

実測値に基づく高波の継続時間の確率的出現特性

鵜飼亮行*・清水琢三*・山口正隆**

1. 緒 言

常時波浪の平均継続時間については、従来より港湾工事等の稼働率の推定を目的とした多くの検討が行われている（例えば、広瀬・高橋，1982）。しかしながら、設計波レベルの高波の継続時間については、構造物の設計に際して考慮すべき重要なパラメタと考えられてきたものの、精度の高い波浪観測データの蓄積が十分でないこともあってこれまであまり検討されていない。

近年、傾斜堤等の被覆工の変形に及ぼす高波の継続時間の重要性が指摘されており、高波の継続時間の出現確率についても研究が行われるようになってきた（例えば、Smith, 1988；Teisson, 1990）。このうち Teisson(1990)は、フランス海岸における5年間の波浪観測データを基に、ある基準波高以上の高波の継続時間をワイブル分布で表し、その係数や指数が基準波高の関数として表されることを示し、波高と継続時間の結合確率を考慮して高波の再現確率を評価している。しかしながら、実際の設計に際しては、ある再現確率を持ったピーク波高が来襲した場合にどのような波高時系列が期待されるかを知る必要があるが、現在のところ明らかにされていない。

そこで本研究では、波高の継続時間の確率分布と波高の極値分布の結合確率分布から高波の継続時間の再現期間を求める方法を用いて、太平洋および日本海沿岸の2地点での高波の継続時間特性を調べた。さらに、特定の確率波高をピークに持つ時化の継続時間を調べることで、一時化における各波高レベルの継続時間の出現パターンについて検討した。

2. 高波の継続時間の出現特性

(1) 波浪観測資料

本研究では波浪観測資料として、気象庁が全国11地点（水深約50m）で行っている超音波波高計による波浪観測のうち、太平洋側の代表地点として石廊崎、日本海側の代表地点として経ヶ岬の有義波高値を用いた。この2地点は最も長い観測期間を持つもので1976年から1992

年の17年間である。また、1976年から1987年までは3時間ごと、1988年以降は1時間ごとの観測となっている。ここでは、観測間隔を全期間で統一するために、3時間ごとの観測値は線形補間により1時間ごとの記録とした。表-1に観測期間およびデータの取得率を示す。データの取得率は非常に高く、両地点とも90%以上である。

なお、データ取得率が高いものの、継続時間の算出においては、欠測の取扱いが高波の継続時間を検討する上で重要である。ここでは、高波浪時の継続時間をできるだけ見落とさないよう、12時間以下の連続欠測期間はそれを線形補間し、12時間より長い連続欠測期間についてはそのまま欠測とした。表-1中には線形補間後のデータ取得率についても示してあるが、石廊崎では94.3%で16.0年の有効統計年数となり、経ヶ岬では96.2%で16.4年であった。

(2) 継続時間の出現分布

前述の処理を行った石廊崎および経ヶ岬の17年間の有義波高値を用いて波高の継続時間を算出した。継続時間は、波高がある基準波高を連続して越える時間である。ここでは観測間隔である1時間を単位時間とし、基準波高は1.5mから5.0mまでを0.5m間隔で8段階に設定した。

表-2は、各基準波高 H_c での波高の継続時間の平均値、および出現数を季別に示したものである。通年でみれば、 H_c が4m以上では石廊崎と経ヶ岬のどちらの値も大きく変わらないが、4mより小さい場合には経ヶ岬の方が長くなっている。石廊崎では、夏から秋にかけて高波浪が継続する時間が長くなる傾向がみられる。経ヶ岬では秋から冬にかけて高波の発生が顕著になり、石廊崎ほどではないが継続時間も長くなる傾向がみられる。

表-1 観測期間およびデータ取得率

地点	石廊崎	経ヶ岬
観測期間	1976年～1992年	1976年～1992年
取得率	92.6%	94.6%
補間後の取得率	94.3%	96.2%
有効統計年数	16.0年	16.4年

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

また、出現数は高波浪において経ヶ岬の方が多いことがわかる。なお、広瀬・高橋(1982)は、継続時間の分布の季別変化は大きいため注意が必要であるとしているが、ここでは季別変化が重要となる稼働率等の検討を行うのではなく、再現期間が数年から数十年の確率の継続時間を求めることを目的としているので、季別変化は考慮しない。

次に、基準波高別に継続時間の出現分布にワイブル分布のあてはめを行った。ワイブル分布関数は次式で表される。

$$F(T)=1-\exp\left[-\left(\frac{T-B}{A}\right)^k\right] \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 T は波高の継続時間、 $F(T)$ は波高の継続時間の分布関数、 k 、 A および B はワイブル分布の係数である。なお、波高の極値分布と継続時間の出現分布の結合分布より継続時間の再現期間を評価する都合上、継続時間の最小値が0となるように、 $B=0$ とした。また、継続時間

表-2 波高の継続時間の平均値 (hrs)

地点	基準波高	春	夏	秋	冬	通年
石廊崎	1.5 m	12.5(517)	14.0(476)	13.7(648)	15.9(758)	14.2(2399)
	2.0 m	8.3(314)	11.7(251)	9.2(450)	9.9(589)	9.7(1604)
	2.5 m	6.7(142)	10.7(140)	6.5(253)	6.7(334)	7.3(869)
	3.0 m	5.2(70)	9.3(81)	4.8(125)	5.9(128)	6.1(404)
	3.5 m	4.8(27)	8.1(53)	6.1(36)	4.8(54)	6.1(107)
	4.0 m	4.2(9)	10.5(26)	6.6(16)	3.3(26)	6.5(77)
	4.5 m	2.6(5)	6.3(26)	8.3(8)	2.7(11)	5.5(50)
経ヶ岬	5.0 m	2.5(2)	6.1(18)	8.0(6)	1.5(2)	5.9(28)
	1.5 m	12.1(243)	12.2(202)	26.2(557)	29.9(550)	23.5(1552)
	2.0 m	10.3(121)	8.4(110)	18.7(504)	21.7(507)	18.2(1242)
	2.5 m	7.4(65)	7.0(51)	14.8(391)	14.4(479)	13.7(986)
	3.0 m	5.5(31)	6.7(22)	10.7(312)	10.5(368)	10.3(733)
	3.5 m	6.6(10)	8.4(10)	7.9(225)	8.3(221)	8.1(466)
	4.0 m	13.7(3)	6.6(7)	6.4(142)	6.6(124)	6.5(276)
	4.5 m	10.0(3)	3.8(4)	5.2(79)	4.6(64)	5.0(150)
	5.0 m	18.0(1)	3.5(2)	3.8(47)	4.1(24)	4.1(74)

ただし、() は出現数

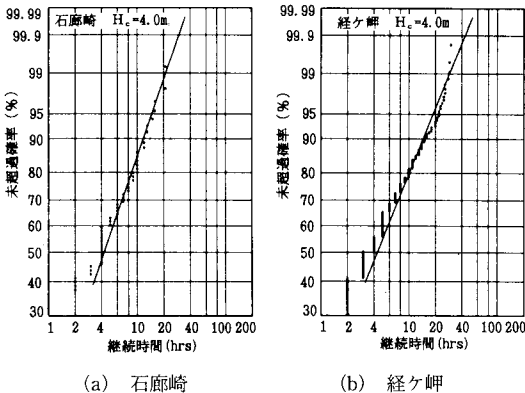


図-1 継続時間のワイブル分布へのあてはめ

データの未超過確率の割当は、次式に示す合田(1988)の提案したワイブル分布に対するプロテイング・ポジション公式(修正P & A公式)によって行った。

$$F_m=1-\frac{m-\alpha'}{N_T+\beta} \quad : \quad m=1, 2, \cdots, N \cdots \cdots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= 0.20 + 0.27/\sqrt{k} \\ \beta &= 0.20 + 0.23/\sqrt{k} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで、 N_T は対象期間中に起こる事象の総数、 N は標本の大きさであるが、今回の解析では基本的には対象期間中に発生した全継続時間を用いているので N_T と N は等しいとした。以上のもとで、係数 k の値を0.1から2.0の範囲で0.02ごとに変化させ、最小2乗法により A の値を求め、そのうちで相関係数が最大となる k と A を採用した。

図-1はワイブル分布を観測値にあてはめた結果であり、石廊崎および経ヶ岬について基準波高が4.0 mのものを示している。図中には継続時間の未超過確率の推定値を実線で、観測値を黒丸で示してある。石廊崎および経ヶ岬ともに継続時間の比較的短い部分でずれがみられるものの、全体的にみれば継続時間の出現分布はワイブル分布により良く近似できた。

(3) 基準波高に対するワイブル分布係数の変化

基準波高 H_c ごとに継続時間の出現分布をワイブル分布にあてはめ、係数 k および A を求めた。これらの k 、 A を H_c の関数として表わし、任意の基準波高に対する継続時間の出現分布を得ることを試みる。

ワイブル分布の係数 k および A をTeisson(1990)と同様に次式で近似する。

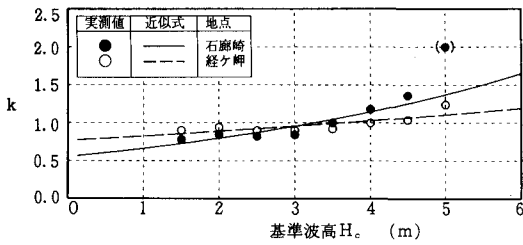
$$k(H_c)=\exp[(H_c-p)/q] \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$A(H_c)=a \cdot H_c^b \cdots \cdots \cdots (5)$$

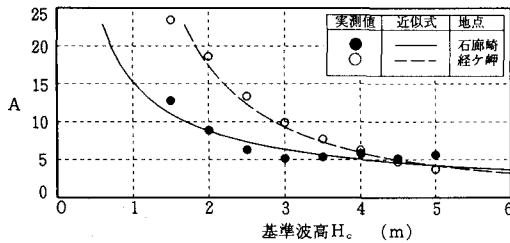
ここで、 p および q は式(4)の係数、 a および b は式(5)の係数であり、最小2乗法により石廊崎では $p=5.50$ 、 $q=3.25$ 、 $a=15.2$ および $b=-0.794$ 、経ヶ岬では $p=13.6$ 、 $q=3.60$ 、 $a=50.8$ および $b=-1.55$ となった。

図-2は、観測値から求められた基準波高に対する係数と近似式(4)および(5)を比較したものである。近似式の値は、対象データ数が少なく信頼性が劣ると考えて無視した石廊崎の $H_c=5$ mの k の観測値を除けば、観測値とほぼ対応しており、この近似式を用いればワイブル分布の係数 k および A を基準波高 H_c の関数として表せ、任意の基準波高に対する出現分布 $F(T, H_c)$ を推定することができる。

なお、石廊崎および経ヶ岬ともに k の値は H_c とともに増大しており、これは波高が大きくなると長い継続時間が発生しにくくなる様子を示している。また、経ヶ岬の k の値は石廊崎のものに比べその増加は小さく、波高が大きくなっても石廊崎より長い継続時間が発生するこ



(a) 係数 k



(b) 係数 A

図-2 基準波高に対するワイブル分布係数の変化

とを示している。

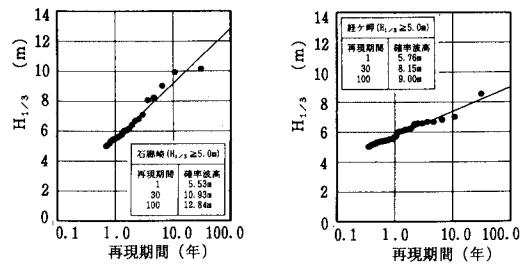
3. 波高の極値統計

継続時間の出現分布が推定されたので、次に波高の極値分布を推定する。波高の継続時間の再現期間を1年確率から100年確率程度まで検討するには波高が比較的低い常時波浪から数十年に1回起こるような極大波までの広い範囲の波高を表現できる波高の極値分布関数が必要である。

通常、波高の極値分布を求める場合は、対象期間の年最大有義波高または波高の大きいものから上位数十個の極値データを基に極値解析を行う。図-3は、石廊崎および経ヶ岬の5.0 m以上の極値データを合田(1988)の方法によって極値解析したものであるが、この結果から得られる極値分布の最小値は5.0 m弱で比較的大きいため(1年確率波程度)、常時波浪程度の波高の再現期間を設定するのに適用できない。

図-4は、同様に両地点について1.5 m以上のピーク値について極値解析したもので、この常時波浪程度のピークまで含めた極値データを用いた結果は、分布の最小値が1.5 m程度であり、常時波浪程度の波高を表すことができるが、波高が大きな部分で実測値とあてはめた分布関数との適合が悪くなっている。

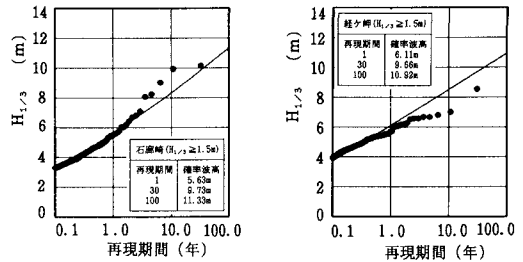
したがって、同一の極値分布により常時波浪程度の波高から数十年確率波のような極大波を表すことは難しいことがわかり、ここでは常時波浪に対しては1.5 m以上のピークを持つ極値から得られた分布を、異常波浪に対しては5.0 m以上のピークを持つ極値から得られた分布を用いることにした。なお、石廊崎では6.0 m、経ヶ岬



(a) 石廊崎

(b) 経ヶ岬

図-3 波高の極値分布 ($H_{1/3} \geq 5.0$ m)



(a) 石廊崎

(b) 経ヶ岬

図-4 波高の極値分布 ($H_{1/3} \geq 1.5$ m)

では5.0 mで2つの極値分布を使い分けた。

4. 高波の継続時間の確率的取扱い

(1) 継続時間の確率的取扱い

高波の継続時間の再現期間 R は、先に求めた継続時間の出現分布 F および波高の極値分布 P を用いて以下のように表される。

$$1/R = \lambda \{1 - P(H_c)\} \{1 - F(T, H_c)\} \dots \dots \dots (6)$$

$$\lambda = N_T / K \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 λ は波高の極値の平均発生率であり、 K は対象期間、 N_T は事象の発生個数である。

図-5は、上式を用いて再現期間別に基準波高 H_c と高波の継続時間 T の関係を推定したもので、石廊崎および経ヶ岬について示している。再現期間は0.1年、1年、5年、10年、30年および100年とした。なお、継続時間が0のときの基準波高が、その再現期間での確率波高となる。この結果より、例えば、基準波高5 mの高波浪の継続時間は、石廊崎で再現期間1年、10年、100年に対してそれぞれ3時間、10時間および15時間となり、経ヶ岬では、5時間、13時間および20時間と推定される。また、日本海側の経ヶ岬の方が太平洋側の石廊崎に比べ、各基準波高に対する継続時間が長い傾向にあることがわかった。これは、太平洋側の高波が主に台風に起因するのに対し、日本海側では季節風あるいは低気圧に起因しており、低気圧等の移動速度が台風に比べ遅いことが原因と考えられる。

次に、推定された継続時間の標準偏差について調べた。図-6は、観測値の標準偏差および標本数をAと同様に基準波高の関数として近似式を求め、合田(1988)の方法を用いて継続時間の推定値の標準偏差を計算したもので、石廊崎の1年確率、10年確率および経ヶ岬の10年確率について1点鎖線で示している。石廊崎では、標本数が少ない10年確率の方が標準偏差が大きくなっている。1年確率の標準偏差は数時間程度であるが、10年確率になると標準偏差をとった範囲が5年確率から30年確率の推定値程度の幅を持っている。また、経ヶ岬については1年確率の図は示していないが、標本数が石廊崎に比べ多かったためか、1年および10年確率ともに標準偏差はあまり大きくなく、石廊崎の1年確率程度となっている。

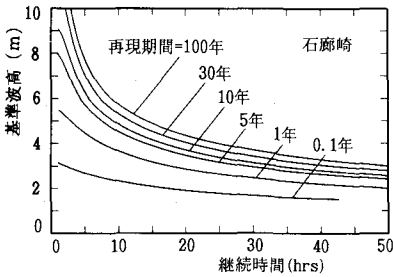
た。

(2) 一時化の継続時間の出現パターン

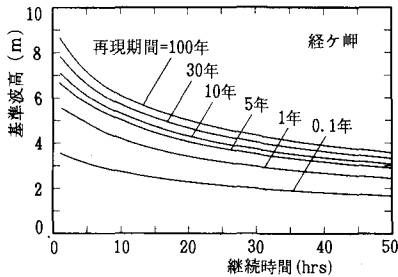
高波の継続時間を考慮して傾斜堤等の変形を検討する場合、ある確率波高をピークに持つ時化のモデルを仮定することになるが、ピーク波高以下の各波高レベルの継続時間をどのように設定するかが問題となる。そこで、実測値を基に、時化における各波高レベルの継続時間の出現パターンについて調べた。

まず、比較的高波浪でかつデータ数が多い1年確率波程度をピークにもつ時化について、各基準波高での継続時間をプロットすることにより、一時化における波高の継続時間の出現パターンを調べた。図-7は、石廊崎についてピーク波高が1年確率波程度である時化の継続時間を基準波高と継続時間の関係で示したものである。なお、図中の点線は先に求めた各再現確率に対する推定値である。ばらつきが大きいものの、図-8(a)に示すように継続時間の平均値は、先に求めた1年確率の推定値の曲線と良く対応しており、平均的にみれば一時化での各波高レベルでの継続時間の再現期間は時化のピーク波高の再現期間にほぼ一致することがわかる。図-8(b)に経ヶ岬の結果を示すが、推定値に比べ平均値が全体的に大きい。5年確率の推定値を上回ることなく、石廊崎の場合とほぼ同様の傾向がみられる。

観測期間中の上位6ケースの異常波浪についても、石廊崎および経ヶ岬それぞれについてプロットを行い図-9に示した。石廊崎については、ピーク波高6.8mのときの継続時間が非常に長いことを除けば、各再現期間の継続時間の推定曲線に沿っており、図-6で示した推定値の標準偏差を考えれば、1年確率をピークに持つ場合と同様、各波高レベルでの継続時間の再現期間は時化のピーク波高のものとはほぼ同等であると考えられる。また、経ヶ岬の場合は推定値から大きく外れているものではなく、同様の傾向を持つといえる。このように、異常波浪時でもピーク波高の再現期間と各波高レベルの継続時間の再現期間がほぼ等しくなる傾向がみられた。

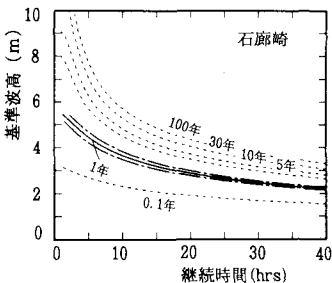


(a) 石廊崎

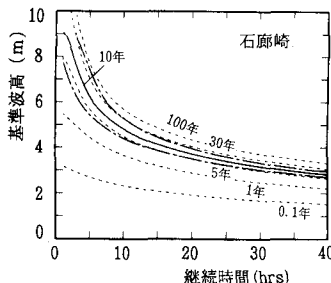


(b) 経ヶ岬

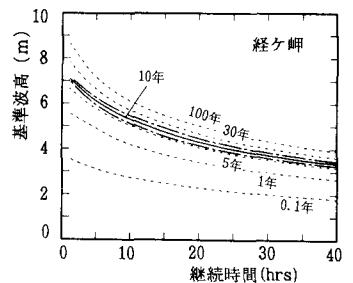
図-5 基準波高と継続時間の関係



(a) 石廊崎 (1年確率)



(b) 石廊崎 (10年確率)



(c) 経ヶ岬 (10年確率)

図-6 継続時間の推定値の標準偏差

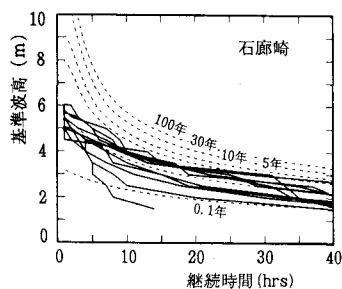
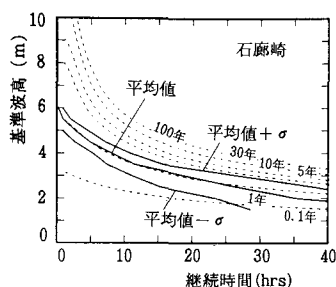
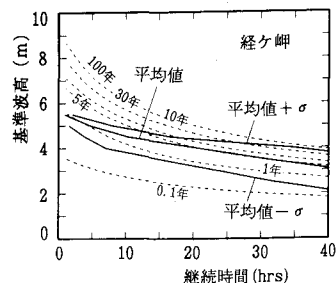


図-7 1年確率程度のピークを持つ時化の継続時間の出現パターン

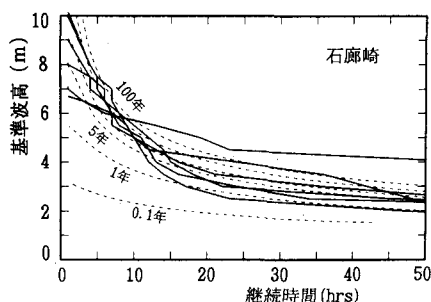


(a) 石廊崎

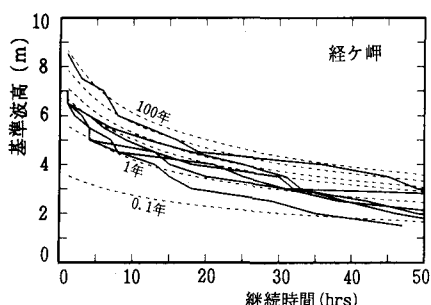


(b) 経ヶ岬

図-8 1年確率程度のピークを持つ時化の平均的な継続時間の出現パターン



(a) 石廊崎



(b) 経ヶ岬

図-9 異常波浪時の継続時間の出現パターン

石廊崎で推定値から大きく外れているケースは台風の移動が遅かったと思われるもので、ピーク波高の再現期間は小さいものの、それを若干下回る波高レベルで100年以上の再現期間をもつ継続時間が発生している。また、時化の中での各波高段階の継続時間の再現期間は、平均的にみればピーク波高の再現期間と同程度であるが、ばらつきが大きく、石廊崎のように高波浪発生時の気象条件によって推定値から大きく外れるものも存在する。したがって、ある再現期間のピーク波高を持つ高波浪の時系列をモデル化するにあたっては、気象擾乱の特性（台風であれば、中心気圧、半径、移動速度など）も考慮し

た検討が必要である。

5. 結 語

太平洋側の観測地点（石廊崎）と日本海側の観測地点（経ヶ岬）の波高の実測値より波高の継続時間を算出し、この継続時間データにワイブル分布のあてはめを行い、継続時間の出現分布を推定した。さらに、波高の極値統計と継続時間の出現分布の結合分布より高波の継続時間の再現期間を計算し、再現期間別に基準波高と継続時間の関係を調べた。この結果、ある再現期間の任意の基準波高に対する継続時間を推定することが可能となった。

さらに、時化における各波高レベルでの継続時間の出現パターンを実測値を基に調べたところ、平均的にみれば各波高レベルの継続時間の再現期間はピーク波高の再現期間と概ね一致することがわかった。

したがって、本研究の成果により、設計波高レベルの時化の波高時系列を概略推定することが可能と判断される。しかしながら、時化のモデル化をより適切に行うためには、波浪データの蓄積が十分でないこともあり、波浪推算結果などによって稀にしか生じないような異常波浪の継続時間に関するデータを蓄積し、推定精度を高める必要がある。

参 考 文 献

- 広瀬宗一・高橋智晴 (1982): 観測結果に基づく沿岸波浪の出現特性, 昭和57年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 1-55.
- 合田良実 (1988): 極値統計におけるプロット公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第1号, pp. 31-92.
- Smith, O. P. (1988): Duration of extreme wave conditions, J. of Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg., Vol. 114, No. 1, pp. 1-17.
- Teisson, C. (1990): Statistical approach of duration of extreme storms: consequences on breakwater damages, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1851-1860.