

「第2編 設計条件」関係

資料2.1 有義波法による沖波推定法の概要

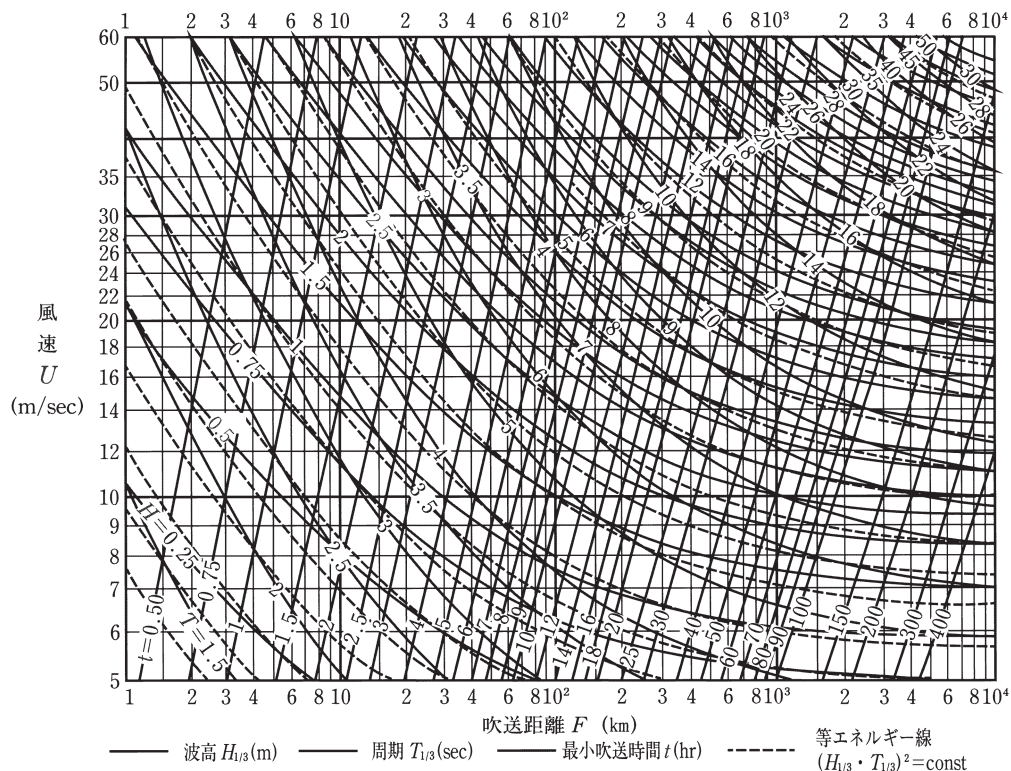
有義波法の考え方による沖波の推定方法について、図式解法を中心に以下に示す。

1. SMB (Sverdrup, Munk, Bretschneider) 法¹⁾²⁾による波の推算

- (1) 風域・風速の決定に必要な天気図を用意し、「第2編第7章 風」にしたがい風域、吹送距離、傾度風速、海上風等の必要諸元を算定する。
- (2) 図2-1-1により、吹送距離 F と風速 U とから求めた波高 $H_{1/3}$ と、吹送時間 t と風速 U から求めた波高 $H_{1/3}$ とを比較して、小さい方の波高 $H_{1/3}$ 及びその周期 $T_{1/3}$ を推算値とする。
- (3) なお、図2-1-1は、Wilson IV 式³⁾とよばれる式2-1-1、式2-1-2を数値的に解いたものである。

$$\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \dots\dots\dots (式 2-1-1)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U_{10}} = 1.37 \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \dots\dots\dots (式 2-1-2)$$



2. ウィルソン (Wilson) 法⁴⁾による波の推算

(1) 天気図上の風域と観測点を結んだ線風域上において、各風速帯 (5 m/sec 間隔) に該当する風域までの距離及び風速帯の幅を求める。

(2) 6 時間ごとに風速分布をの方法により求め、トレーシングペーパー上に、横軸に距離、縦軸に時間を取り、各時点の風速と距離を記入して、等風速線を描く (図 2-1-3 を参照のこと)。この場合、距離、時間の縮尺は図 2-1-2 の距離・時間軸縮尺と同じにとる。

(3) 以下は図 2-1-4 に示す例により、図 2-1-2 を使った波の推算法を説明する。図 2-1-4 は簡単な例として 10 m/s、15 m/s、20 m/s の風速の領域を示したものである。

- ① 図 2-1-2 の上にこの風域図を重ね合わせ、原点 O は風域図上の所要の波の出発点に合わせる。
- ② O 点から出発する波は O 点では波高、周期ともに 0 である。しかし 10 m/sec の風速を受け始めるから、それは F-t 平面上風速 10 m/s の進行曲線に沿って進み、a 点において 15 m/s の境界線と交わる。このときまでの時間は $\overline{Ot_1}$ である。進行した距離は $\overline{OI}$ である。この間に周期は、T-t 面上の 10m/s に対する周期曲線に沿って増加し、 $\overline{bt_1}$ の値を示す。波高は H-F 面上の波高曲線 $\overline{OI'}$ に沿って増加し、 $\overline{II'}$ の値を示す。
- ③ 波は a 点以後 15 m/s の風域に入り、これから後の進行経路は 15 m/s の進行曲線に入る。このときには点 a で持つ波の進行速度が、風速が不連続にもかかわらず連続的に変わっていくものとする。波の進行速度は周期だけで決まるから、a 点で波の持っている進行速度は $\overline{bt_1}$ に比例し、15 m/s の風域では 15 m/s に対応する周期曲線上の点 c に等しく、それは F-t 面上の 15 m/s に対応する進行曲線上の点 a' に対応する。すなわち、点 a での波は 15 m/s の風を受けている点 a' での波と同じ進行速度をもって進行すると考えてよい。したがって、実際に点 a にある波は、これから 15 m/s の風を受けて進むのであるから、その進行曲線は a'd' に平行となる。
- ④ 点 a から a' d' に平行に ad を引くと、これが実際の波の進行曲線となり、波は時刻 t_2 において点 d にある。このとき周期は、Oa' 線上 (15 m/s の進行曲線上) に ad の長さに等しく a'd' をとり、点 d' に対応する周期曲線状の点 e を求めると、それが波が点 d にあるときの周期である。したがって、点 e から Ot 軸に平行に垂線を引き、点 d から水平に引いた線との交点を f とすると、波が Oad を進む間に、周期は Obf のように変化する。以下同様の手続きを進めることにより、波の進行曲線と周期曲線が求められる。
- ⑤ 波高は、波の進行曲線が点 a に波がくるときは $\overline{OI'}$ のように変わる。I' と同じ波高の点 I'' からの 15 m/s の波高曲線に平行に、I' から線を引き、dm の延長との交点を m'' とすると、波が点 d にくるまでの波高の変化は $\overline{OI'm''}$ で示される。以下同様の手続きを進めると波高曲線が求められる。

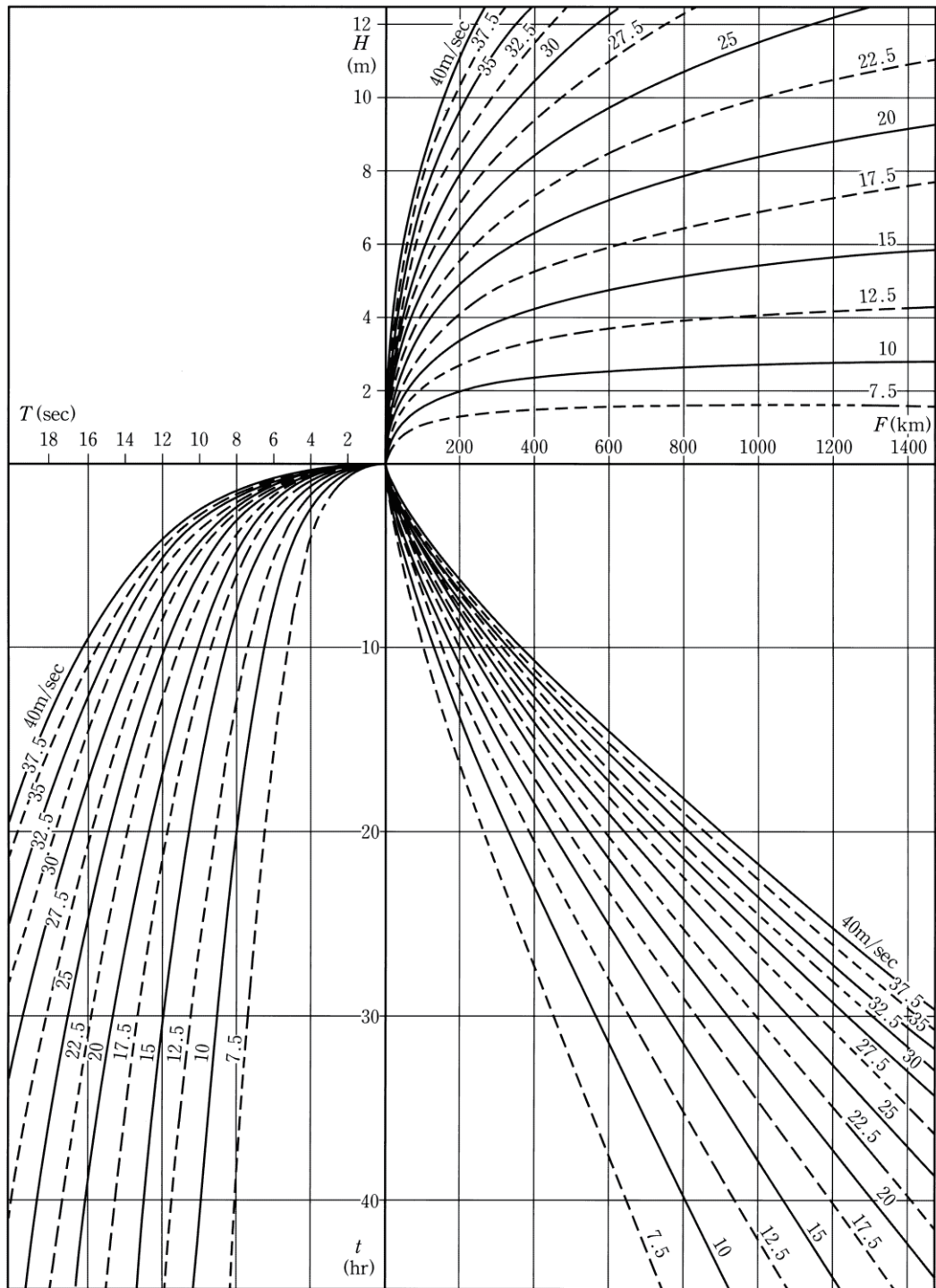


図 2-1-2 H-t-F-t 図

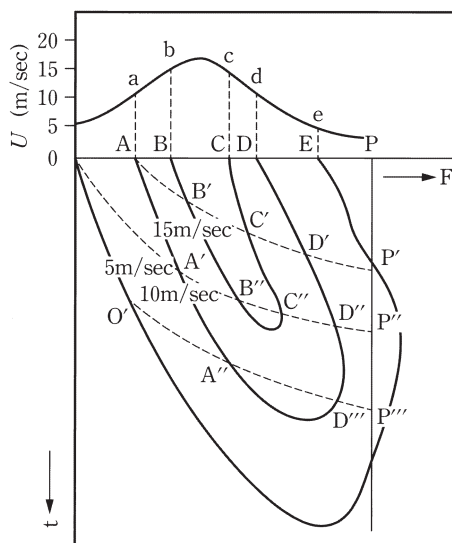


図 2-1-3 等風速線図

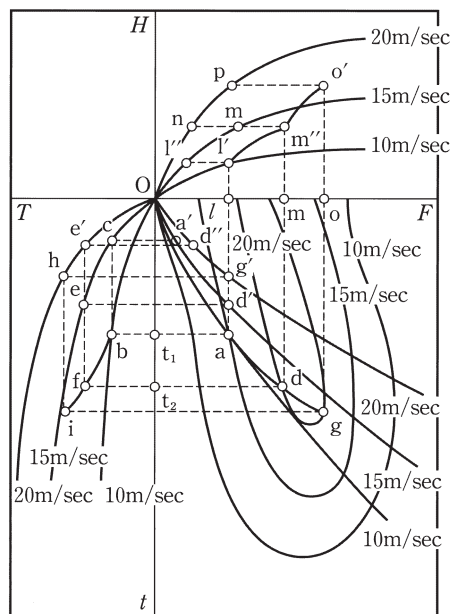


図 2-1-4 風域が変化する場合の計算例

3. 浅海発生波の諸元の推算

発生域が浅海部と考えられ、しかも信頼すべき実測値が得られない場合の波の諸元は、以下の手続きにより推算するものとする。

(1) 吹送時間が十分長く、かつ波高が吹送距離及び風速で定まる場合には、ブレットシュナイダー (Bretschneider) 法⁵⁾が適用できる。

- ① 付近測候所の毎時風速記録から、風速 10 m/s 以上で 2 時間以上にわたって風向変化が 45 以内の場合を求め、16 分割した所要の主方向ごとに風速－時間図を作る。
- ② 風向ごとの風速－時間図から、吹送距離 F (対岸距離を採用してよい) と (ほぼそのときの風速に対応する最小吹送時間に等しい時間内で) 最も大きい値となる平均風速 U を算定する (最小吹送時間の算定は図 2-1-1 による)。
- ③ この平均風速 U と吹送距離 F から gF/U^2 を求める。また、平均風速 U と構造物設置位置の水深 h_F とから gh_F/U^2 を求める。
- ④ ③で求めた結果を用いて、図 2-1-5 (a)(b)(c) のうち適するものから gH_0'/U^2 を読み、換算沖波波高 H_0' を算定し、周期は式 2-1-3 により H_0' を用いて決定する。

$$T = 3.86 \sqrt{H_0'} \dots\dots\dots \text{(式 2-1-3)}$$

- ⑤ ④で求めた換算沖波波高 H_0' 、周期 T 、及び水深 h_F とから構造物設置位置における浅水係数 K_s を求め、式 2-1-4 により設計に使用する波高 H を決定する (浅水係数 K_s については「第 2 編 3.5 水深による波の変形の算定」を参照のこと)。

$$H = K_s H_0' \dots\dots\dots \text{(式 2-1-4)}$$

(2) ブレットシュナイダー法に対し変動風域内での浅海波を推算する場合、坂本・井島法⁶⁾が適用

できる。これは深海でのウィルソンの深海風波に対する図式算法を浅海風波に拡張したもので、図 2-1-6 のような $H_{1/3}$ - t - F - C_G 図を作成し、風域が変化する場合での浅海波の推算を可能にしたものである。

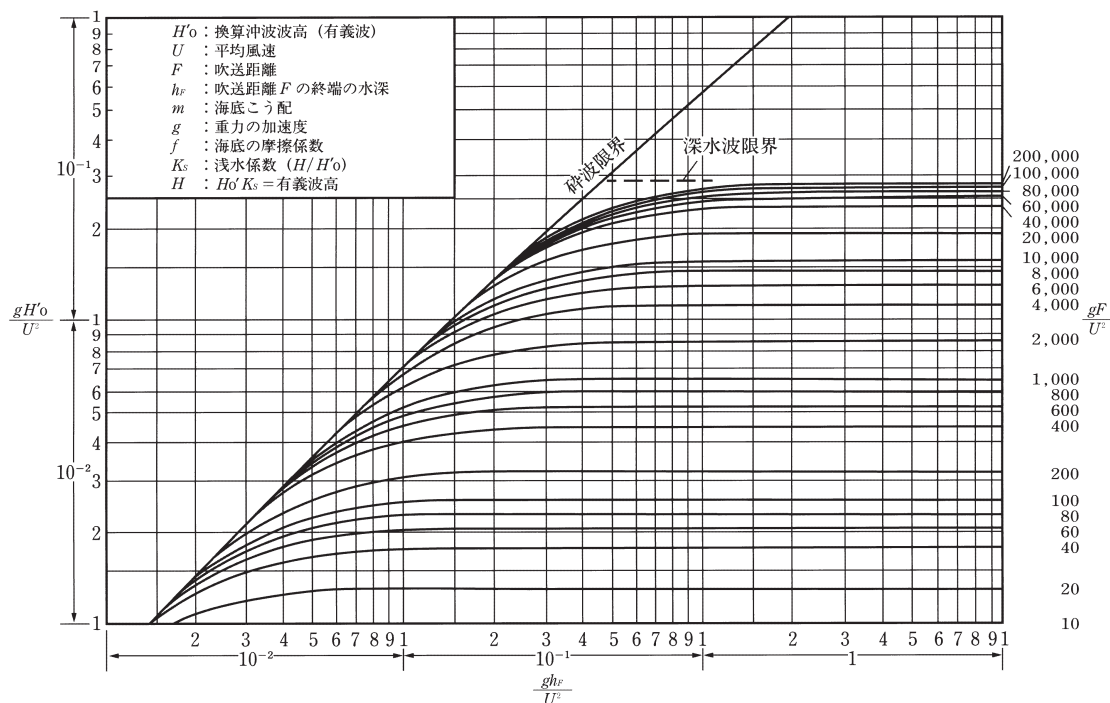


図 2-1-5(a) 海底勾配が一様な場合の波高と水深及び風速の関係 ($f/m = 5.28$ の場合)

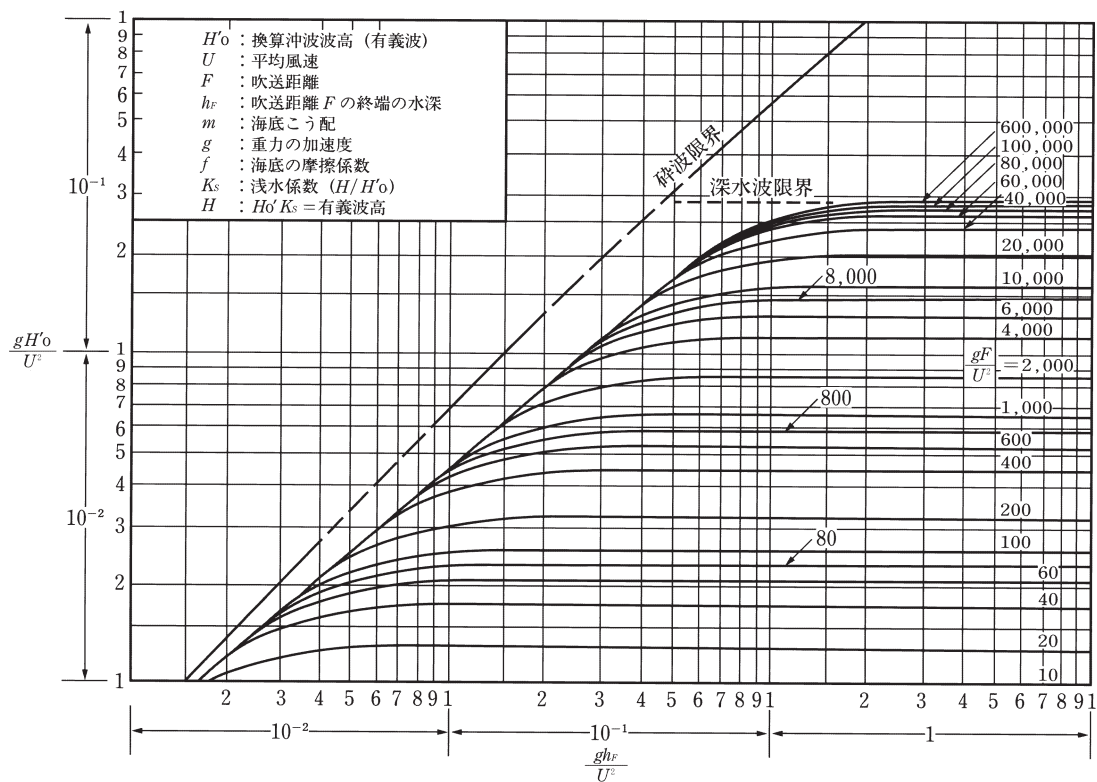


図 2-1-5(b) 海底勾配が一様な場合の波高と水深及び風速の関係 ($f/m = 10.6$ の場合)

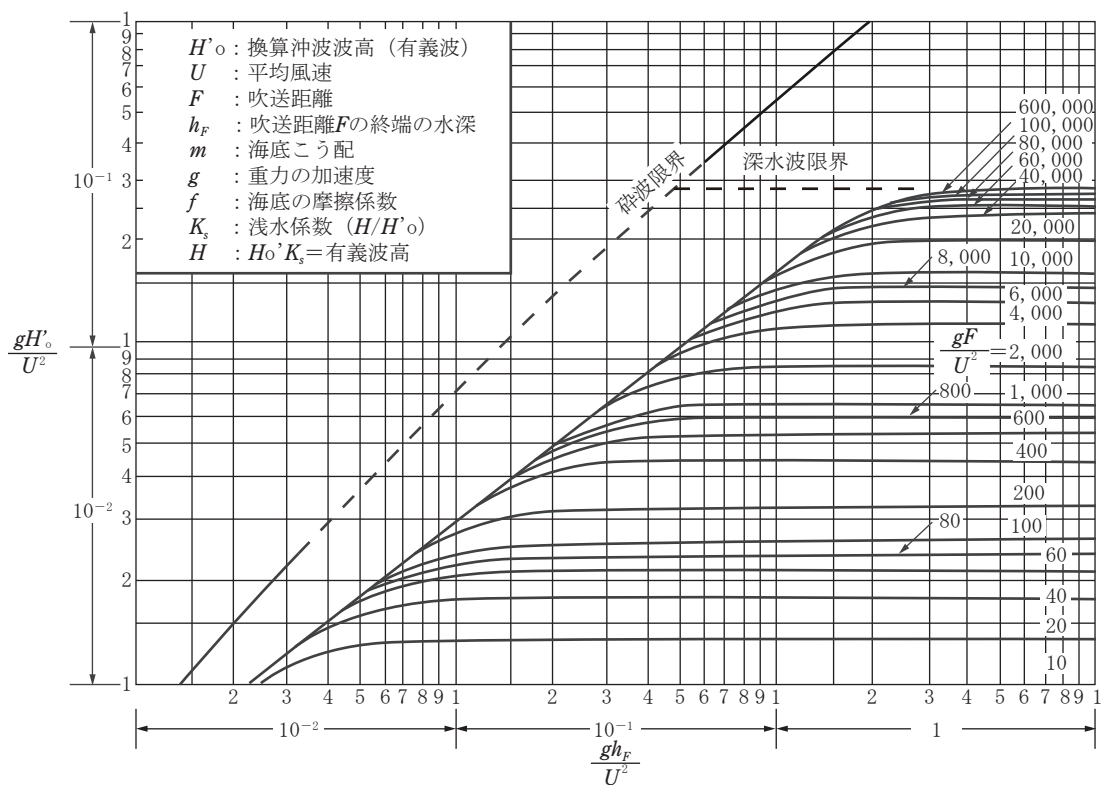


図 2-1-5(c) 海底勾配が一樣な場合の波高と水深及び風速の関係 ($f/m = 52.8$ の場合)

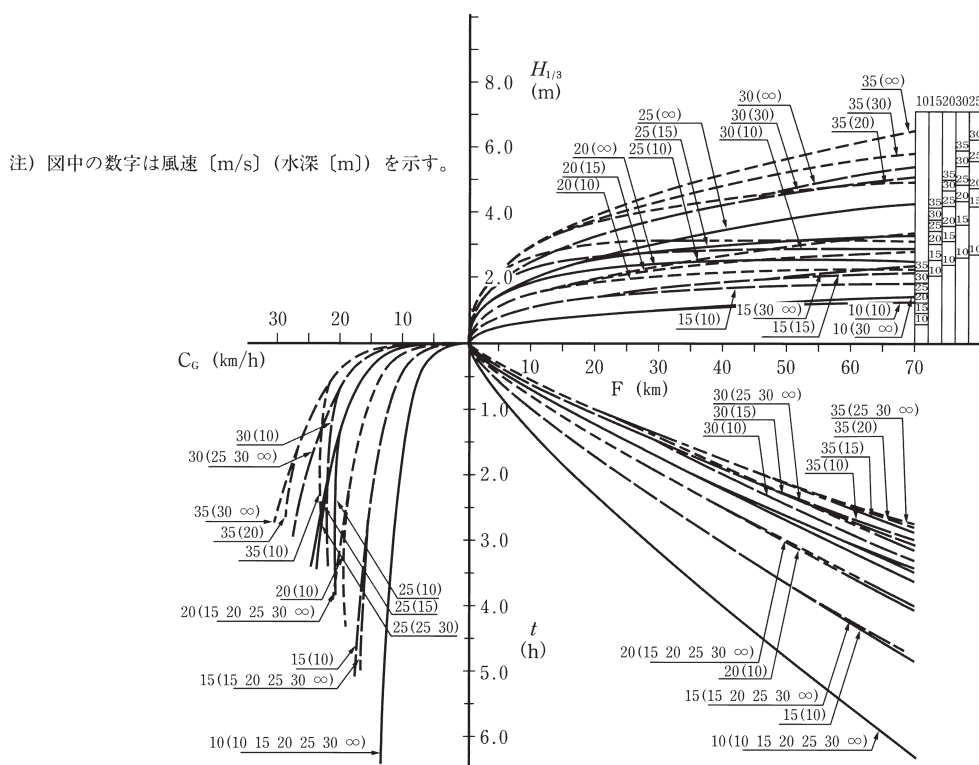


図 2-1-6 浅海波の $H_{1/3}$ - t - F - C_g 図

(参考文献)

- 1) Sverdrup, H.U. and W.H. Munk: Wind, sea and swell, theory of relations for forecasting, U.S. Navy Hydrographic Office, Pub. 601 (1947), 44p.
- 2) Bretschneider, C.L. : Revised wave forecasting relationships, Proc. 2nd Conf. Coastal Eng., ASCE (1952)
- 3) Wilson, B.W.: Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959, Deutsch Hydrogr. Zeit, Jahrgang 18, H eft 3 (1965), pp.114-130
- 4) Wilson, B.W.: Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetches, Tech. Memo. 73, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Eng. (1955)
- 5) Bretschneider, C.L.: Generation of Wind Waves over a Shallow Bottom, Tech. Memo. 51, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Eng. (1954)
- 6) 坂本信雄・井島武士・佐藤昭二・青野尚 : 浅海における風波の図式計算法, 第7回海岸工学講演会講演集 (1960), pp.137-147

資料 2.2 各種沖波推定法の特徴と比較

表 2-2-1～表 2-2-3 は、波浪推算手法のそれぞれの特徴や適用条件、計算方法の概要を主な手法別に示したものである。また、表 2-2-4 は有義波法とスペクトル法について比較したものである。

表 2-2-1 有義波法

計算手段	対象波浪	水深	風速の変動	波浪推算手法の名称	波浪推算手法の概要
図式 計算法	風浪	深海域	風域の変動なし	SMB 法	風域内の風速，吹送時間，吹送距離から，Wilson 式によって波高，周期を推算する。実際には，この式にしたがって作成した波浪予知曲線によって推算する。
			変動性風域	Wilson 法	SMB 法を拡張し，台風のような移動性の風域にも適用できるようにしたもので，いくつかのステップに分けて波浪予知曲線を追跡していくことによって推算する。
		浅海域	風域の変動なし	ブレットシュナイダー法	深海域について①水深が一定である場合と，②海底勾配が一定である場合の 2 種について，風速と吹送距離を与えて波浪予知曲線により算定する。
			変動性風域	坂本・井島法	深海波用の Wilson 法の考え方を浅海波の場合に採り入れて，変動性風域に対して，浅海波浪を波浪予知曲線によって求めるものである。
	うねり	深海域	—	ブレットシュナイダー法	風域に対して波浪が発達しながら進んだ距離と，風域からはずれ，うねりとして減衰しながら進んだ距離をパラメーターにした式*により，うねり推算法での波浪を求めるものである。
数値 計算法	風浪 うねり	深海域	変動性風域	追跡法	計算領域内で初期波を発生させ，風域（風向・風速）の変動にしたがって波浪を Wilson 式にしたがって発達させながら，ラグランジュ的に追跡していく方法である。状況によっては個々の波の分布が不均一で，波の到達しない海域が生ずる欠点がある。
	風			格子点法	波浪推算の計算式と考え方は追跡法と同様であるが，個々の波の分布の不均一性を除くため，格子点上の波浪について，その進行を逆算することにより，常に格子点上の波浪の値が得られるように改良したものである。
	浪	浅海域		井島法	深海波を対象とした追跡法について，海底摩擦を考慮して浅海波用に拡張したもので，浅海域に対するブレットシュナイダー法の式をもとに，個々の波の発達を追跡していくものである。ただし，波の分布の不均一性の欠点は追跡法と同様である。

$$* \text{ブレットシュナイダーの式} \dots \begin{cases} \frac{(H_{1/3})_D}{(H_{1/3})_F} = \left[\frac{k_1 F_{\min}}{k_1 F_{\min} + D} \right]^{1/2} \\ \frac{(T_{1/3})_D}{(T_{1/3})_F} = \left[k_2 + (1 - k_2) \frac{(H_{1/3})_D}{(H_{1/3})_F} \right]^{1/2} \end{cases}$$

ここに $k_1 \doteq 0.4$ $k_2 \doteq 2.0$ (ともに無次元定数)

$F_{\min}$: 風波を発生させた風域の長さ (最小吹送距離)

D : うねりの減衰距離

$(H_{1/3})_F$, $(T_{1/3})_F$: 風域の終端における有義波の波高及び周期

$(H_{1/3})_D$, $(T_{1/3})_D$: 距離 D を進行した後のうねりの有義波高及び有義波周期

表 2-2-2 スペクトル法（第 1 世代モデル）

計算手段	対 象 波 浪	水 深	風 域 の 変 動	波浪推算手法 の 名 称	波 浪 推 算 手 法 の 概 要
図 式 計算法	うねり		風域の変動なし	PNJ 法	風域内の風速，吹走時間，吹走距離によって風波のスペクトル（ノイマンスペクトル）が規定されることをもとにして，波浪スペクトル予知曲線によって波高，周期を予報する。
数 値 計 算 法	風 浪 及 び う ね り	深海域	変 動 性 風 域	井上モデル	Hasselmann のエネルギー平衡方程式を基本として，風からのエネルギーの輸送と，砕波及び逆風による減衰を考慮して，周波数別方向別の 144 個の成分波の発生，発達，減衰を計算する。
				MRI モデル	エネルギー平衡方式を基本式として，成分波の発生，発達，減衰を計算する考え方は，井上モデルと同様であるが，以下の点で相違している。 ①周波数別方向別の成分波の数が細かい。(352 個) ②海水の内部摩擦によるエネルギー消散の効果を考慮している。 ③逆風による減衰が MRI モデルの方が弱い。 ④波のエネルギーの伝播の方式が滑らかである。
				山口・土屋 モ デ ル	エネルギー平衡方式を基本式として，成分波の発生，発達，減衰を計算する考え方は，井上モデルと同様であるが，以下の点で相違している。 ①周波数別方向別の成分波の数が細かい。(360 個) ②周波数成分波間の非線形干渉によるエネルギーの移流を考慮。 ③周波数スペクトル，方向スペクトルの形を実測値から求めた。 ④波のエネルギーの伝播の方式が滑らかである。
		浅海域		山口モデル	エネルギー平衡方程式を基本式として，深海域のエネルギー流出流入項に加えて，更に①海底面の摩擦，②海底砂地の浸透効果を考慮したものである。
		深海域		一 点 法 (山口の方法)	山口モデルを基本にして，計算時間を減らすため波浪推算地点に到達する各方向成分の経路上で，波の発達，減衰を計算する。
				一 点 法 (後藤の方法)	MRI モデルを基本にして，計算時間を減らすため波浪推算地点到達する各方面成分の経路上で，波の発達，減衰を計算する。

表 2-2-3 スペクトル法（第 2 世代モデル）

計算手段	対 象 波 浪	水 深	風域の 変 動	波浪推算手法 の 名 称	波 浪 推 算 手 法 の 概 要
数 値 計 算 法	風 浪 及 び う ね り *	深海域	変動性 風 域	TOHOKU II モ デ ル	鳥羽による波エネルギーに関する単一パラメーター発達方程式及び $2/3$ 乗則を基本方程式として、風の流入による波エネルギー（パラメーター）の変化を計算するものである。一方、うねりの発達・減衰についてはスペクトル法と同様の扱いをしている。
				MRI II モ デ ル	エネルギー平衡方程式を基本とした MRI モデルについて、次の点に改良を加えている。 ①風波のエネルギースペクトルを鳥羽の法則にしたがって、エネルギーピーク周波数をパラメーターとして表現する。 ②砕波によるエネルギー消散の計算項について観測データから求めた砕波確率を考慮している。
				DOLPHIN II モ デ ル (一 点 法)	エネルギー平衡方程式を基本式にして、風波の発達については方向別エネルギー（パラメーター）が理想発達条件のもとに発達するとし、うねりの伝播・減衰については、スペクトル法と同様な扱いをすることによって、波浪推算地点に到達する各方向成分の経路上で、波の発達、減衰を計算する。
				一 点 法 (後藤の方法)	エネルギー平衡方程式の発達項に Wilson 式から換算した式を用い、うねりの計算に Bretschneider 式を用いて、波のエネルギー及び群速度をパラメーターとして、波浪推算地点に到達する各方向成分の経路上で、波の発達、減衰を計算する。

* スペクトル法（第 2 世代モデル）は発達段階における風波のスペクトル構造の相似性をもとにしているため、本来うねりは取り扱えないが、これらモデルでは、うねりをスペクトル法で算定することによって補っている。

表 2-2-4 スペクトル法（第 3 世代モデル）

計算手段	対 象 波 浪	水 深	風域の 変 動	波浪推算手法 の 名 称	波 浪 推 算 手 法 の 概 要
数 値 計 算 法	風 浪 及 び う ね り	深海域	変 動 性 風 域	WAM モ デ ル	エネルギー平衡方程式を基礎方程式として、波の発生・発達・伝播および減衰に伴う波浪エネルギー（スペクトル）の変動を以下のようにして数値的に求める。 ①WAM モデルの Cycle4 では、風から波へのエネルギー輸送の計算式に、Janssen の quasi-linear 理論を導入し、より現実に近い定式化に改良されている。 ②エネルギー消散項では、白波砕波と底面摩擦の効果が考慮されている。 ③非線形相互作用によるエネルギー輸送は、4波共鳴の非線形相互作用を考慮している。ただし、4波共鳴の組み合わせは無数に存在することから、離散相互作用近似により、たった 1 組の組み合わせで代表させている。
		浅海域		MRI III モ デ ル	我が国（気象庁）で開発された波浪推算モデルであり、WAM と同様に、非線形相互作用によるエネルギー輸送項が直接的に表現されたモデルである。WAM と比較して漁港・港湾に対する実務実績はほとんどない。
		浅海域		SWAN モ デ ル	WAM をもとに地形性砕波やウェーブセットアップを考慮できるよう拡張したモデルであり、主に浅海域を対象にした波浪推算に用いられることが多い。ただし、深海域（外洋）を対象にした計算も可能である。
		深海域		WAVEWATCH III モ デ ル	WAM の性能拡張版として開発されており、WAM に比較して、うねり性波浪を含む異常波浪ケースのピーク時付近や周期の全期間について再現性が優れている。周期の精度が高いことから、うねり性波浪が存在する深海域（外洋）を対象にした計算に使用されることが多いが、浅海域を対象にした計算も可能である。

表 2-2-5 有義波法とスペクトル法の長所・短所の比較表

比較項目	有義波法	スペクトル法	長所・短所の比較
基本方程式	ウィルソン式	エネルギー平衡方程式	(有義波法) ウィルソン式は波の発達時のエネルギー変化過程を基本にしているが、波の減衰過程は全く考慮していない。 (スペクトル法) エネルギー平衡方程式の Source Function では、波の発達・減衰のメカニズムを、ほぼ正確に表現することが可能である。
二方向波浪系の表現	表現できない	方向スペクトルによって表現可能	(有義波法) 単一波として波を扱うため、風波とうねりの共存場等の二方向波浪系は表現できない。したがって推算波諸元にうねりは反映されない。 (スペクトル法) 方向スペクトルによって波を表現するため、風波とうねりの各々の発達・減衰を追跡可能である。
うねりの扱い	考慮できない (または別扱いで考慮する)	風波とうねりを同等に扱う	(有義波法) 基本的にうねりが考慮できないため、うねりが卓越するケースでは推算波高が低く、周期が短くなる。また、風場が複雑に変化するケースや、遠方の強風域で発達した波浪が一旦うねりとなりながら、近傍の強風域で再度発達するケースは再現できない。 (スペクトル法) 複雑な風場、波浪場のケースでも再現可能である。
計算時間	小	大	スペクトル法の計算時間は有義波法の約 10 倍。

資料2.3 不規則波の回折図

不規則波の回折図として図 2-3-1～図 2-3-11¹⁾を示す。図 2-3-1～図 2-3-7 は半無限堤の先端部における回折図であり、図中の実線は等波高比線、破線は等周期比線である。また、 θ は波の主方向を示し、座標は有義波の波長で無次元化されている。これらの図では、防波堤の裏側で反射されるような方向からの入射波は無視されている。図 2-3-8～図 2-3-11 は開口部における回折図であり、波の主方向は防波堤に対して垂直で、座標は開口幅によって無次元化された値である。また、右半分は回折係数、左半分は周期比であり、回折された不規則波の有義波周期は回折前のものと異なることを示している。各図に示している S_{max} は方向集中度パラメーターであり、 $S_{max}=10$ は風波、 $S_{max}=25$ は減衰初期のうねり、 $S_{max}=75$ はうねり性の波に相当する。

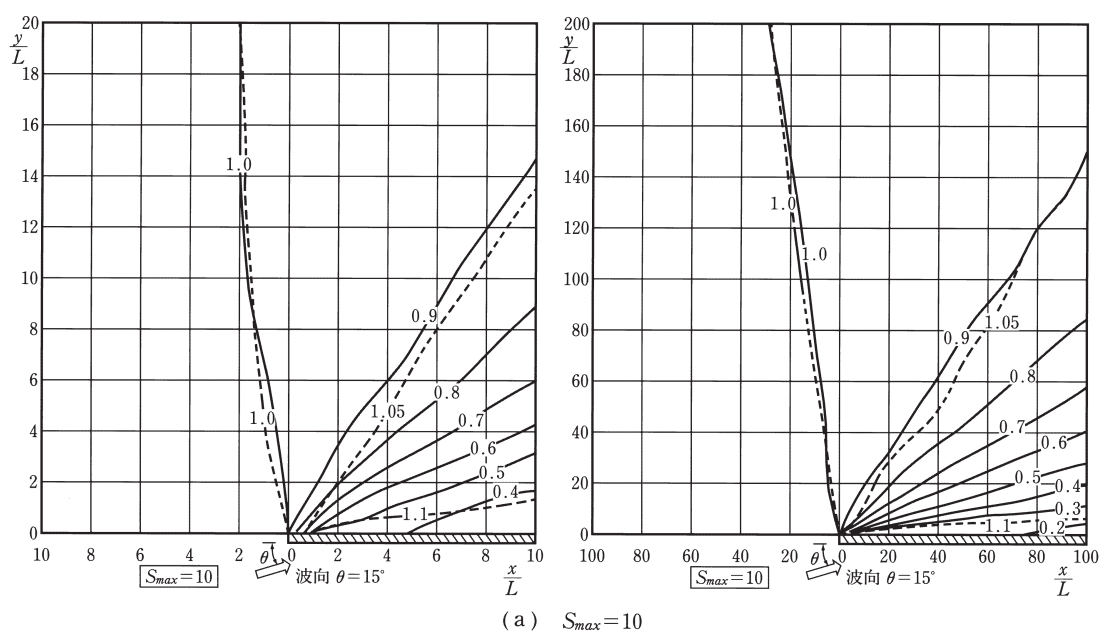


図 2-3-1 半無限堤による回折図 ($\theta = 15^\circ$)

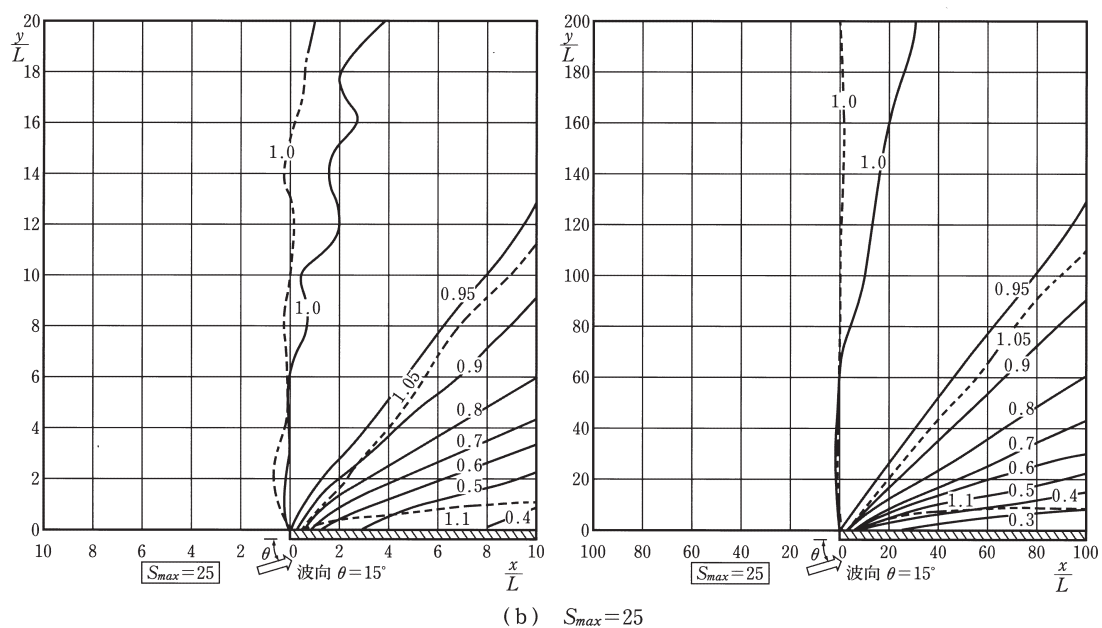


図 2-3-1 半無限堤による回折図 ($\theta=15^\circ$)

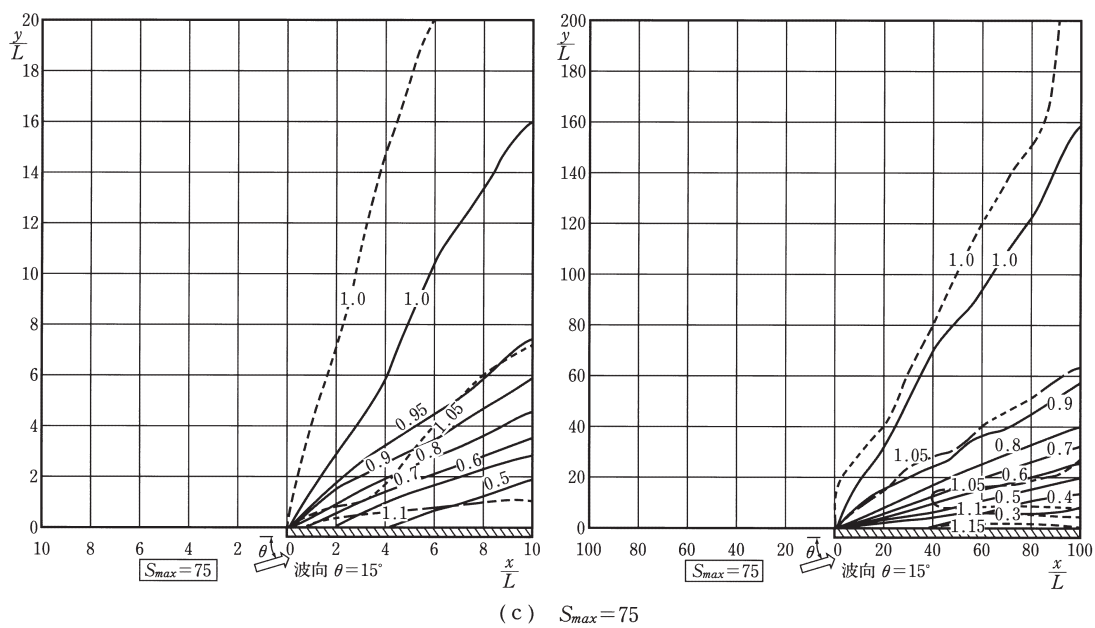


図 2-3-1 半無限堤による回折図 ($\theta=15^\circ$)

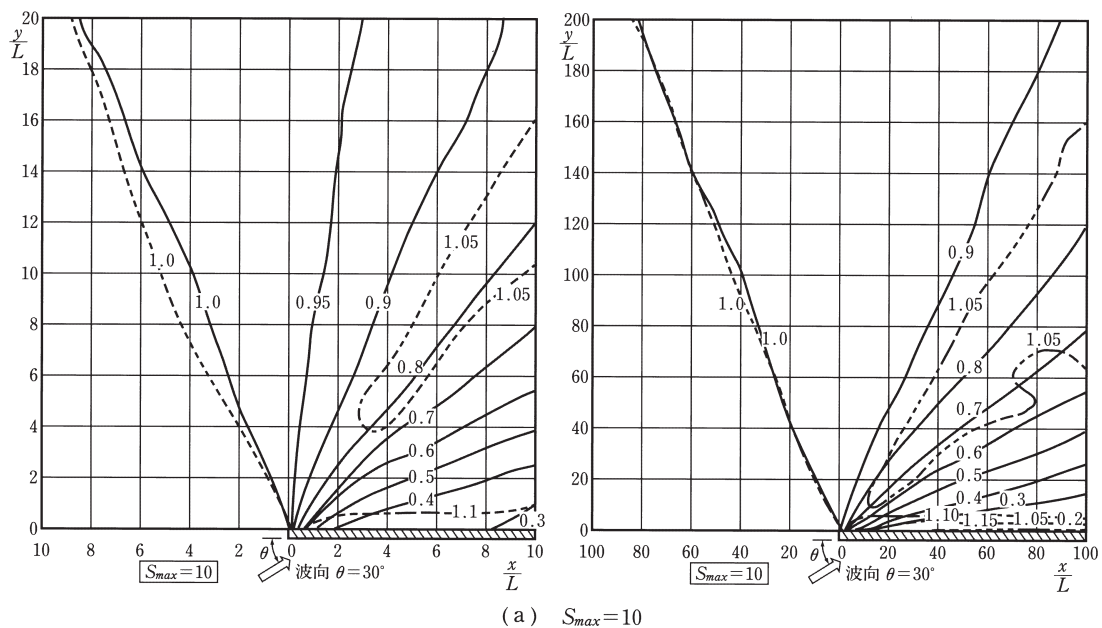


図 2-3-2 半無限堤による回折図 ($\theta=30^\circ$)

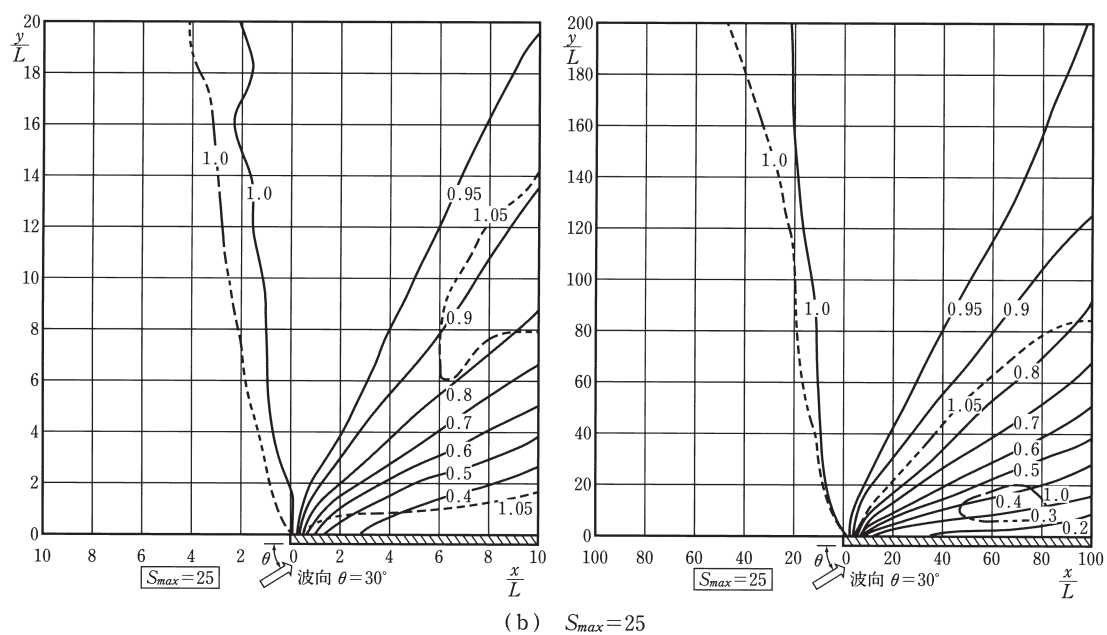


図 2-3-2 半無限堤による回折図 ($\theta=30^\circ$)

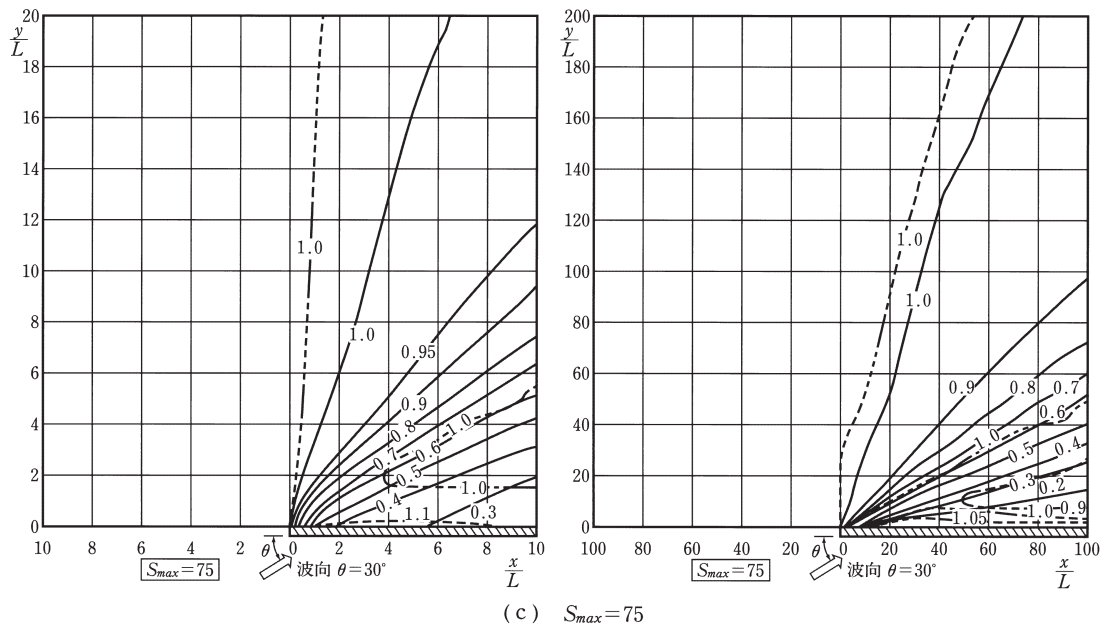


図 2-3-2 半無限堤による回折図 ($\theta=30^\circ$)

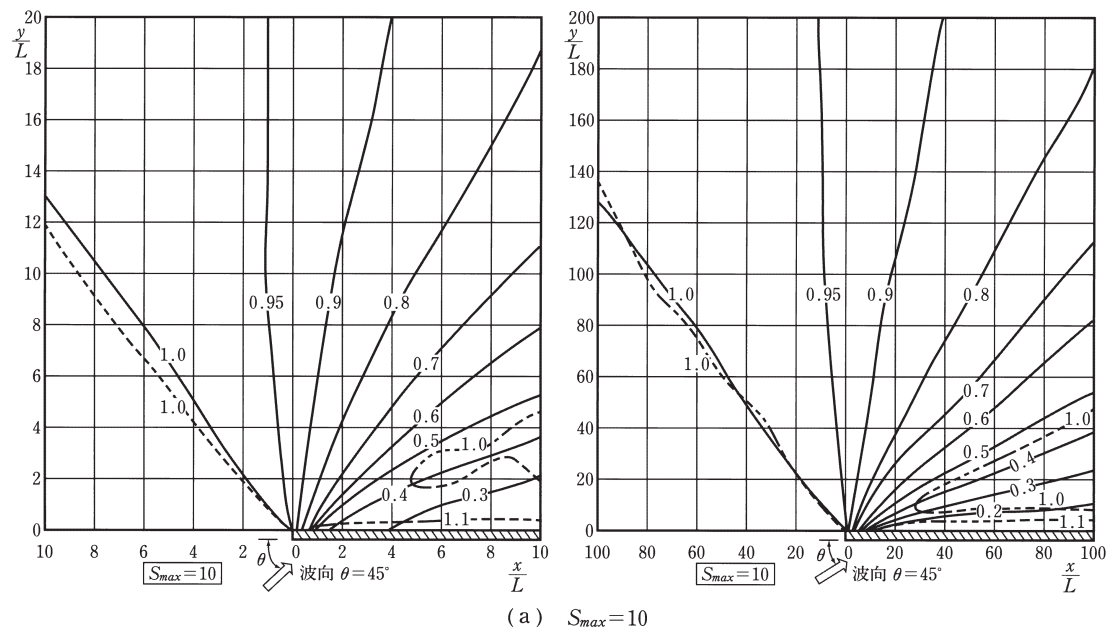


図 2-3-3 半無限堤による回折図 ($\theta=45^\circ$)

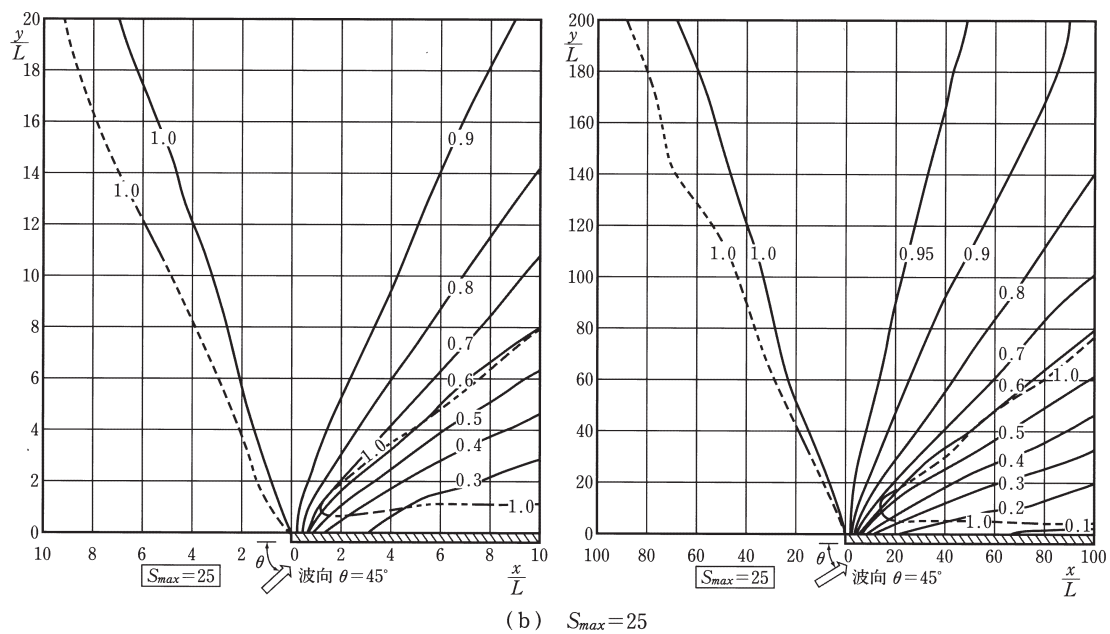


図 2-3-3 半無限堤による回折図 ($\theta=45^\circ$)

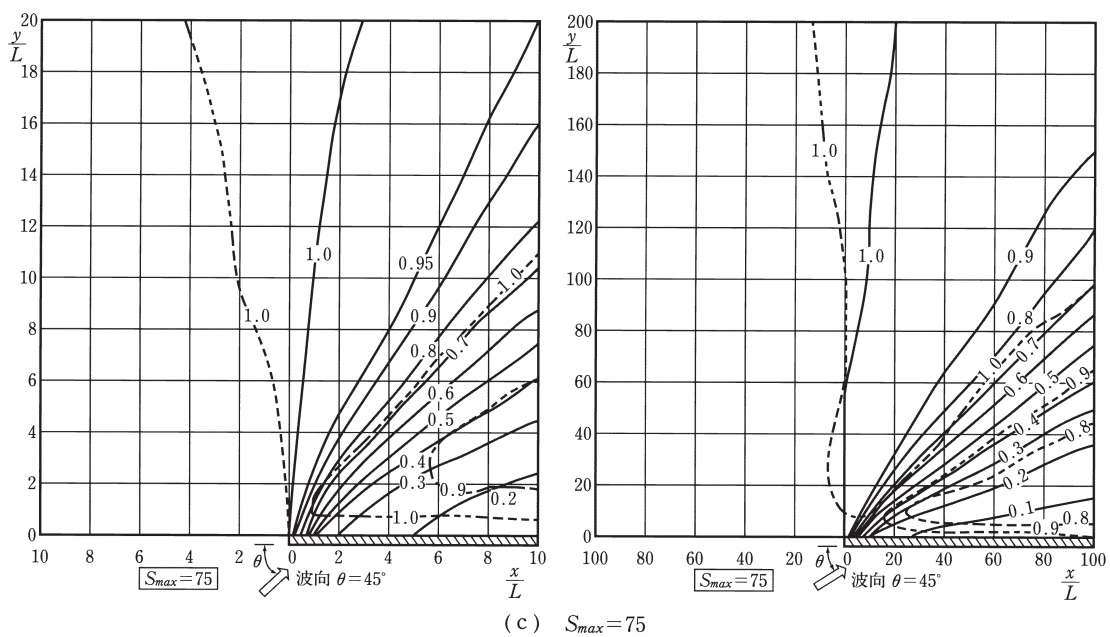


図 2-3-3 半無限堤による回折図 ($\theta=45^\circ$)

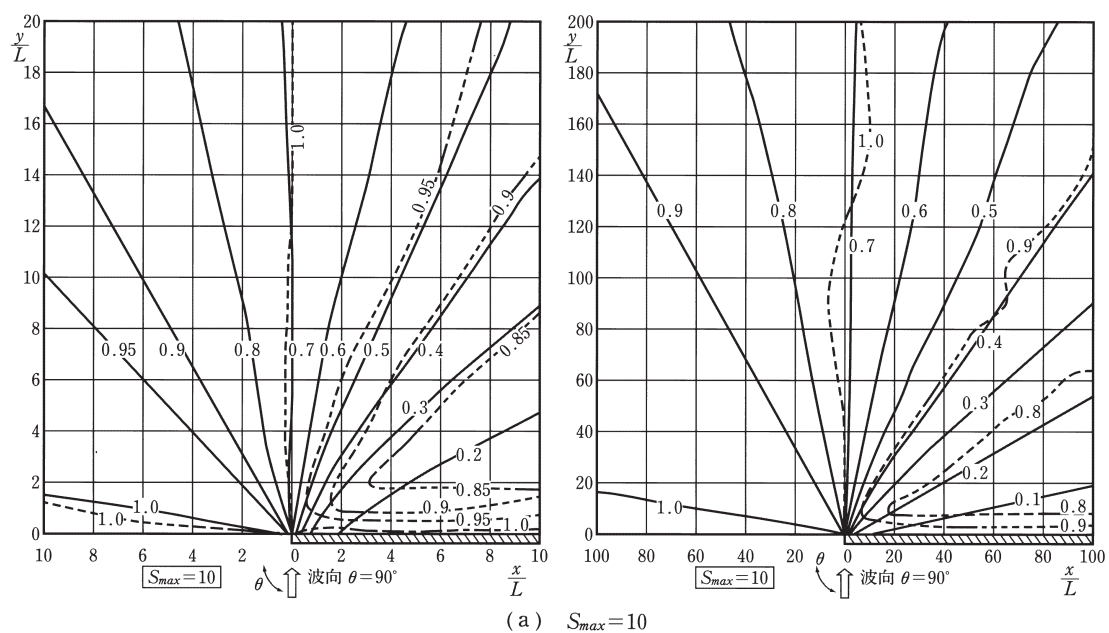


図 2-3-4 半無限堤による回折図 ($\theta=90^\circ$)

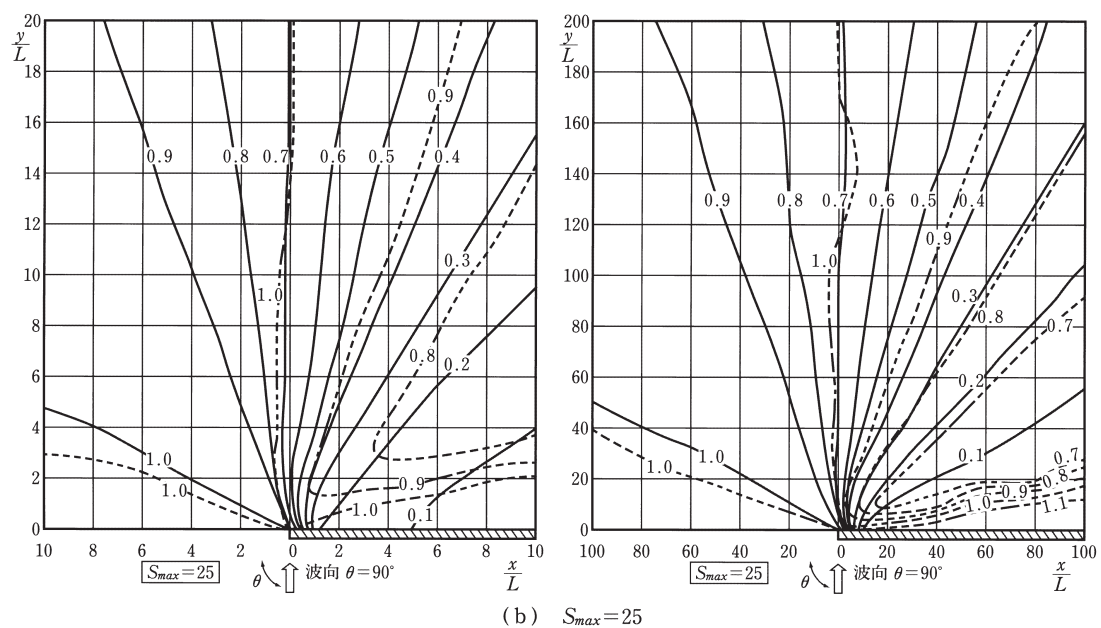


図 2-3-4 半無限堤による回折図 ($\theta=90^\circ$)

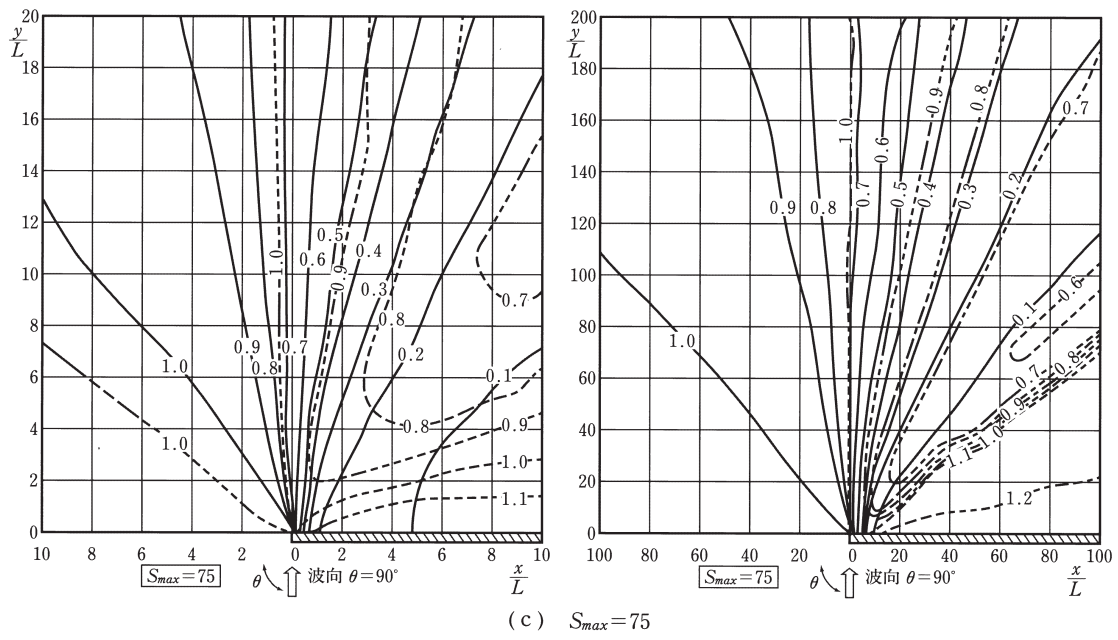


図 2-3-4 半無限堤による回折図 ($\theta = 90^\circ$)

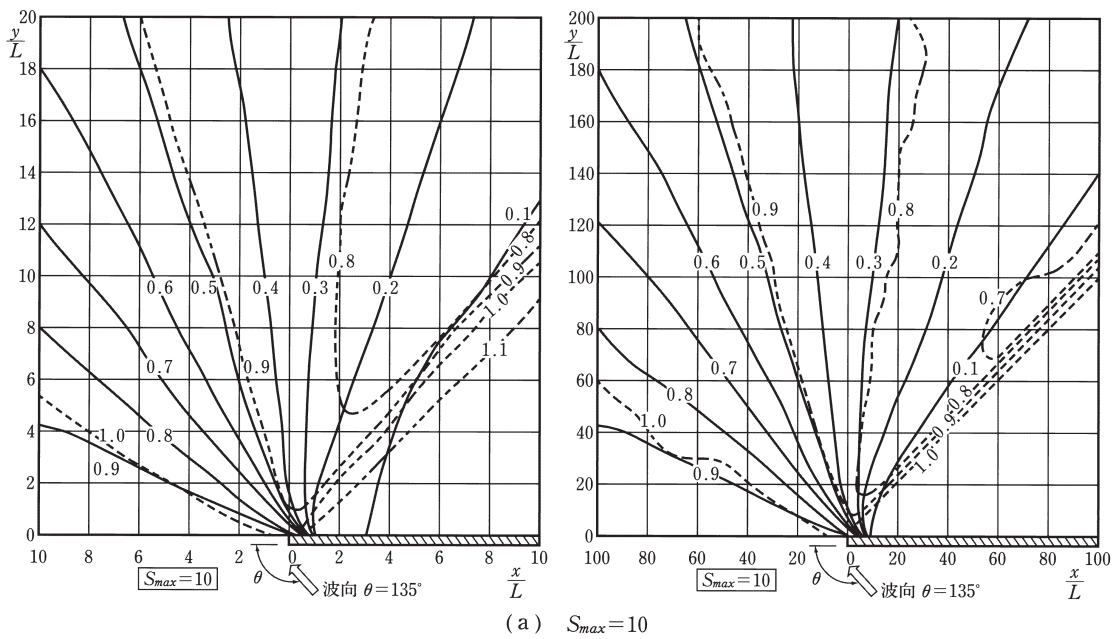


図 2-3-5 半無限堤による回折図 ($\theta = 135^\circ$)

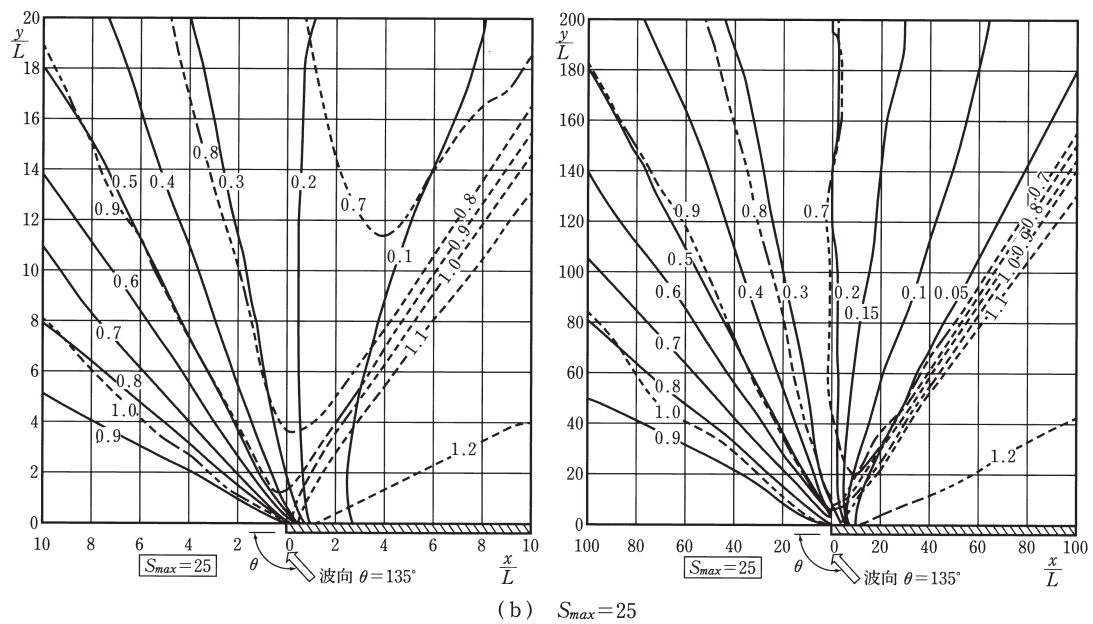


図 2-3-5 半無限堤による回折図 ($\theta = 135^\circ$)

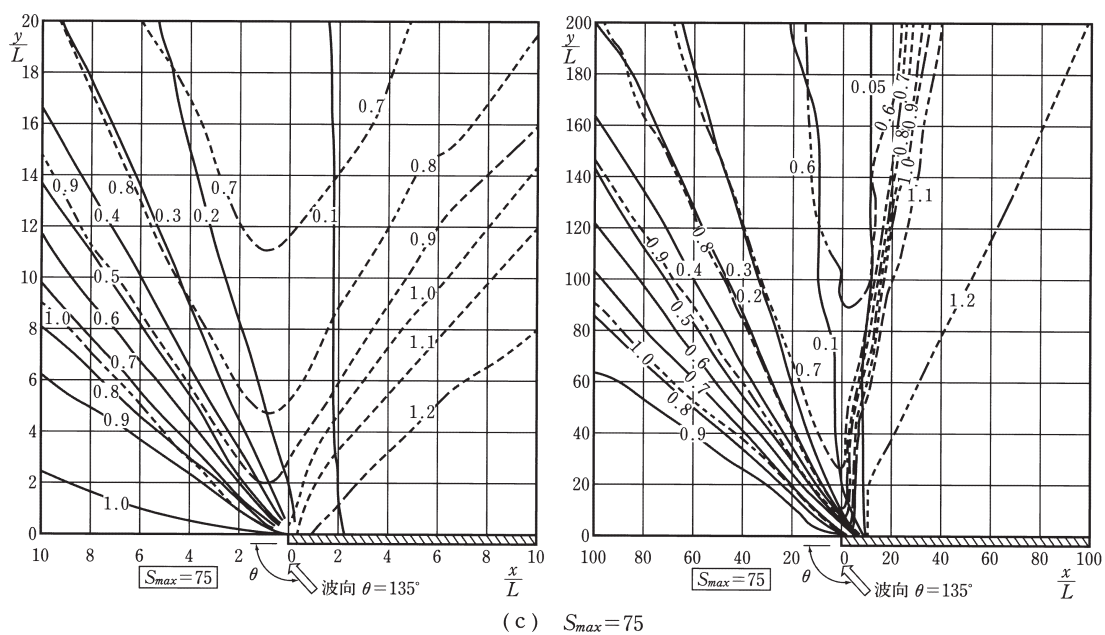


図 2-3-5 半無限堤による回折図 ($\theta = 135^\circ$)

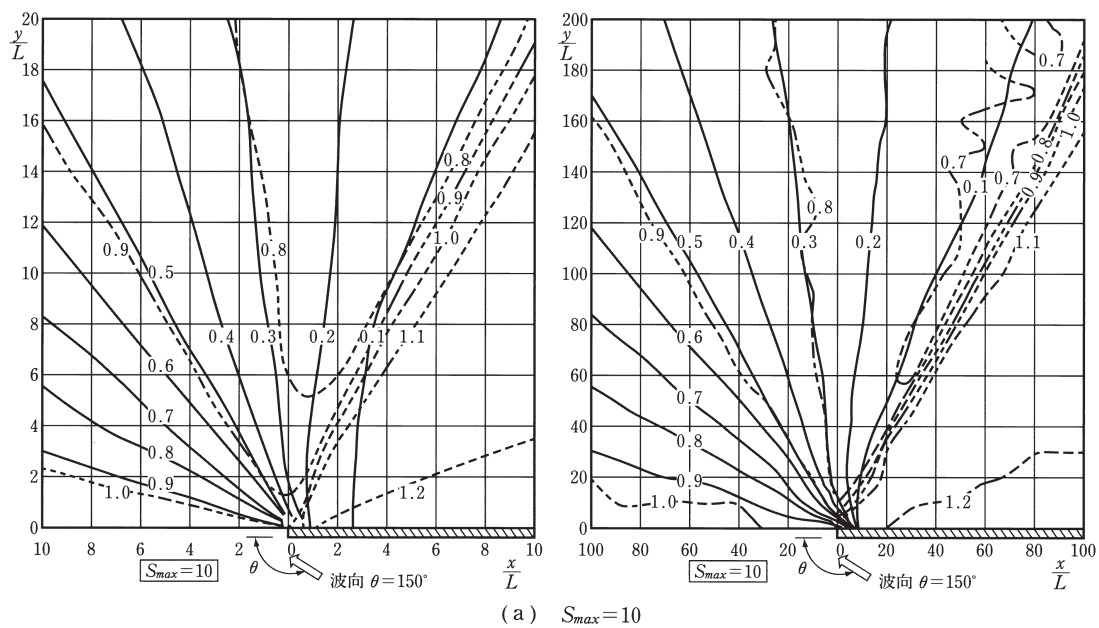


図 2-3-6 半無限堤による回折図 ($\theta=150^\circ$)

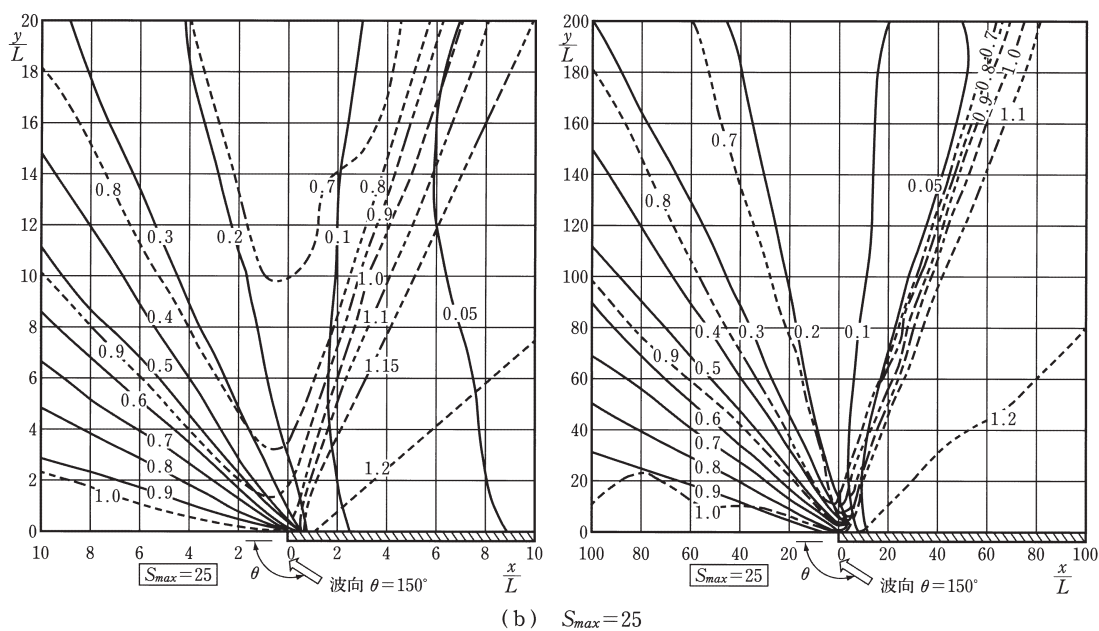


図 2-3-6 半無限堤による回折図 ($\theta=150^\circ$)

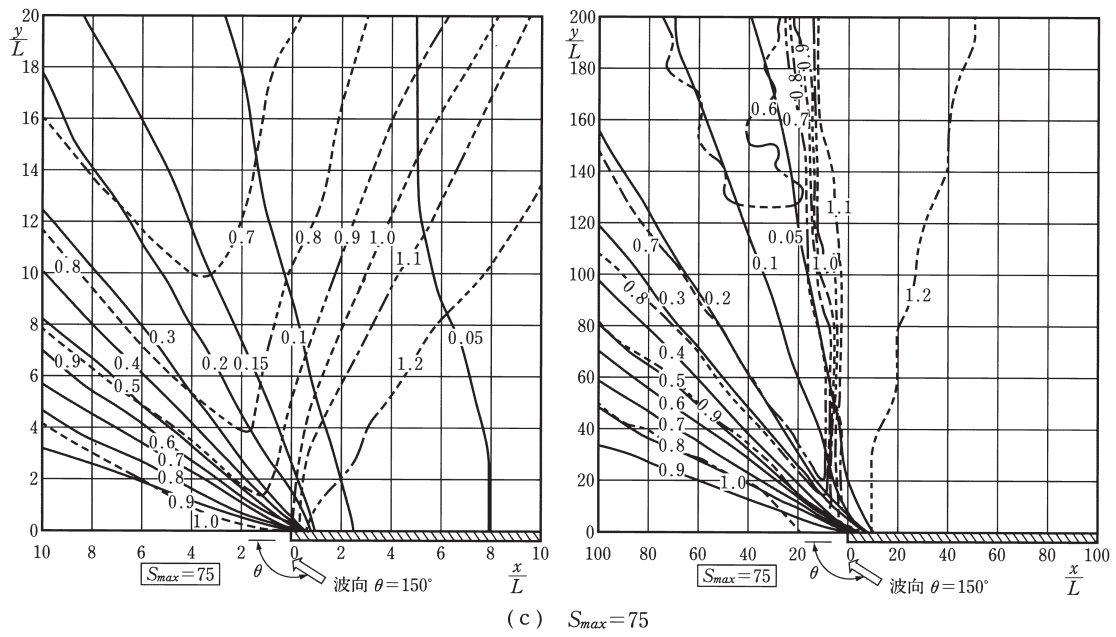


図 2-3-6 半無限堤による回折図 ($\theta = 150^\circ$)

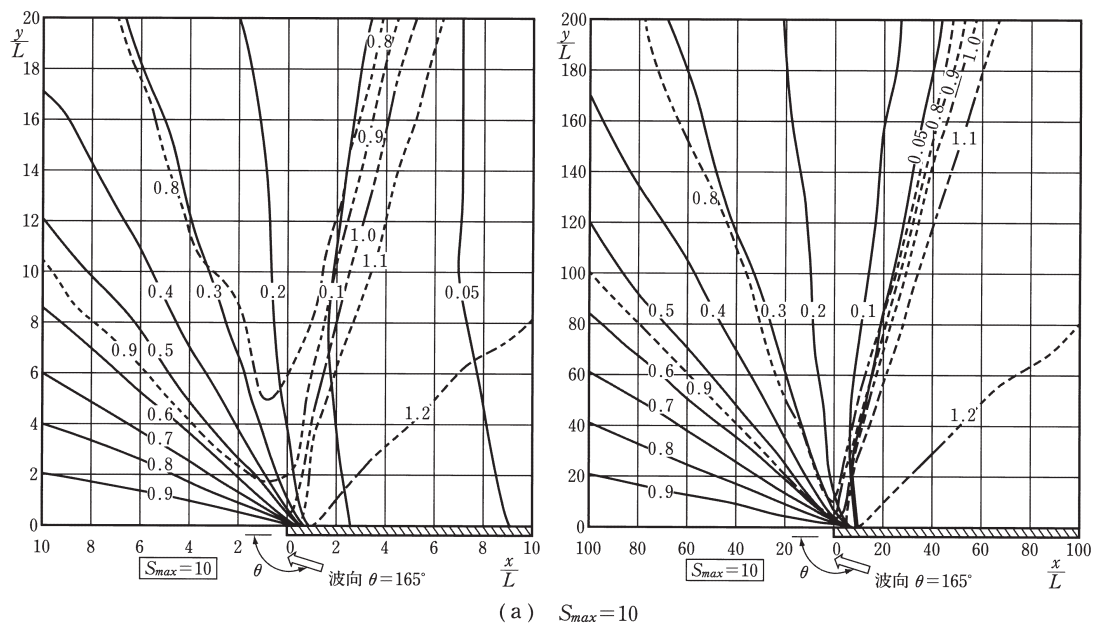


図 2-3-7 半無限堤による回折図 ($\theta = 165^\circ$)

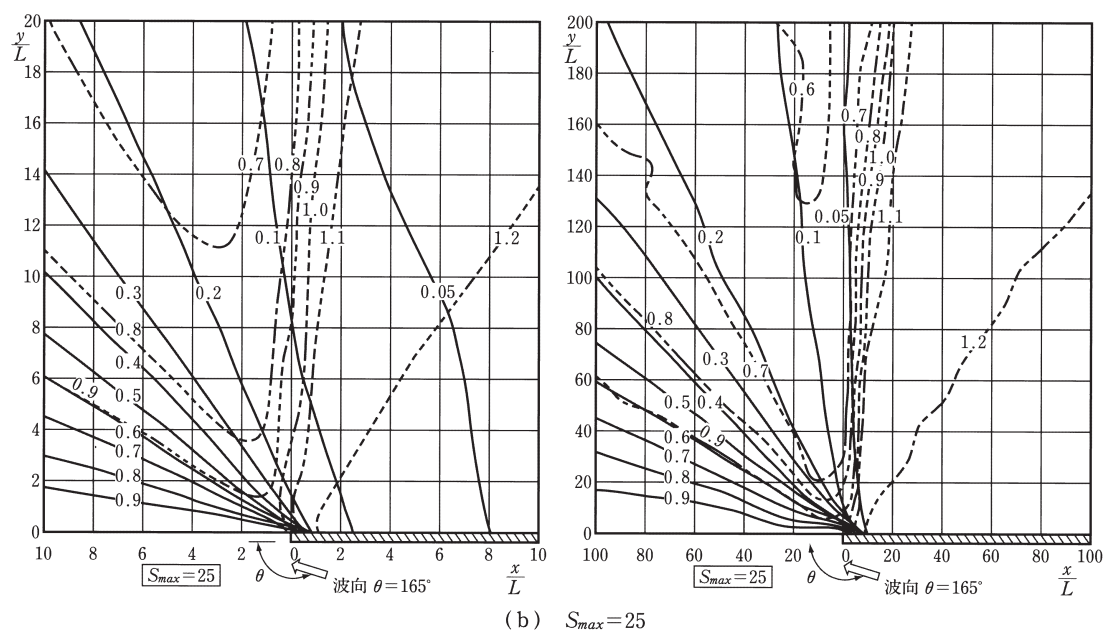


図 2-3-7 半無限堤による回折図 ($\theta = 165^\circ$)

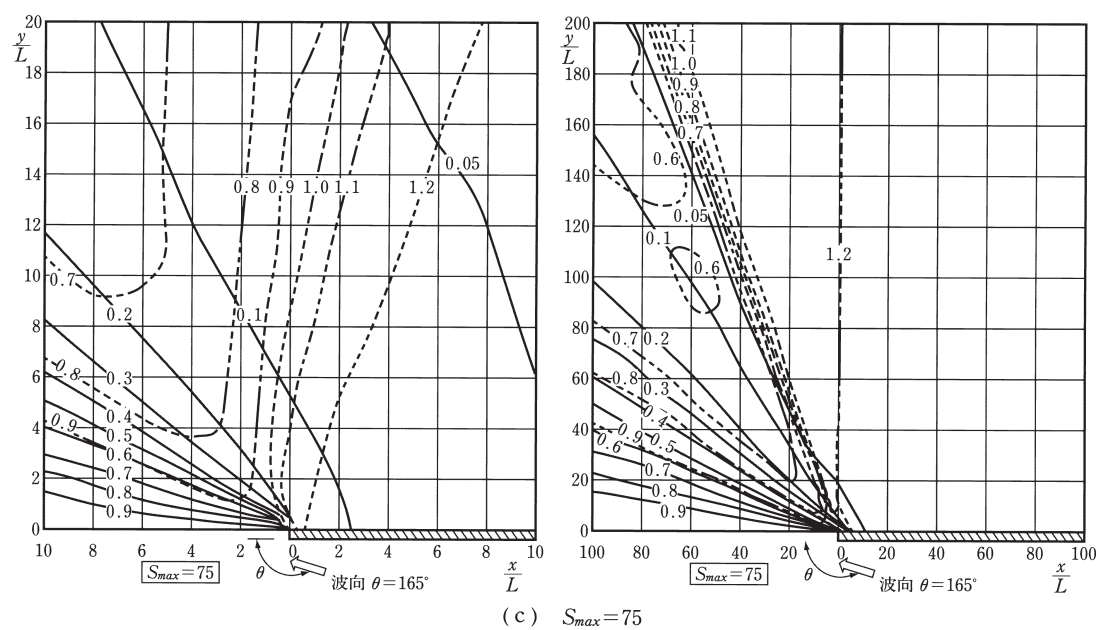


図 2-3-7 半無限堤による回折図 ($\theta = 165^\circ$)

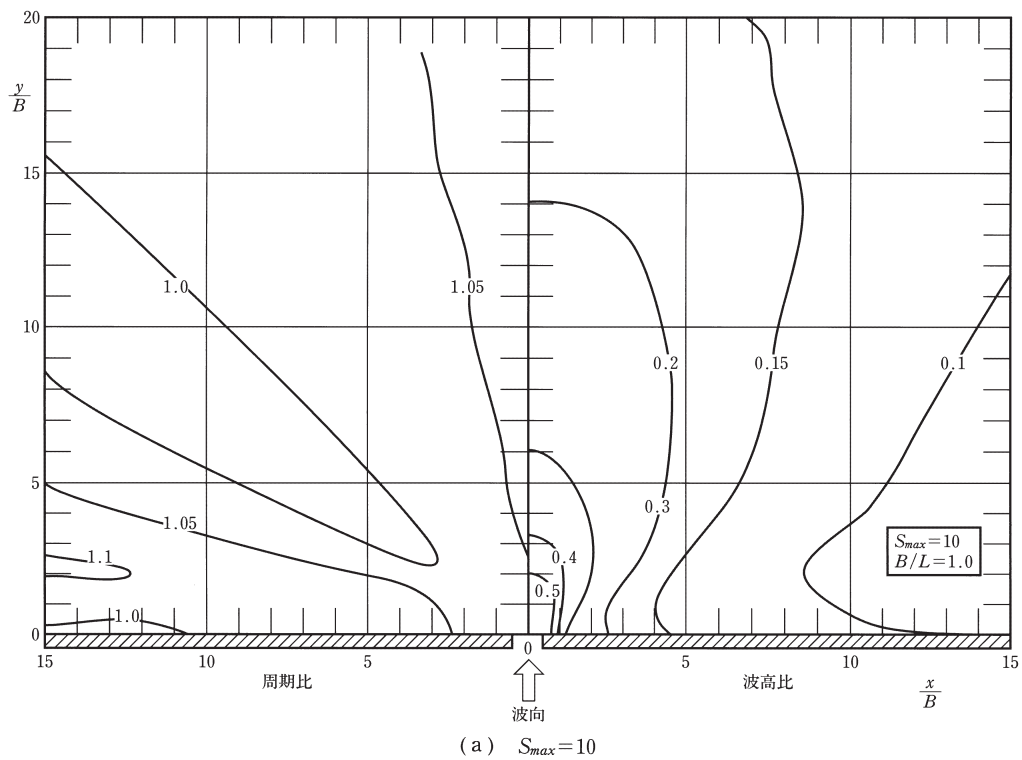
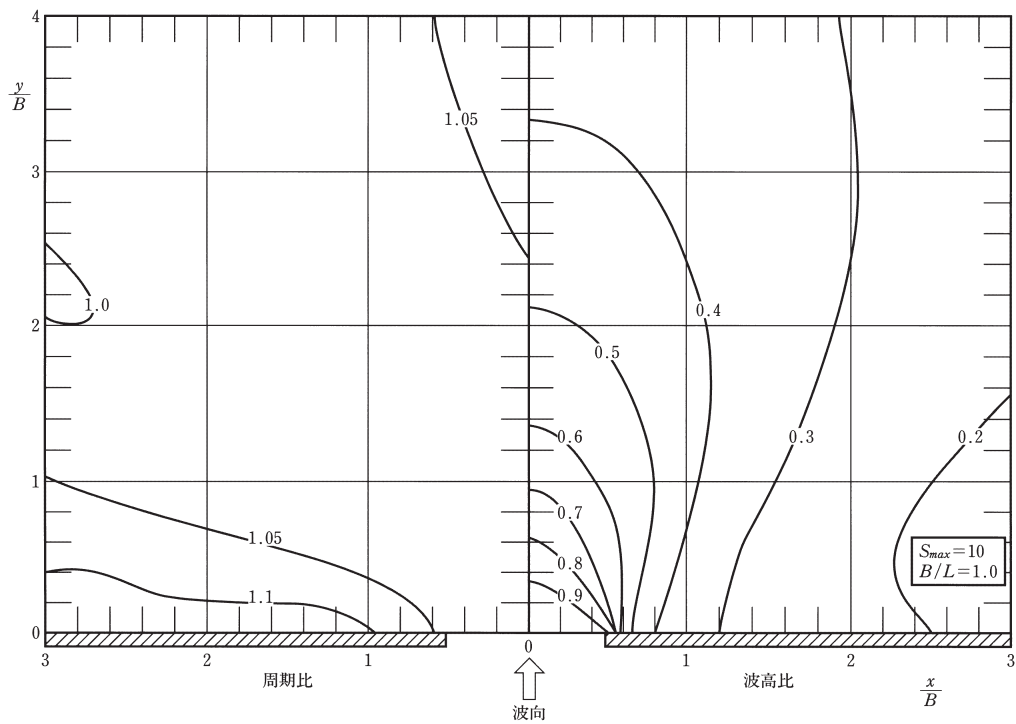
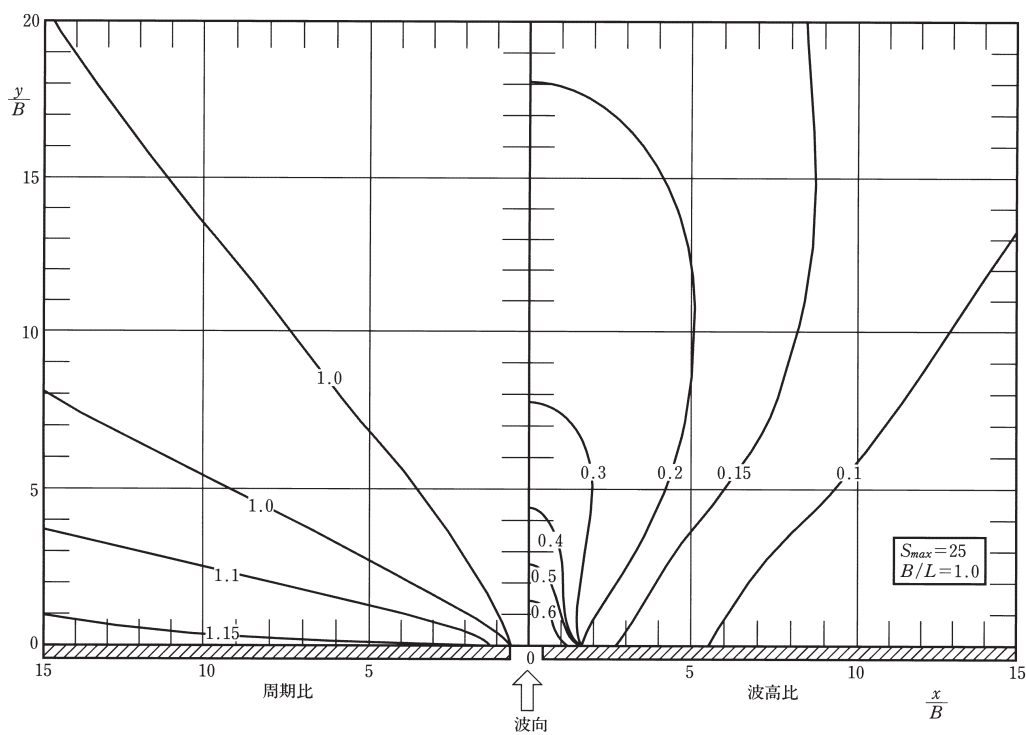
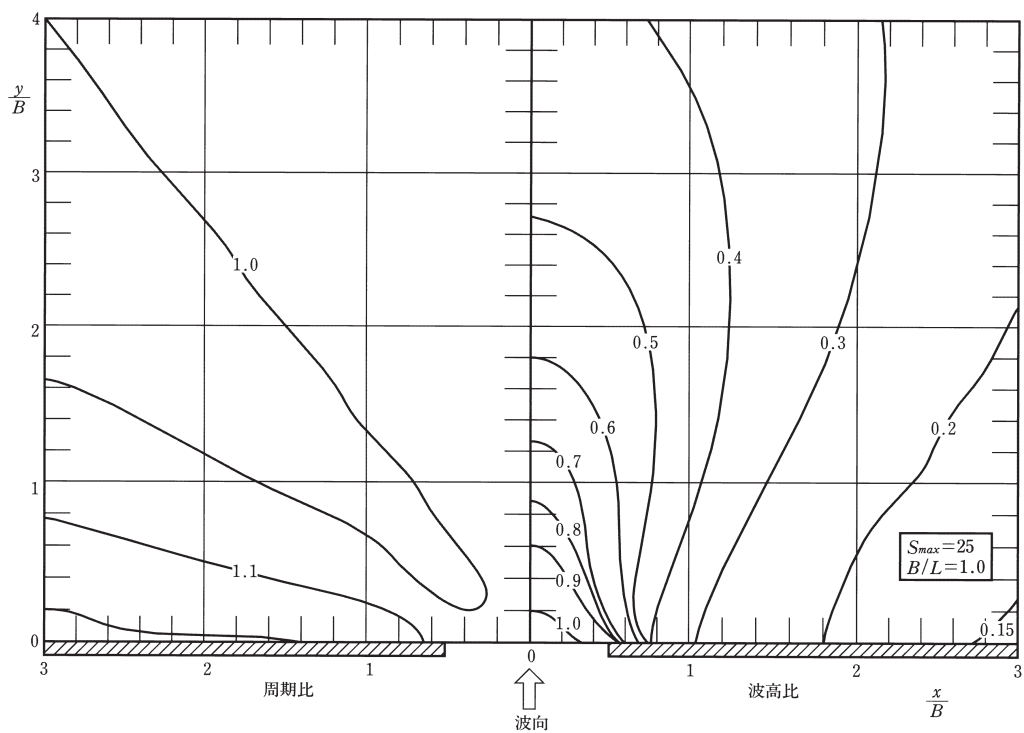


図 2-3-8 開口防波堤による回折図 ($B/L=1.0$)



(b) $S_{max}=25$

図 2-3-8 開口防波堤による回折図 ($B/L=1.0$)

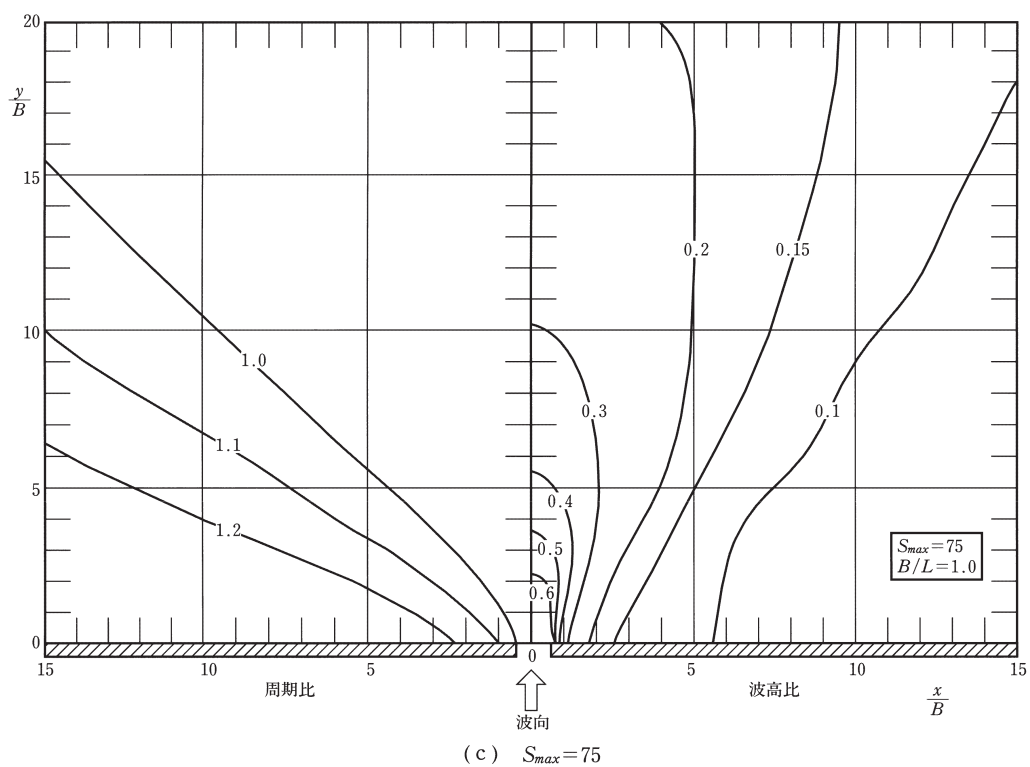
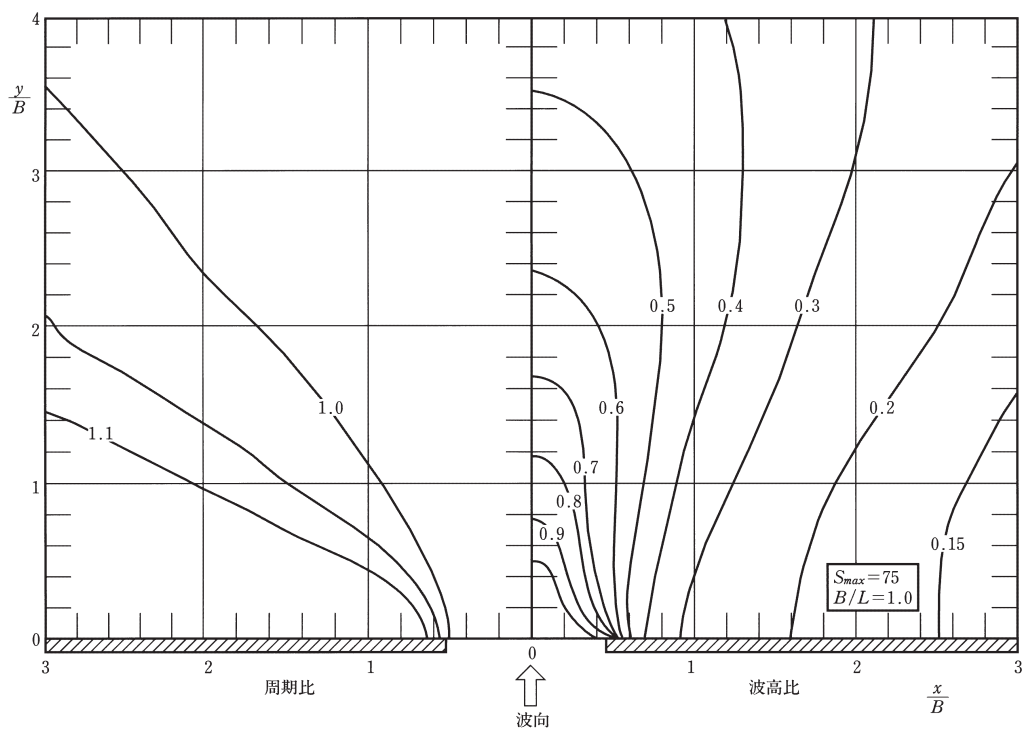


図 2-3-8 開口防波堤による回折図 ($B/L=1.0$)

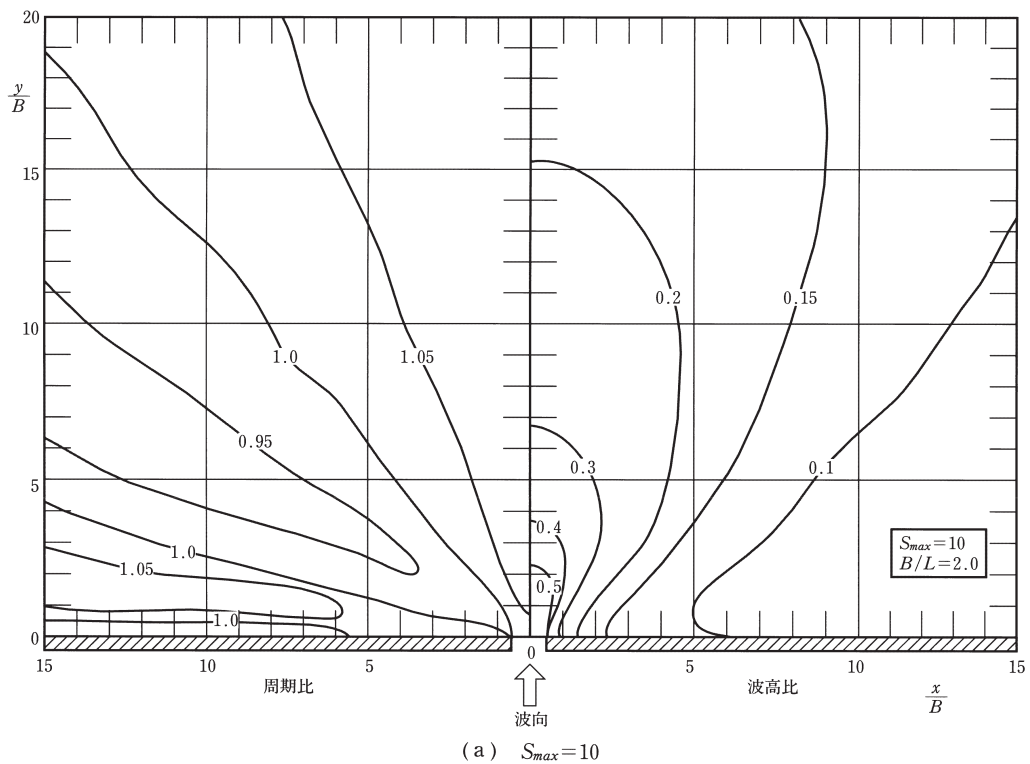
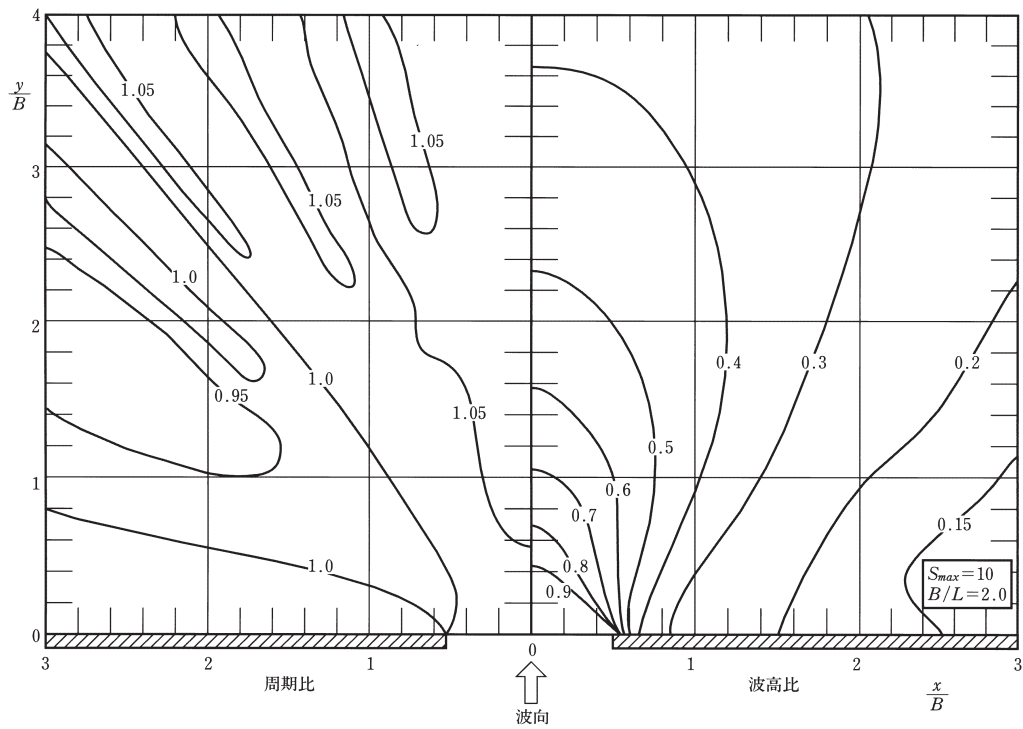


図 2-3-9 開口防波堤による回折図 ($B/L=2.0$)

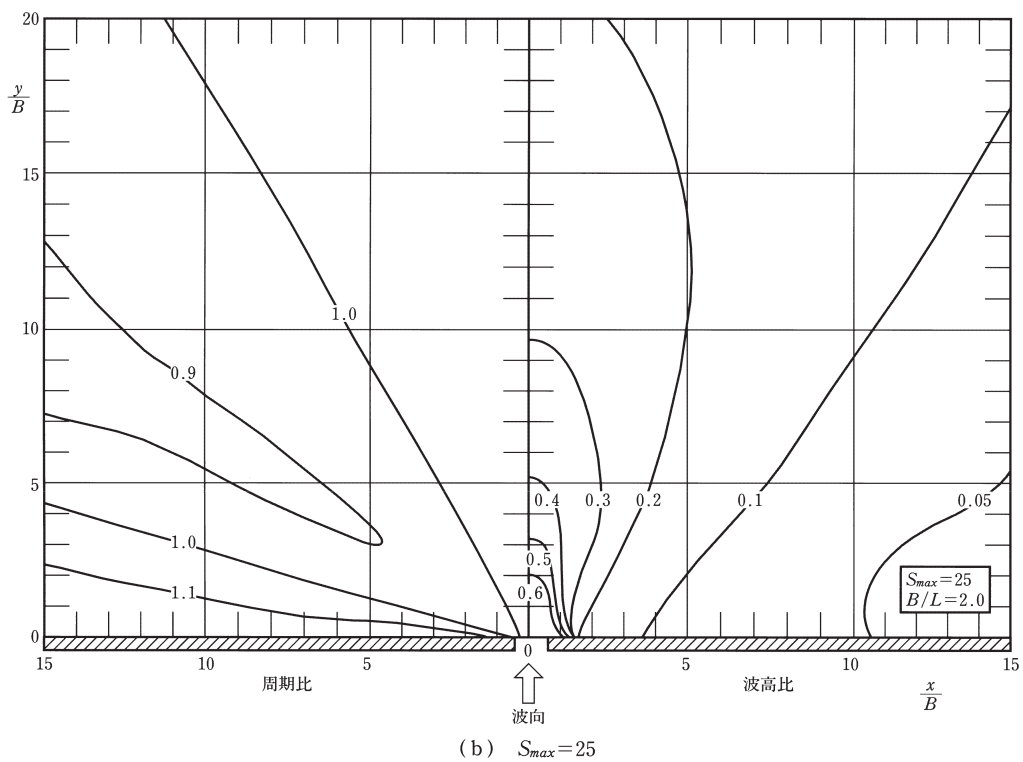
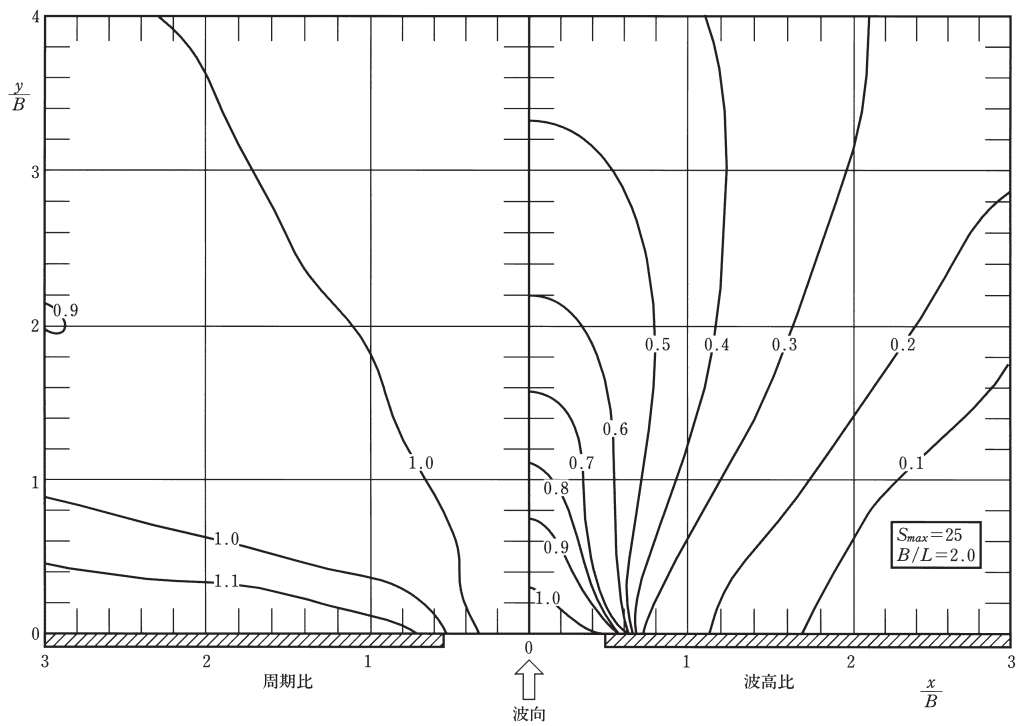
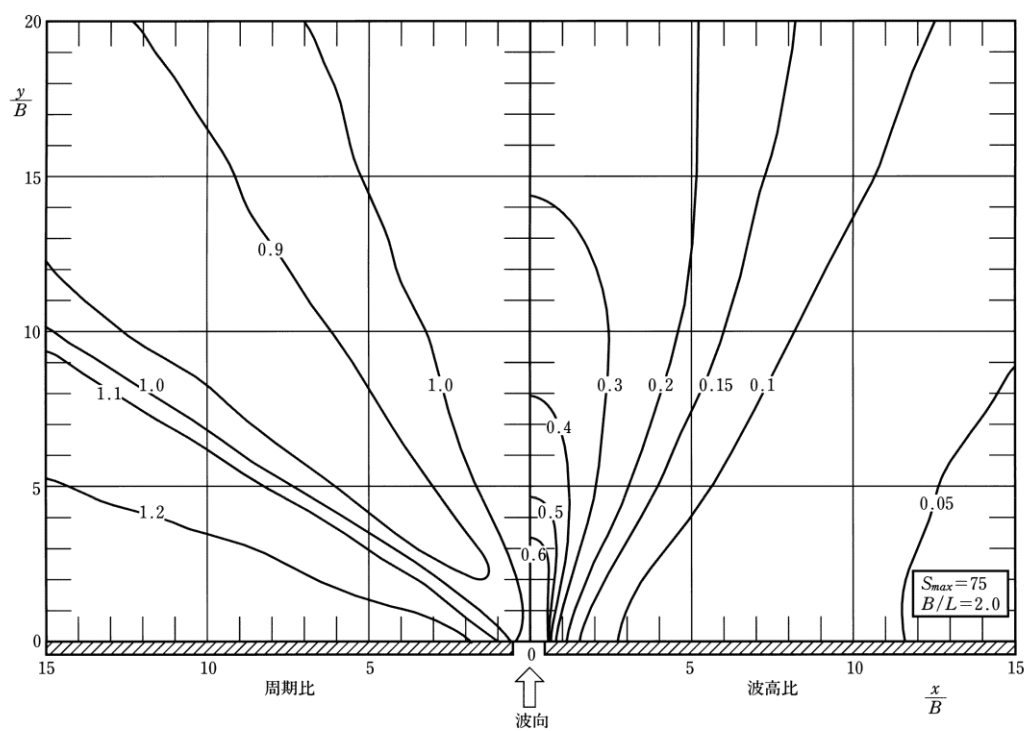
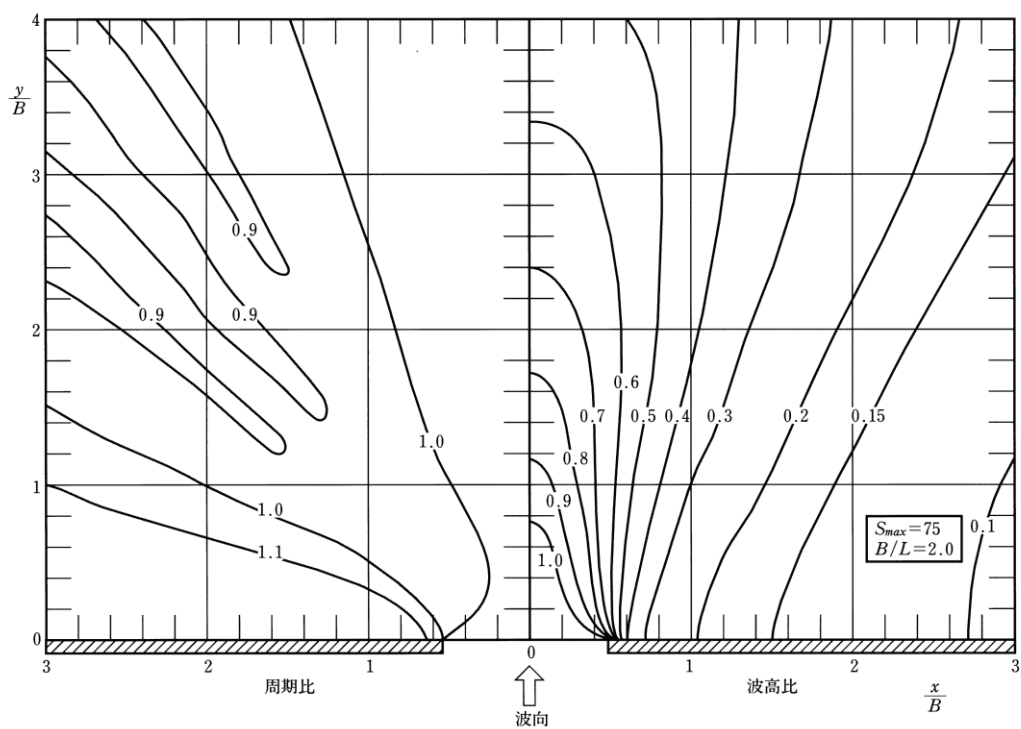


図 2-3-9 開口防波堤による回折図 ($B/L=2.0$)



(c) $S_{max}=75$

図 2-3-9 開口防波堤による回折図 ($B/L=2.0$)

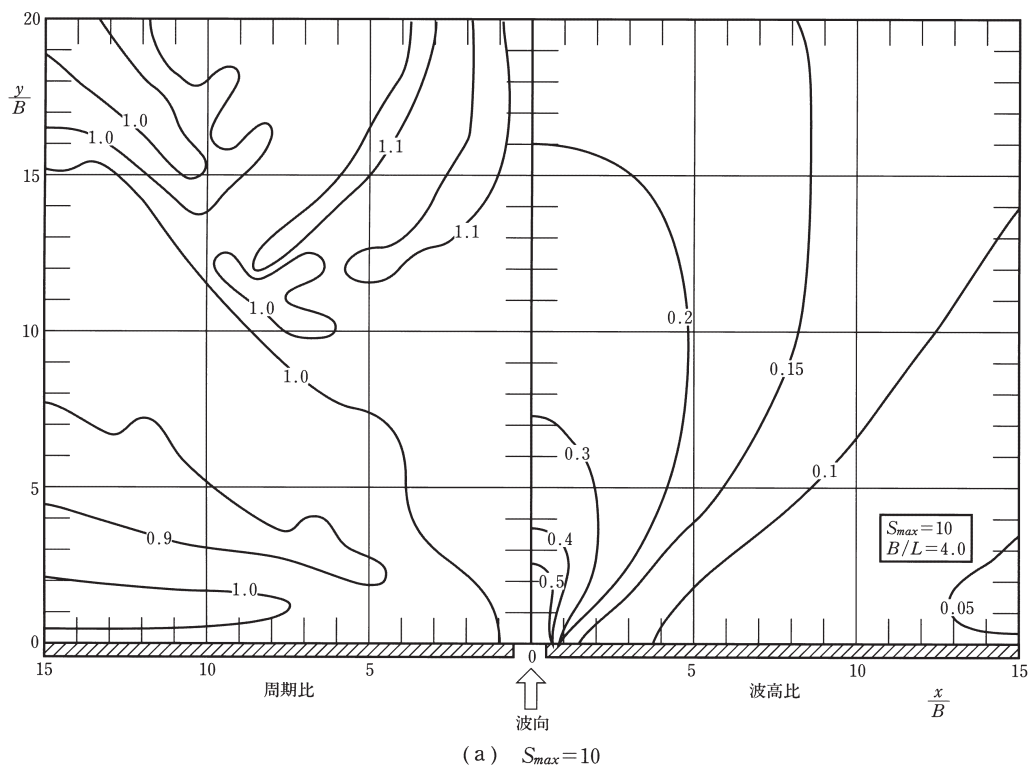
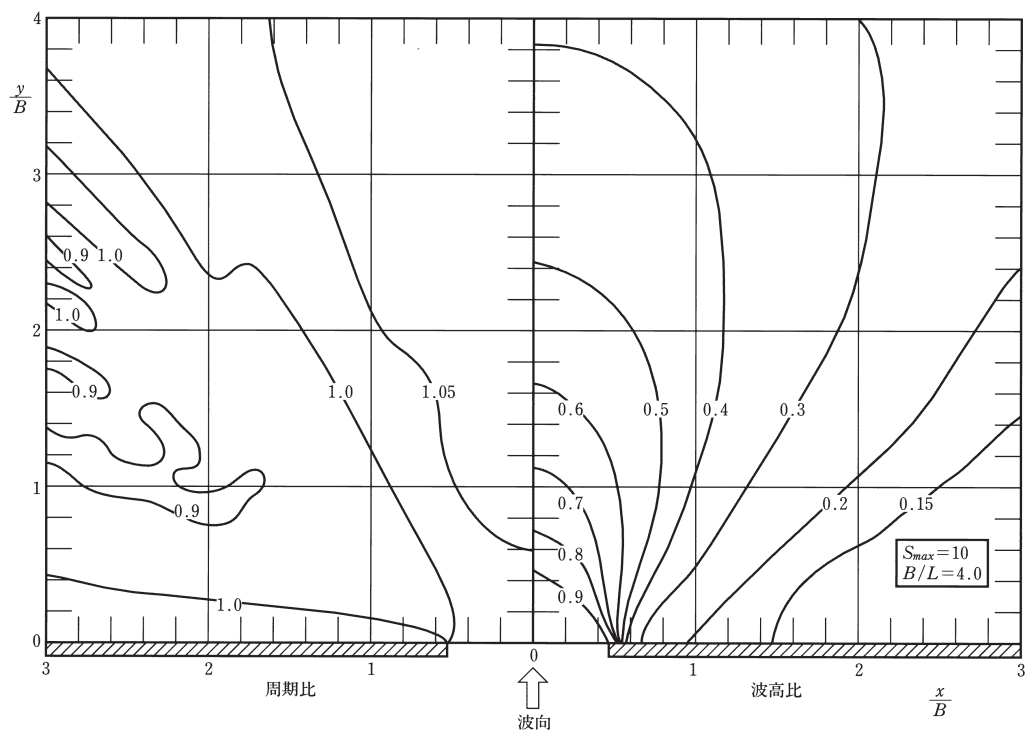


図 2-3-10 開口防波堤による回折図 ($B/L=4.0$)

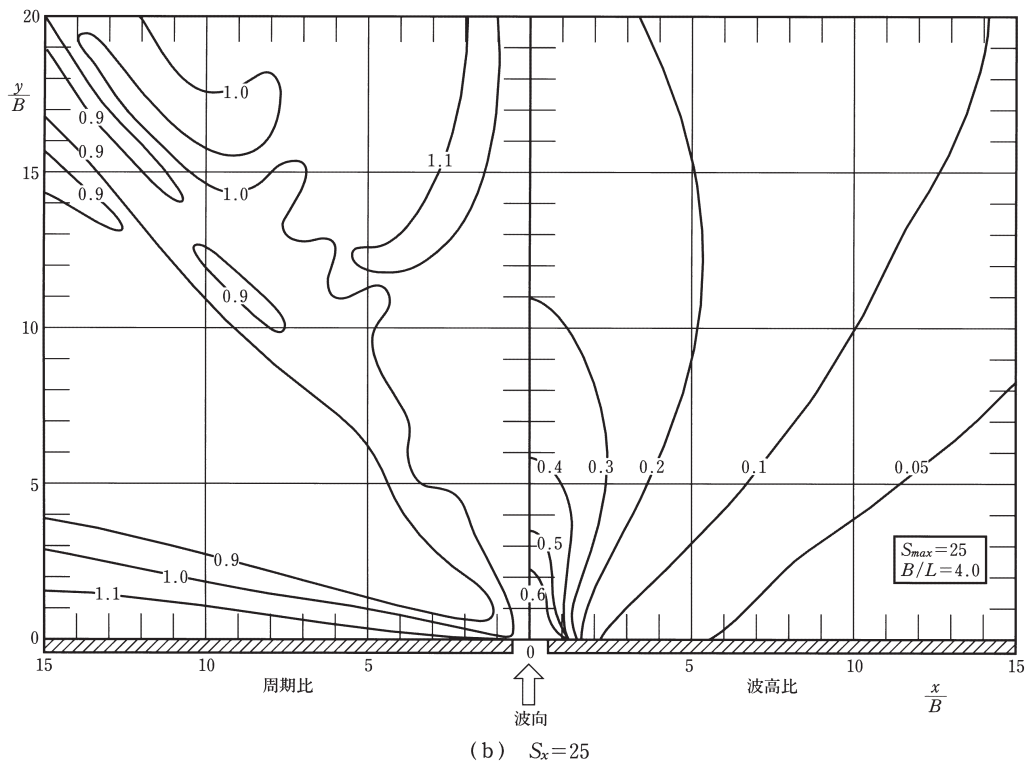
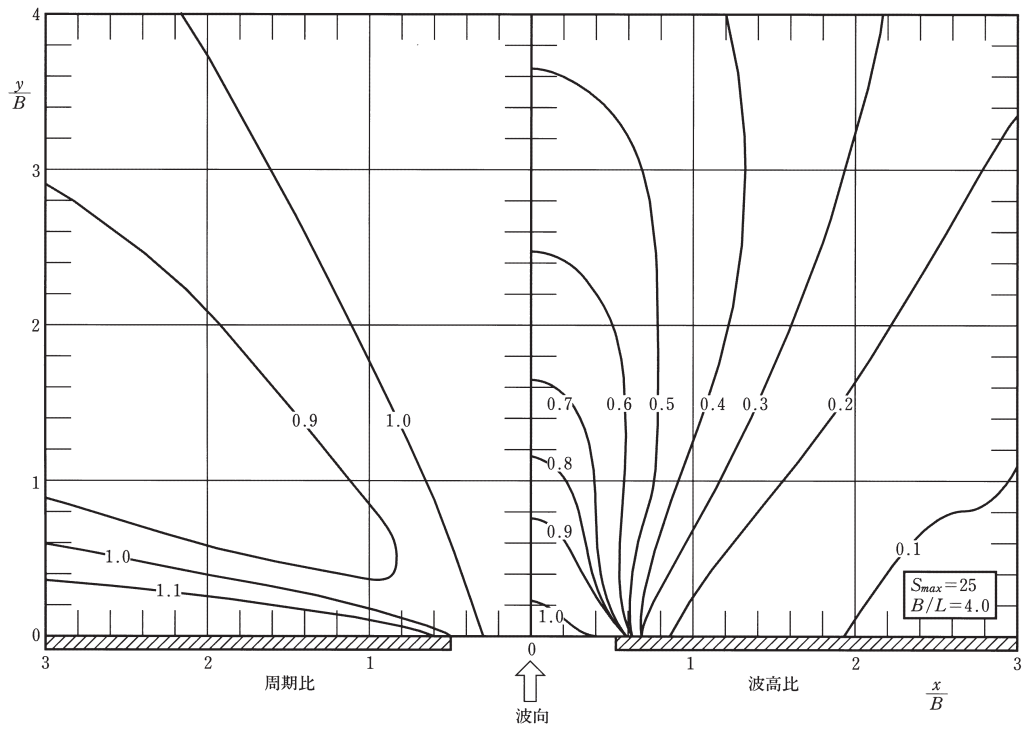


図 2-3-10 開口防波堤による回折図 ($B/L=4.0$)

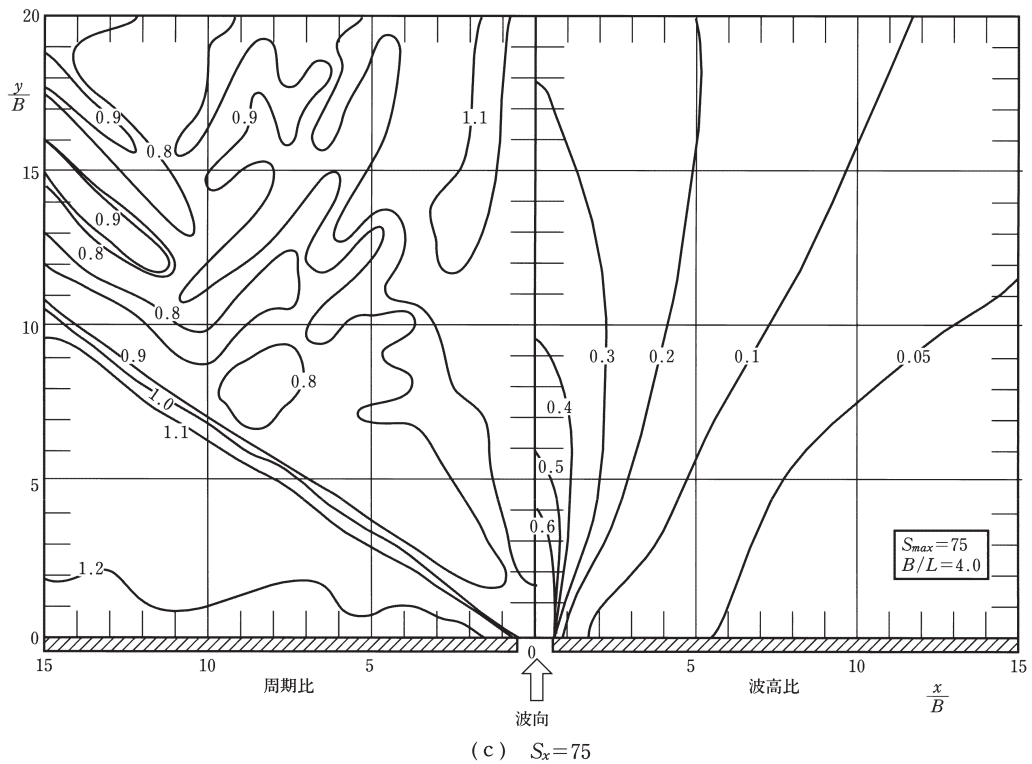
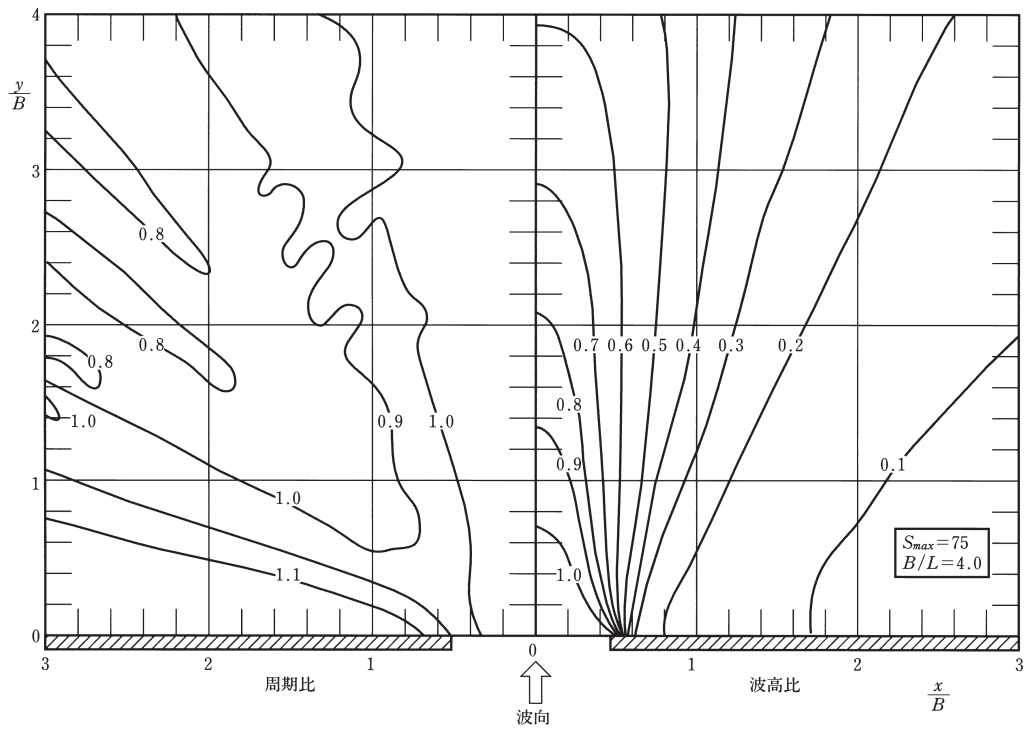
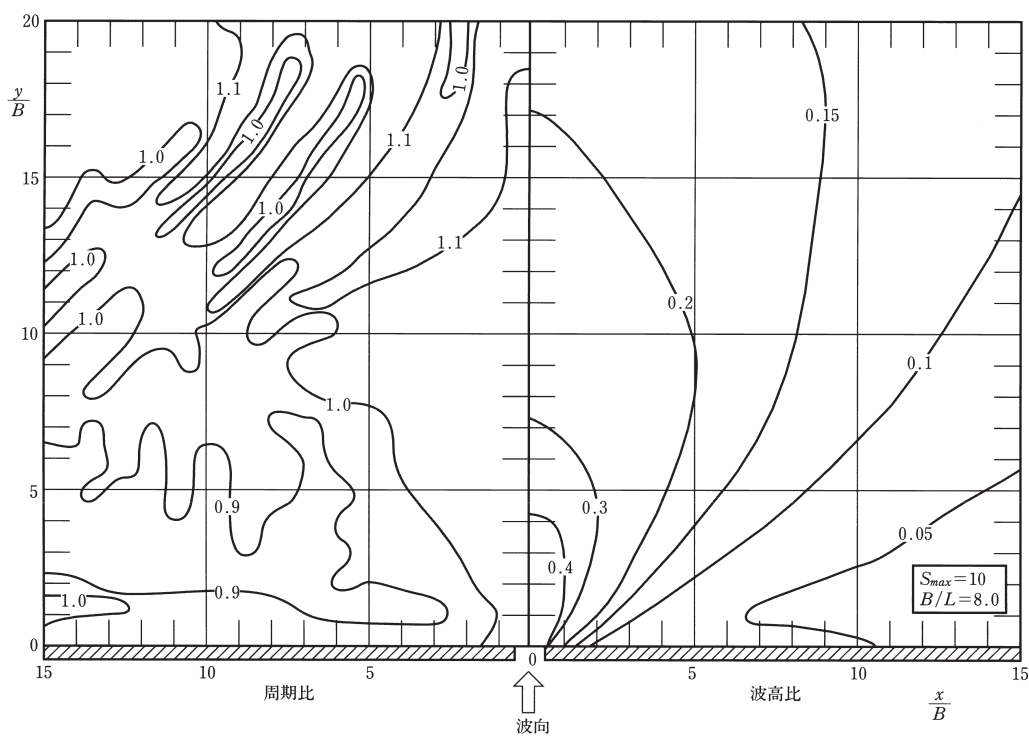
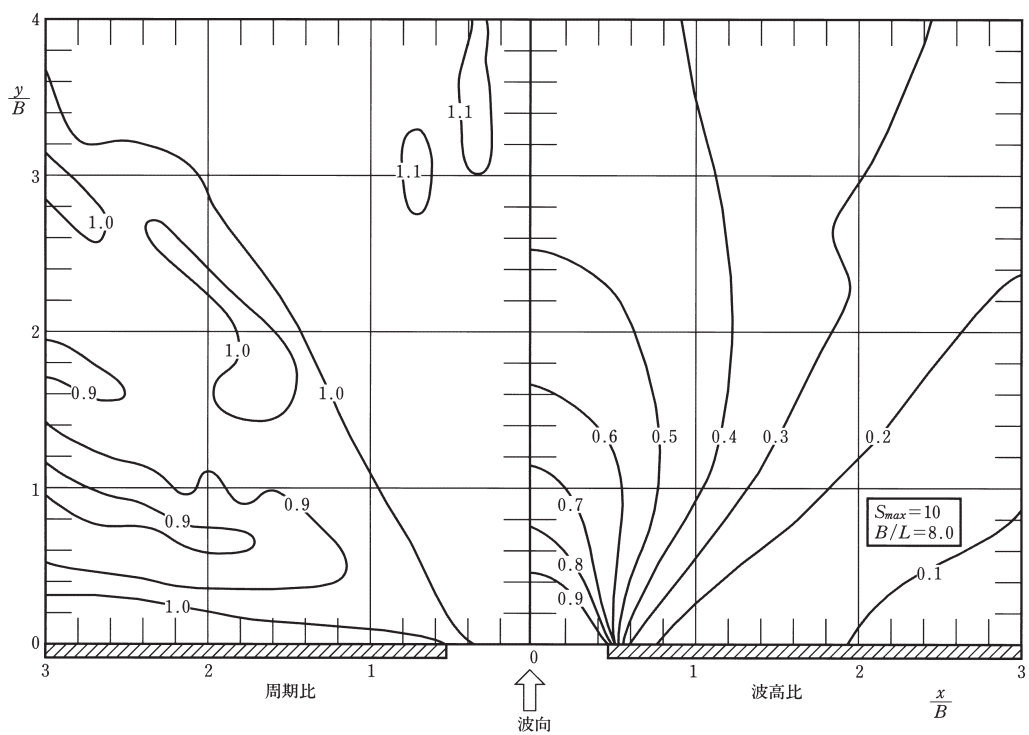


図 2-3-10 開口防波堤による回折図 ($B/L=4.0$)



(a) $S_{max}=10$

図 2-3-11 開口防波堤による回折図 ($B/L=8.0$)

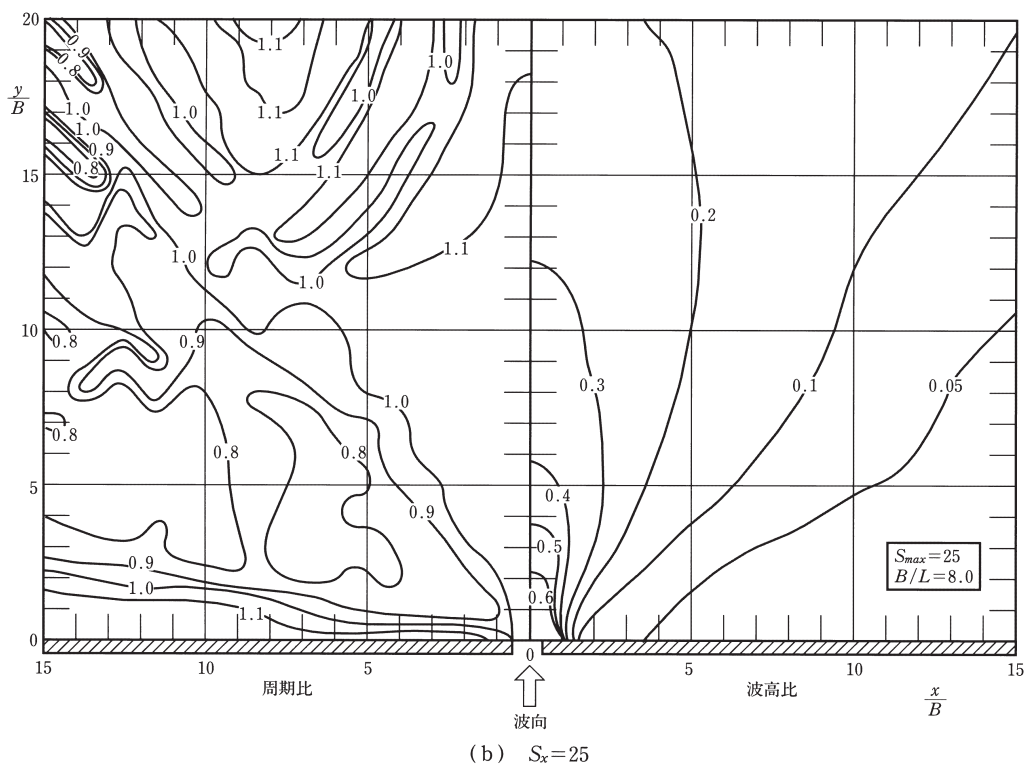
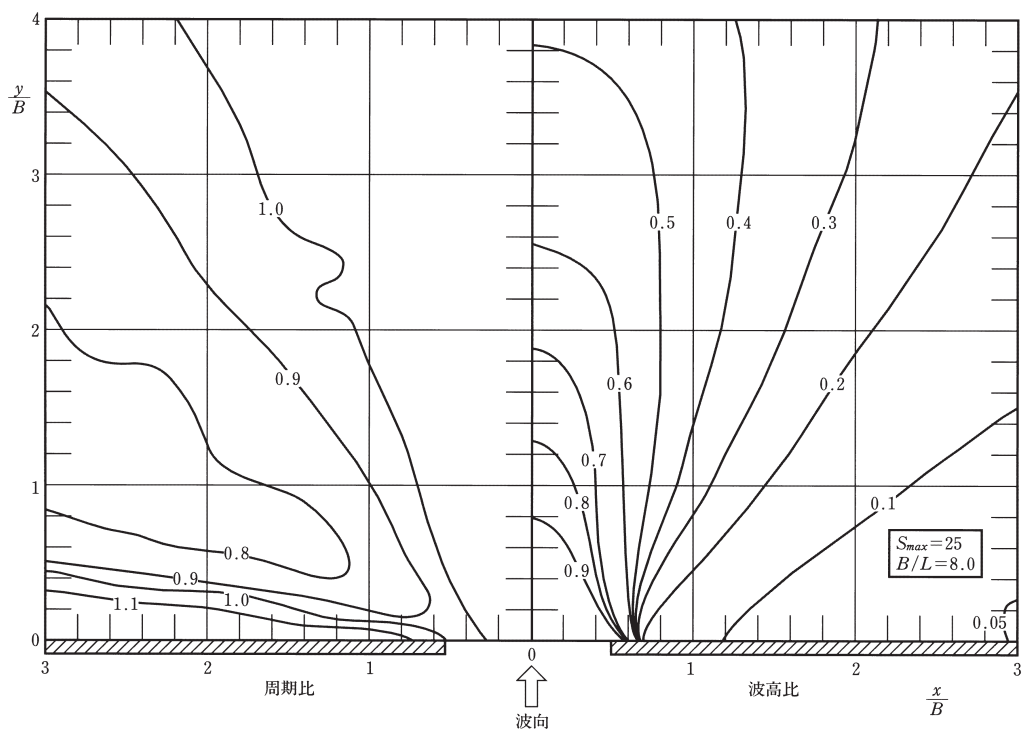
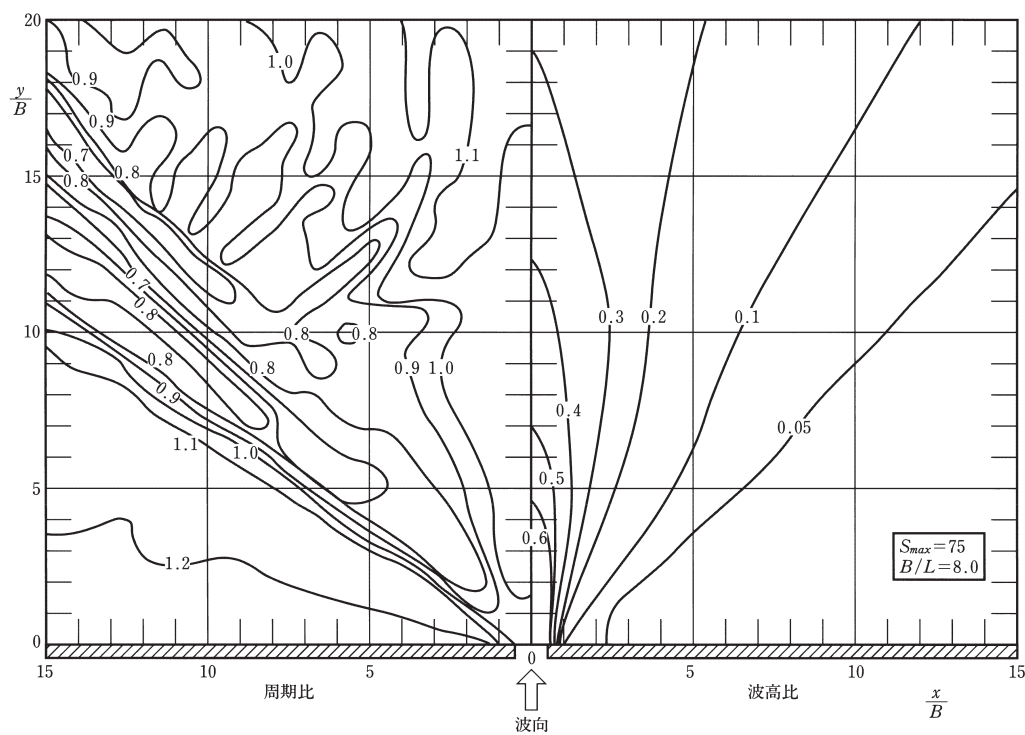
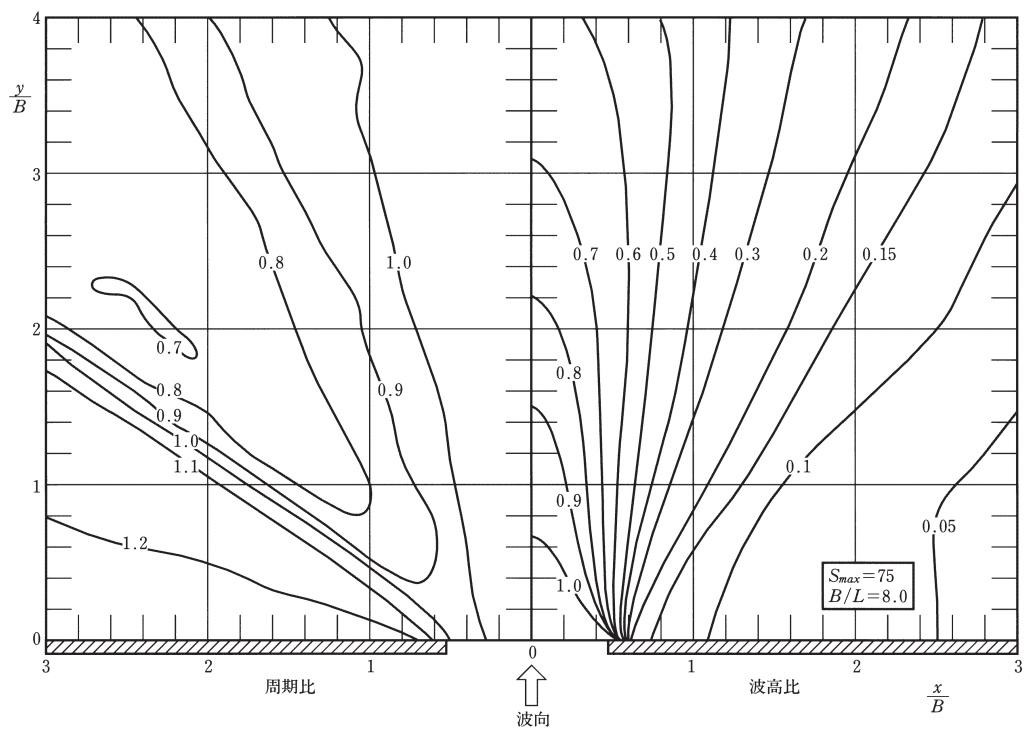


図 2-3-11 開口防波堤による回折図 ($B/L=8.0$)



(c) $S_x=75$

図 2-3-11 開口防波堤による回折図 ($B/L=8.0$)

開口部に波が斜めから入射する場合の不規則波の場合には電子計算機による数値計算で求めることが望ましいが、近似的な方法として以下のような方法を示す。

図 2-3-12 に示すように斜め入射の場合、回折波の軸線方向 θ' は、波の入射方向 θ と異なる。

この一例を示したのが図 2-3-13 (a)～(c)、及び図 2-3-14 (a)～(c)である²⁾。開口幅比 B/L 及び波の入射方向に対する回折波の軸線方向をとりまとめたものが表 2-3-1 である。この表から回折波の軸線方向を求め、この θ' に対する仮想開口幅比 B'/L を式 2-3-1 で求める。

$$\frac{B'}{L} = \frac{B}{L} \sin \theta' \quad \dots\dots\dots \text{(式 2-3-1)}$$

ここに、

B' : 仮想開口幅 (m)

B : 開口幅 (m)

L : 波長 (m)

θ' : 回折波の軸線方向

仮想開口幅比に等しい開口比の通常の回折図（直角方向からの入射）を選び出し、この回折図の入射方向と表 2-3-1 で求めた回折波の軸線方向とが一致するよう写し取り、斜め入射波の回折図とする。この近似法による誤差は防波堤開口部付近で最も大きい。

表 2-3-1 不規則波の軸線角度 (θ)

[() 内は入射角に対する偏角]

	B/L	防波堤と波向とのなす角 θ			
		15°	30°	45°	60°
$S_{\max}=10$	1.0	53° (38°)	58° (28°)	65° (20°)	71° (11°)
	2.0	46° (31°)	53° (23°)	62° (17°)	70° (10°)
	4.0	41° (26°)	49° (19°)	60° (15°)	70° (10°)
$S_{\max}=25$	1.0	49° (34°)	52° (22°)	61° (16°)	70° (10°)
	2.0	41° (26°)	47° (17°)	57° (12°)	67° (7°)
	4.0	36° (21°)	42° (12°)	54° (9°)	65° (5°)
$S_{\max}=75$	1.0	41° (26°)	45° (15°)	55° (10°)	66° (6°)
	2.0	36° (21°)	41° (11°)	52° (7°)	64° (4°)
	4.0	30° (15°)	36° (6°)	49° (4°)	62° (2°)

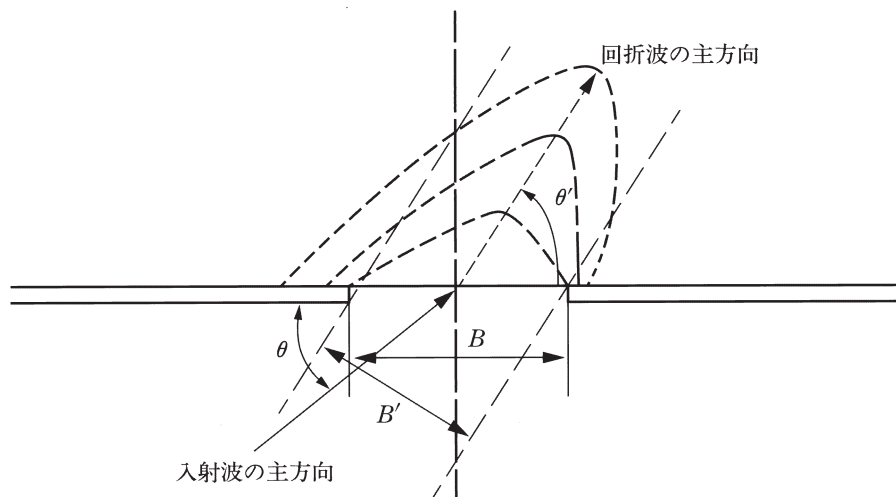


図 2-3-12 仮想開口幅と回折波の軸線角度

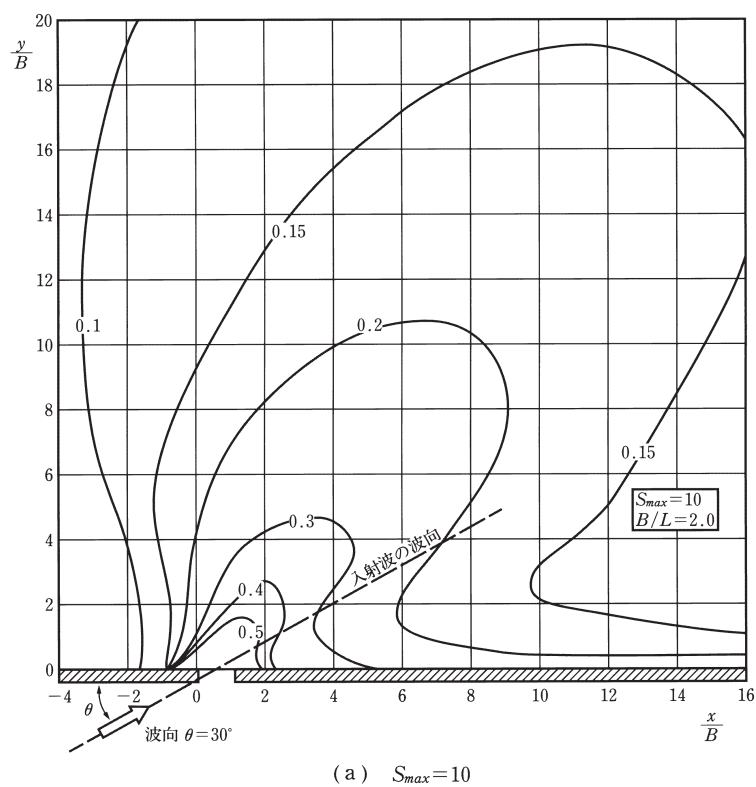


図 2-3-13 斜め入射波の回折図 ($B/L=2.0$, $\theta=30^\circ$)

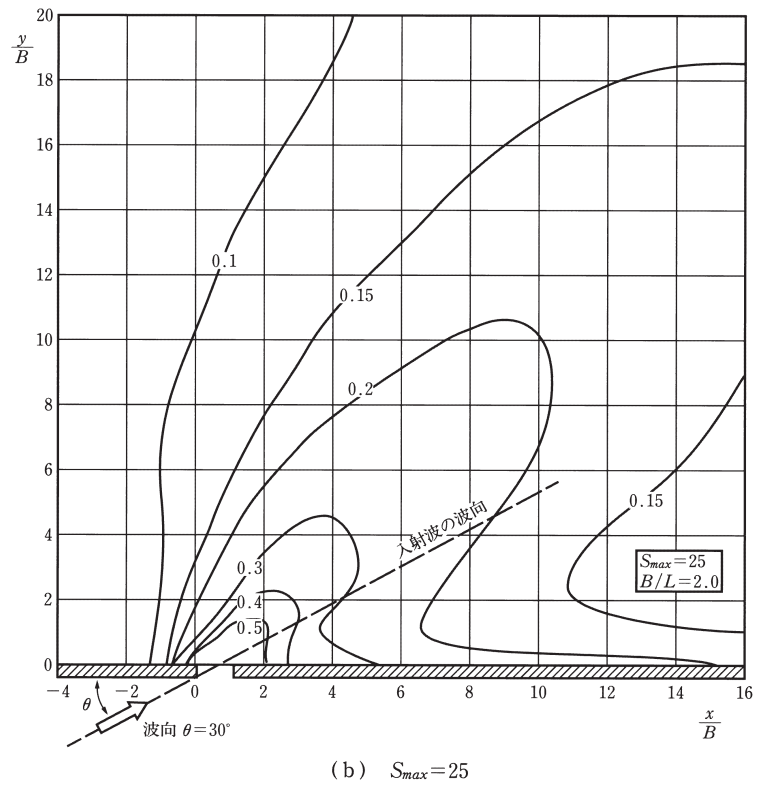


図 2-3-13 斜め入射波の回折図 ($B/L=2.0$, $\theta=30^\circ$)

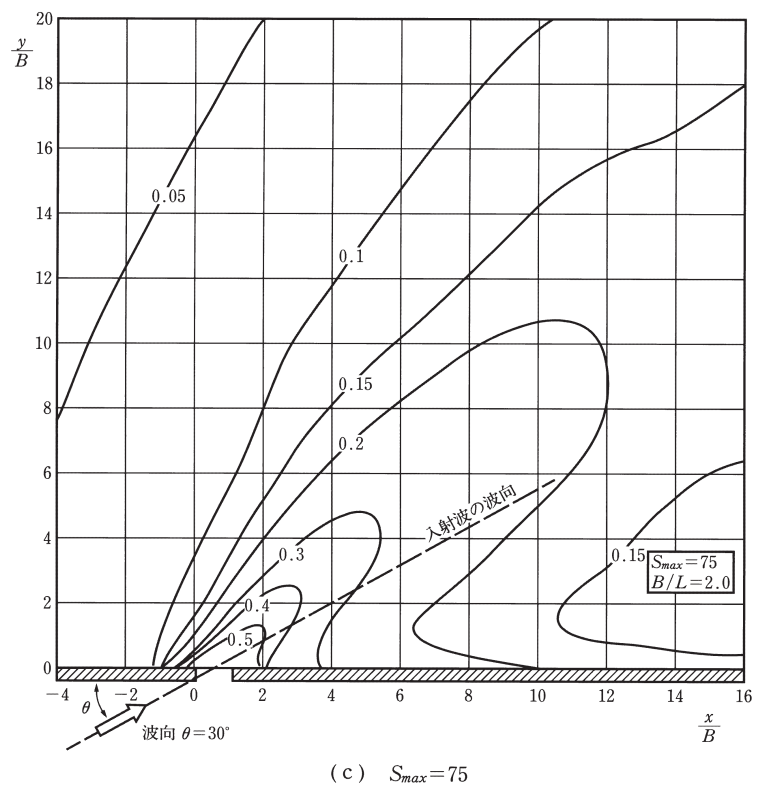
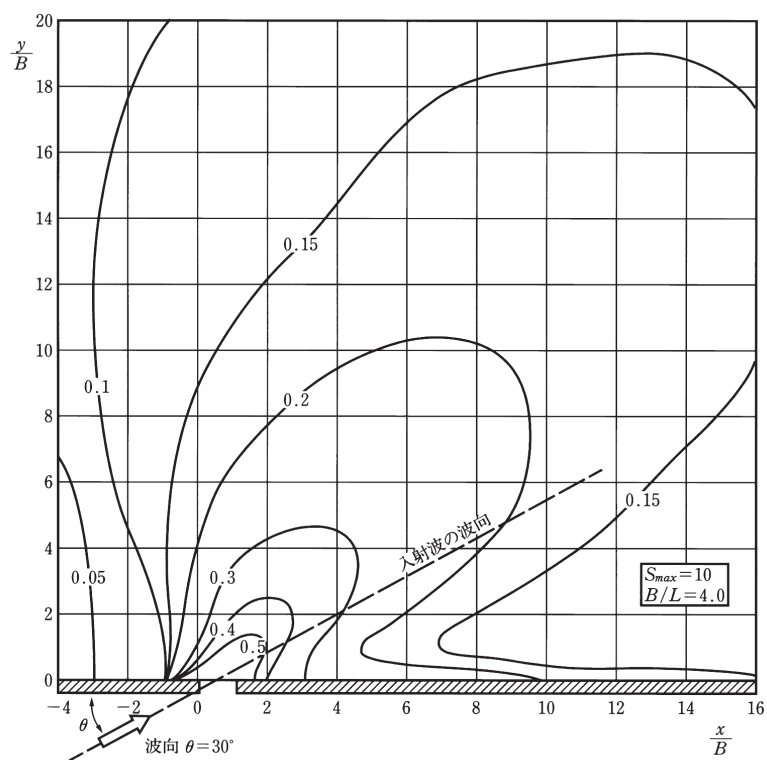
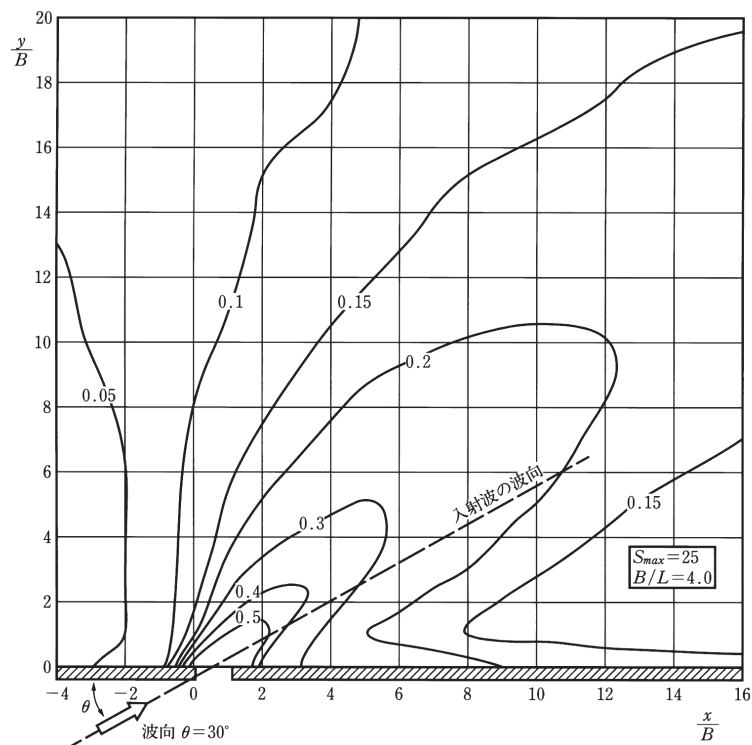


図 2-3-13 斜め入射波の回折図 ($B/L=2.0$, $\theta=30^\circ$)



(a) $S_{max}=10$

図 2-3-14 斜め入射波の回折図 ($B/L=4.0$, $\theta=30^\circ$)



(b) $S_{max}=25$

図 2-3-14 斜め入射波の回折図 ($B/L=4.0$, $\theta=30^\circ$)

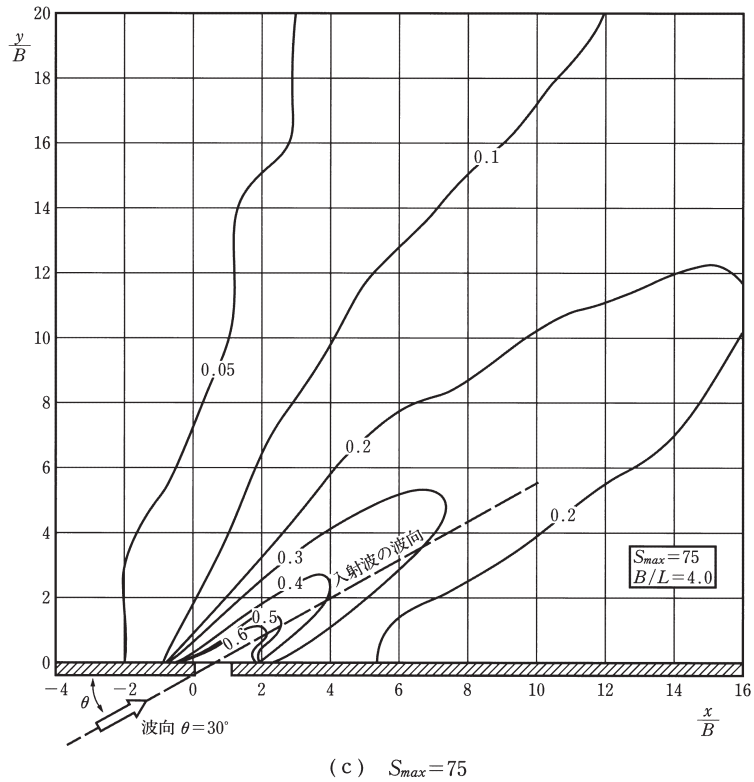


図 2-3-14 斜め入射波の回折図 ($B/L=4.0$, $\theta=30^\circ$)

(参考文献)

- 1) 原著は、合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技研資料，230（1975），45p.
- 2) 原著は、合田良実・鈴木康正・高山知司：不規則波に対する防波堤の回折図について，第23回海岸工学講演会論文集（1976），pp.401-405

資料2.4 エネルギー分散法

1. 島等により影響を受ける場合の回折係数

図 2-4-1 に示すように、設計対象地点 A が島影になる場合は、次の手順により回折係数 (K_d) を求める。

- (1) 方向集中度パラメーター S_{max} を推定する。
- (2) 設計対象地点 A での波の主方向と島影にならない角 θ_1 、 θ_2 を求める。
- (3) 図 2-4-2 により、 θ_1 及び θ_2 のエネルギー比 $P_E(\theta_1)$ 、 $P_E(\theta_2)$ を求める。例えば $\theta_1 = -78^\circ$ 、 $\theta_2 = 57^\circ$ で $S_{max} = 10$ であるとする、 θ_1 のエネルギー比 $P_E(\theta_1)$ は、 -90° から -12° の間のエネルギー比を求めればよく、0.37 となる。また、同様に θ_2 のエネルギー比 $P_E(\theta_2)$ は 33° から 90° 間のエネルギー比となり 0.17 を得る。
- (4) したがって、全エネルギー比 E は $E = P_E(\theta_1) + P_E(\theta_2) = 0.37 + 0.17 = 0.54$ となる。
- (5) したがって、A 点に到達する波の波高比 (回折係数) は $K_d = \sqrt{E} = \sqrt{0.54} = 0.73$ となる。

ただし、波の状況としては島の左手側と右手側から方向の明らかに異なる 2 つの波 (波群) が来襲するので、設計対象地点に港口を計画する場合等、波高だけでなく波向も重要な場合には 2 つの波群が来襲する方と考える方がよい。

2. 岬等により影響を受ける場合の回折係数

図 2-4-3 に示すように、設計対象地点 A が岬の影響を受ける場合には、次の手順により回折係数 (K_d) を求める。

- (1) 方向集中度パラメーター S_{max} を推定する。
- (2) 波の主方向と障害物の見通し線とのなす角 θ を求める。
- (3) 図 2-4-2 より θ のエネルギー比 $P_E(\theta)$ を読みとる。なお、来襲波のエネルギーのうち $\theta \sim 90^\circ$ の範囲は、岬に遮られても到達しないものとする。
- (4) A 点に到達する波の波高比 (回折係数) は θ のエネルギー比 $P_E(\theta)$ の平方根により求めることができる。例えば $\theta = 18^\circ$ で $S_{max} = 75$ であるとする、 $P_E(18^\circ) = 0.91$ である。すなわち A 点には全エネルギーの 91% が来襲し、波高比は $K_d = \sqrt{P_E(\theta)} = \sqrt{0.91} = 0.95$ となる。

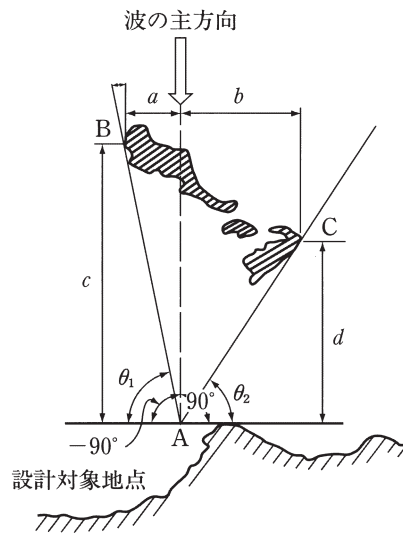


図 2-4-1 島による波の回折

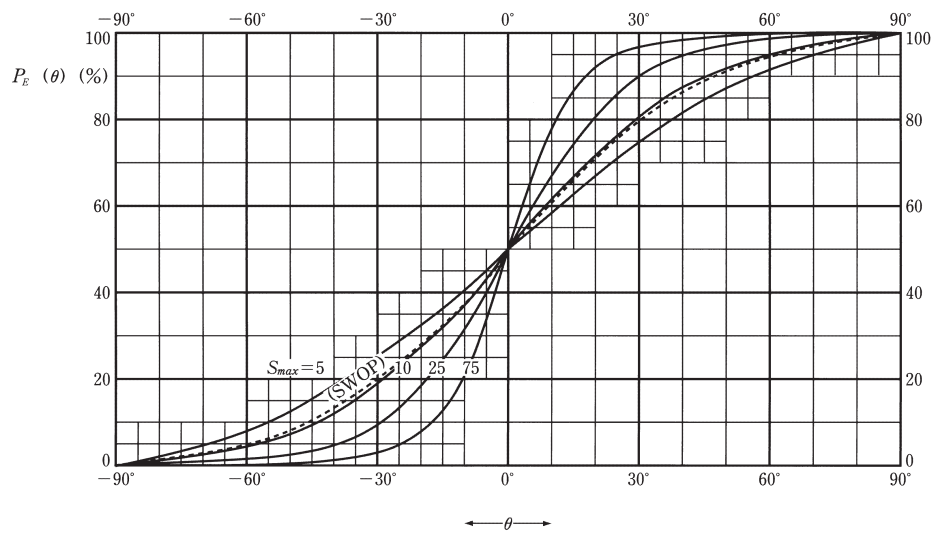


図 2-4-2 方向別エネルギー累加曲線

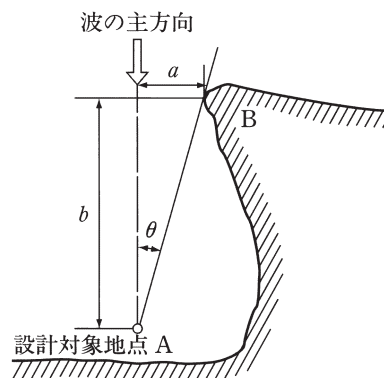


図 2-4-3 岬による波の回折

資料2.5 リーフ上の波の変形

1. リーフ上の波高、水位の算定

リーフ地形上における波高、水位の変化を算定する際、設計対象地点における経験的な資料や観測値がない場合には、適用条件に十分配慮して以下の実験式を用いてもよい¹⁾²⁾³⁾。ただし、リーフ先端より陸側の領域に適用するものとする。

また、数値計算で波高、水位の変化を算定する場合は、中山らのエネルギー平衡方程式を用いた波高変化計算と海浜流計算を組み合わせた計算方法、修正ブシネスク方程式を用いた計算方法の二つの計算方法⁴⁾を参考にすることができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_{1/3}}{H_0'} &= B \exp \left[-A \frac{x}{H_0'} \right] + \frac{\alpha (h + \bar{\eta}^\infty)}{H_0'} \\ B &= \left(\frac{H_{1/3}}{H_0'} \right)_{x=0} - \frac{\alpha (h + \bar{\eta}^\infty)}{H_0'} \\ \frac{h + \bar{\eta}^\infty}{H_0'} &= \sqrt{\frac{C_0}{1 + \frac{3}{8} \beta \alpha^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 2-5-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\eta}{H_0'} &= \left[C_0 - \frac{3}{8} \beta \left(\frac{H_{1/3}}{H_0'} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{h}{H_0'} \\ C_0 &= \left(\frac{h + \bar{\eta}^\infty}{H_0'} \right)_{x=0}^2 + \frac{3}{8} \beta \left(\frac{H_{1/3}}{H_0'} \right)_{x=0}^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 2-5-2)$$

ここに、

$H_{1/3}$ ：防波堤設置位置での有義波高 (m)

H_0' ：換算沖波波高 (m)

$(H_{1/3})_{x=0}$ ：リーフ先端の波高 (m)

h ：リーフ先端部 ($x=0$) における静水深 (m)

$\bar{\eta}^\infty$ ：リーフ先端から十分離れた地点での平均水位上昇量 (m)

$\eta_{x=0}$ ：リーフ先端での平均水位上昇量 (m)

η ：リーフ先端から x の地点における平均水位上昇量 (m)

x ：リーフ先端から防波堤設置位置までの距離 (m)

2. リーフ先端の定義

図 2-5-1 に示すように、リーフ上の水平な直線①と、リーフ前面の $1.0 H_0' \leq h$ (水深) $\leq 2.5 H_0'$ における海底勾配の延長線②が交わったところをリーフの先端とする。

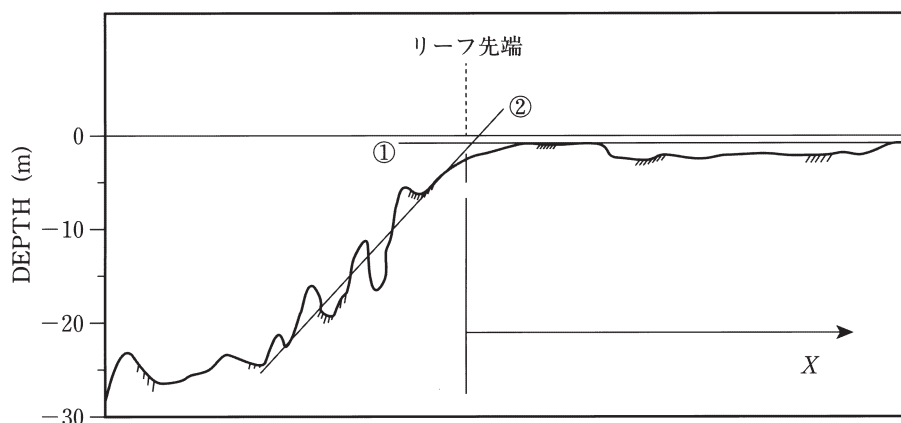


図 2-5-1 リーフ先端の定義図

3. 係数値 A 、 α について

係数値 A 、 α の値は、現地観測結果から求めた値を用いるのがよい。設計対象地点における経験的な資料や観測値がない場合には、係数値 A は図 2-5-2 から与えられる値、係数値 α は図 2-5-3 から与えられる関係 ($H_{\infty}/H_0' = \alpha \{(h' + \Delta)/H_0'\}$) を参考にしてもよい。また、係数値 β に関しては、高山らの研究²⁾を参考にしてもよい。

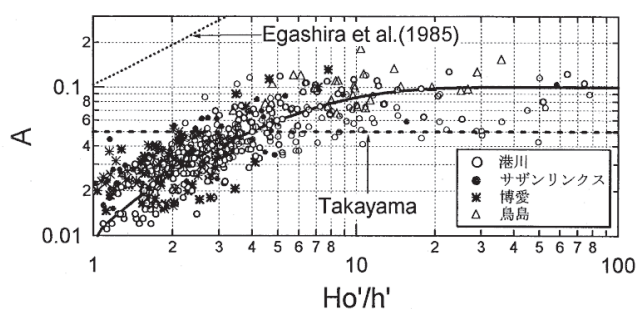


図 2-5-2 係数 A と波高水深比

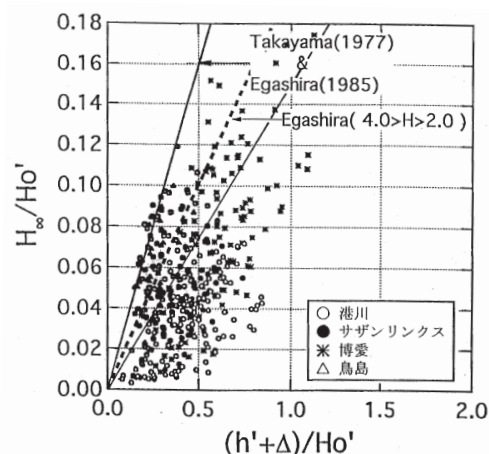


図 2-5-3 係数 α と相対水深

4. 海底勾配

海底勾配は、水深による波高変化図において碎波が $h/H_0' = 1.0 \sim 2.5$ の範囲で起きることから、この範囲における平均海底勾配を用いるものとする。ただし、この範囲内で海底勾配が急激に変化する場合は急勾配側を用いるものとする。

5. リーフ先端部における波高及び水位上昇量の算定

リーフ先端部における波高及び水位上昇量は、原則として「第 2 編 3.5.3 不規則波砕波を考慮した水深のみによる波高の変化」の「図 2-3-12 水深による波高変化」及び「図 2-3-15 平均水位の上昇量」を用いて算定するものとする。ただし、リーフ先端付近に施設を整備する場合や複雑な地形の場合などには、現地観測結果を用いることが望ましい。

6. 特殊地形条件の考慮

リーフ先端が環礁となっている場合や、リーフの大きな切れ目（みお筋）、また、海水の溜まりやすい地形等の場合は、上昇量が計算値よりも大きくなる可能性があるので、実測値等を勘案して決定するものとする。

7. サーフビートの波高の算定

リーフ海岸においては、換算沖波が 5m 以上になるとサーフビートの影響が顕著となる。よって、設計沖波波高が 5m 以上の場合には、図 2-5-4 を参考に、式 2-5-3 及び式 2-5-4 を用いてサーフビートの波高を推定する必要がある。

$$H_{L/3} = 0.10H_0' \dots\dots\dots (式 2-5-3)$$

$$H_L = 1.5H_{L/3} \dots\dots\dots (式 2-5-4)$$

ここに、

H_L : サーフビートの波高 (m)

$H_{L/3}$: サーフビートの有義波高 (m)

8. 波圧強度算定に用いる波高

波圧強度算定に用いる波高は、式 2-5-5 に示すように、リーフ上の波高算定式から求められる波高とサーフビートの波高を合成して求める。

$$H = \sqrt{(H_1)^2 + (H_L)^2} \dots\dots\dots (式 2-5-5)$$

ここに、

H_1 : リーフ上の波高算定式から求められる波高 (m)

式 2-5-1 における $H_{1/3}$

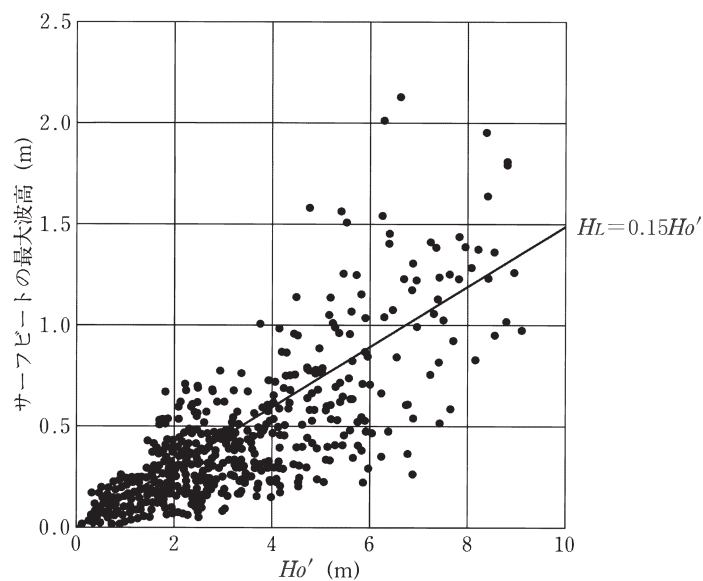


図 2-5-4 換算沖波波高 H_o' とサーフボート最大波高 H_L の関係
(港川、サザンリンクス、博愛、鳥島)

9. 潮位

設計潮位は構造物が最も危険となる潮位であり、潮汐あるいは状況により高潮、津波等による異常潮位の実測値、又は推算値（朔望平均満潮位 H.W.L. + 偏差）に基づいて定めるものとする。

(参考文献)

- 1) 沖縄県農林水産部漁港課・財団法人漁港漁村建設技術研究所：平成 9 年度リーフ上の波浪観測調査委託報告書
- 2) 高山知司・神山豊・菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究，港湾技研資料，No.278（1977）
- 3) 宮地健司・中山哲巖・榎本一徳・小林学：リーフ上での波浪変形に関する模型実験，水産工学研究所技報，第 23 号（2001），pp.51-69
- 4) 中山哲巖・大村智宏・金城哲男・篠田邦裕・佐藤勝弘・榎本一徳・藤井和敏・滑川順・小林学：珊瑚礁上の波の変形について，第 4 回全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集（2005），pp.143-169

資料2.6 直立護岸と消波工付護岸の越波流量

直立護岸と消波工付護岸の越波流量推定図を図 2-6-1～図 2-6-4¹⁾に示す。これらの図は、水理模型実験結果を堰の越流公式に当てはめて算定したものである。水理模型実験には不規則波を用いており、直立護岸は波返し工や根固工がない直立壁、消波工付護岸は消波ブロック 2 層積み、天端部分の下層を 2 個並びとしている。なお、これらの図には実験でのデータにバラツキがあり、誤差としては表 2-6-1¹⁾に示す値が推定されている。

表 2-6-1 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲

$\frac{q}{\sqrt{2g(H_0)^3}}$	直 立 護 岸	消 波 護 岸
10^{-2}	0.7 ～ 1.5倍	0.5 ～ 2 倍
10^{-3}	0.4 ～ 2 倍	0.2 ～ 3 倍
10^{-4}	0.2 ～ 3 倍	0.1 ～ 5 倍
10^{-5}	0.1 ～ 5 倍	0.05 ～ 10倍

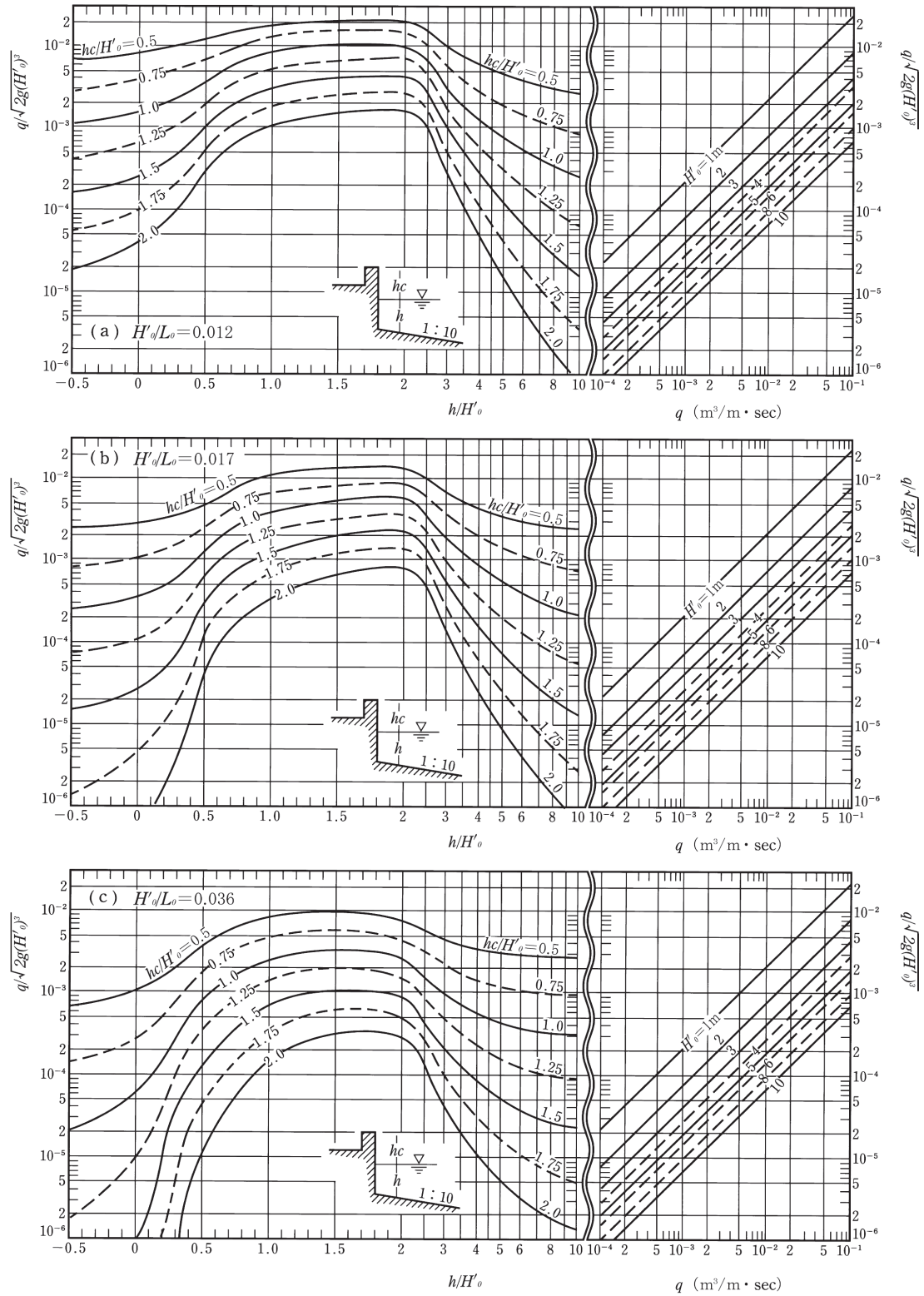


図 2-6-1 直立護岸の越波流量推定図（海底勾配 1/10）

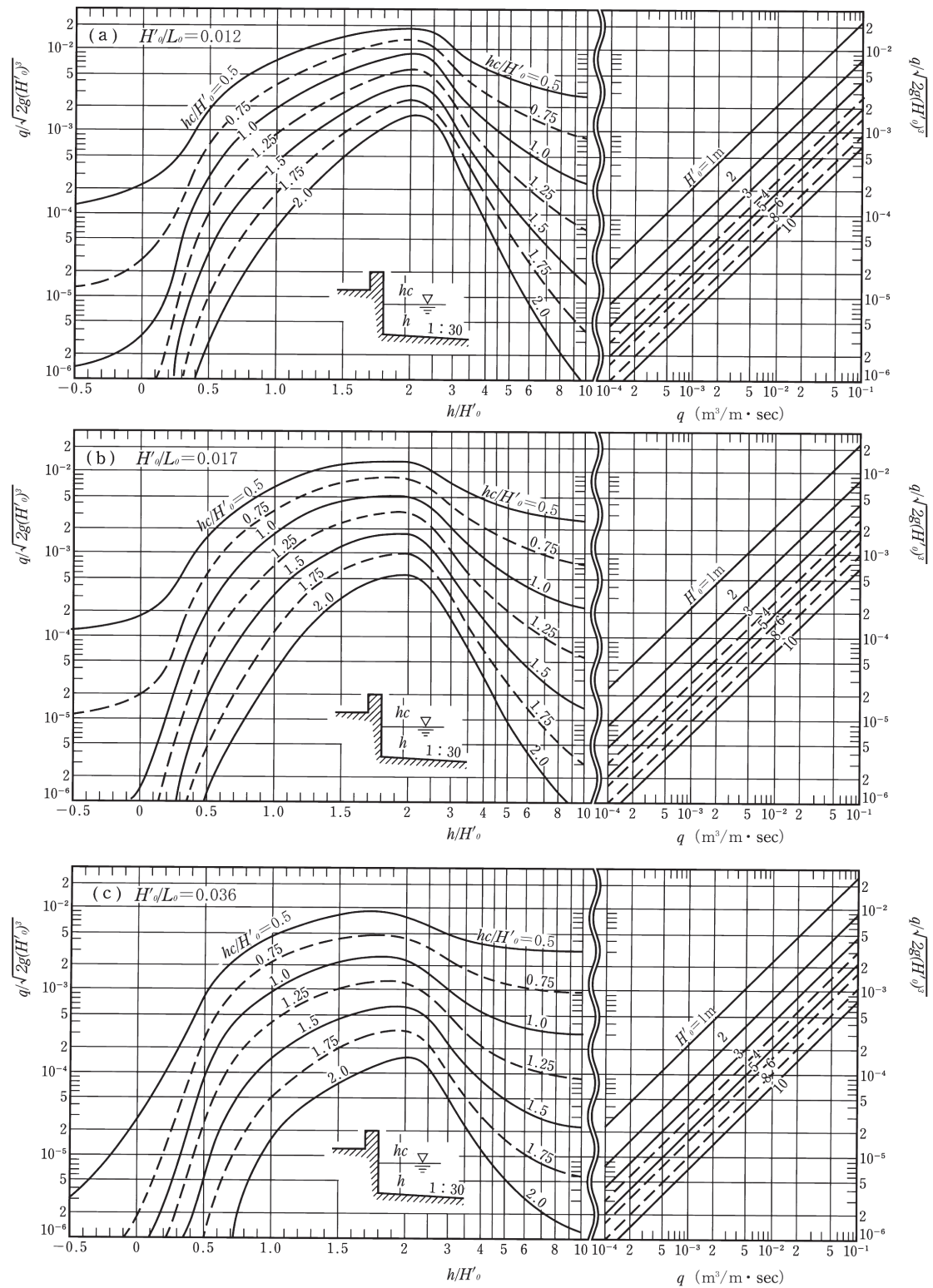


図 2-6-2 直立護岸の越波流量推定図（海底勾配 1/30）

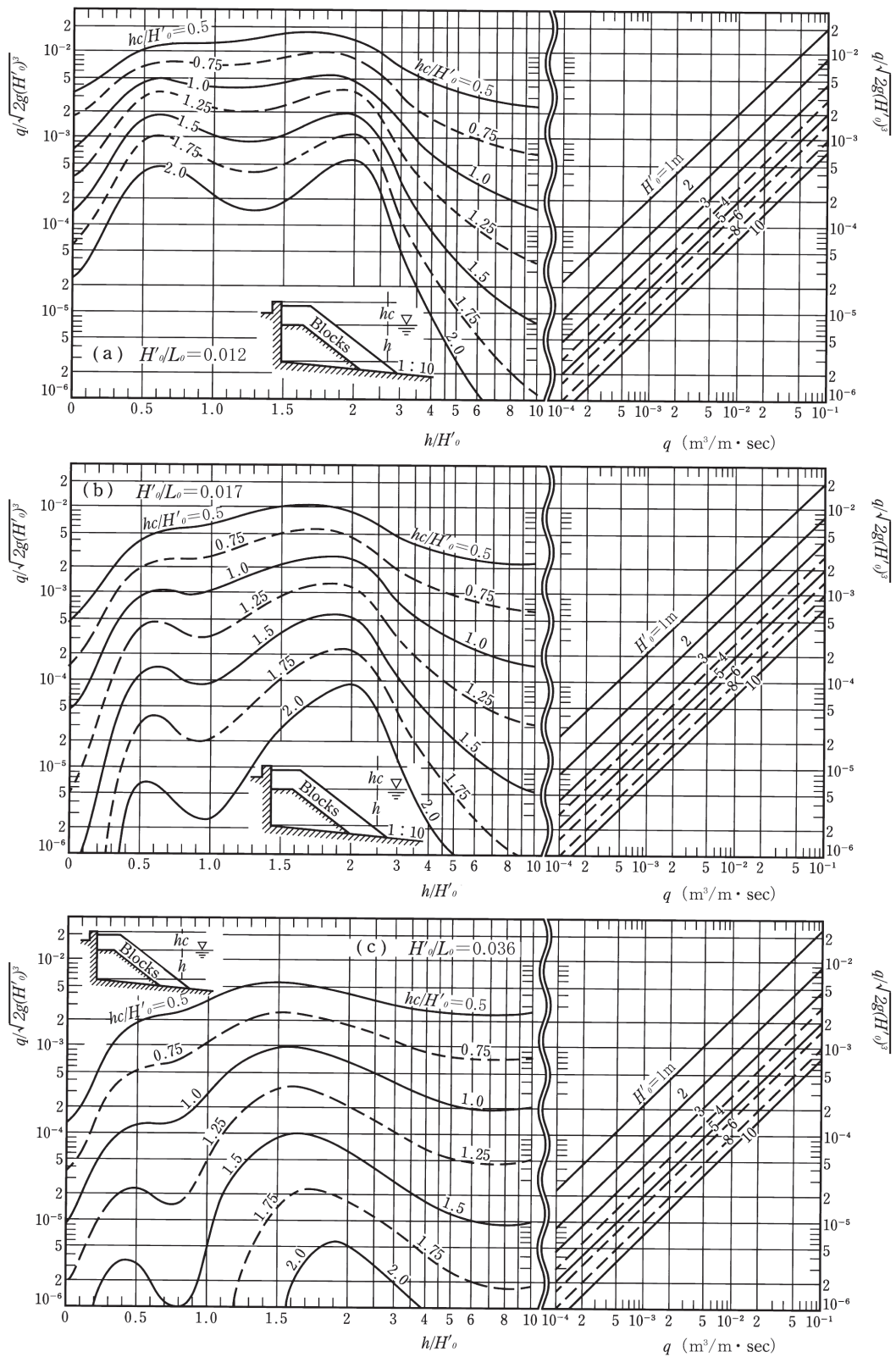


図 2-6-3 消波工付護岸の越波流量推定図（海底勾配 1/10）

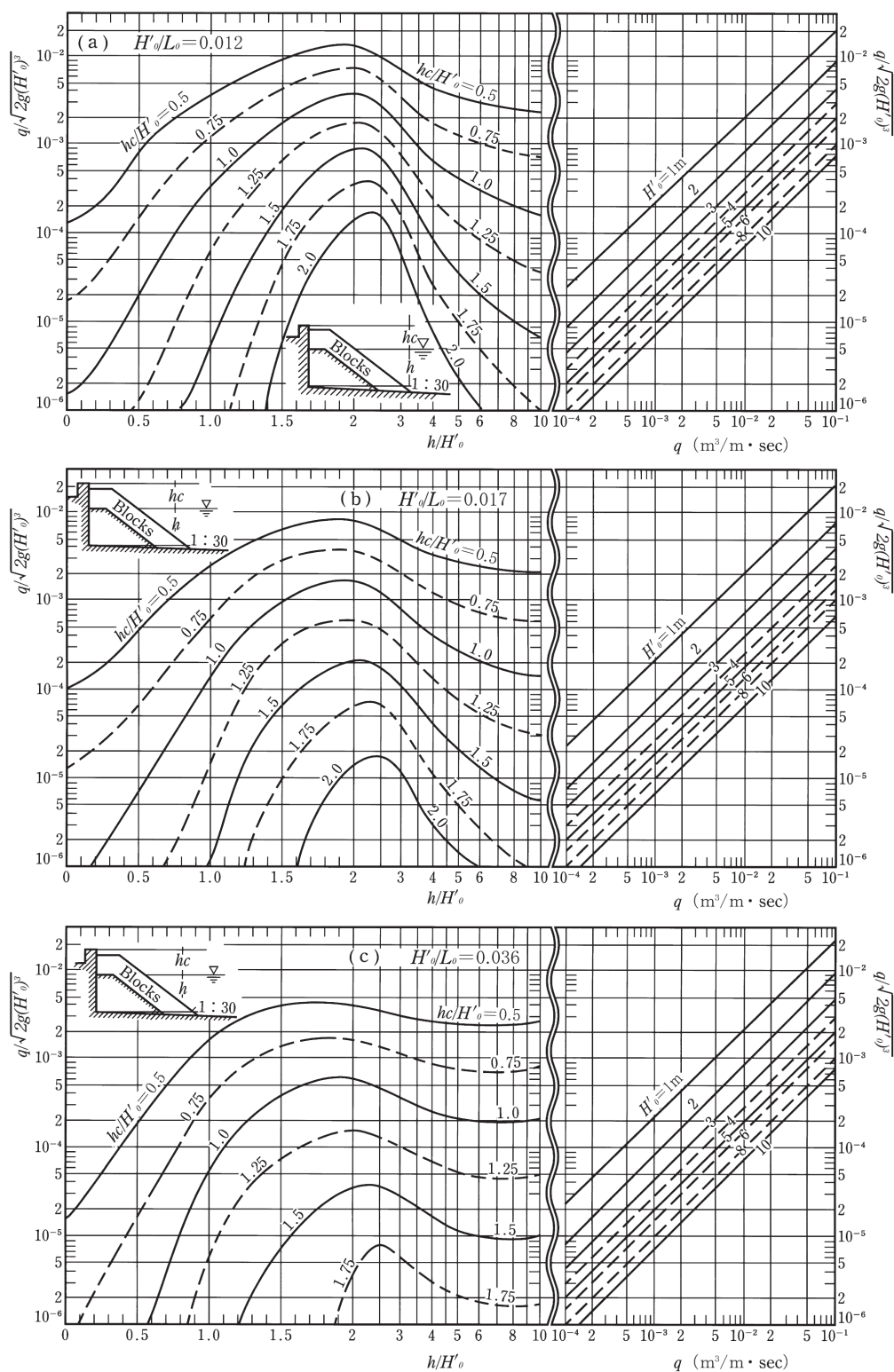


図 2-6-4 消波工付護岸の越波流量推定図（海底勾配 1/30）

(参考文献)

- 1) 合田良実・岸良安治・神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 4 号（1975），pp.3-44

資料2.7 許容越波流量と限界越波流量

護岸・堤防が被災しないための越波流量（限界越波流量）を表 2-7-1¹⁾に、また背後地利用状況からみた越波流量（許容越波流量）を表 2-7-2²⁾、表 2-7-3³⁾にそれぞれ示す。

表 2-7-1 護岸・堤防の限界越波流量

種 別	被 覆 工	越 波 流 量 q (m ³ /m/sec)
護 岸	背後舗装済み	0.20
	背後舗装なし	0.05
堤 防	コンクリート三面巻き	0.05
	天端舗装、裏のり未施工	0.02
	天端舗装なし	0.005以下

表 2-7-2 背後地に被害が予想される場合の許容越波流量

要 件	越 波 流 量 q (m ³ /m/sec)
背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波、飛沫等の進入により重大な被害が予想される地区	0.01程度 (バケツ 1 杯程度)
その他重要な地区	0.02程度
その他の地区	0.02～0.06

表 2-7-3 背後地利用状況からみた許容越波流量

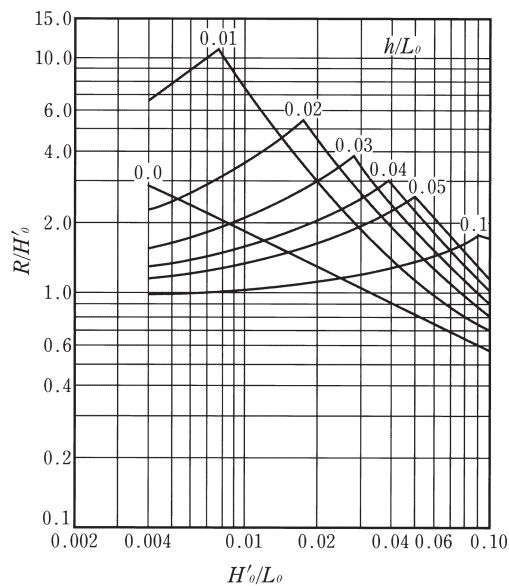
利用方法	状態（護岸のすぐ背後）	越 波 流 量 q (m ³ /m/sec)
歩 行	危険ない	2×10^{-4} (コップ 1 杯程度)
自動車	高速通行可能 運転可能	2×10^{-5} 2×10^{-4}
家 屋	大丈夫	7×10^{-5}

(参考文献)

- 1) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究，港湾技術研究所報告，第 9 巻，第 4 号（1970），pp.3-41
- 2) 永井荘七郎・高田彰：海岸堤防の越波におよぼす消波堤の効果，第 11 回海岸工学講演会講演集（1964），pp. 279-286
- 3) 福田伸男・宇野俊泰・入江功：防波護岸の越波に関する現地観測（第 2 報），第 20 回海岸工学講演会論文集（1973），pp.113-118

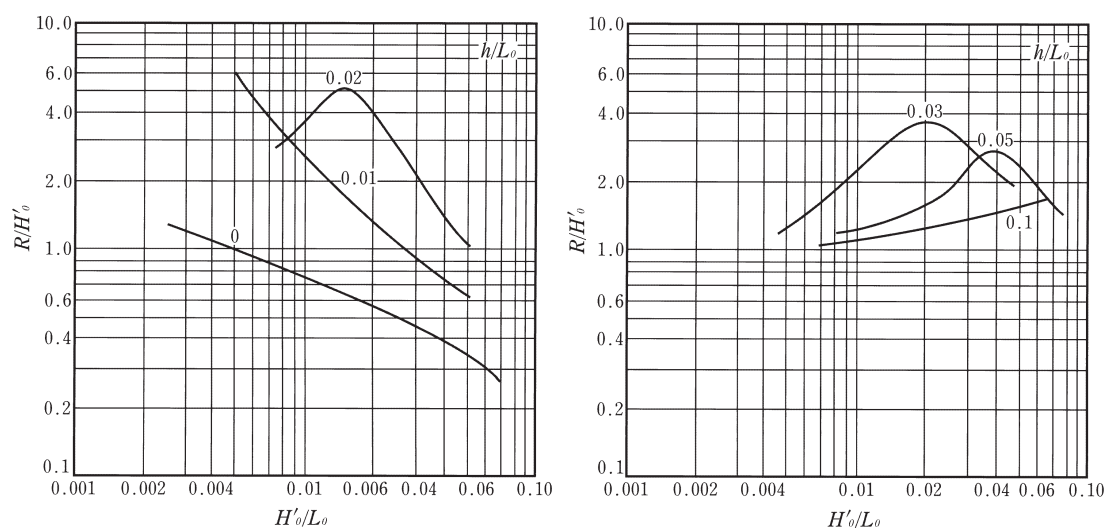
資料2.8 直立堤と一様勾配斜面堤の打ち上げ高

直立堤と一様勾配斜面堤に対して行った規則波による水理模型実験結果を図 2-8-1～図 2-8-5¹⁾²⁾³⁾に示す。



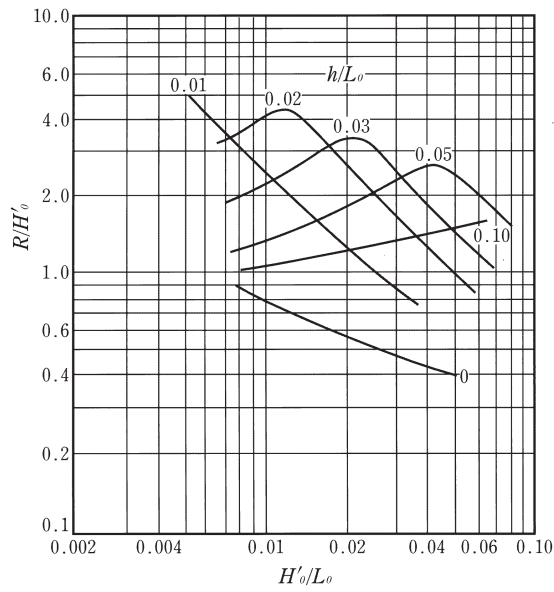
(a) 海底勾配1/10

図 2-8-1 打ち上げ高（直立堤）

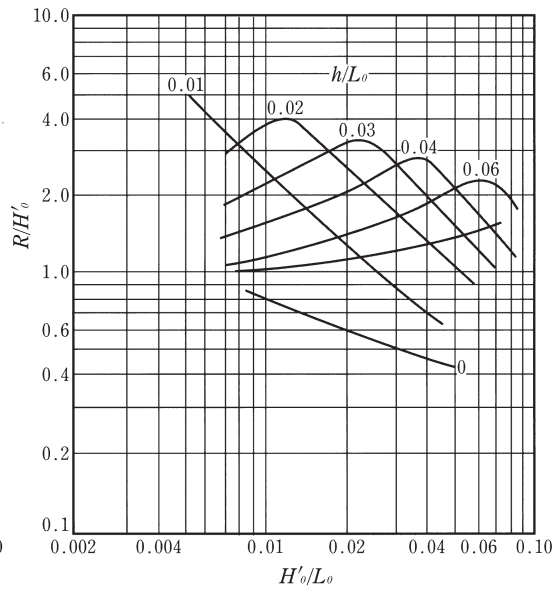


(b) 海底勾配1/20

図 2-8-1 打ち上げ高（直立堤）

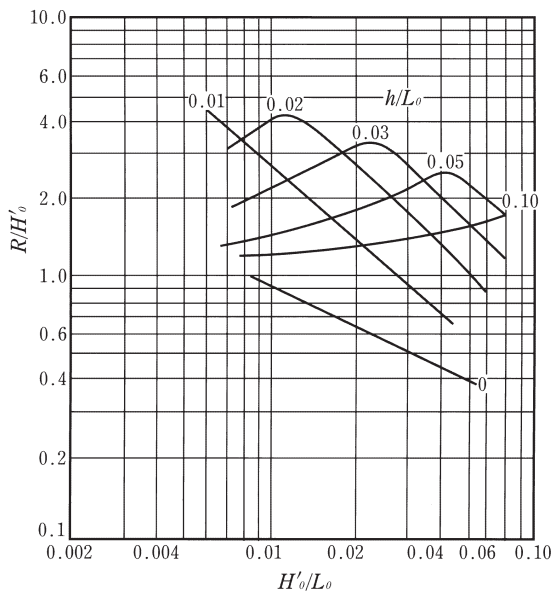


(a) 海底勾配1/20

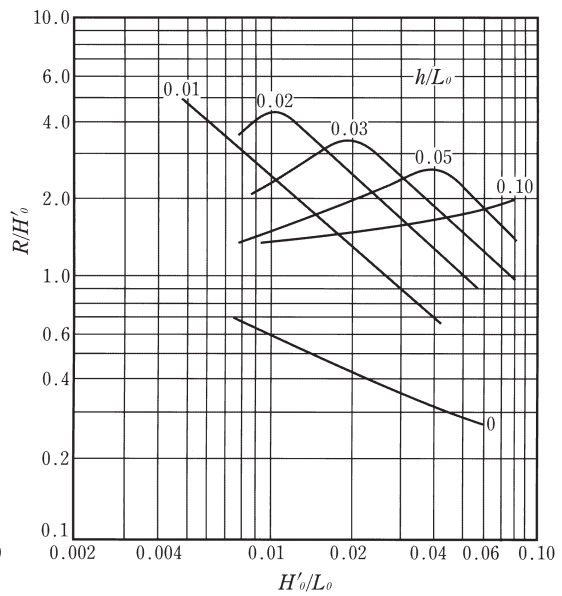


(b) 海底勾配1/30

図 2-8-2 打ち上げ高（護岸勾配 1 : 0.5）

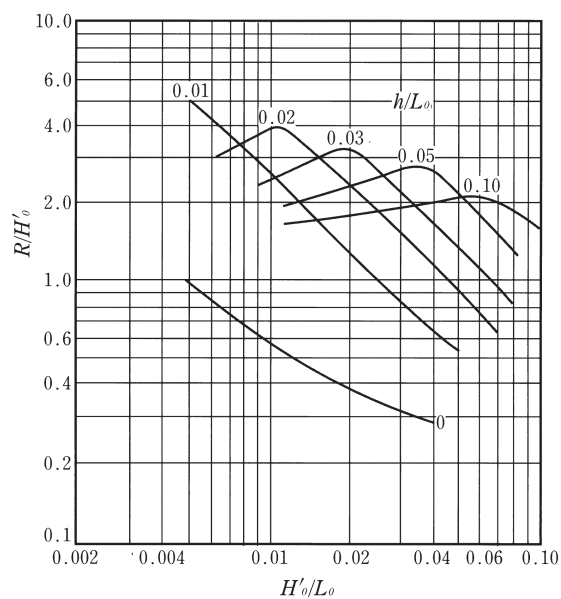


(a) 海底勾配1/20

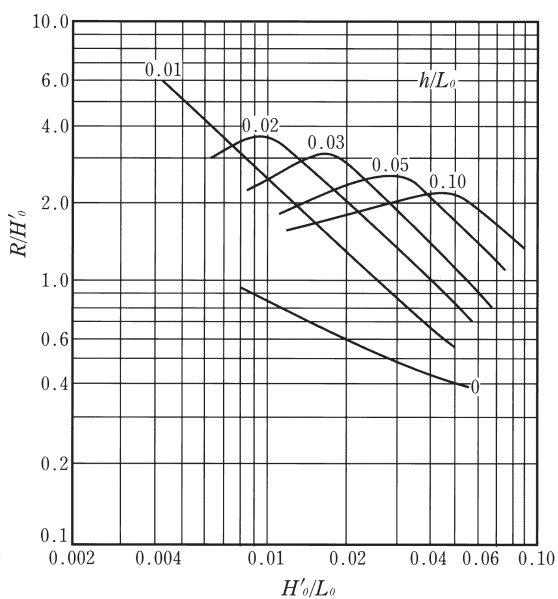


(b) 海底勾配1/30

図 2-8-3 打ち上げ高（護岸勾配 1 : 1）

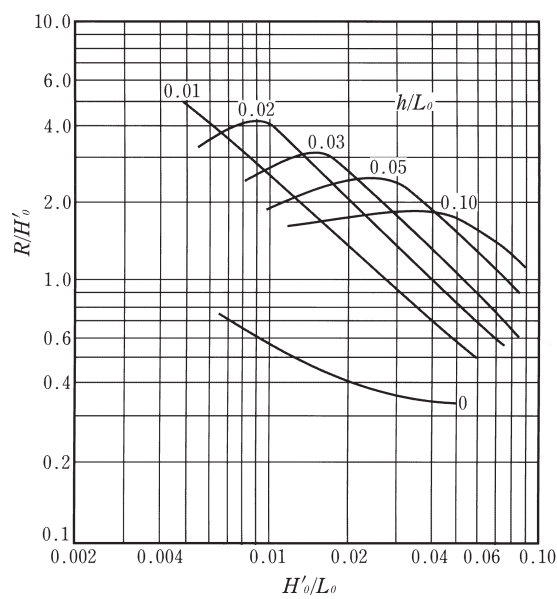


(a) 海底勾配1/20

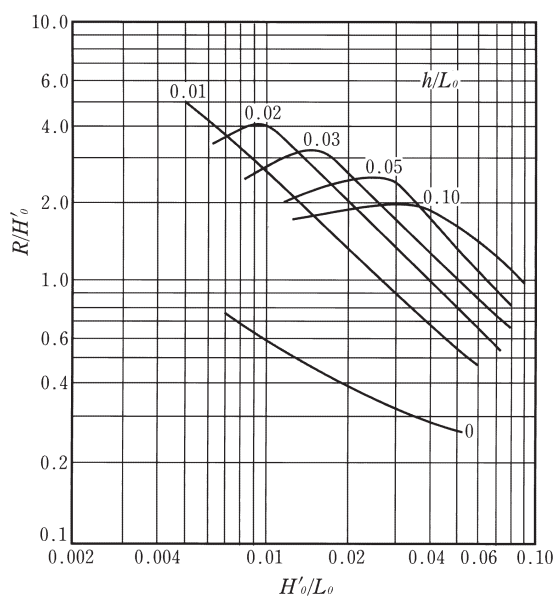


(b) 海底勾配1/30

図 2-8-4 打ち上げ高（護岸勾配 1 : 2）



(a) 海底勾配1/20



(b) 海底勾配1/30

図 2-8-5 打ち上げ高（護岸勾配 1 : 3）

(参考文献)

- 1) 高田彰：規則波の打上げ高および越波量の定式化について，第 22 回海岸工学講演会論文集（1975），pp.377-386
- 2) 豊島修・首藤伸夫・橋本宏：海岸堤防への波の打ちあげ高 $1/20$ ，第 12 回海岸工学講演会講演集（1965），pp.180-185
- 3) 豊島修・首藤伸夫・橋本宏：海岸堤防への波の打ちあげ高 $1/30$ ，第 11 回海岸工学講演会講演集（1964），pp.260-265

資料2.9 捨石等の K_D 値

捨石等の K_D 値は下表に示す自然石の値を標準とするが、捨石の並べ方等の要因により K_D 値は変動幅を持つので、所要質量の決定にあたっては留意する必要がある。

表 2-9-1 捨石等の K_D 値

名 称		被覆層数	積み方	K_D 値		実験者
				砕 波	非砕波	
自 然 石	表面が滑らかなもの	2	乱 積	2.1	2.4	ハドソン
	〃	3 以上	〃	2.8	3.2	〃
	表面が粗いもの	2	〃	3.5	4.0	〃
	〃	3 以上	〃	3.9	4.5	〃

資料2.10 風の推算方法の概要及び適用法

波浪推算に用いられる風の推算方法は大きく天気図解析法、台風モデル法、ハイブリッド法、実測風内挿法の4種類に分けられる。これらの手法は各々特徴があり、対象とする気象擾乱、領域（外洋域、内湾域）、緯度などにより、どの手法を用いるかが使い分けられ、その概略と特徴を示したものが表2-10-1である。また、これらの特徴を考慮して対象とする諸要素について適切な風の推算方法を分類すると、表2-10-2の通りとなる。

表 2-10-1 風場推算手法の比較表

推 算 手 法		対象とする 気象擾乱	推算理論の概要	特 徴
天気図 解析法	傾度風 モデル	台 風 低気圧 季節風	天気図の情報から等圧線の間隔、曲率を算出し、次式によって計算する。 $V_{gr} = \pm \left\{ \left(\omega^2 \sin^2 \phi \pm \delta \frac{P/\delta r}{\rho r} \right)^{1/2} - \omega \sin \phi \right\}$	気圧分布に応じた風場を推算できるが、台風中心付近で推算精度が落ちる。
	Cardone モデル		Monin-Obukov の similarity theory から Panofsky の安定度長さを採り入れると、任意の高さ z での風速は $U_z = \frac{u}{k} \left\{ \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right\}$ で与えられる。	Cardone モデルは自由大気の状態を表す方程式を連立させて海上風を推算するものであり、傾度風モデルよりもさらに推算精度は良いが、同様の欠点を持つ。
台 風 モデル法	Myers モデル	台 風	台風周辺の気圧分布モデル次式によって与えられる。 $P = P_c + \Delta P e^{-r_0/r}$ （ ΔP , r_0 : 台風定数） これから傾度風を計算する。	台風周辺の風場を簡便に表現できるが、これ以外の前線や低気圧による風が表現できない。 台風の気圧分布が同心円で近似できない場合は適さない。
	藤 田 モデル		台風周辺の風場モデル次式によって与えられる。 $P = P_0 - \left\{ \frac{\Delta P}{(1 + (r/r_0)^2)} \right\}$ これから傾度風を計算する。	同 上
ハイブリッド法		台 風	台風の中心付近を Myers モデルで与え、その周辺を Cardone モデルで与える。	Cardone モデルの欠点を Myers モデルで補ったもので、精度が良い。
実測風 内挿法	平面近似 補間法	台 風 低気圧 季節風	計算領域の実測風観測地点を選び出し、三角形網や正方形状の風場をスプライン平面補間法等によって求める。	周辺地形の影響を受けた内湾や水道域の風場を比較的精度良く簡便に表現できる。
	重み付き 補間法		計算地点周辺の実測風観測地点を選び出し、 $1/(距離)^2$ 等の重みをつけて補間する方法。	同 上

表 2-10-2 風場推算方法の適用

気象擾乱	対象領域	適切な風場推算方法	備 考
台 風	外 洋 域	ハイブリッド法，台風モデル法	高緯度（35°N以北）では台風モデル法は不適。 台風南側の計算領域を十分広くとる必要がある開境界の設定が難しい。
	内 湾 域	実測風内挿法，ハイブリッド法，台風モデル法	計算領域が狭い（100～200km四方以下）場合，ハイブリッド法は不適。 陸地地形による遮蔽効果が大きい場合，ハイブリッド法は不適。 風の実測データがない場合，天気図解析法を併用することも可能。
低 気 圧 (温帯低気圧)	外 洋 域	天気図解析法	
	内 湾 域	実測風内挿法，天気図解析法	計算領域が狭い場合，天気図解析法は不適。
季 節 風 (冬季季節風)	外 洋 域	天気図解析法	
	内 湾 域	実測風内挿法，天気図解析法	計算領域が狭い場合，天気図解析法は不適。

① 対象とする諸要素

a) 気象擾乱

気象擾乱は大きく分けて台風、(温帯) 低気圧、(冬季) 季節風の 3 つに分けられる。

b) 対象領域

対象領域は、太平洋や日本海などの広い海域を含む計算領域である外洋域と、大阪湾や瀬戸内海などの比較的狭い海域を対象とした計算領域である内湾域に分けられる。

c) 緯度

台風については高緯度と低緯度では扱い方が異なってくる。

② 天気図解析法については、天気図の前処理を必要とする。

③ ハイブリッド法については、できるだけ実測風を与えることが望ましい。

④ 傾度風速の算定にあたっては、図 2-10-1 の傾度風算定ノモグラフを使うと便利である。これは、 $\rho_a=1.1\times 10^{-3}$ を仮定したものである。使用例として、緯度 40 度の地点の 2 hPa ごとの等圧線の間隔（気圧傾度）が緯度に対して 0.6 度相当、等圧線の曲率半径が 6 度相当の場合（低気圧性とする）には、A 点と B 点を直線で結び、曲率半径相当角度 $r=6$ の曲線と交わる点 C を求め、縦線を目盛りを読めば傾度風速が約 21.5 m/s と求められる。

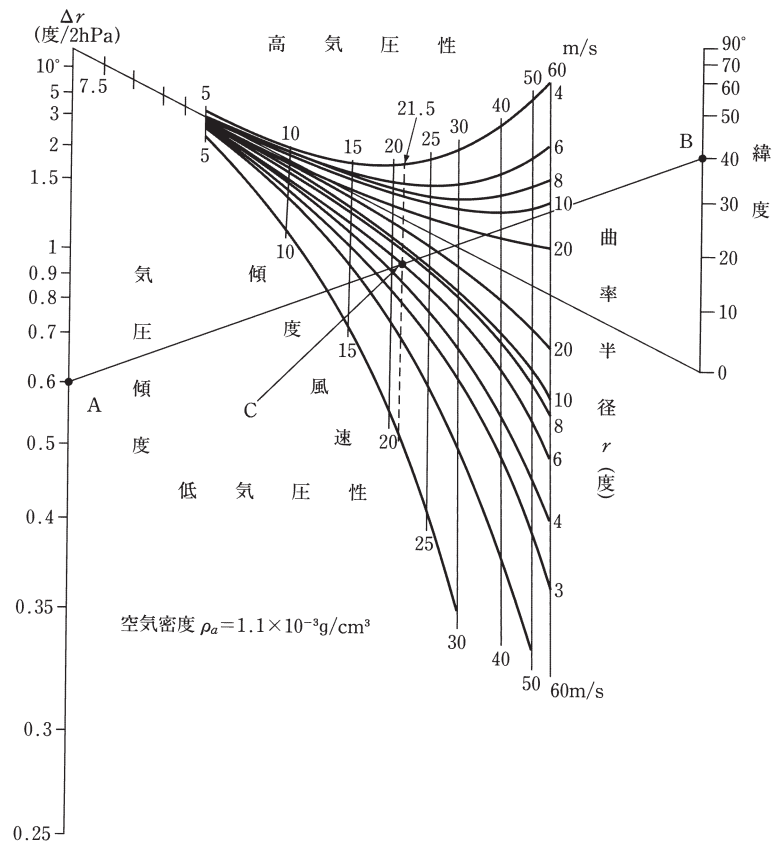


図 2-10-1 傾度風算定ノモグラフ

資料2.11 砂質土における土圧係数の計算可能条件

(1) 砂質土の常時の土圧

「第2編 10.1.2 砂質土の常時の土圧」における土圧係数の算定式(式 2-10-4)及び崩壊面の傾斜角を表す式(式 2-10-5)が計算されるためには、式中の根号内が非負であることが必要である。

これは、次の場合に成立する。

$$\phi_n \geq |\delta| \dots\dots\dots (式 2-11-1)$$

$$\phi_n > |\beta| \dots\dots\dots (式 2-11-2)$$

$$|\delta + \Psi| < 90^\circ \dots\dots\dots (式 2-11-3)$$

$$|\Psi - \beta| < 90^\circ \dots\dots\dots (式 2-11-4)$$

ここで、式 2-11-1～式 2-11-4 の意味するところを考える。式 2-11-1 において、 $|\delta|$ が ϕ_n より大きいと仮定すると、土圧は壁面に垂直な方向から ϕ_n よりも大きい δ の勾配で働こうとするが、この壁面のごく近傍での土中では土は内部摩擦角 ϕ_n で滑るから、土圧は壁面に垂直な方向から ϕ_n だけ傾いた方向に働く。すなわち、見かけ上壁面付近では壁面摩擦角は ϕ_n とみなすことができる。したがって、壁面摩擦角の絶対値 $|\delta|$ は ϕ_n より大きくなり得ない。すなわち、式 2-11-1 は必ず成立するように δ 及び ϕ_n を設定しなければならない。

式 2-11-2 において、 ϕ_n を土の安息角と考えるとき、地表面の傾き角の絶対値 $|\beta|$ が ϕ_n より大きくなると、地表面は壁体とは関係なく滑りを生じることになる。したがって、式 2-11-2 も必ず成立するように、 β と ϕ_n を設定しなければならない。

式 2-11-3 において、 $(\delta + \Psi)$ は、土圧の働く方向の水平からの傾斜角を表している。式 2-11-3 は、図 2-11-1 において、土圧が、その作用点 E を通る鉛直線よりも右側からのみ働くことを意味している。

式 2-11-4 は、図 2-11-1 において、地表面 AB が壁体面 AC 及びその延長線 AD よりも右側にのみ存在することを意味している。

式 2-11-1～式 2-11-4 が同時に成立するとき、「第2編 10.1.2 砂質土の常時の土圧」の式 2-10-4 及び式 2-10-5 の根号内は非負となり、土圧係数及び崩壊面の傾斜角が計算される。式 2-11-1、式 2-11-2 は土質力学的に成立しなければならない条件であり、通常の砂質土に対し常に満足される必要がある。他方、式 2-11-3、式 2-11-4 は、壁体面の傾斜角に関する幾何学的な仮定であり、大部分の壁体に対しては通常許される条件と考えられる。

式 2-11-3 又は式 2-11-4 が成立しない断面がでてきた場合は、「第2編 10.1.2 砂質土の常時の土圧」の式 2-10-4 及び式 2-10-5 中の根号内が非負となる条件を別途検討する必要がある。

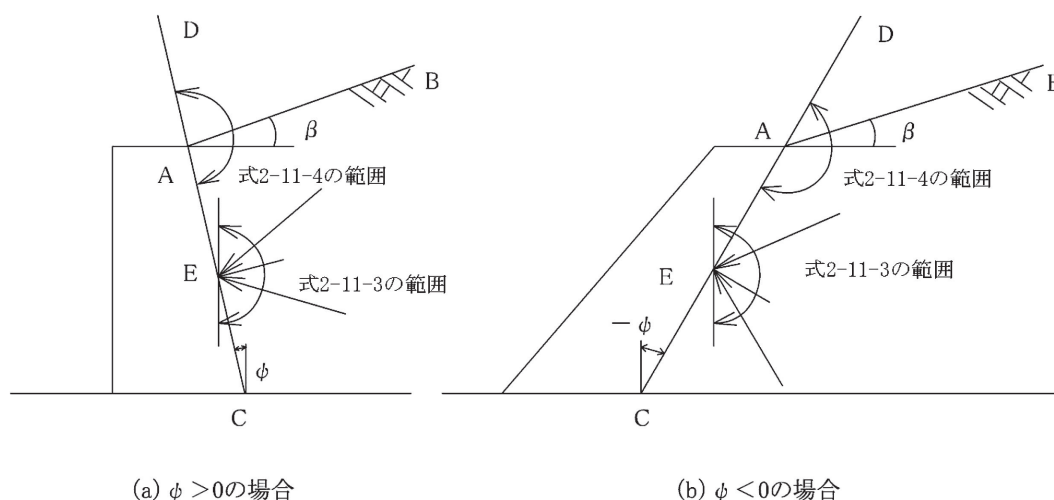


図 2-11-1 土圧の働く方向及び地表面の傾斜の範囲

(2) 砂質土の地震時の土圧

「第 2 編 10.1.5 砂質土の地震時の土圧」における地表面の土圧係数の算定式（式 2-10-16）及び崩壊面の傾斜角の算定式（式 2-10-17）が計算できるためには、これらの式中の根号内が非負であることが必要である。これは、次の場合に成立する。

$$\phi_n \geq |\delta| \dots\dots\dots \text{(式 2-11-5)}$$

$$\phi_n > |\beta \pm \theta| \dots\dots\dots \text{(式 2-11-6)}$$

$$|\delta + \Psi \pm \theta| < 90^\circ \dots\dots\dots \text{(式 2-11-7)}$$

$$|\Psi - \beta| < 90^\circ \dots\dots\dots \text{(式 2-11-8)}$$

これらの式の中で、式 2-11-5、式 2-11-8 の意味については、上記の(1)で説明した。これに加えて、地震時の場合は常時の場合に比べ、 β を $(\beta \pm \theta)$ 、 Ψ を $(\Psi \pm \theta)$ に置き換えた式 2-11-6 及び式 2-11-7 が図 2-11-1 の幾何学的条件を満足する場合に「第 2 編 10.1.5 砂質土の地震時の土圧」の式 2-10-16 及び式 2-10-17 の根号内が非負となり、 K_n 及び ζ_n が計算可能となることを示している。

(3) 計算が不可能な場合の対応

実務上では、常時は特段の問題にはならないが、地震時で地盤の ϕ_n が小さい場合、 θ が大きいと、特に式 2-11-6 が成立しない場合が起こりうる。「第 2 編 10.1.5 砂質土の地震時の土圧」の図 2-10-2 及び図 2-10-3 について、地表面が水平となす角 β も勘案すると、その傾向が見られる。その場合は、地盤改良を行うか、断面諸元あるいは構造形式を変更するのがよい。

資料2.12 設計水平震度算出に用いる SMAC フィルターについて

本資料では、SMAC フィルターについて解説する。SMAC フィルターは、波形に含まれる周波数成分を調整するための関数である。地震動の観測記録から、あるいは計算で作成した地震動波形から、設計水平震度を算出しようとする際、SMAC フィルターによる計算が必要な場合がある。

港湾地域強震観測において、かつては SMAC-B2 型強震計(地震計)が一般的に使われていた。SMAC-B2 強震計は機械的な機構を主体とした強震計で、スタータ、振子、記録装置(記録紙)などを一つの箱の中におさめたものである。その後、強震観測はより精度の高い電磁式、そしてデジタル式へと移行し、港湾地域強震観測において SMAC-B2 型強震計は 2003 年 2 月を最後に姿を消した¹⁾。それまでに SMAC-B2 強震計による観測記録を用いて種々の数式が提案されてきた。例えば次に示す、最大加速度と作用震度の上限との関係式は、SMAC-B2 型強震計の記録によるものである²⁾³⁾⁴⁾。(この式は、「第2編第11章 地震力」に式 2-11-1 として掲載。また、「資料 6.1 地震動及び設計水平震度の算定方法」に式 6-1-6 として掲載。)

$$k_h = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\alpha \geq 200\text{Gal}) \quad \dots\dots\dots \text{(式 2-12-1)}$$

$$k_h = \left(\frac{\alpha}{g} \right) \quad (\alpha < 200\text{Gal}) \quad \dots\dots\dots \text{(式 2-12-2)}$$

ここで、

k_h : 作用震度

α : 地表面最大加速度 [Gal (=cm/s²)]

g : 重力加速度 (980Gal)

ところで SMAC-B2 型は、その後に登場した地震計と比較して、高周波帯域における感度が低い傾向にある。そのためたとえば最大加速度は小さめに得られる傾向がある⁵⁾。

そのため、SMAC-B2 型強震計による観測記録を用いて作られた数式に、現在の地震計による観測記録をあてはめようとする場合、現在の観測記録を、SMAC-B2 型強震計で記録されたものと同等になるように調整してからあてはめる方がより正確である。

そこで、SMAC 相当フィルターを用いる。SMAC 相当フィルターは、現在の地震計による地震動の観測記録を、SMAC-B2 型強震計を用いて記録した場合と同等になるよう、周波数成分を調整するためのものである。

SMAC 相当フィルターは次のように周波数 f の関数で、虚数 i を含んでおり複素数の形をしている。

$$S(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{7.14} \right)^2 + 2 \left(\frac{f}{7.14} \right) i} \quad \dots\dots\dots \text{(式 2-12-3)}$$

これを振幅と位相に分けると次のグラフのようになる⁶⁾。

振幅のグラフは、周波数ごとの振幅を何倍するかを表している。

位相のグラフは、周波数ごとの揺れの時間的なずれの度合いを表している。

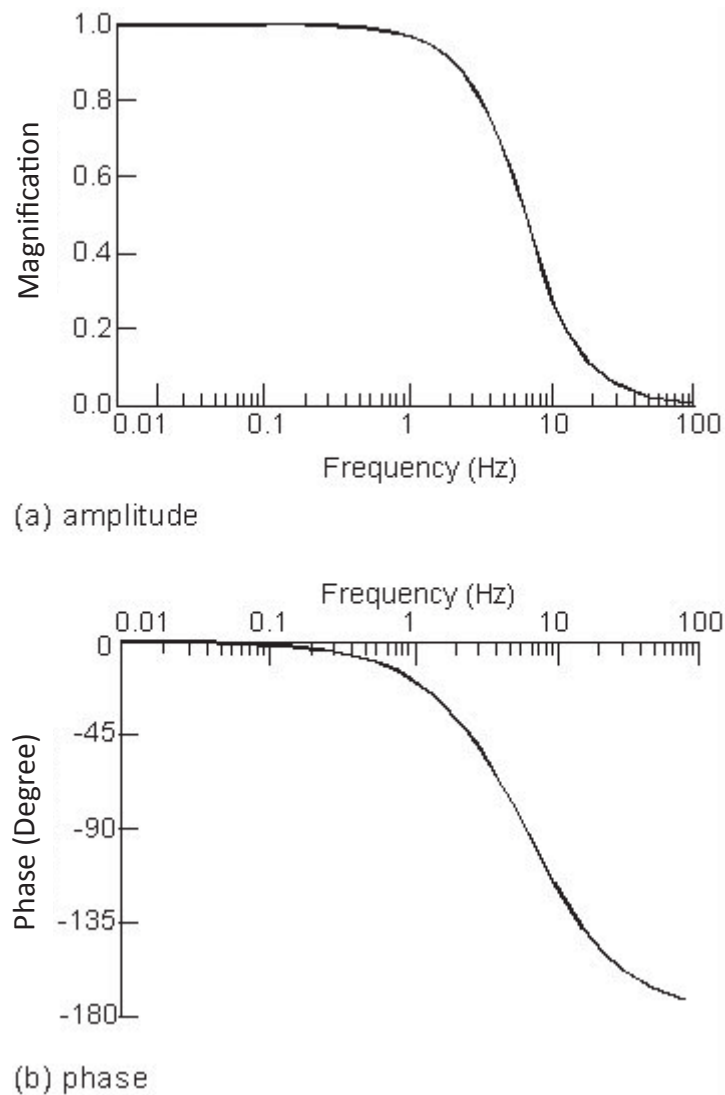


図 2-12-1 SMAC-B2 相当フィルター（上：振幅 下：位相）⁶⁾

最近の感度の高い地震計での観測記録に基づく加速度時系列波形を用いて、上記の式 2-12-1 又は式 2-12-2 を使用して設計水平震度を求めたい場合、SMAC フィルターを施して使用することを原則とする。加速度時系列波形をフーリエ変換し、SMAC 相当フィルターを掛け、フーリエ逆変換すると、SMAC-B2 型の地震観測記録に相当する加速度時系列波形が得られる。

震源モデルを用いた計算で作成された加速度時系列波形を用いて、式 2-12-1 又は式 2-12-2 を使用して設計水平震度を求めたい場合も、SMAC フィルターを施して使用することを原則とする。

(参考文献)

- 1) 野津厚：港湾地域強震観測の経緯と現状，第2回日本地震工学会大会梗概集（2003），pp.54-55
- 2) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，Vol.14，No.4（1975），pp.67-111
- 3) 北澤壮介・上部達生・檜垣典弘：沿岸地域における基盤の最大加速度期待値の推定，港湾技研資料，No.486（1984）
- 4) 野津厚・上部達生・佐藤幸博・篠澤巧：距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係，港湾技研資料，No.893（1997）
- 5) 野津厚・上部達生・佐藤幸博：工学的基盤における最大加速度等の断層面からの距離減衰の検討，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集（1997），pp.27-34
- 6) 港湾空港技術研究所：2003年5月26日宮城県沖の地震現地調査速報第3報（暫定版），
http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/news_jpn/2003/news_2003_043_jpn.html