

[112] 両振り繰返し荷重を受ける PC 曲面部材の疲労性状

正会員 ○ 横田 弘 (運輸省港湾技術研究所 構造部)

正会員 清宮 理 (運輸省港湾技術研究所 構造部)

1. まえがき

海洋構造物での消波工等にプレストレストコンクリート (以下 PC と略す) 曲面部材が利用されている。この一例を図-1 に示す。この曲面部材には、波浪作用時に部材の内側と外側から交互に波力が作用する。内側及び外側から静的荷重が作用する時の PC 曲面部材の基礎的な力学性状は、載荷実験及び有限要素法による数値解析を通してほぼ明らかにすることができた^{1~3)}。しかし、PC 曲面部材には、強大な波浪外力が繰返し作用するため、静的な力学性状とともに疲労に対する部材の安全性も検討しなければならない。特に、構造物の耐久性及び安全性の観点から、疲労限界状態の検討を適切に行なう必要がある。

本報告では、部材の内側から及び外側から繰返し荷重が作用する PC 曲面部材の疲労性状について模型載荷実験を行い、強度比と載荷回数との関係、ひびわれの性状等について調べる。また、Minor 則により PC 曲面部材の疲労安全性の検討を行なった結果について述べる。

2. 供試体の概要

疲労実験を行った供試体の概要を図-2 に示す。供試体は 1/4円弧状で、両端に固定用のブロックが設けてある。供試体の中心半径は1000mmで、曲面部の断面寸法は、150(W)×100(H)mmである。端部のブロックの寸法は、600(L)×300(H)×250(W)mmである。曲面部材には、鉄筋4本(SD30-D6)をそれぞれかぶり厚さ25mmの位置に配し、PC鋼棒1本(SBPR 95/110、 $\phi 11$)を断面中央に配した。また、スターラップとして、SD30-D6 鉄筋を40mmピッチに配した。鉄筋及び PC 鋼棒の機械的性質を表-1 に示す。

供試体の製作に使用したコンクリートは、粗骨材 (砕石) の最大寸法が10mm、W/C=55%、s/a=50% である。また、配合強度は、400kgf/cm²である。

供試体には、ポストテンション法でプレストレスを導入した。導入応力は、コンクリート応力に換算して、実験時に約20kgf/cm² になるようにした。また、プレストレス導入後グラウトを施した。

3. 疲労実験の概要

疲労実験の状況を図-3 に示す。供試体は、両端のブロックを反力床上に設けた支点台に PC 鋼棒を用いて取付け、両端固定の条件とした。油圧式振動疲労試験機 (アクチュエータ) により供試体のスパン中央部に集中荷重を載荷した。この際、供試体の内側及び外側の両側からの両振り載荷及び内側もしくは外側からのみの片振り載荷とし、載荷の周波数は、1~3 Hz とした。表-2 に各供試体での上限荷重値及び下限荷重値を示す。片振り載荷では、アク

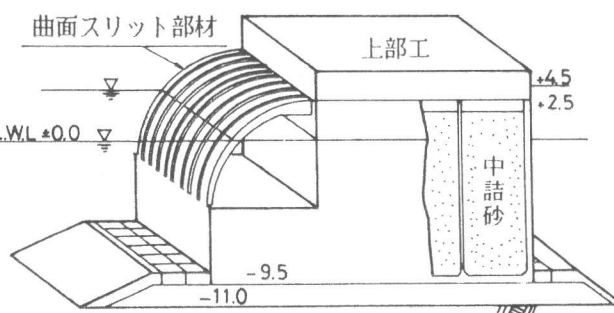


図-1 曲面部材を有する防波堤の一例

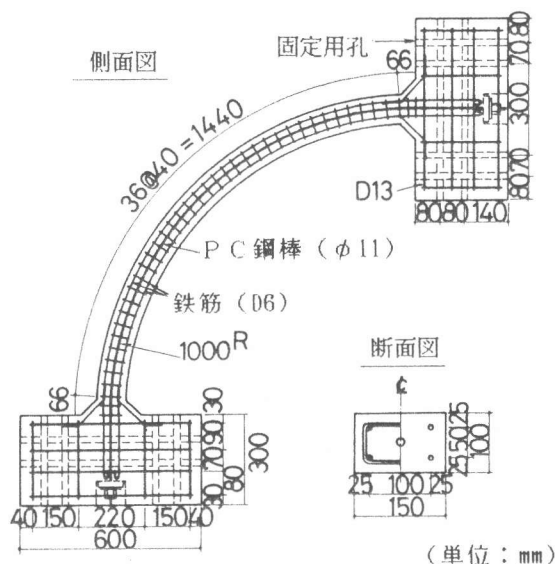


図-2 供試体の概要

表-1 鋼材の機械的性質

種類	直径 mm	引張強度 kgf/cm ²	降伏点 kgf/cm ²	伸び %
鉄筋	6	5182	3952	24.3
PC 鋼棒	11	11400	10800	12.0

チュエータの性能の制約により、下限荷重を2tfに固定した。

荷重値及びスパン中央部の変位量は、アクチュエータに設けられたロードセル及び変位計によりそれぞれ測定した。鋼材に生じるひずみ量は、供試体スパン中央部の鋼材に貼付したひずみゲージにより測定した。これらの測定は、破壊まで継続して行ない、測定結果は動ひずみアンプを経てペンレコーダーに記録した。ひびわれ幅は、コンタクトゲージ（標点距離：100mm）により測定した。

4. 実験結果と考察

4. 1 疲労破壊時の载荷回数

疲労実験で得られた各供試体の破壊に至るまでの载荷回数を表-2に示す。本実験では、鋼材の破断をもって疲労破壊と定義した。表-2に示す結果から求めたS-N曲線を図-4に示す。図-4では、荷重の方向に拘らず上限荷重値を縦軸にとった。また、静的载荷時の終局耐力は、内側からの载荷の場合8.5tf、外側からの载荷の場合15.0tfであった。曲面部材では、部材の内側からの载荷の場合、断面内に引張軸力が発生するため、部材の外側からの载荷の場合と比べて、鋼材にはより大きな引張応力が発生する。このため、同じ上限荷重を与えた場合、外側からのみの片振り载荷、内側からのみの片振り载荷、両振り载荷の順で破壊時の载荷回数が小さくなった。さらに、両振り载荷では、内側からのみの片振り载荷と比べて、約3割程度強度が小さくなった。曲面部材の疲労強度は、载荷の方向と方法によりかなり異なると言える。

4. 2 ひびわれの性状

図-5に疲労破壊時のひびわれ発生の様子の一例を示す。载荷点のコンクリートは、両振り繰返し载荷による影響でかなり破壊が進行した。この破壊によるコンクリート断面の欠損により、供試体の変形が進行し、鋼材に生じるひずみ量が増大すると考

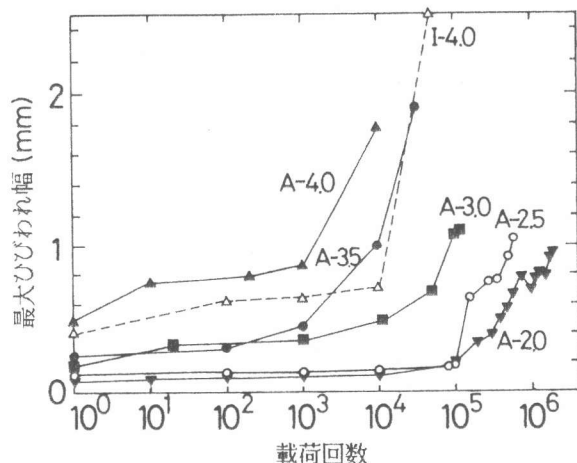


図-6 各载荷回数における最大ひびわれ幅

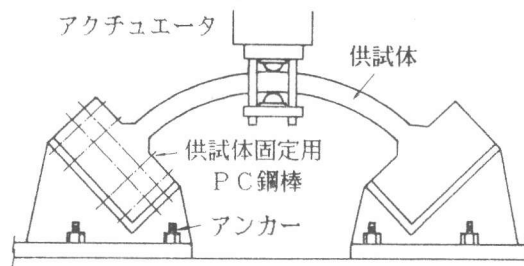


図-3 载荷状況の概要

表-2 実験結果の概要

No.	荷重 (tf)		f'_c (kgf/cm ²)	破壊時载荷回数
	上限	下限		
A-2.0	2.0	-2.0	447	2,000,000 以上
A-2.5	2.5	-2.5	418	630,600
A-3.0	3.0	-3.0	384	190,110
A-3.5	3.5	-3.5	413	49,400
A-4.0	4.0	-4.0	411	12,800
A-4.5	4.5	-4.5	427	720
I-4.0	4.0	2.0	472	130,510
I-6.0	6.0	2.0	389	6,000
O-6.0	-6.0	-2.0	375	422,000

A：両振り I：内側からの片振り
O：外側からの片振り

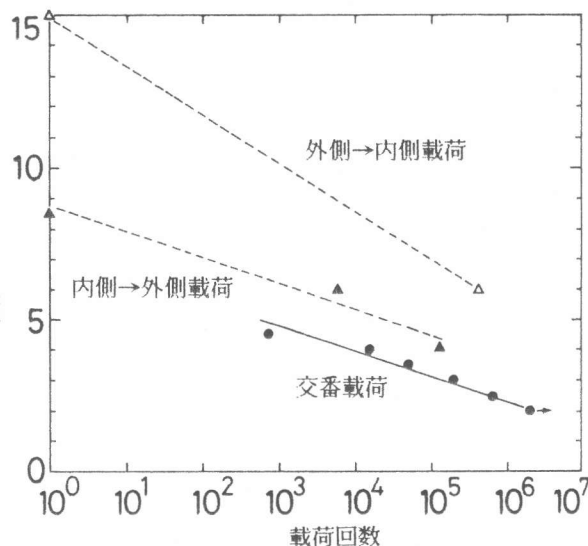


図-4 各荷重レベルに対する疲労寿命

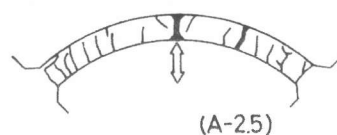


図-5 破壊時のひびわれ状況

えられる。

図-6に上限荷重載荷時の最大ひびわれ幅と載荷回数との関係を示す。最大ひびわれ幅は、供試体のスパン中央部で得られたものである。両振り載荷の場合、内側からの載荷の時にひびわれ幅が増大し、載荷回数が増すと外側からの載荷になっても、ひびわれが閉じることがなかった。ひびわれ幅は、鋼材に生じるひずみに大きい影響を与えるが、初載荷時のひびわれ幅を維持している間は、P C 鋼棒のひずみも安定していた。スパン中央の載荷点での断面欠損がかなり進行した後、他の部分でもひびわれの発生・進展が顕著になった。特に、1/4スパン点では、ひびわれ幅がかなり大きくなった。

4. 3 P C 鋼棒のひずみ

スパン中央で得られたP C 鋼棒のひずみ量と載荷回数との関係を図-7に示す。P C 鋼棒のひずみ量は、内側からの載荷（上限荷重）時に得られたものである。いずれの供試体でも、破壊時の載荷回数の約10%の載荷回数までは、P C 鋼棒に生じるひずみ量はほぼ一定の値であった。この回数を過ぎると、ひずみ量は急速に増大した。片振り載荷と両振り載荷を比較した場合（上限荷重値が同じ）、載荷の初期にはほぼ同程度のひずみがP C 鋼棒に生じたが、ひずみが急速に増大する載荷回数は、片振り載荷の方が多かった。しかし片振り載荷の場合でも、破壊時の載荷回数の約10%までは、P C 鋼棒に生じるひずみ量はほぼ一定となり、両振り載荷の場合と同様の傾向を示した。

4. 4 変形

載荷回数と各供試体の載荷点での変位量の差（上限荷重時の変位－下限荷重時の変位）との関係を図-8に示す。変形は、前述の鋼材のひずみの傾向とほぼ同じであり、破壊時の載荷回数の約15%を過ぎると急速に大きくなった。また、供試体の残留変形（荷重0の時）は、両振り載荷の場合、載荷回数が増すにつれて外側に大きくなった。

4. 5 破壊の形態

全ての供試体の疲労限界状態は、鋼材の破断であった。疲労限界状態に至るまでは、鋼材に生じるひずみ及び変形量が急激に増大した載荷回数、即ち破壊時の載荷回数の10～15%程度の回数でコンクリートの破壊が顕著になってくると考えられる。また、破壊直前には鋼材のみが外力に抵抗し、最終的には鉄筋の破断または鉄筋及びP C 鋼棒の破断が観察された。

スパン中央で鋼材が破断した後、1/4スパン点に曲げモーメントの再配分が行なわれるが、供試体の変形がかなり増大し、供試体の残存耐力はほとんどなかった。また、1/4スパン点で鋼材の破断が観察された供試体もあった。静的載荷実験では、スパン中央の載荷点で塑性ヒンジが発生した後、供試体は片持ちばりと同様な構造になり、外力に抵抗することが可能であった。しかし、疲労荷重下では、スパン中央の破壊耐力が構造系全体の耐力を支配すると言える。また、静的荷重下では、外側からの載荷の場合せん断ひびわれが顕著となったが、疲労荷重下では、せん断ひびわれの発生は観察されなかった。

5. Minor 則による疲労寿命の推定

曲面部材を有する防波堤は、現在船川港（秋田県）で建設中である。実験の対象とした供試体は、この部材の完全な縮尺模型ではないが、1/7 程度の縮尺と考えて良い。ここでは、曲面部材の疲労の安全性についてMinor 則を用いて検討する。日本海沿岸で1年間に到来すると考えられる個別波の波の総数を図-

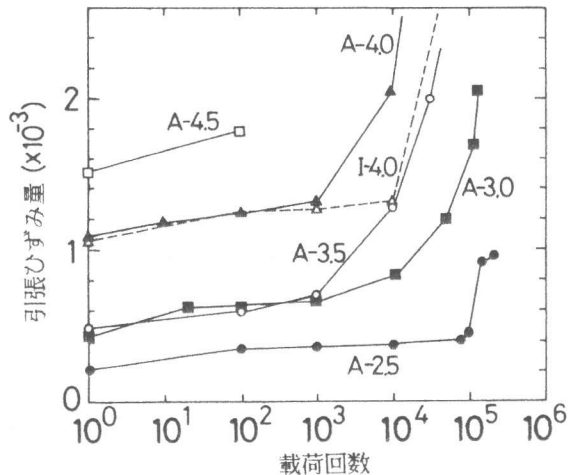


図-7 各載荷回数におけるP C 鋼棒のひずみ

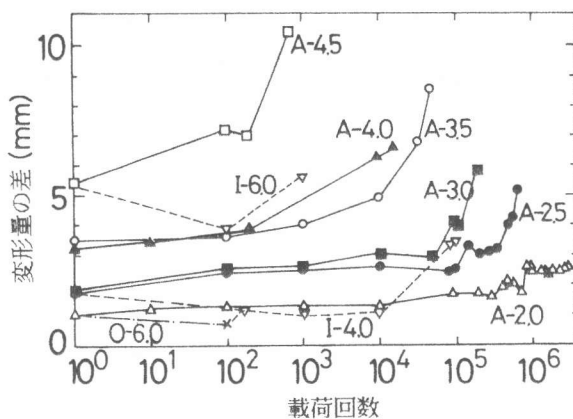


図-8 各載荷回数における変形

9に示す⁴⁾。海洋構造物の設計耐用年数として、ここでは50年を設定する。しかし、50年間の波浪統計はないので、図-9での個別波の波の総数を単純に50倍した波数を用いる。また、50年間内の最大波高の推定値は、17.9mである。曲面部材に作用する波力は、図-10に示すように波高の関数として与えられる。供試体と実物の部材の間の相似則として、

$$(MR/EI)_p = (MR/EI)_{Model}$$

M: 曲げモーメント、R: 部材の半径

等の関係を用いると、実海域での波高15mは、実験供試体の載荷荷重として11tf程度となる。コンクリート及び鋼材の疲労強度は、限界状態設計法指針(案)⁵⁾に示される式を片振り載荷時のみでなく両振り載荷時にも適用できるとした。即ち、永久荷重により発生する応力をここでは、下限荷重により発生する応力と読み換えた。以上のような仮定の下で、材料毎の累計回数比を求めた。その結果、コンクリート及びP C鋼棒に関しては、材料に損傷を与える応力以上の累計回数比はほとんど0となった。また鉄筋に関しては、累計回数比は0.1程度となった。したがって、曲面部材の疲労の安全性は、本実験に採用した鉄筋比の範囲では、主に鉄筋に支配されていると考えられる。この結果は、実験で得られた傾向とほぼ一致した。また、実験の結果からも疲労に対する安全性が確認された。

6. まとめ

曲面部材の疲労性状に関して、本実験の範囲で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 等振幅両振り載荷を受ける曲面部材の疲労は、内側からの載荷時に進行した。また、両振り載荷時の疲労強度は、内側からのみの片振り載荷の時に比べて、3割程度低下した。
- 2) 載荷点のコンクリートの破壊が進行し断面の欠損が著しくなると、鋼材のひずみ、変形及びひびわれ幅が急速に増大した。この時の載荷回数は、各荷重レベルでの疲労寿命の1割程度であった。
- 3) 交番荷重による静的載荷実験では、曲面部材の破壊の形態はコンクリートの圧縮破壊であったが、疲労実験では、鋼材の破断によって疲労限界状態に至った。
- 4) Minor 則による検討の結果及び実験結果から、今回検討を行った曲面部材の波浪による疲労破壊の安全性が確認できた。

謝辞

本研究は、特別研究「大水深重力式構造物の構造解析に関する研究」の一環として実施した。なお、実験の実施に当たっては、当所の西澤英雄技官に多大な御協力をいただいたことに感謝致します。

参考文献

- 1) 清宮 理、横田 弘: Nonlinear Properties of Arc-Shaped Concrete Members、港湾技術研究所報告 Vol.24、No.1、1985年 3月、pp.69 ~131.
- 2) 清宮 理、横田 弘、西澤英雄: 曲面形状をした消波部材の力学的性状、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983年 4月、pp.341~344.
- 3) 清宮 理、横田 弘: 曲面消波部材の弾塑性解析、第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1984年 5月、pp.445~448.
- 4) 広瀬宗一、高橋智晴: 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、1982年12月、pp.30 ~34.
- 5) 土木学会: コンクリート構造物の限界状態設計法指針(案)、1983年12月、pp.24 ~44.

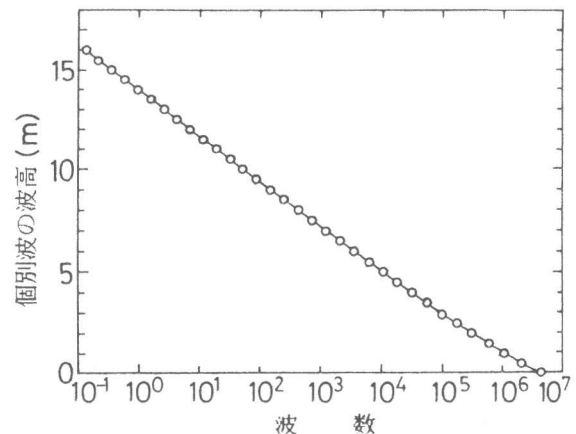


図-9 ある波高レベルを超過する1年あたりの個別波の波数

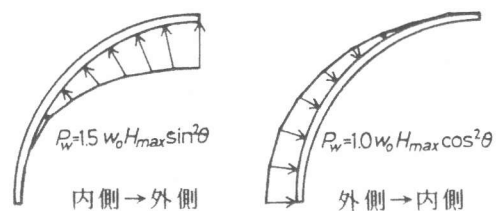


図-10 曲面部材に作用する波力分布