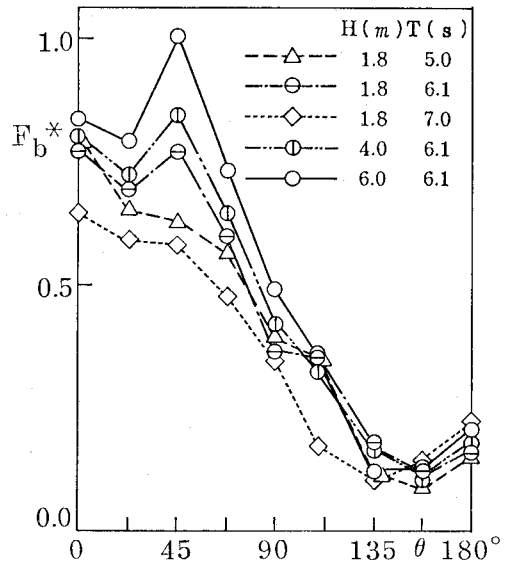


図-5 防波板に作用する波力 F_b

用いて算定した。

図-5 から、周期 $T=5.0 \text{ s}$ 、および $T=7.0 \text{ s}$ の波作用時の F_b^* は、 $\theta=0.0^\circ$ で最大となる。 $T=6.1 \text{ s}$ の波浪条件での F_b^* は、波高 $H=4.0 \text{ m}$ 、 $H=6.0 \text{ m}$ では $\theta=45.0^\circ$ で最大となり、また $H=1.8 \text{ m}$ でも、 $\theta=45.0^\circ$ で大きくなる傾向がみられる。これは、 $\theta=45^\circ$ の防波板背面水位の変動は、 $\theta=0^\circ$ より大きいため、防波板前・背面の水位差が $\theta=0^\circ$ より大きくなることによ

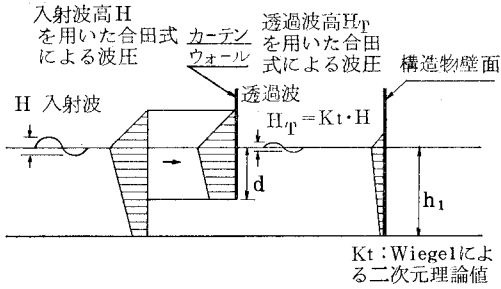


図-6 波力計算値算定方法

ると考えられる。

なお、本実験条件の範囲では、 F_b^* は 1.0 以下で合田式を用いた計算値より小さい。

c) 規則波と不規則波作用時の比較

図-7 に規則波と不規則波作用時の防波板前面の打上げ高 η_b/H 、および防波板に作用する波力 F_b^* を示す。

図-7 の実験値の諸元は、設計波級の波である規則波 $H=6.0\text{ m}$ 、 $T=6.1\text{ s}$ 、不規則波 $H_{1/3}=3.5\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=6.1\text{ s}$ である。なお、図-7 の縦軸で、不規則波作用時の打上げ高は、実験値の最大値を最大波高 $H_{\max}=6.1\text{ m}$ で、また波力は、規則波と同様に合田式による計算値で除した値を示してある。図-7 から、不規則波作用時の η_b/H は、前述した遊水部の断面方向の一次共振周期 $T_p=7.1\text{ s}$ の成分波により入射波エネルギーが遊水部に伝達し、規則波に比べ全体的に小さくなる。ただし、不規則波の波力 F_b^* の最大値は、規則波と異なり、 $\theta=0.0^\circ$ で発生し最大値は規則波に比べ大きい。

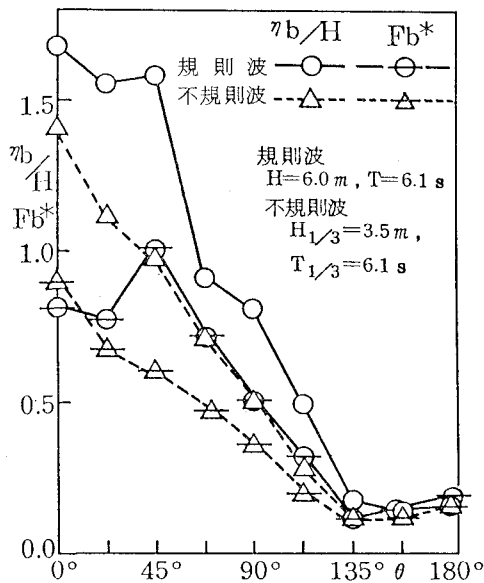


図-7 規則波と不規則波の比較（防波板）

防波板に作用する波力は、防波板前面の水位差による。従来の防波板に関する実験（国栖ら, 1985）では、不規則波の場合最大波力発生時の防波板前面水位差は、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、規則波のように著しい水位差にはならない。そのため、不規則波の波力は、規則波より小さくなる。ただし本実験では、不規則波の場合、前述の断面方向の共振により防波板背面の変動が大きいため、防波板前面・背面の水位差が規則波に比べ大きくなる。そのため、不規則波の F_b^* は、規則波より大きくなったと考えられる。

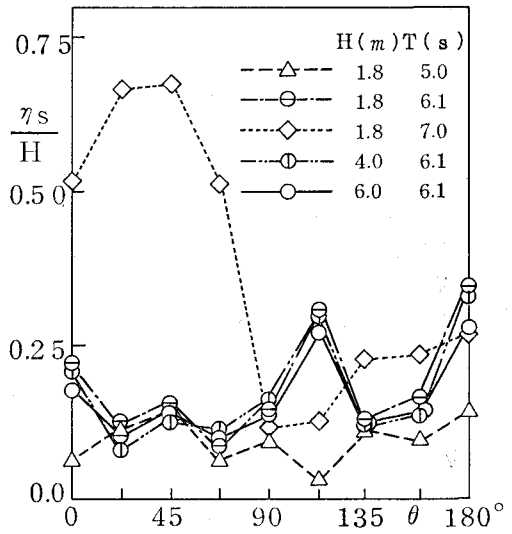
ただし、 F_b^* の最大値は 0.9 で合田式を用いた計算値より小さい。

3.2 構造物壁面への打上げ高、波力特性

a) 規則波作用時の構造物壁面への打上げ高

規則波作用時の構造物壁面への打上げ高 η_s/H を図-8 に示す。図-8 から、周期 7.0 s の波作用時は、断面方向の一次共振周期により、 η_s/H は $\theta=22.5^\circ\sim 67.5^\circ$ 0.5~0.7 となる。一方、周期 $T=7.0\text{ s}$ 以外の波作用時は防波板の効果により η_s/H は小さく、 $T=5.0\text{ s}$ 作用時の η_s/H は 0.05~0.15 に、 $T=6.0\text{ s}$ では 0.08~0.35 になる。ただし、 η_s/H の最大値は、 $T=7.0\text{ s}$ の波作用時は $\theta=45^\circ$ で発生する。 $T=6.1\text{ s}$ の波浪条件では、 $H=6.0\text{ m}$ の波作用時は $\theta=112.5^\circ$ で最大となり、また、 $H=1.8\text{ m}$ 、 $H=4.0\text{ m}$ 波作用時も $\theta=112.5^\circ$ で $\theta=180.0^\circ$ の最大値にほぼ等しい値となる。実験中の観察から、構造物壁面での水位は、円周方向に高次のモードを扱った共振現象が観察された。

この3次元的な共振現象により、 η_s/H の最大値の発生位置が入射波周期により変化したと考えられる。また

図-8 構造物壁面への打上げ高 η_s/H

遊水部を左右に別れた波が衝突する $\theta=180.0^\circ$ での η_s/H は、大きくなる。

b) 規則波作用時の構造物壁面に作用する波力

規則波作用時の構造物壁面に作用する波力を図-9に示す。図-9の縦軸は、実験結果の最大値を計算値 $F_{s, cal}$ で除した値 F_s^* をとってある。計算値 $F_{s, cal}$ は、図-6に示す方法で、防波板に関する Wiegel (1960) の透過理論と合田式を用いて算定した。

図-9から、 F_s^* の円周方向分布は、図-8に示した構造物壁面への打上げ高 η_s/H の円周方向分布とほぼ同様の傾向を示す。周期 $T=7.0$ s の波作用時の F_s^* は、 $\theta=0.0\sim45.0^\circ$ で $1.5\sim1.7$ になる。 $T=7.0$ s 以外の波作用時の F_s^* は $0.07\sim0.76$ で、特に $T=5.0$ s の F_s^* は、 $0.07\sim0.30$ と全体的に小さい。これは、Wiegelの透過理論において、水深波長比が大きいと（本実験では $h/L=0.7413$ ）透過率を過大に与えるためである。

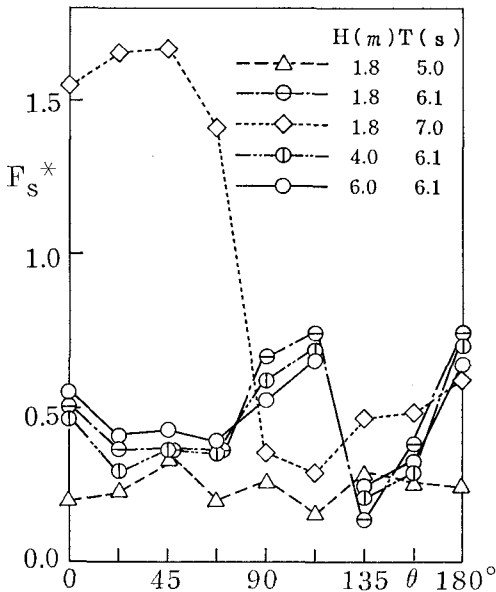


図-9 構造物壁面に作用する波力 F_s^*

c) 規則波と不規則波作用時の比較

図-10に規則波と不規則波作用時の構造物壁面への打上げ高 η_s/H 、および構造物壁面に作用する波力 F_s^* を示す。図-10の実験波の諸元は、図-7と同一である。

図-10から、 $H_{1/3}=3.5$ m、 $T_{1/3}=6.1$ s の不規則波では、前述した遊水部の断面方向の一次共振周期 $T_p=7.1$ s の成分波により入射波エネルギーが遊水部に取込まれ、 η_s/H は $\theta=22.5\sim67.5^\circ$ で $0.30\sim0.35$ になる。そのため、波力 F_s^* の最大値は $\theta=22.5^\circ$ で発生し、最大値は 1.2 となり実験値は計算値に比べ大きい。すなわち、防波板の背面に反射面を設置する場合、断面方向

の1次共振周期が入射波周期に近い場合は、3次元的な構造物でも断面方向の共振により遊水部の水位変動が大きくなり、波力が増大するため注意を要する。

3.3 有限要素法による計算例

有限要素法による、防波板前面、および構造物壁面への打上げ高の計算値と実験値を図-11に示す。図-11の実験波の諸元は、規則波 $H=1.8$ m、 $T=7.0$ s である。

図-11から、計算では、防波板周辺の渦等によるエネルギー損失を考慮していないため、 $0.0^\circ\leq\theta\leq45.0^\circ$ での η_b/H の計算値は、実験値より大きくなっている。

また、計算値は $\theta\geq90.0^\circ$ で波打った分布になる。

しかし、 η_b/H 、 η_s/H の円周方向の分布の傾向は、両

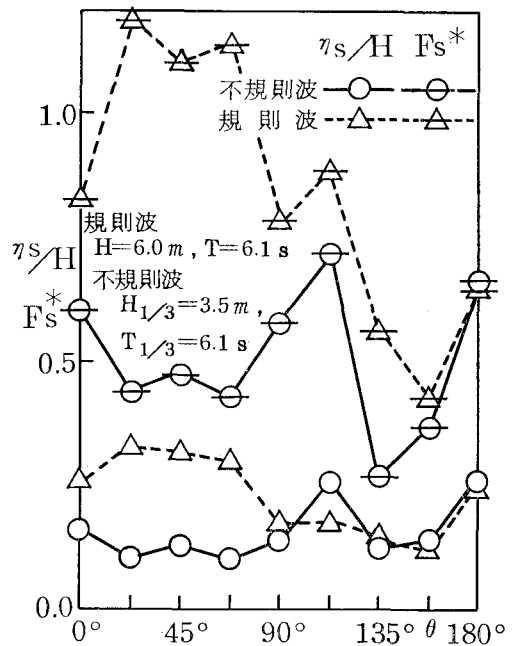


図-10 規則波と不規則波の比較（構造物壁面）

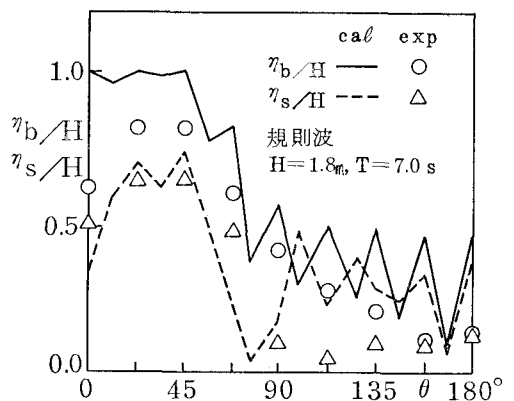


図-11 有限要素法による計算例
(規則波 $H=1.8$ m、 $T=7.0$ s)

者で共通している。特に、遊水部の断面方向の共振により η_s/H が $0.0^\circ \leq \theta \leq 67.5^\circ$ で増大する傾向は、で計算も明確に再現されている。

3.4 越波特性

異常高潮位での越波低減のために防波板前面に水平板を設けた場合の無次元越波量 q^* の円周方向分布を図-12に示す。図-12は、規則波 $H=6.0\text{ m}$, $T=6.1\text{ s}$ 作用時の結果である。

図-12から、越波量の場合も最大値の発生位置は、 $\theta=0.0^\circ$ とならず $\theta=24.0^\circ \sim 48.0^\circ$ で発生する。これは、 $\theta=0.0^\circ$ 付近では、入射波は水平板より入射波方向に跳ね飛ばされ、防波板背面への越波は低減されるが、防波板前面の沿い波は円周方向に進むにつれ、防波板天端を越えやすくなるためである。また、水平板の幅 $b=1.5\text{ m}$, 2.0 m における、幅の越波低減効果は、 $h_c/H=0.93$ 以上の条件で見られる。ただし、その効果は小さい。なお、高田らによる海岸堤防での消波堤として適する越波

量は $q^*=10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ (水理公式集, 1971) で、本実験では、 $h_c/H=0.93$ 以上でこの値以下になる。

4. 結 論

水深 28 m の湾内に設置された防波板を有する大型円筒構造物の打上げ高、波力、越波の3次元的水理特性が明らかになった。実験から、波形勾配の大きい設計波級の波である規則波 $H=6.0\text{ m}$, $T=6.1\text{ s}$ の条件で、

(1) 防波板前面の打上げ高の最大値は、 $\theta=0^\circ$ で発生し、その値は波高の1.6倍となり、海岸堤防の所要天端高の標準値はほぼ等しい。

(2) 構造物壁面に作用する波力は、遊水部の3次元的な共振により、 $\theta=110^\circ$ で最大となる。また $H_{1/3}=3.5\text{ m}$, $T_{1/3}=6.1\text{ s}$ の不規則波では、遊水部の断面方向の共振が卓越し $\theta=23^\circ$ で最大となる。なお、防波板に関する Wiegel の透過理論と2次元直立防波堤を対象とした合田式を用いて波力を評価する場合、規則波では実験値は計算値より小さい。一方、不規則波では断面方向の共振により水位変動が大きくなり、実験値は計算値の1.2倍となるため注意を要する。

(3) 異常高潮位での越波低減のために水平板を設けると、無次元越波量 ($2 \times \pi \times Q / (H \times L)$) を $10^{-4} \sim 10^{-2}$ に低減できる。越波の場合も最大値の発生位置は $\theta=0^\circ$ とならず防波板前面の沿い波の影響により $\theta=24 \sim 48^\circ$ で発生する。

参 考 文 献

- 石野和男・長谷川明機・大石嗣雄 (1989): 大型円筒構造物の外周に設置されたカーテンウォールの波浪特性, 土木学会第44回年次学術講演会。
- 森平倫生・柿崎秀作・合田良実 (1964): カーテン防波堤とその特性, 港湾技術研究所報告, Vol. 3, No. 1, pp. 1~27。
- 国栖広志・洞谷邦弘・関本恒浩・清水虎重 (1985): 不規則波を用いたカーテンウォール構造物の波浪特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 530~534。
- Wiegel, R. I. (1960): 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。
- 土木学会編 (1971): 水理公式集, pp. 535。

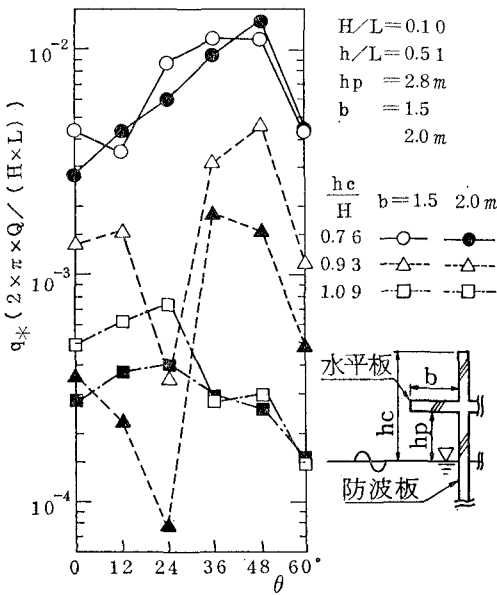


図-12 規則波作用時の無次元越波量 q^*