

周期分布関数を用いた限界状態設計波の算定方法

大 田 勲* ・ 神 藤 明 彦** ・ 櫻井日出伸***
山 谷 弘 幸**** ・ 大 下 英 治***** ・ 滑 川 伸 孝*****

従来の限界状態設計波の算定において、周期は有義波周期の 1/1.2 倍の平均周期を仮定している。しかし下田港と御前崎港の生波浪データの個別解析より、設計において有意な波高 2 m 以上の大きい波の周期が有義波周期相当であることを確認し、波高 2 m 以上と 2 m 未満の波高階級に分けて、周期分布関数を検討した。周期分布関数として Longuet-Higgins の理論式を用い、パラメーター等は観測波浪の出現頻度分布にあうように設定した。波高の出現頻度分布はレーリー分布を仮定して、下田港の使用限界と疲労限界の限界状態設計波を算出し、個別波の実測データによる算出結果とおおむね一致することから、同手法の妥当性を確認した。

1. はじめに

港湾構造物の部材設計が許容応力度法から限界状態設計法に移行し、耐用期間に発生する全ての波を整理することが限界状態設計波の算定に必要なになった（（社）日本港湾協会, 1999）。本研究は国土交通省中部地方整備局管内の観測波浪データを解析し、現地の波高と周期の出現特性を再現できる合理的な疲労限界状態と使用限界状態の設計波算定手法を確立し、管内の限界状態設計波算定の基礎にすることを目的としている。

2. 波浪データ（生データ）の整理

下田港、御前崎港の波浪データ（生データ）から波別解析法により、個々の波の波高と周期を求める。データ整理期間は、1989 年～1999 年の 11 年間（ただし、御前崎港については、1994 年のデータ欠測により、10 年間分）である。

個々の波（個別波と呼ぶ）の算出は、観測された 1 観測分（20 分間）の水位データ（超音波データ）を用いて、ゼロアップクロス法によって解析を行い、観測記録に含まれる 1 波ごとの波高、周期を定義する。平均水面となるゼロ線は、周期 30 秒以上の長周期を除去するために 30 秒の移動平均値を用いて決定した。さらに、データのノイズが大きいデータについては、表面波換算を行って処理を行った。このようにして得られた個別波と有義波の関係を示すデータ例を図-1 に示す。個別波の波高周期別頻度分布表に整理した結果を下田港について表-1

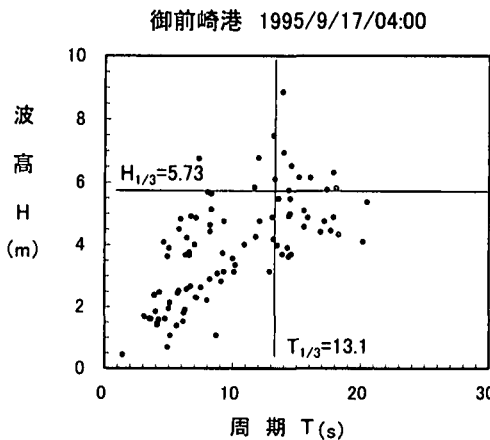
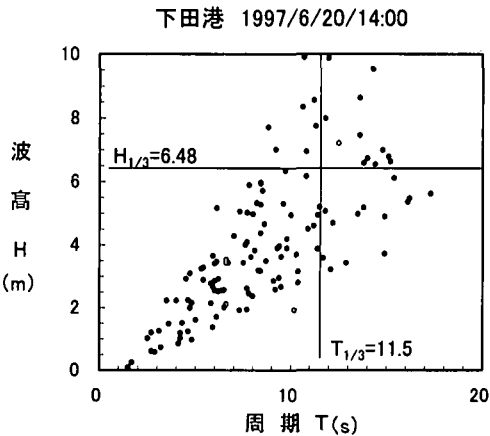


図-1 個別波と有義波の関係

*	(財)港湾空港建設技術サービスセンター 名古屋支部常務理事所副所長(前)国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所副所長
**	中部国際空港(株) 建設部企画室企画グループ副所長
***	国土交通省中部地方整備局衣浦港事務所建設管理官(前)国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所調査係長
****	(財)沿岸開発技術研究センター 第一調査部長
*****	(財)沿岸開発技術研究センター 主任研究員
*****	正会員 工博 (株)日本港湾コンサルタント 設計本部技術開発部

に、御前崎港について表-2 に示す。さらに、有義波と平均波の関係を表-3 に示す。表-3 の結果より、波の統計的性質で表される関係式 $H_{1/3} = 1.6\bar{H}$, $T_{1/3} = (1.1 \sim 1.3)\bar{T}$ を、おおむね満足していることがわかる。

3. 個々の波データによる限界状態設計波

生波浪データより求めた個々の波データが耐用期間において変化しないでくり返し発生すると仮定して、耐用

表一 下田港における個別波の波高・周期別頻度分布表

m 波高階級	周期階級 s																			計
	0.0 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.0 6.0	6.0 7.0	7.0 8.0	8.0 9.0	9.0 10.0	10.0 11.0	11.0 12.0	12.0 13.0	13.0 14.0	14.0 15.0	15.0 16.0	16.0 17.0	17.0 18.0	18.0 19.0	19.0 20.0		
0.0~ 0.5	1,482,676	1,165,444	916,487	628,223	399,447	238,335	134,812	70,115	32,632	13,371	5,053	1,845	605	204	88	26	11	28	5,089,402	
0.5~ 1.0	56,500	309,759	580,218	666,547	611,097	469,550	309,354	181,000	94,659	45,993	21,367	9,331	3,763	1,490	517	176	43	41	3,361,405	
1.0~ 2.0	1,291	20,998	88,825	173,018	211,472	193,771	144,478	92,499	55,407	32,051	18,437	9,804	4,752	2,154	807	287	98	70	1,050,219	
2.0~ 3.0		144	1,550	6,394	13,005	16,078	15,172	11,451	7,190	4,431	2,836	1,743	982	499	217	92	34	12	81,830	
3.0~ 4.0		4	57	467	1,368	2,115	2,340	2,005	1,256	768	512	312	161	114	53	12	6	5	11,555	
4.0~ 5.0			4	34	184	395	480	411	273	186	143	93	55	23	25	10	5	9	2,330	
5.0~ 6.0			1	7	32	71	114	95	65	64	52	34	29	15	6	1		3	589	
6.0~ 7.0				2	7	17	27	25	17	26	21	22	13	13	3	1			194	
7.0~ 8.0						3	6	10	6	9	6	11	3	2					56	
8.0~ 9.0						2	2	3	6	2	4	2						1	22	
9.0~10.0						1	1		2	2	2		3					2	13	
10.0~11.0											1								1	
11.0~																			0	
計	1,540,467	1,496,349	1,587,142	1,474,692	1,236,612	920,338	606,786	357,614	191,513	96,903	48,434	23,197	10,366	4,514	1,716	605	197	171	9,597,616	

表二 御前崎港における個別波の波高・周期別頻度分布表

m 波高階級	周期階級 s																			計
	0.0 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.0 6.0	6.0 7.0	7.0 8.0	8.0 9.0	9.0 10.0	10.0 11.0	11.0 12.0	12.0 13.0	13.0 14.0	14.0 15.0	15.0 16.0	16.0 17.0	17.0 18.0	18.0 19.0	19.0 20.0		
0.0~ 0.5	3,104,937	1,209,286	809,772	498,526	300,175	180,359	103,689	56,228	27,988	12,585	5,265	2,141	798	332	122	69	35	190	6,312,497	
0.5~ 1.0	314,646	474,496	458,160	369,759	292,625	229,029	161,750	99,651	54,827	28,387	14,292	7,055	3,020	1,291	522	186	65	59	2,509,820	
1.0~ 2.0	7,610	74,368	150,031	130,558	97,236	81,723	66,746	48,261	31,656	20,276	13,405	8,683	4,783	2,427	1,102	459	176	135	739,635	
2.0~ 3.0		687	8,145	12,311	8,501	7,115	7,126	6,721	5,619	4,607	3,794	3,128	2,024	1,189	574	232	111	94	71,978	
3.0~ 4.0		6	235	1,003	979	891	954	1,116	1,202	1,096	1,057	920	676	415	240	110	50	45	10,995	
4.0~ 5.0			5	55	112	135	158	246	281	283	254	275	178	118	65	38	12	25	2,240	
5.0~ 6.0				5	14	19	26	47	45	77	75	67	59	31	17	20	7	10	519	
6.0~ 7.0					1	3	5	8	12	14	25	32	18	9	5	3	2	4	141	
7.0~ 8.0						1	1	2	5	5	9	9	2	2	2			1	39	
8.0~ 9.0										1	2	3	3	2	2				13	
9.0~10.0										2	1	2	2	2	2				11	
10.0~11.0													1						1	
11.0~																			0	
計	3,427,193	1,758,843	1,426,348	1,012,217	699,643	499,275	340,455	212,280	121,635	67,333	38,179	22,315	11,564	5,818	2,653	1,117	458	563	9,647,889	

表三 有義波と平均波の関係

下田港	御前崎港	備考
$H_{1/3}=1.59\bar{H}$	$H_{1/3}=1.58\bar{H}$	有義波($H_{1/3}$, $T_{1/3}$)
$\bar{T}_{1/3}=1.30\bar{T}$	$\bar{T}_{1/3}=1.36\bar{T}$	平均波($\bar{H}$, $\bar{T}$)

期間 50 年間の疲労限界状態設計波を算出する。換算係数は、耐用年数での総時間(s)/各観測地点のデータ取得有効時間(s)とする。各観測地点での換算係数の算出結果を表一4に示す。

表一1,2の各波数に、表一4の50年換算係数を乗じて、耐用年数(50年)における疲労限界状態設計波を算出した結果を表一5に示す。耐用期間中にそれ以上の波が出現する回数が10⁴回のオーダーである使用限界状態設計波も同表に示した。

4. 有義波データによる従来の限界状態設計波

下田港と御前崎港の有義波データを用いて、波高分布

表一4 換算係数表

観測地点	下田港	御前崎港
有効時間(s)	51,477,029	41,658,457
50年間の総時間(s)	1,576,800,000	1,576,800,000
50年換算係数	30.6311387	37.85065779

を式(1)に示すレーリー分布で仮定し、周期を平均周期でとりあつかう長尾(1994)による従来の手法を用いて限界状態設計波を算出する。

$$p(H/\bar{H}) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}} \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (1)$$

H: 波高

$\bar{H}$: 平均波高

個別波のデータによる限界状態設計波と比較するため、同一整理期間について、有義波データの波高・周期

表一5 個別波による限界状態設計波

港	下 田 港			御 前 崎 港		
	出現度数	設計波高	設計周期	出現度数	設計波高	設計周期
	(千回)	(m)	(s)	(千回)	(m)	(s)
疲労限界	258,857.8	0.5	5.1	333,930.5	0.5	4.1
	32,169.4	1.5	7.4	27,995.7	1.5	6.7
	2,506.5	2.5	8.5	2,724.4	2.5	8.4
	353.9	3.5	9.0	416.2	3.5	10.2
	71.4	4.5	9.6	84.8	4.5	11.4
	18.0	5.5	10.2	19.6	5.5	12.2
	5.9	6.5	11.1	5.3	6.5	12.7
	1.7	7.5	11.3	1.5	7.5	12.3
	0.7	8.5	10.6	0.5	8.5	14.2
	0.4	9.5	11.3	0.4	9.5	14.1
使用限界	9.863	5.9	10.7	9.841	5.8	12.5
	(累積度数)			(累積度数)		

別度数分布の整理を行い、従来法により限界状態設計波を算出した結果を表-6に示す。同表と表-5の設計周期を比較すると、個別波による使用限界状態の設計周期が従来法による周期の1.3倍に大きくなっており、従来法での周期の取り扱い方について検討が必要と考えられる。

表-6 従来法による限界状態設計波

港	下 田 港			御 前 崎 港		
	出現度数	設計波高	設計周期	出現度数	設計波高	設計周期
	(千回)	(m)	(s)	(千回)	(m)	(s)
疲労 限界	230,015.1	0.5	5.8	279,883.1	0.5	4.9
	35,328.3	1.5	6.2	31,441.9	1.5	5.6
	3,422.3	2.5	6.6	3,405.4	2.5	6.5
	411.6	3.5	7.3	502.9	3.5	7.9
	82.8	4.5	7.7	108.9	4.5	8.8
	19.2	5.5	8.2	27.6	5.5	9.5
	5.3	6.5	8.7	8.4	6.5	9.8
	1.7	7.5	9.1	2.9	7.5	9.9
	0.6	8.5	9.4	1.2	8.5	9.8
	0.2	9.5	9.5	0.5	9.5	9.7
				0.3	10.5	9.7
				0.1	11.5	9.6
使用 限界	9.110	5.9	8.4	9.150	6.4	9.8
	(累積度数)			(累積度数)		

5. 波高分布と周期分布を考慮した限界状態設計波の算定方法の検討

(1) 個別波と有義波の関係

下田港を例にとり、下田港波浪観測地点での1996年1～12月の生波浪データのなかから波高範囲を1mにして波高4.5m, 2.5m, 1.5m相当と見なせる個別波を抽出し、この波が含まれている20分間の波浪データの有義波との関係を検討してみた。このようにして得られた個別波周期と有義波周期の関係を図-2に示す。

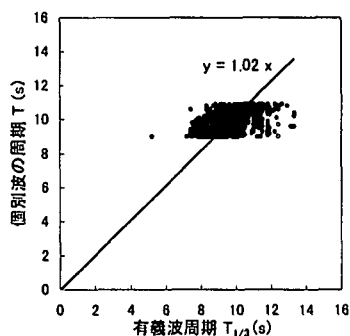
個別波と有義波の周期はばらついているが、波高4.5m, 2.5mの範囲で回帰式の周期比は1.02, 0.98であり、平均的にはほぼ等しい値になっている。波高1.5mのケースでは、回帰式の値は0.90と個別波の周期が小さい値を示している。図には示さないが、波高0～1.0m, 周期5.0～7.0sの範囲の回帰式の値は0.83とさらに小さくなる。このことから、設計に有意な2m以上の大きな波高階級の周期は、平均的に有義波周期と同じとみなすことができる。

(2) 波高の出現頻度分布関数

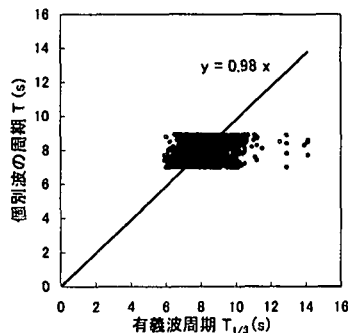
有義波データから個々の波の波高と周期の出現頻度表を作成する場合、波高の出現頻度は前述のレーリー分布を仮定する。ここには示さないがレーリー分布が成立することは、下田港と御前崎港の観測値で確認している。

(3) 周期の出現頻度分布関数

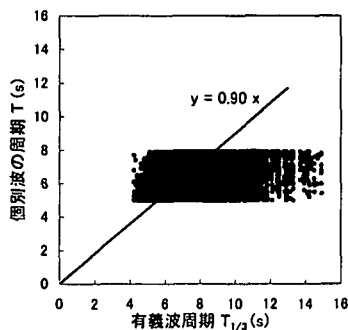
波の出現頻度には波数が影響し、波数は周期で表される。



波高4.0～5.0m, 周期9.0～11.0s



波高2.0～3.0m, 周期7.0～9.0s



波高1.0～2.0m, 周期5.0～8.0s

図-2 個別波周期と有義波周期の比較 (下田港)

従来の限界状態設計波の算定は、長尾(1994)の研究に準じて、有義波周期に対する1/1.2倍の周期を平均波周期と仮定している。同仮定は、全波の平均周期としてはほぼ正しいが、使用限界状態設計波のように比較的大きな波の周期は異なり、有義波周期にほぼ等しくなることが今回の個別波周期と有義波周期の比較から明らかになった。いままでの設計事例から疲労限界状態の設計波においても、周期が有義波周期とみなせる大きい波だけが設計において意味を有する。また、波高分布だけでなく、周期分布も考慮しないと実際の個別波の波高・周期別出現頻度を再現できない。

以上のことから有義波周期とみなせる波高2m以上

の大きい波高階級と平均波周期で代表する波高 2 m 未満の小さい波高階級に分けた 2 種類の周期分布関数を考え、周期分布パターンに係するパラメーター等を管内の観測波浪データから検討する。

ここでは周期の確率密度関数として Longuet-Higgins が導いた分布関数 (1975) の式 (2) を用いる。

合田 (1977) は、パラメーター ν の値を実測の周期分布に合わせて定めてやると部分的に理論分布式 (2) の適用が可能になると報告している。

$$p(\tau) = \frac{\nu^2}{2\{\nu^2 + (\tau - 1)\}^{3/2}}, \quad \tau = \frac{T}{\bar{T}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

T : 周期

$\bar{T}$: 平均周期

ν : 周期分布のパラメータ

周期の超過出現率は、式 (2) を $T/\bar{T} \sim \infty$ で積分することにより求められ、式 (3) で示すことができる。

$$P(T/\bar{T}) = \int_{T/\bar{T}}^{\infty} p(\tau) d\tau = \left\{ 0.5 - \frac{\frac{T}{\bar{T}} - 1}{2\sqrt{(\frac{T}{\bar{T}} - 1)^2 + \nu^2}} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) は、 $T/\bar{T} = 0$ の時に最大となり、積分範囲の条件 ($T/\bar{T} > 0$) から全出現率が 1 にならないため、全出現率が 1 となるような係数 k を与えて補正する。式 (3) から、限界状態設計波の算出に用いる周期 ($T_2 \sim T_1$) の出現確率の計算には、式 (4) を用いる。

$$P(T/\bar{T}) = k \times \left\{ \frac{\frac{T_1}{\bar{T}} - 1}{2\sqrt{(\frac{T_1}{\bar{T}} - 1)^2 + \nu^2}} - \frac{\frac{T_2}{\bar{T}} - 1}{2\sqrt{(\frac{T_2}{\bar{T}} - 1)^2 + \nu^2}} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

T_1 : 周期の出現分布を用いて置き換える周期ランクの上限

T_2 : 周期の出現分布を用いて置き換える周期ランクの下限

$\bar{T}$: もとの周期ランクにおける平均周期

k : 補正係数

(4) 周期の出現頻度分布関数に用いる係数

周期の出現頻度分布関数に用いるパラメーター ν は、観測値の周期分布に一致するように設定する。下田港、御前崎港について、15 例の観測データについて個別波を波高 2 m で分け、波高 2 m 以上の周期の頻度分布を図-3 に、波高 2 m 未満の分布を図-4 に棒グラフで示す。曲線で示す分布関数のパラメーター ν は、波高 2 m 以上に対して 0.3、波高 2 m 未満に対して 0.5 とすると実測値としての頻度分布をおおむね再現できることがわかった。このときの周期分布を図-3、4 に示す。また、周期

の分布関数のパラメーターおよび周期比 ($T_{1/3}/\bar{T}$) の整理結果を表-7 に示す。個別波 2 m 以上の周期平均値は同表からも有義波周期とみなすことができる。

(5) 算定例

下田港で観測された前述の 1989 年～1999 年の有義波データから、波高と周期の分布を考慮して耐用期間 50 年の疲労限界状態設計波を算出し、波高階級別の平均周期 (設計周期) を実線 (—▲—) で示したものが図-5 で、出現度数を示したものが図-6 である。設計に有意な波高 2 m 以上の範囲において、●印で示した実測値としての個別波による波高階級別平均周期と出現度数におおむ

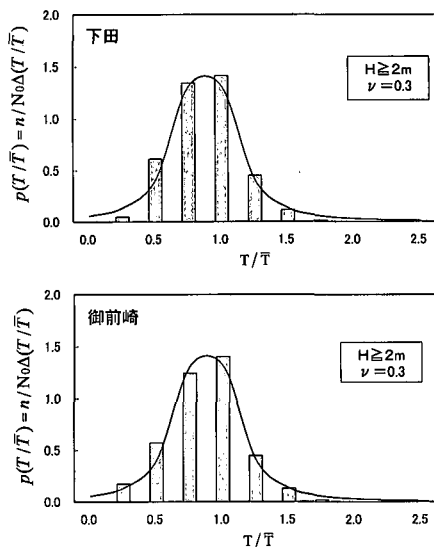


図-3 周期の頻度分布 (波高 2 m 以上)

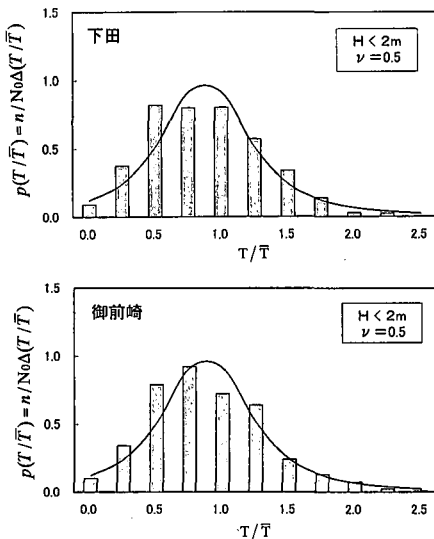
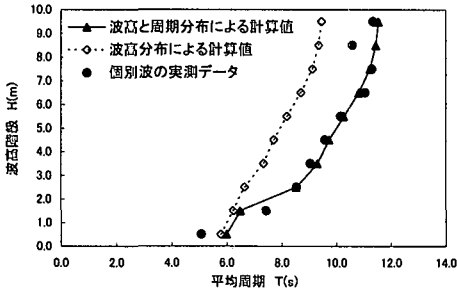


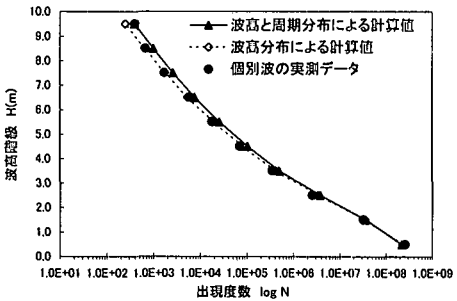
図-4 周期の頻度分布 (波高 2 m 未満)

表一7 周期比とνの結果

項目		下田港	御前崎港
個別波 2 m 以上	$(T_{1/3}) / (\text{個別波 2 m 以上の周期平均値})$	0.98	0.98
	ν	0.3	0.3
個別波 2 m 未満	$(T_{1/3}) / (\text{個別波 2 m 未満の周期平均値})$	1.30	1.37
	ν	0.5	0.5



図一5 波高と周期分布を考慮した波高階級別平均周期(下田港)



図一6 波高と周期分布を考慮した波高階級別出現度数(下田港)

ね対応していることがわかる。

使用限界状態設計波の算出結果は、設計波高 6.2 m、設計周期 10.7 s であり、表一5 に示す個別波による設計波高 5.9 m、設計周期 10.7 s とほぼ一致する。

6. ま と め

① 個々の生波浪データから算出した実際の使用限界状態設計波は、波高分布のみを考慮して有義波データか

ら算出した従来法の使用限界状態設計波の周期に比較して下田港と御前崎港で 1.3 倍程度大きくなった。

② 下田港、御前崎港の波浪データ全波の平均周期は、有義波周期の 1/(1.3~1.4) 倍であるが、設計に有意な波高 2 m 以上の大きい波の平均周期は有義波周期にほぼ等しい。従来の手法は設計に有意な波高階級の設計周期を過小評価しており、設計上危険側になることがある。有義波データから限界状態設計波を算出するに際して周期分布を考慮する必要がある。

③ 波高分布をレーリー分布で与えるだけでなく、有義波周期とみなせる 2 m 以上の大きな波高階級と平均周期で代表する小さな波高階級に分けた 2 種類の周期分布関数を用いて、有義波周期から個別波の周期を算出する新手法を提案した。

④ 下田港で観測された 1989~1999 年の有義波データをもとに、波高分布と周期分布を再現できる新手法により疲労限界状態設計波を算出し、実測値としての個別波による波高階級別平均周期と比較した。新手法の計算値は設計において無視できる小さい波高階級を除いて良好な一致を示した。使用限界状態設計波においても良好な一致を得て、同手法の妥当性を確認した。

同手法を用いて管内の限界状態設計波の算出を行った。

謝辞：本研究にあたっては、(独法)港湾空港技術研究所永井海象情報研究室長と下迫耐波研究室長より貴重なご意見をいただきました。ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

合田良実 (1977): 波浪観測記録による周期と波高の結合分布の解析, 港研資料, No. 272, p. 17.
長尾 毅 (1994): 限界状態設計法の鉄筋コンクリート港湾構造物への適用に関する研究, 港研報告, Vol. 33, No. 4, pp. 106-107.
(社)日本港湾協会 (1999): 3.2 限界状態設計法による設計の基本, 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上), pp. 330-332.
Longuet-Higgins, M. S. (1975): On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves, J. Geophys. Res., Vol. 80, No. 18, pp. 2688-2694.