

運輸省港湾技術研究所 正員 大郎 信明
五洋建設機技術研究所 正員 内藤 英晴

1. まえがき 近年、PC港湾構造物の設計・施工等が行われる機運にある。しかし、PC構造を港湾構造物に使用した例は少なく、設計・施工上の問題点も多い。運輸省港湾局では、設計法として限界状態設計法の採用を検討している。本研究は、港湾構造物の設計荷重として重要な波浪データ（全国8港湾）を用い、限界状態設計法のPC港湾構造物への適用を検討するもので、特に疲労限界状態について考察を行った。

2. 検討方法 本研究では、矩形断面の曲げを対象とし、終局限界状態において $R_d = S_d$ （断面耐力設計用値＝断面力設計用値）という状態で、疲労限界状態の安全性を検討した。

3. 波浪データ 日本の代表的港湾においては定常的に波浪観測が行われており、一般に異常時波浪と常時波浪とに分けて統計処理されている。異常時波浪の確率統計処理により再現期間 R_p に対する確率波高 H_{Rp} が求められ、この H_{Rp} を一般に設計用有義波高として取扱うが、ここでは H_{Rp} に対する95%信頼限界値をもって終局限界状態検討用の有義波高特性値 $H_{1/3 \max}$ とする。この有義波高 $H_{1/3 \max}$ より最大波高 $H_{\max}$ を求めるには、碎波の影響を考慮せず沖波に対して通常用いられる次の関係式によった。 $H_{\max} = 1.8 H_{1/3 \max}$ ---- (1)
また、常時波浪の観測結果より、1年間の波高と超過出現回数（その波高を上回る波が出現する回数）との関係（ $H-N$ 曲線）が得られる。本研究では、日本のほぼすべての海象条件を代表する8港湾（図-1）について検討したが、一例として、神戸港について再現期間を50年とした時の確率波高 $H_{50 \text{年}}$ 、 $H_{1/3 \max}$ および $H_{\max}$ を表-1に、 $H-N$ 曲線を図-2に示す。

4. 疲労限界状態の検討 疲労限界状態に対する検討はマイナー則を用いて行う。港湾構造物に作用する主な外力である波力によって部材に生じる応力は図-3に示すように連続的に変化するので、疲労寿命を直接求めるのは困難である。したがってある応力振幅に対する疲労寿命 N_i とその応力振幅の発生期待回数 n_i との比を求め、各応力振幅に対してその比の総和（累計回数比）をとり、それがある値以下となることを確かめることにより安全性の検討を行った。すなわち、 $\sum (n_i / N_i)$ を計算したが、DNVではこの値が0.2以下であればよいとしている。

5. 計算手順と計算例 終局限界状態において、最大波高 $H_{\max}$ により生じる曲げモーメントを M_E 、永久荷重によるものを M_P とすると、曲げモーメントの設計用値 M_{sd} は、 $M_{sd} = \gamma_E M_E + \gamma_P M_P$ ---- (2) で表わされる。ここに、 γ_E 、 γ_P は荷重係数であり、ここでは表-2に示す値を用いた。この M_{sd} が曲げ破壊モーメントの設計用値 M_{rd} に等しいものとする。波高 H とその波により生じる曲げモーメント M とが比例関係にあるものとし、比例定数を k とすると、終局状態において



表-1 (神戸) (m)

$H_{50 \text{年}}$	$H_{1/3 \max}$	$H_{\max}$
3.37	3.80	6.84

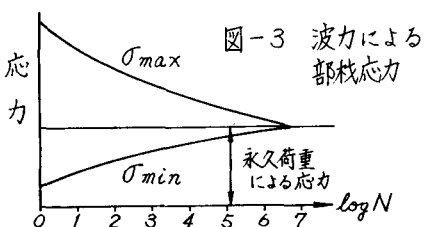
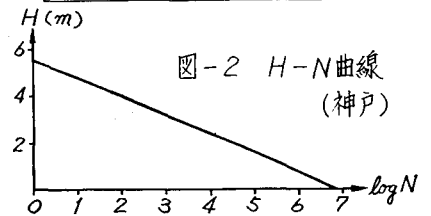


表-2 荷重係数

荷重の種類	環境荷重	永久荷重
異常時	$\gamma_E = 1.0 \sim 2.0$	$\gamma_P = 1.1$

表-3 材料係数

	材料係数
コンクリート γ_{mc}	1.50
鋼材 γ_{ms}, γ_{mp}	1.15

$M_E = k H_{max}$ となる。また、ここで終局時における全作用曲げモーメント ($M_E + M_P$) に対する M_P の占める割合を α とおく。すなわち、 $\alpha = M_P / (M_E + M_P)$ -----(3) 以上より、 $k = M_{rd} / [H_{max} \{ \delta_E + \delta_P \alpha / (1 - \alpha) \}]$ -----(4) を得る。この k に $H-N$ 曲線より得られる波高 H を乗じた曲げモーメント $M = k H$ を断面に作用させる。 M_{rd} としては、ここでは鉄筋比が p の RC 断面の曲げ破壊モーメントの設計用値を用いたが、計算に際して用いた各材料の $\sigma - \epsilon$ 曲線は PC 標準示方書による。

本研究では図-4(a)に示す PC 断面を取扱うが、鋼材断面積を求めるにあたり、終局時において圧縮側コンクリートひずみは 0.35% に達しており、PC 鋼材と鉄筋は共に降伏しているものとする (同図(b),(c))。さらに、鋼材が一段に集中配置されているとみなせるものとし、 $d_p = d_s = d$ とすると曲げ破壊モーメント M_r は、 $M_r = (A_p \sigma_{pyd} + A_s \sigma_{syd}) / (d - a/2)$ (5) となる。ここに、 $a = (A_p \sigma_{pyd} + A_s \sigma_{syd}) / (0.85 \sigma_{cd} b)$ 、 $\sigma_{pyd} = 0.80 \sigma_{pu}$ である。

式(5)で与えられる M_r が M_{rd} に等しくなるようにするが、ここで次のパラメーター β を導入する。 $\beta = A_p \sigma_{pyd} / (A_p \sigma_{pyd} + A_s \sigma_{syd})$ -----(6) すなわち β は全引張鋼材による終局抵抗モーメントに対する PC 鋼材による終局抵抗モーメントの比を表す。式(5)、(6)より $p = 0.01, 0.02$ の場合の鋼材断面積を求めた結果を表-4に、計算に用いた諸定数を表-5に示す。また、荷重状態としては、下限が M_P 、上限が $(M_P + kH)$ の曲げモーメントを受ける片振りとし、下限が $(M_P - kH)$ 、上限が $(M_P + kH)$ の両振りと考えたが、両振りに対しては表-4の鋼材を上下対称に配置した断面を用いた。なお、PC 鋼材の疲労特性については、試的に *Hilms & Eksberg* 式を用いた。

α を 0, 0.25, 0.50, 0.75 と変化させて、各港についての累計回数比を試算した結果、神戸において、特に片振りでは $\alpha = 0$ 、両振りでは $\alpha = 0.25$ の時に一番大となった (図-5, 6)。

6. 考察 本研究の範囲 (沖波を扱い砕波現象は考えない) で次のような考察がなされた。
(1) 片振りを受ける場合、 $\delta_E \geq 1.0$ では疲労に対して安全である。
(2) 両振りを受ける場合、神戸において、 $\alpha = 0.25$ 、 $\beta = 0$ の時に δ_E が小さいと疲労に対して危険となるが、 δ_E を 1.2 以上とすれば安全である。したがって、DNV, FIP において推奨する $\delta_E = 1.3$ を用いた場合には、疲労限界状態に対する検討は省略できる。

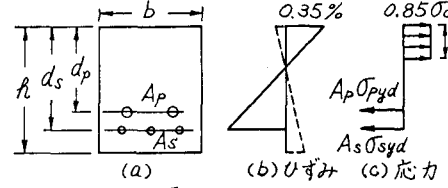


図-4

表-4 鋼材断面積 (cm²)

β	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
case I						
A_s	30	24	18	12	6	0
A_p	0	1.875	3.750	5.625	7.500	9.375
case II						
A_s	60	48	36	24	12	0
A_p	0	3.75	7.50	11.25	15.00	18.75

表-5 計算に用いた定数

$k = 40 \text{ cm}, d = 30 \text{ cm}, b = 100 \text{ cm}$
 $\sigma_{sy} = 3500 \text{ kg/cm}^2, \sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$
 $\sigma_{pu} = 14000 \text{ kg/cm}^2$
 $\sigma_{pe} = 8000 \text{ kg/cm}^2$

○ $\beta = 0$
 × 0.2
 □ 0.4
 △ 0.6
 + 0.8

--- case I
 --- case II

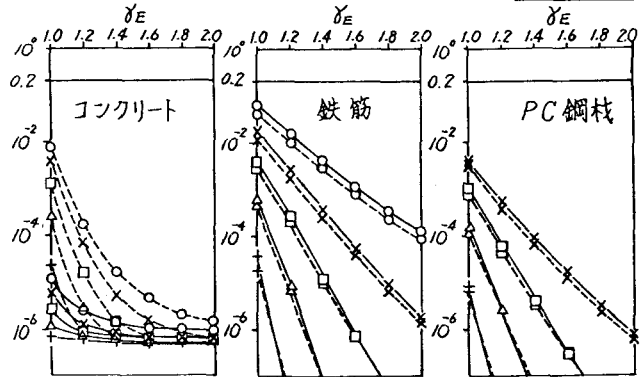


図-5 累計回数比-片振り (神戸, $\alpha = 0$)

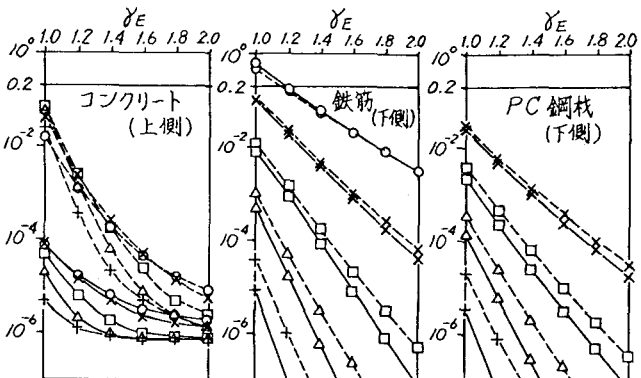


図-6 累計回数比-両振り (神戸, $\alpha = 0.25$)