

# 現地観測結果を用いた波浪変形計算および 波力の推定精度に関する研究

竹中秀夫\* ・西田 穰\*\*・榊原 弘\*\*\*  
殿最浩司\*\*\*\*・佐藤 広章\*\*\*\*

## 1. はじめに

港湾構造物の分野においても、安全度を被災確率等で表す信頼性設計法が注目されており、1999年4月に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(日本港湾協会, 1999)でも、防波堤の設計を信頼性設計法によって行ってもよい旨の記述が盛り込まれている。高山ら(1991a, 1994)は、この信頼性設計法を適用して防波堤の滑动確率の計算法を提案するとともに、初期建設コストに被災時の復旧費用を加算したトータルコストを最小にする設計手法について検討を行っている。また、最近では下迫ら(1998)は、ケーソンの滑动モデルとモンテカルロ法を用いた期待滑动量の計算法を提案している。

これらの計算法は、沖波、波浪変形計算および波力公式の算定誤差や摩擦係数のばらつき等を考慮するものであり、平均値の偏りと変動係数を用いた正規分布で表すことが多い。しかしながら、これらの計算法の提案では、この平均値の偏りや変動係数を変化させたケーススタディは実施されているが、今後設計に用いる具体的な数値が示されていない。一方、高山ら(1991b)は、波浪変形計算や波力公式の算定誤差についての検討を行っているが、そのほとんどが実験結果を用いたものであり、理想的な条件下で行われる実験結果と様々な要因が加わる現地とは、その特性が異なってくるものと考えられる。したがって、本研究は、信頼性設計の精度向上を目的として、波浪変形計算、最高波高および波力の推定精度を長期間にわたる現地観測結果を用いて検討したものである。

## 2. 波浪変形計算の推定精度の検討

### (1) 検討に用いる波浪観測データ

波浪変形計算の推定精度の検討に用いる波浪観測データは、海象状況が異なる図-1に示す紀伊水道内の御坊地点(御坊沖と御坊発電所沖)と、図-2に示す若狭湾内の舞鶴地点(経ヶ岬と舞鶴発電所沖)で観測されているものを用いた。表-1に、これらの波浪観測所の仕様と検

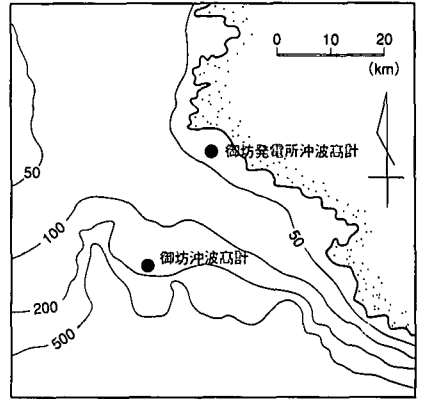


図-1 波浪観測位置(御坊地点)

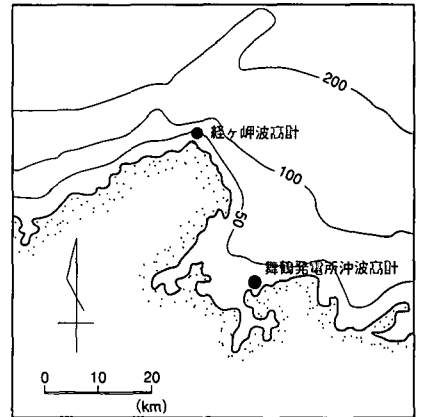


図-2 波浪観測位置(舞鶴地点)

\* 正会員 工修 関西電力(株)土木建築室土木課副長  
\*\* 正会員 関西電力(株)土木建築室土木課  
\*\*\* 正会員 (株)ニュージエック河川海岸部海岸室次長  
\*\*\*\* 正会員 工修 (株)ニュージエック河川海岸部海岸室

討対象とした期間を示す。なお、対象期間は2地点間の波浪観測結果が揃っている期間とした。

### (2) 検討方法および検討手順

波浪変形計算手法としては、このような設計検討によく用いられるエネルギー平衡方程式(高山ら, 1991c)を用いるものとし、御坊地点では御坊沖で、舞鶴地点では経ヶ岬で観測された有義波高  $H_{1/3}$  および有義波周期  $T_{1/3}$  を沖波条件として波浪変形計算を実施した。また、その計算領域は、両地点とも2地点間の波高計地点を含む大

表-1 検討に用いた波浪観測所の仕様

地点	波高計	観測機器	管理者	水深 (m)	観測項目	計測時間 ピッチ	対象期間	
御坊	沖波	御坊沖波高計	ブイ式波高計	運輸省三建	170	波高・周期	2時間	1995年3月～
	対象地点	御坊発電所沖波高計	海象計	関西電力(株)	36	波高・周期・波向	1時間	1997年6月
舞鶴	沖波	経ヶ岬波高計	超音波式波高計	気象庁	48	波高・周期	1時間	1992年1月～
	対象地点	舞鶴発電所沖波高計	海象計	関西電力(株)	34	波高・周期・波向	1時間	1998年6月

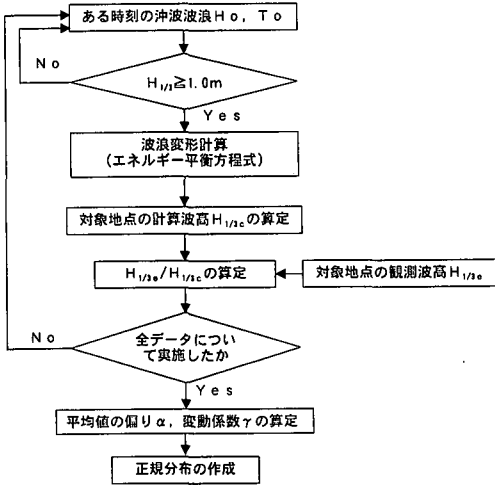


図-3 波浪変形計算の推定精度の検討手順

領域 ( $\Delta x=200$  m) と対象地点周辺を細かくした小領域 ( $\Delta x=25$  m) に分けて行った。なお、両地点とも沖波の観測点では波向の観測結果がないため、対象地点の発電所沖で観測された波向と波浪変形計算結果との比較により沖波の波向を 16 方位で推定した。

次に、この計算結果  $H_{1/10c}$  と各発電所沖での観測波高  $H_{1/10e}$  を比較することによってその推定精度を検討する。なお、これは沖波地点の  $H_{1/10}$  が 1.0 m 以上となる波浪に着目して検討した。図-3 にこの検討のフローを示す。

(3) 検討結果

図-4(御坊地点)および図-5(舞鶴地点)は、 $H_{1/10e}/H_{1/10c}$  の出現確率密度分布を示したものである。また、これらの図中の曲線は、式(1)で表される正規分布を示している。

$$p(X_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(X_m - \bar{X}_m)^2}{2\sigma^2}\right\} \dots\dots(1)$$

$$X_m = H_{1/10e}/H_{1/10c} \dots\dots(2)$$

ここで、 $\sigma$  は標準偏差であり、本研究の場合  $X_m = H_{1/10e}/H_{1/10c}$  として観測値と計算値の比で表すため、標準偏差  $\sigma$  は変動係数  $\gamma$  と一致する。また、 $\bar{X}_m$  は  $X_m$  の全データについての平均値であり、平均値の偏り  $\alpha$  を用いて表すと次式のようになる。

$$\bar{X}_m = 1 + \alpha \dots\dots(3)$$

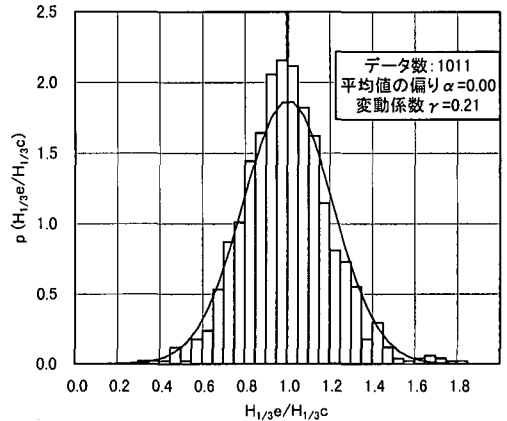


図-4 波浪変形計算の推定精度 (御坊地点)

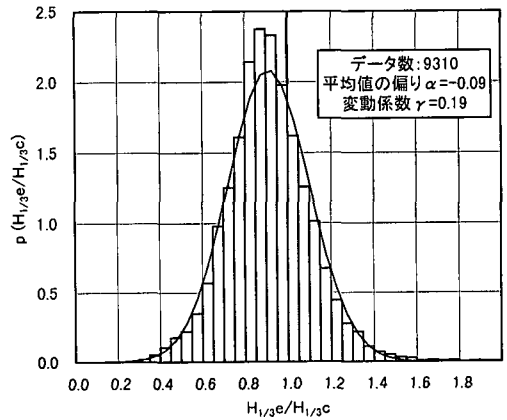


図-5 波浪変形計算の推定精度 (舞鶴地点)

これらの結果から、波浪変形計算の算定誤差の分布は地点に関係なく、正規分布によく一致する。表-2は、ここで算定した平均値の偏り  $\alpha$  と変動係数  $\gamma$  を高山ら(1991b)の結果と比較して示したものである。この結果から波浪変形計算の変動係数  $\gamma$  は、御坊地点のほうが舞鶴地点より若干大きくなるが、地点による差はほとんどないとわかる。しかしながら、高山らの結果に比べると変動係数  $\gamma$  はかなり大きくなる。すなわち、様々な要因が加わる現地の方がデータの間ばらつきが大きくなるといえる。

表-2 波浪変形計算の平均値の偏りと変動係数

	平均値の偏り $\alpha$	変動係数 $\gamma$
御坊地点 (本研究)	0.00	0.21
舞鶴地点 (本研究)	-0.09	0.19
高山らの検討結果	-0.03	0.04

一方、平均値の偏り  $\alpha$  は地点による差が現れ、御坊地点では  $\alpha=0$  であり、観測値の平均値は計算値と一致すのに対し、舞鶴地点では  $\alpha=-0.09$  であり、観測値の平均値は計算値よりも小さくなる。このように地点によって平均値の偏りが変化する原因としては、御坊地点では地形の変化があまり複雑でないのに対し、舞鶴地点では岬の遮蔽等が現れた複雑な地形であること等が考えられる。したがって、波浪変形計算の平均値の偏りは、一義的に決定するのは困難であり、地点ごとにこのような検討を行う必要があると考えられる。

3. 最高波高の推定精度の検討

(1) 検討方法および検討手順

最高波高  $H_{max}$  の推定精度については、表-1 に示す各発電所沖の波浪観測結果を用いる。まず、観測された  $H_{1/3}$  を浅水係数  $k_s$  で除すことによって換算沖波波高  $H_0'$  を求め、それから合田の砕波帯内の波高変化図 (1975) を用いて  $H_{maxc}$  を算定し、それと 20 分間の観測波形から算出した実測の  $H_{maxe}$  を比較することによってその推定精度を検討した。また、ここでも観測された  $H_{1/3}$  が 1.0 m

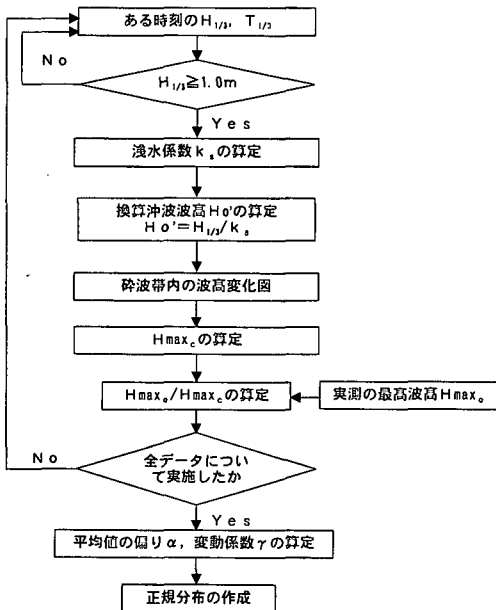


図-6 最高波高の推定精度の検討手順

以上の波浪に着目して検討した。図-6 にこの検討のフローを示す。

(2) 検討結果

図-7 (御坊地点) および図-8 (舞鶴地点) は、 $H_{maxe} / H_{maxc}$  の出現確率密度分布を示したものである。なお、これらの図中の曲線は (2) 式を

$$X_m = H_{maxe} / H_{maxc} \dots\dots\dots (4)$$

と書き改めて、式 (1) で表される正規分布を示している。

これらの結果から、最高波高の算定誤差についても、正規分布と比較的よく一致することがわかる。表-3 は、ここで算定した平均値の偏り  $\alpha$  と変動係数  $\gamma$  を高山ら (1991b) の結果と比較して示したものである。最高波高については平均値の偏り  $\alpha$  および変動係数  $\gamma$  も地点による差はほとんど現れないことがわかる。また、高山らの検討結果と比較しても比較的よく一致している。前述した波浪変形計算の変動係数と平均値の偏りは、地点

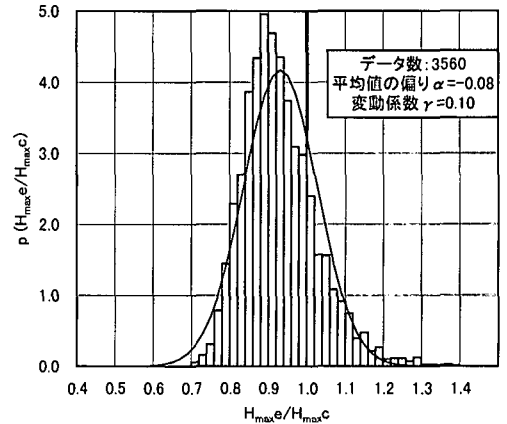


図-7 最高波高の推定精度 (御坊地点)

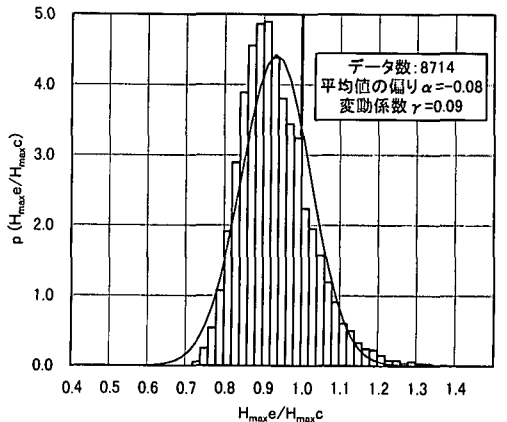


図-8 最高波高の推定精度 (舞鶴地点)

表-3 最高波高の平均値の偏りと変動係数

	平均値の偏り $\alpha$	変動係数 $\gamma$
御坊地点 (本研究)	-0.08	0.10
舞鶴地点 (本研究)	-0.08	0.09
高山らの検討結果	-0.13	0.09

による差や高山らの検討結果との差が現れるのに対し、最高波高では、あまりそれらの差が現れない。これは、最高波高は周辺地形に関係なく、その地点の水位の変化のみによって決定されるのに対し、波浪変形計算は沖波から対象地点への地形の影響が現れるためと考えられる。

ただし、この観測結果は水深 30 m 以上のものであり、その地点で碎波するような波は含まれていない。碎波の影響が現れるような場所では、これらの結果と異なることが予想され、今後は碎波の影響を含んだ結果を用いた検討が必要であると考えられる。

#### 4. 波力の推定精度の検討

##### (1) 用いる波力測定データ

波圧の推定精度の検討には、舞鶴地点の放水口建設用の仮設円筒ケーソンに設置した波圧計の測定データを用いた。この円筒ケーソンは図-9 に示すように、上部が  $\phi 10\text{m}$ 、下部が  $\phi 15\text{m}$  であり、その側面に合計 10 個の波圧計を設置した。波圧計のサンプリング周波数は 100 Hz であり、舞鶴発電所沖波高計の  $H_{1/10}$  が 2.0 m 以上となると波圧データを記録する仕組みになっている。ここでは、P-1~P-6 の波圧データを同時刻で積分した水平波力の時系列変化を作成し、その最大値を推定精度に用いる波力データとした。図-10 は、P-1~P-6 の波圧データと、それを積分した水平波力の時系列変化の一例である。なお、対象とした期間は、1998 年 9 月 (波圧観測開始)~1999 年 3 月である。

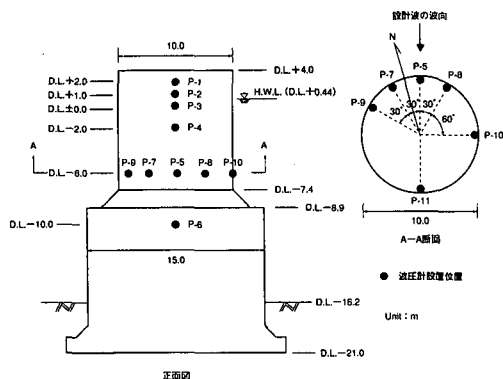


図-9 波圧計を設置した円筒ケーソン

##### (2) 検討方法および検討手順

水平波力の計算は、舞鶴発電所沖波高計で観測された最高波高  $H_{\max}$ 、 $T_{\max}$  を用いて行った。また、本構造物は円筒ケーソンであるため、水平波力の計算は図-11 に示す谷本ら (1988) が提案した二重円筒ケーソンの不透過壁の波力算定法に準じた。こうして計算された水平波力  $F_c$  と (1) で示した観測波力  $F_o$  を比較することによ

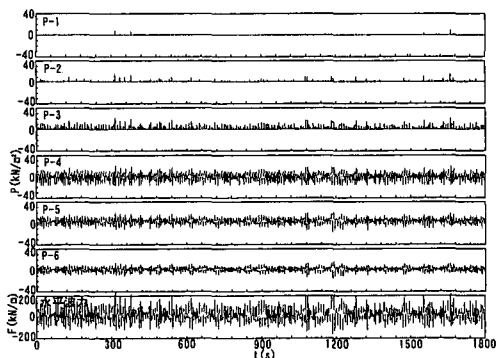


図-10 波圧観測結果 (時系列変化) の一例 (1999 年 3 月 20 日 3:00)

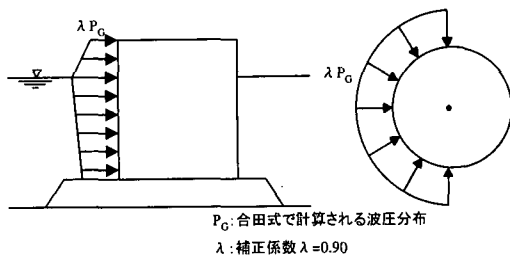


図-11 円筒ケーソンの波力算定法 (谷本らによる)

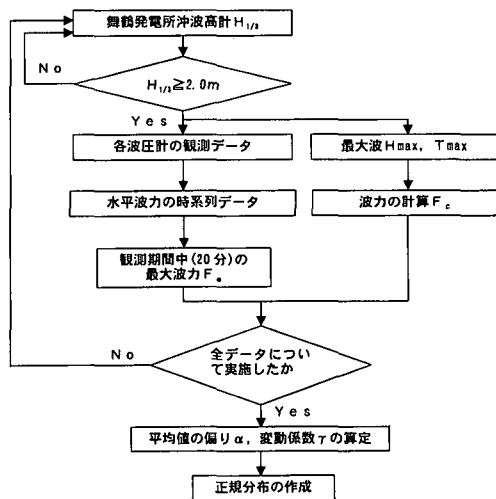


図-12 波力の推定精度の検討手順

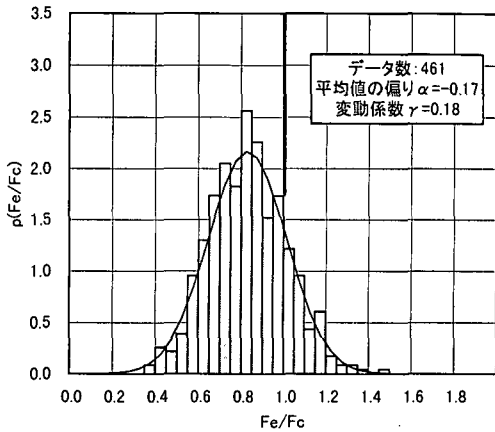


図-13 波力の推定精度

表-4 波力の平均値の偏りと変動係数

	平均値の偏り $\alpha$	変動係数 $\gamma$
舞鶴地点 (本研究)	-0.17	0.18
高山らの検討結果 (混成堤)	-0.09	0.17

て、波力の推定精度を検討した。図-12にこの検討のフローを示す。

(3) 検討結果

図-13は、 $F_e/F_c$ の出現確率密度分布を示したものである。また、この図中の曲線は(2)式を

$$X_m = F_e/F_c \dots \dots \dots (5)$$

と書き改めて、式(1)で表される正規分布を示している。

これらの結果から、波力の算定誤差についても、正規分布に比較的良好一致することがわかる。表-4は、ここで算定した平均値の偏り $\alpha$ と変動係数 $\gamma$ を高山ら(1991b)の結果と比較して示したものである。ここに示した高山らの結果は、混成堤に作用する波力について、合田波力公式の推定精度を検討したものであり、本構造物は円筒ケーソンであるため、直接的な比較をするのは問題があると考えられるが、変動係数 $\gamma$ は高山らの検討結果と比較的良好一致する。ただし、平均値の偏り $\alpha$ は高山らの結果に比べると大きくなる。

なお、この検討に用いた波圧観測データ対象期間は、前述したように1998年9月~1999年3月であり、この間の $H_{1/3}$ の最大は約3.7mであるため、砕波力が作用するような高波浪のデータが含まれないことに留意する必要がある。

5. おわりに

以上、本研究では、これまでほとんど報告されたことがなかった現地観測結果を用いた波浪変形計算、最高波

高および波力の推定精度を検討し、実験結果を用いて検討した高山らの結果との比較も実施することができた。その結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 現地観測結果を用いて検討した波浪変形計算、最高波高および波力の算定誤差は正規分布によく一致する。
- (2) 波浪変形計算の変動係数は、地点による差はほとんどないが、実験結果を基にした高山らの結果に比べると現地の方がかなり大きくなる。また、平均値の偏りは地点によって若干差が現れる。このことから、平均値の偏りは、現地の特性を考慮した地点ごとの検討が必要であると考えられる。
- (3) 最高波高 $H_{max}$ については、平均値の偏りおよび変動係数とも地点の差はあまり現れない。また、高山らの検討結果とも比較的良好一致する。
- (4) 波力については、変動係数 $\gamma$ は高山らの検討結果と比較的良好一致するが、平均値の偏りは若干大きくなる。

しかしながら、本研究では、波浪変形計算および最高波高の推定精度の検討に用いた観測結果は、水深が30m以上のものであり砕波の影響は含まれていない。また、波力の推定精度の検討に用いた観測結果も砕波力を含むような結果を用いたものでない。したがって、今後はこれらの影響を加味した検討を行う必要があると考えられる。これらについては、今後もできる限り現地観測を実施し、継続的に検討していきたい。

さらに、今後はここで検討した推定精度を用いて信頼性設計法による構造物の試設計等を実施し、推定精度の異なる地点での構造物の断面特性等について検討していきたい。

参考文献

合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.  
 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港研報告, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.  
 高山知司・藤井 久 (1991a): 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討, 港研報告, 第30巻, 第4号, pp. 35-64.  
 高山知司・池田直太 (1991b): 現行設計法における防波堤の滑動安定性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 641-645.  
 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991c): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 第30巻, 第1号, pp. 21-67.  
 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀司 (1994): 防波堤の信頼性設計に向けて, 港研資料, No. 785, pp. 1-37.  
 谷本勝利・下迫健一郎 (1988): 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その5)―二重円筒ケーソン(マウンド設置型)の水理特性と設計波力―, 港研資料, No. 637, pp. 1-16.  
 日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 600-602.