

浮消波堤の設計法について

荒木 敏光*・中条 武彦**

1. 緒 言

浮消波堤は、既存の重力式防波堤に比較して経済性、機動性、海水交流性に優れ、沿岸水域の有効利用の気運が高まると共に、その実用化が推進されて来た^{6),7)}。

浮消波堤は、浮体本体と係留システムから成る極めてシンプルな構造であるが、その実用化のためには模型による水槽試験をはじめ、実海上における各種試験、更には理論解析などのデータを基とした、総合された設計技術が必要とされる。

本論文では、IHI が研究、開発して来た成果ならびに既に実用機を納入した実績を基に、与えられる各種条件に対する、浮消波堤の設計手法に関して、その概要を発表するものである。

2. 設 計 法

浮消波堤に要求される消波性能、耐久性等はその使用目的によって異なり、経済性にも大きく影響する。設計フローシートに示す様に、総合的な見地からの設計を実施し、ユーザーに対しハードウェアだけでなくソフトウェア面でのデータをも提供して行く事が必要であろう。

図-1 に、浮消波堤の設計フローシートを示す。図-2 に、IHI 浮消波堤 LH-型（チェーンカテナリー係留）を示す。

設計フローシートにおけるフローを大別すると、以下の各ブロックに分けられる。

- a) 設計条件
- b) 基礎データ
- c) 不規則波中における解析
- d) 本体構造解析及び係留ラインの解析

このフローシートを実行する事により要求仕様を満足し、かつ経済的な設計、さらに投資効率までも算定できる様なデータを提供できる。以下、フローシートを実行するに当たり主要点について解析手法を述べる。

(1) 設計方針

設計に当って、安全性の確保と適切な性能を得るために特に次の点に留意する。

- a) 浮消波堤の設置目的、b) 要求静穏度の波高分布、c) 耐用年数、d) 設計波条件、e) 現地の地理的条件、f) 特殊条件（船舶の衝突、流水など）

(2) 波浪推算

短期および長期の波浪予測は、現地の波浪観測データがあれば、Weibull 分布などに近似して推定できる⁹⁾。

波浪データが無い場合には、風のデータから、“S-M-B 法”などを用いて有義波を推定できる^{1),2),3)}。

(3) 消波特性および動揺特性

2次元規則波中における消波特性および動揺特性を基に、不規則波中の消波特性、動揺特性を求める。図-3 に規則波中における消波特性、図-4 に動揺特性をおのおの実線で示す。これらの値は、図-2 に示した LH-型浮消波堤の特性の例である。

(4) 不規則波中における解析

海の波は、波高、波周期、波向の異なる種々の成分波が重なった、いわゆる不規則波である⁴⁾。したがって、不規則波中における解析が必要であろう。

a) 不規則波中における消波特性

不規則波中における透過率は、規則波中における透過率を用い、その現象がほぼ線形であれば、次の様に求める事ができる。

入射波の周波数 f の規則波中における透過率を $K_T(f)$ とすれば、透過波の周波数スペクトル $S_T(f)$ は、入射波の周波数スペクトル $S_I(f)$ に対して、式(1)で与えられる¹²⁾。

$$S_T(f) = \{K_T(f)\}^2 \cdot S_I(f) \dots\dots\dots (1)$$

波高の確率密度関数が Rayleigh 分布で表わされるとすれば、有義波高 $H_{1/3}$ について次の関係がある¹²⁾。

入射波の有義波高

$$(H_I)_{1/3} = 4.0 \sqrt{\int_0^\infty S_I(f) \cdot df} \dots\dots\dots (2)$$

透過波の有義波高

$$(H_T)_{1/3} = 4.0 \sqrt{\int_0^\infty \{K_T(f)\}^2 \cdot S_I(f) \cdot df} \dots\dots (3)$$

* 石川島播磨重工業(株) 技術開発本部 製品開発センター

** 石川島播磨重工業(株) 重機プラント事業本部 運鉄事業部
海洋設計部

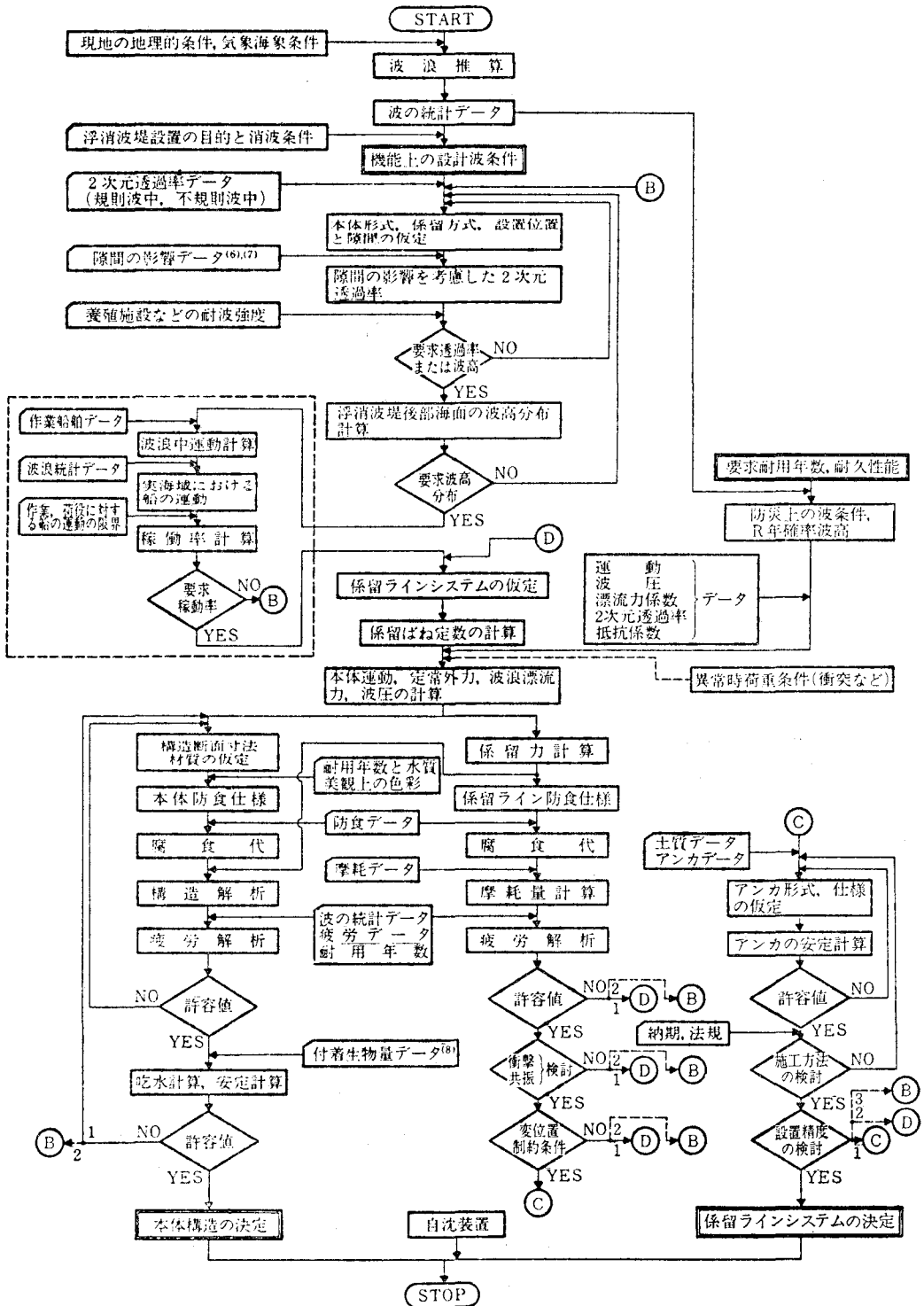


図-1 IHI 浮消波堤の設計フローシート

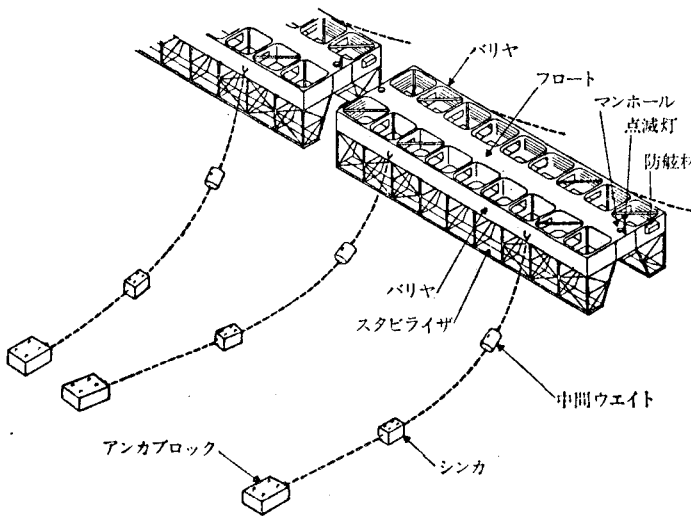


図-2 LH形浮消波堤

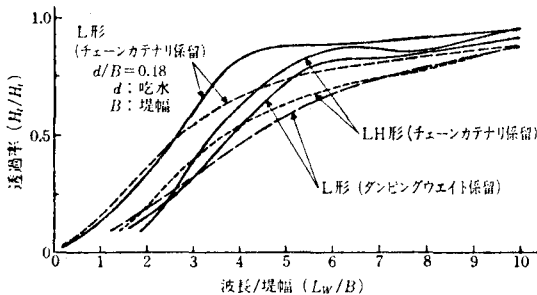


図-3 消波特性

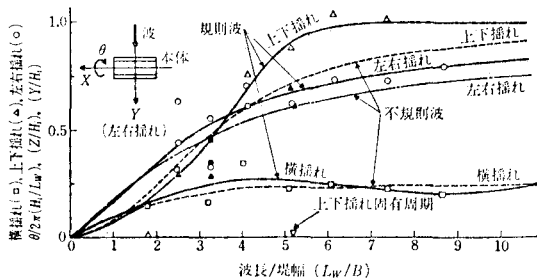


図-4 動揺特性

ここで、添字は I : 入射波, T : 透過波

従って、有義波高の比 $(K_T)_{1/3}$ は次式で表わされる。

$$(K_T)_{1/3} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty \{K_T(f)\}^2 \cdot S_I(f) \cdot df}{\int_0^\infty S_I(f) \cdot df}} \quad \dots\dots (4)$$

$S_I(f)$ に, Bretschneider-光島修正形の式⁹⁾を適用して、不規則波中の透過率を計算し、その結果を図-3中に点線で示した。

b) 不規則波中における動揺特性

本体の動揺は、波高の1次にほぼ比例するので前項で

述べた場合と同様に取扱う事が出来、式(5)で示される¹⁰⁾。

$$(S_M)_{1/3} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty \{J_{M,\xi}(f)\}^2 \cdot S_I(f) \cdot df}{\int_0^\infty S_I(f) \cdot df}} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 $(S_M)_{1/3}$: 有義波高 $H_{1/3}$ に対する動揺の不規則波中の周波数応答、 $J_{M,\xi}(f)$: 規則波中単位波高に対する動揺の周波数応答。

不規則波中における動揺の計算結果を図-4中に点線で示した。

(5) 不規則波中における波浪漂流力

波浪による定常漂流力は、一般に知られている様に波高の2乗にほぼ比例する¹¹⁾。したがって、不規則波中の漂流力

係数は式(6)で表わされる¹⁰⁾。

$$S_{Dr} = \frac{\int_0^\infty H_{Dr,\xi}(f) \cdot S_I(f) \cdot df}{\int_0^\infty S_I(f) \cdot df} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 S_{Dr} : 有義波高 $H_{1/3}$ に対する波浪漂流力係数の周波数応答、 $H_{Dr,\xi}$: 規則波中単位波高に対する波浪漂流力係数の周波数応答。

また、波浪漂流力係数は式(7)で表わされる¹¹⁾。

$$H_{Dr,\xi} = F_{Dr} \left[\frac{1}{2} \rho g \left\{ \left(\frac{H_I}{2} \right)^2 - \left(\frac{H_T}{2} \right)^2 \right\} \times \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] \quad \dots\dots (7)$$

ここで、 F_{Dr} : 波浪漂流力、 ρ : 海水密度、 g : 重力加速度、 H_I : 入射波高、 H_T : 透過波高、 k : 波数、 h : 水深以上、2次元不規則波中における取扱いを述べたが、3次元不規則波についても方向関数⁴⁾を導入して、同様に取扱う事ができる。

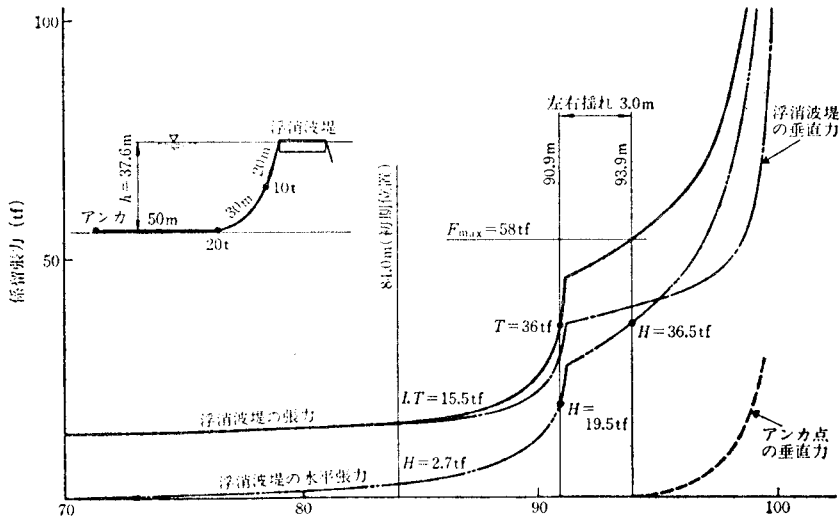
(6) 係留張力

係留張力は、波による力の他に風、潮流による力も加えて、次の様に表わされる。

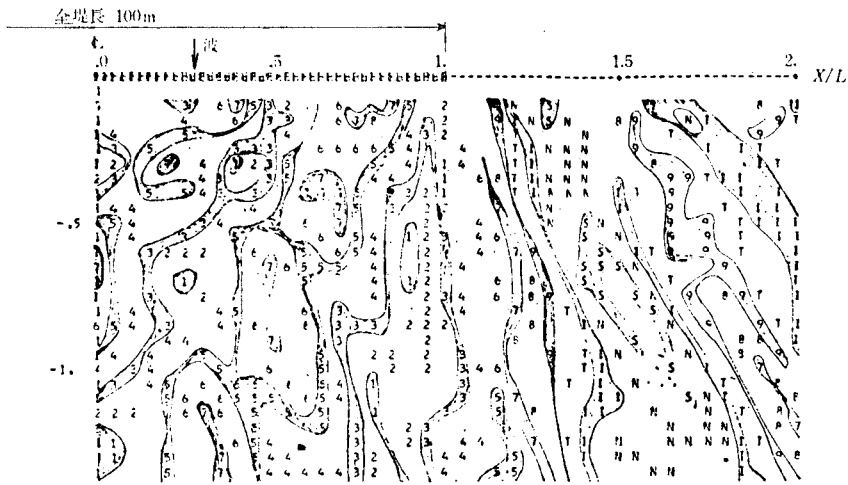
係留張力 = (初期張力) + (定常漂流力) + (変動張力)

ここで、(初期張力): 静止状態における係留張力、(定常漂流力): (風による漂流力) + (潮流による漂流力) + (波浪による漂流力)、(変動張力): 波による動揺に伴う変動係留張力。

係留張力は、係留ラインをバネ系として取扱う事により求められる。係留ラインのバネ定数計算には、「任意係留ラインの静的解析プログラム」を用いる⁹⁾。この電算プログラムは、係留ラインの力の平衡条件から得られる特性方程式を差分近似により数値計算するもので、計算結果と係留張力計算例を図-5に示す。



図—5 係留ラインの静的解析(P6Z037)による係留張力の計算例



- (注) 1. 条件
堤 長 ($2L$): 100 m
透過率 (H_T/H_I): 0.35
波 長 (L_W): 19 m
周 期 (T_W): 3.5 s
2. 波高分布の計算結果の数字は入射波高を10とした場合の波高を示し、それ以外はつぎの意味である。
T: 10以上 I: 11以上
N: 12 " S: 13 "

図—6 浮消波堤による波の回折計算例

(7) 浮消波堤後部海面の静穏度

浮消波堤後部海面の波高分布を求めるために、「浮消波堤による波の回折計算プログラム」を用いる。この電算プログラムは、特異点分布法により Green 関数を用いて速度ポテンシャルを求め、波高分布を計算するものである⁹⁾。計算例を 図—6 に示す。計算結果の妥当性は水槽試験により確認した。

(8) 係留チェーンの摩耗、腐食を考慮した疲労解析

係留チェーンは、絶えず繰返し荷重を受けている。したがって、繰返疲労による強度低下、摩耗と腐食によるチェーン直径の減少を同時に考慮して疲労解析をする必

要がある。これらを検討するための基礎データは、各種の要素試験で得られており、これらのデータと波浪の統計データを合せて用いる事により、Miner の直線被害法則から、累積疲労被害度(ダメージ量) D_g を求める事ができ、式(8)で示される⁶⁾。

$$D_g = \frac{N_t}{C} \int_0^1 \{\sigma(x)\}^m \cdot p(x) \cdot dx \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 D_g : 累積疲労被害度、 $\sigma(x)$: 相当両振応力振幅(係留張力と摩耗、腐食および波高の確率分布を考慮して求めるチェーンの応力)、 N_t : 波の総数、 m , C : チェーンの疲労強度(S-N線図)¹³⁾より得られる定数、

$p(x)$: 波高の確率密度関数, x : 確率変数 ($x=H/H_{\max}$),
 H : 波高, $H_{\max}$: 最大波高.

なお, 累積疲労被害度 D_g の許容値は, $D_g < 0.1$ 程度とする事が妥当と考えられる¹⁴⁾.

(9) 本体構造解析

本体には, 浮力, 自重, 波圧, 係留力, 風や潮流による力が作用するが, 異常時の荷重として船舶の衝突が考えられる. いずれの場合も, 荷重条件を十分把握した上で構造解析を実施する. 部材の許容応力は, 参考文献2)などに基づいて決定する. 構造部材の板厚には腐食代を考慮し, 継手部や応力の高い部分については, 疲労強度も検討する必要がある.

(10) 2次安全の必要性

充分安全に設計されたものでも, 万一予期しない事故などで係留チェーンが切断された場合, 浮消波堤が漂流して周辺の構造物や諸施設に, 多大の被害を与える可能性が無いとは言えない.

したがって, この様な場合に浮消波堤が遠くまで漂流しない様に, 短時間のうちに自動的に沈下させる危急用自沈システムも場合により必要と考える.

3. 結 論

浮消波堤の総合設計法がほぼ確立され, 各種データおよび理論解析プログラムを得て, 信頼性の高い設計が可能となった. したがって, 総合的な見地から消波性能, 耐久性, 安全性, 経済性が検討できる様になった.

なお, 本報告では, 概略を述べたので詳細は参考文献を参照していただきたい.

参 考 文 献

- 1) 土木学会: 水理公式集, 1973 年.
- 2) 土木学会: 海洋鋼構造物設計指針(案)解説, 1973 年.
- 3) 日本港湾協会: 港湾構造物設計基準, 1971 年.
- 4) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 237, 1977 年 10 月.
- 5) Robinson, D. W.: Use of the three parameter Weibull distribution to describe the marginal and conditional distributions of wave heights, R & T.A Report, No. 5096, 1972.
- 6) 第一製品開発部: IHI 浮消波堤の開発, 石川島播磨技報, 第 18 巻第 2 号, pp. 206~212, 1978 年 3 月.
- 7) 日本船用機器開発協会: 浮消波堤の開発事業報告書, p. 61, 1975 年 3 月.
- 8) 井上義行: 任意係留ラインの静的解析, 石川島播磨技報, 第 16 巻第 5 号, pp. 552~558, 1976 年 9 月.
- 9) Motoshima, H.: The wave pattern and exciting forces of a slender body, 日本造船学会論文集, 第 143 号, pp. 27~34, 1978 年 6 月.
- 10) 井上義行: 浮遊式海洋構造物の波浪中における運動および係留特性, 石川島播磨技報, 第 17 巻第 2 号, pp. 143~152, 1977 年 3 月.
- 11) 野尻信孝・村山: 規則波中の 2 次元浮体に働く漂流力に関する研究, 西部造船会々報, 第 51 号, pp. 131~153, 1976 年 3 月.
- 12) 木原 力・北谷・轟: 円形断面緊張繫留浮体の防波効果と繫留力, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻第 2 号, pp. 79~110, 1975 年 6 月.
- 13) Girbert de Label: Fatigue tests on anchor chain-cable, OTC-1053, 1971.
- 14) 山口勇男: 造船技術者のための信頼性工学, 船の科学, 第 29 巻第 5/8 号, 1976 年 5/8 月.