

⑧仮設構造物の設計波浪

仮設構造物の性能照査においても、設計波浪は、基本的には、上述した考え方で設定する。しかしながら、仮設構造物は、設置期間が限定されているため、対象とする作用の再現期間を短く設定することが可能である。2～3年程度の期間の仮設構造物であれば、10年間程度の再現期間の作用で照査が行われることが多い。

⑨気候変動による波浪への影響

気候変動の影響により日本付近の台風の強度が将来強まることを受けて、10年に1回の確率で発生する極大波高は多くの海域で高くなるとともに、台風の経路変化の影響を受けて場所により $\pm 30\%$ 程度の変化があることが予測されている¹⁵⁻¹⁾。ただし、台風経路予測の不確実性のためこれらの確信度は低い。

確率波高の将来変化は、現在気候及び将来気候を対象とした波浪推算（過去実験及び将来実験）で得られるデータを統計解析し、それぞれ算定される確率波高の現在気候に対する将来気候の変化比^{15-2), 15-3), 15-4)}から得られる現在年から将来年までの年変化率¹⁵⁻⁵⁾により評価することができる。しかし、一般的にその予測には誤差に伴う予測幅があるとともに、気候変動に伴い漸次的に変化する。このため、確率波高の将来変化は、その予測幅を評価し^{15-6), 15-7)}、漸次的な変化及び予測幅を勘案して評価することが望ましい。また、確率波高に対応する周期についても同様に将来変化を評価することが望ましいが、これに関する知見は未だ十分でない。そのため、現状では、現行の確率波高の推定資料である極大波データの波高と周期の相関関係を将来における確率波高に対して適用することができる。一方、波浪推算で得られたうねりは、現状では、その妥当性を観測データ等で検証して用いることが望ましい。

(2) 偶発波浪条件の設定

偶発作用としての波浪は、台風や急速に発達する低気圧等の想定じょう乱に基づき、必要に応じ高潮（本章3.2 高潮参照）との同時生起性を考慮して、波浪推算（本章4.3 波浪の発生・伝播・減衰参照）を行い設定することを標準とする¹⁶⁾。なお、想定擾乱の強度、規模及び経路の設定に当たっては、高潮災害による社会的影響の甚大さも考慮する。一方、現状では、将来気候の波浪場、及び高潮との同時生起性における予測値のバイアスに関する知見は未だ十分でないことに留意する必要がある。

(3) 設計を超える波浪への対応

対象施設の設計供用期間や重要度、並びに当該地点の自然状況によっては、必要に応じ、安定性の照査に用いた変動波浪を超える作用に対しても、修復性あるいは安全性が確保されることが望ましく、当面の間は粘り強さに対する性能照査手法を準用するなどが想定される。このような波浪諸元は、使用性の照査に用いたものに比べ再現期間が比較的長い変動波浪、あるいは偶発波浪を設定した最大クラスに準じるじょう乱による波浪、のいずれかを選択して設定することができる。なお、気候変動の影響は、本章4.1.1 (1) ⑨気候変動による波浪への影響にならい、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）等¹⁶⁻¹⁾の現在気候及び将来気候の大規模アンサンブル数値実験結果¹⁶⁻²⁾に基づく波浪推算結果を用いて、再現期間が比較的長い現在および将来の変動波浪の波高の変化比により評価することができる¹⁵⁻⁷⁾が、大規模アンサンブル数値実験結果等に含まれるバイアスに注意する必要がある。

4.1.2 構造部材の使用性の照査に用いる波浪条件の設定

(1) 構造部材の使用性の照査に用いる波浪は、設計供用期間中にしばしば作用することが想定される波浪として適切に設定する。こうした波の設定は、月別・季別及び通年の波浪観測資料より、波向別に波高・周期の相関度数分布表を求め、算定することが望ましい。設計供用期間が50年の場合は、以下の方法により求めてよい。一方、現状では、将来気候の波浪場における予測値のバイアスに関する知見は未だ十分でないことに留意する必要がある。

①波浪資料

全国の港湾で波浪観測が継続的に行われているナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）波浪観測データを用いることができる。ナウファスの毎年の波浪観測年報¹⁷⁾または長期統計報¹⁸⁾には、2時間毎または20分

毎の有義波の波高階級別出現頻度統計がとりまとめられている。この2時間または20分に1回与えられる有義波高値から、2時間または20分の観測時間内における個別波の出現状況の推定を行う。

②個別波の出現状況の推定

上記の波浪観測資料は、有義波の出現頻度であるため、下記の仮定に基づいて観測期間中の個別波の出現状況を推定する。

(a) 個別波高の出現分布は、レーリー分布に従う。2時間中または20分中の有義波高は一定であると仮定し、2時間中または20分中に発生する個数の個別波高の分布は、有義波高が等しいレーリー分布となることを仮定することができる。

(b) 時間中の個別波の個数は、観測毎によって（周期によって）異なるが、2時間毎または20分毎の各観測について、それぞれの個別波数を設定するのは極めて困難であるため、2時間（7200秒）または20分（1200秒）を当該波浪観測点の長期間の平均周期で除した値を、2時間中または20分中の波数と仮定することができるものとする。

③設計供用期間における個別波の頻度分布

観測期間中の個別波の平均周期を用いて、設計供用期間における波浪の出現回数を求める。なお、設計供用期間が50年の施設に対する使用性の照査に用いる波浪としては、上記の方法で設定された波浪の出現回数より、それ以上の波高の波が来襲する回数が 10^4 回オーダとなる波として設定することができる。プレス・トレスト・コンクリート港湾構造物設計マニュアルでは、国際PC協会の規定に基づいて、この波浪を使用限界状態の照査に用いる波浪としており¹⁹⁾、ここでもこれを準用している。

4.1.3 静穏度の照査に用いる波浪条件の設定

静穏度の照査に用いられる常時の波浪特性は、一般に、波浪資料より月別、季別及び通年の資料について波向別に波高、周期の相関度数分布表として表す。周期の影響が強く現れる事象（例えば稼働率）の詳細な検討に当たっては、周期帯毎の換算波高・波向の出現度数分布の整理を行うことが望ましい。波浪条件の検討は、観測データを使用して行うことを標準とする。観測データが利用できない場合は、波浪推算によることができるが、波浪推算結果の活用には、観測データによる検証が行われることが望ましい。静穏度の照査に用いる常時の波浪条件の設定は、文献20)のマニュアルを参照することができる。

一方、現状では、将来気候の波浪場における予測値のバイアスに関する知見は未だ十分でないことに留意する必要がある。

4.2 設計に用いる波の取扱い

4.2.1 波の設定方法

(1) 波の設定手順

海の波は、港湾の施設に働く主要な作用の一つである。性能照査においては、まず、施設の機能に応じて、変動作用あるいは偶発作用となる沖波を決定する。このとき設定する波の条件は、有義波高、有義波周期、波向、及び波のエネルギーの方向集中度等を用いて表すことができる（本章4.2.2 波の表し方参照）。次に、浅海域においては、本章4.4 波浪の変形に示す算定図式の適用、波浪変形計算、または模型実験を行い、施設に作用する波の条件を決める。一方、将来の見通しとして気候変動による波浪への影響を勘案する際には、波浪の将来予測に関する研究成果又は調査結果（本章4.1.1 (1) ⑨気候変動による波浪への影響参照）などを参考に、将来における変動波浪条件を適切に設定するものとする。

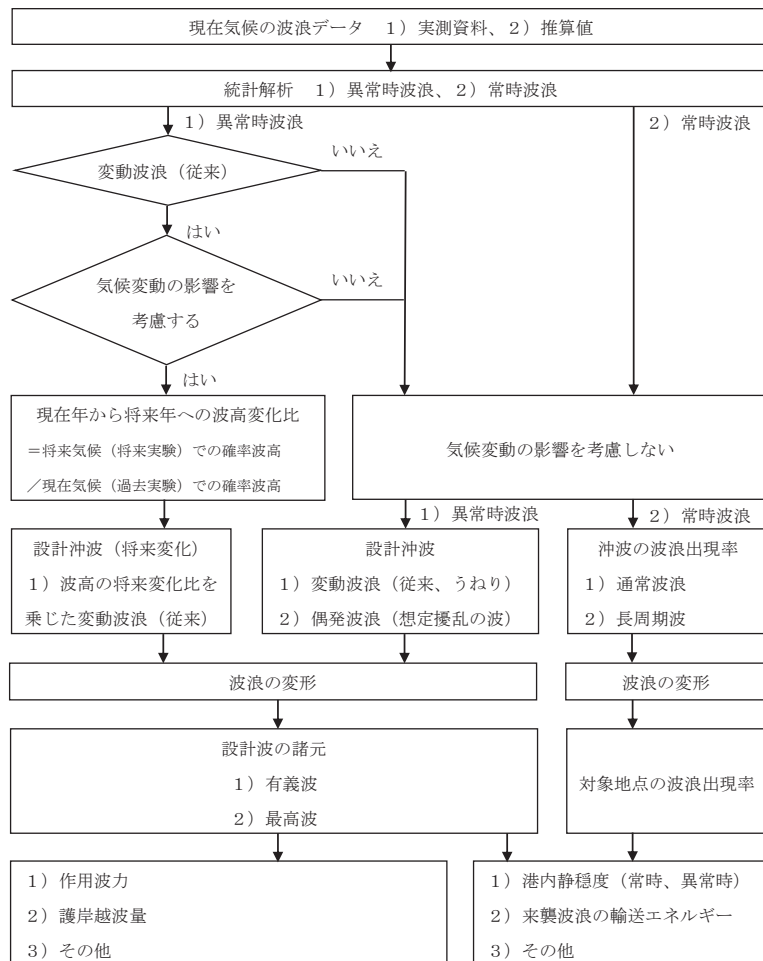


図-4.2.1 設計に用いる波の設定手順

(2) 波の線形分散関係

波の基本的性質は、一般に波高、周期（波長）及び水深によって変化する。これらの関係を水面波の分散関係という。第一次近似として波高を微小とみなした微小振幅波理論によるものを線形分散関係といい、次式で表される。

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (4.2.1)$$

ここに、 σ ：角周波数 (1/s)、 k ：波数 (1/m)、 h ：水深 (m)、 g ：重力加速度 (m/s^2) である。また、角周波数、波数はそれぞれ、周期 T (s)、波長 L (m) を用いて、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $k = 2\pi/L$ と表される。さらに、これらを式 (4.2.1) に代入して整理すると、波速 C (m/s) は次式のように表される。

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh 2\pi \frac{h}{L}} \quad (4.2.2)$$

(3) 沖波（深海波）と浅海波

波長に対する水深の比： h/L を相対水深と呼ぶことがある。相対水深が $1/2$ 程度以上の水域では、波は海底の影響をほとんど受けず、変形することなく進行する。しかし、相対水深が $1/2$ 程度未満の水域に進入すると次第に海底の影響を受けて、波速は遅くなり、波長が縮まり、波高も変化する。このことから相対水深が $1/2$ 程度以上の海域を伝播する波を深海波といい、これよりも浅い海域を伝播する波を浅海波という。

ここで、相対水深が $h/L = 1/2$ 程度以上のとき、式 (4.2.2) において $\tanh$ (ハイパボリックタンジェント) 関数の値はほぼ 1 とみなせる。そこで、右側の等式の両辺を 2 乗して整理すると、深海波の波長及び周期を特に L_0 、 T_0 と書くことにより、深海波の波長は次式のように算定される。

$$L_0 \approx \frac{g}{2\pi} T_0^2 \approx 1.56 T_0^2 \quad (4.2.3)$$

なお、式 (4.2.3) からわかるように深海波の波長は水深に依存しないので、特に沖波と呼ばれる。

一方、相対水深が $h/L=1/2$ 程度未満である浅海波の波長は式 (4.2.2) により算定されるが、右側の等式の両辺に波長が含まれるために、解を得るためには一般に収束計算を必要とする。そこで、ある水深・周期に対する波長・波速は、[参(施)] 第4章 4 波の線形分散関係を用いて見積もってもよい。

また、相対水深が $h/L=1/25$ 程度未満のとき、式 (4.2.2) において $\tanh$ 関数の値はほぼ関数の引数 $2\pi h/L$ の値と同じになる。そこで、等式の両端の関係から次式が得られ、さらに周期を乗じると波長が算定できる。

$$C \approx \sqrt{gh} \quad L = CT \approx T\sqrt{gh} \quad (4.2.4)$$

このような近似が成り立つ相対水深が非常に浅い海域での浅海波を、特に極浅海波または長波という。たとえば、波長が100kmを超えるような津波は、平均水深4kmの太平洋を伝播する際にも長波とみなすことができ、その伝播速度は式 (4.2.4) で見積もることができる。

なお、浅海波では、海底地形による屈折、浅水変形及び砕波等の波の変形による影響を受けて、スペクトル形状及び波高の頻度分布は沖波の状態とは異なることを考慮する必要がある。

ここで、遠浅の海底地形や内湾に面する港湾等においては、設計沖波を深海域で設定すると設計対象施設から遠く離れてしまい、風場による波浪の発達が考慮されないなど沖波としての代表性が損なわれてしまうため、海底地形を考慮せずに実施した波浪推算で過去の事象を再現することにより、比較的深い浅海域で設計沖波を設定することができる。新しい波浪推算・設計波算定マニュアル～浅海波浪推算と準沖波の導入～²⁰⁻¹⁾ では、深海域で設定された本来の沖波と区別するために、このようにして設定された沖波を「疑似沖波」と称している。一方、近年では、波浪推算技術の発展により、海底地形を考慮した波浪推算を実施して過去の事象を高精度に再現することが可能になっている。このとき、疑似沖波を算定した地点で推算される波浪は海底地形による屈折、浅水変形等が考慮されることになる。そこで、同マニュアルでは、このようにして設定する沖波を「準沖波」と称し、本来の沖波や疑似沖波と区別している²⁰⁻²⁾。特に、準沖波に対して波浪変形計算を実施し設計対象施設の堤前波を算定する場合には、深海条件を満たす沖からの波浪変形を考慮できるよう、同時に、準沖波を再現する深海域での沖波を、波のエネルギーの方向集中度にも留意しつつ逆推定しなければならない^{20-3), 20-4), 20-5)}。

なお、気候変動による波浪への影響を考慮する際に用いる変化比¹⁵⁻⁴⁾ は、沖波、疑似沖波または準沖波の確率波高に対して適用することが想定されているため、これらの波浪変形を考慮した波高（例えば、堤前波高、準沖波に対して逆推定した沖波、等）にそのまま適用してはならない。

(4) 沿岸域における波の変形

水深の影響を受けて波の波高や進行方向が変化する現象を波の変形といい、沖波の波長 L_0 に対する相対水深が $1/2$ 程度より浅い海域や陸地等による遮蔽の影響を受ける海域では、波の変形を考慮すべきである（本章4.4 波浪の変形参照）。波の変形には、海底地形による屈折、浅水変形、砕波や島や構造物等の遮蔽物による回折、反射、透過などが含まれ、それぞれ適切な数値計算法を用いて計算を行う。それぞれの現象は相互に影響して生じるので、すべてを一度に考慮できる計算法の適用が望ましいが、いまのところ、空間スケールによらずすべての現象を同時に考慮し、完全に再現できる計算法は実用化されていない。港湾の施設に作用する波は、沖波の伝播による屈折、回折、浅水変形、砕波等の変形を勘案して、港湾の施設の構造の安定または港湾の施設の利用に最も不利となる適切な波とすることを原則とする。

(5) 波の有限振幅性による影響

波高を微小とみなせない波を有限振幅波といい、浅海域では相対水深の減少とともに微小振幅波との特性の違いが顕著となり、波峰が尖り波谷が扁平な波形がみられるようになる。このような波を非線形波といい、波

の変形のうち浅い水深で波高が増大する浅水変形ではこのような波の非線形性による影響を考慮すべきである。

図-4.2.2は、水深 $h=100\sim150\text{cm}$ の水理模型実験におけるデータを整理して得られた進行波の波頂高の変化を示したものである。また、図-4.2.3は、現地の波形記録に基づいて作成されたもので、各観測記録について読み取られた最高波頂高 $(\eta_c)_{\max}$ とその記録中の最高波高 $H_{\max}$ に対する比を $H_{1/3}/h$ の関係で図示したものである。実際の波頂高は模型実験の値より若干大きい。 $H_{1/3}/h<0.5$ の領域では、現地記録から求めた図-4.2.3を利用するのが望ましい。

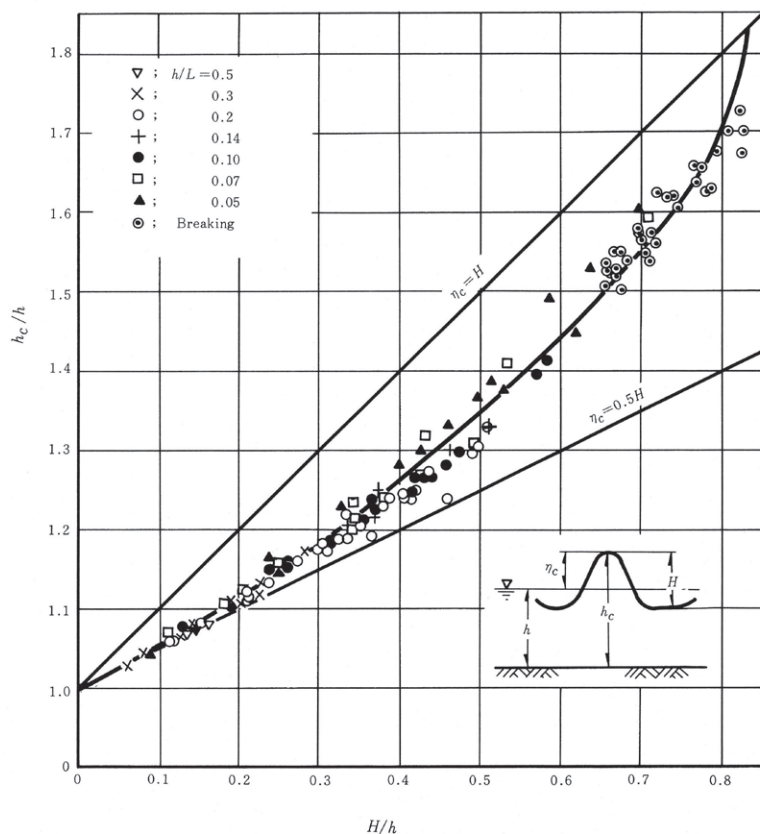


図-4.2.2 水底からの相対波頂高²¹⁾

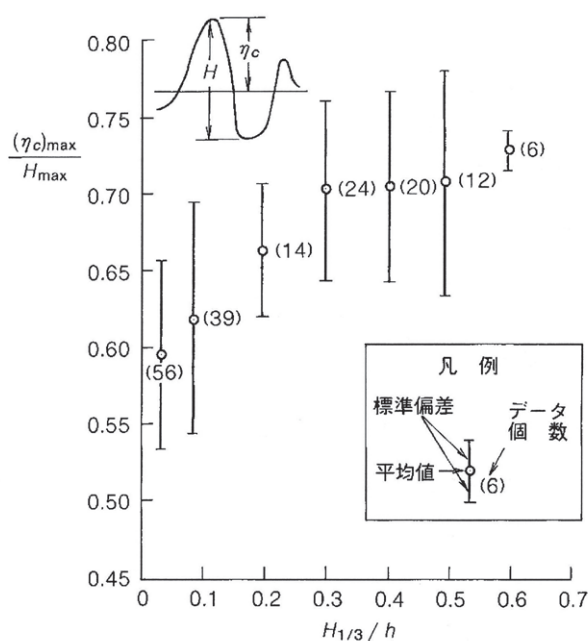


図-4.2.3 最高波頂高 $(\eta_c)_{\max}$ と $H_{1/3}/h$ の関係²²⁾