

周波数がコンクリートの引張疲労強度に及ぼす影響

EFFECT OF FREQUENCY ON TENSILE FATIGUE STRENGTH OF CONCRETE

清宮 理* 本多宗隆**

by Osamu KIYOMIYA* and Munetaka HONDA**

Concrete offshore structures are subjected to repeated forces due to waves. Repeated wave forces may bring structures fatigue damages. Wave forces have wide frequency ranges from 0.05Hz to 50Hz. In double cylindrical offshore breakwaters made of reinforced concrete, inplane tensile stress will be dominant in walls. Tensile fatigue endurance should be paid attention. Splitting tensile fatigue tests have been carried out to know an effect of frequency on tensile fatigue endurance.

1. まえがき

コンクリート製海洋構造物には、波浪により繰返し荷重が作用する。この繰返し荷重に対して疲労限界状態の検討をする。従来の海洋構造物では、コンクリートの疲労は曲げ圧縮状態で検討されるが、波浪より内力が卓越する円筒型構造物が近年開発され、純引張状態での疲労限界状態の検討が必要となった。しかし、引張状態での検討例は少ない。^{1)~3)}そこで、水中と気中での引張疲労強度試験を行って、疲労寿命曲線(S-N曲線)を求めた。また波浪は、衝撃時に高い周波数あるいは重複時に低い周波数で構造物に到着する。そこで周波数がどの程度疲労強度に影響を及ぼすか検討を行った。更に今回得られた疲労寿命曲線を用いて円筒構造物の疲労の検討を行った結果を示す。

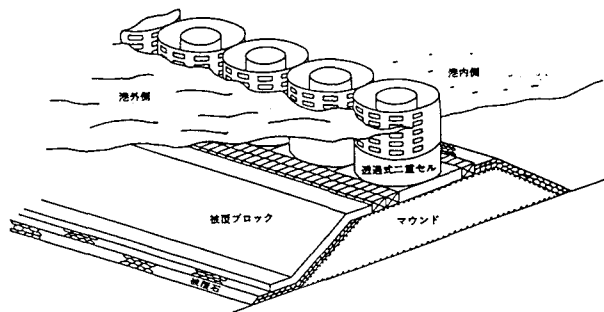


図-1 円筒波浪制御構造物の概要

*工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

2. 試験の背景

図-1 に二重円筒ケーソンの概要⁴⁾を示す。二重円筒ケーソンは、外海からの波浪を制御する目的で建設されるもので、多数の開口を持つ外側円筒と砂を中詰めした内側円筒で構成されている。この二重円筒ケーソンの主たる外力は波力で、繰り返し円筒壁に作用する。この際、円筒壁の円周方向に大きな軸引張力が生じる。この波力に対して各材料、部材の疲労設計を行うが、疲労設計に用いる S-N 曲線は通常 1~3Hz の周波数での载荷試験によって得られる。図-2 に示すように波浪

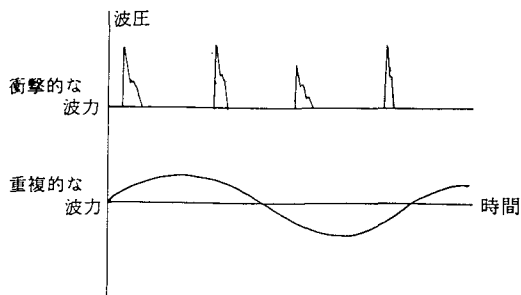


図-2 波力の作用状況

は、衝撃的に部材に作用する時には非常に高い周波数(10~50Hz)で、重複的に作用する時には逆に低い周波数(0.06~0.3Hz)で作用する。衝撃的な波力は、波の砕波により生じる。

図-3 に示すように部材には広い周波数の領域で繰り返し荷重が作用する。このためこれらの周波数の領域での疲労寿命を検討しておく必要がある。またコンクリート製海洋構造物は大半が水中に没している場合が多いので、水中と気中での両環境下での疲労寿命の検討が不可欠となる。

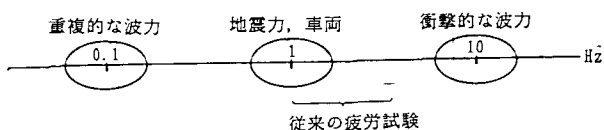


図-3 外力と周波数の関係

3. 疲労試験の概要

3.1 試験体

疲労試験は、総計 106 体の $\phi 10 \times 20$ cm の円柱試験体を対象に実施した。表-1 にこれらの試験体の一覧を示す。ここに示された a~c の試験体については標準養生 28 日間施した後、室内に 3~4 週間放置し、試験体の重量変化がほぼ無くなるまで乾燥させ試験に供した。d の試験体については、水中養生を試験時まで継続し、湿润状態を保ったまま試験に供した。

表-2 にコンクリートの示方配合を示す。コンクリートの設計強度は 240 kgf/cm^2 である。表-3 に試験体 b から得られた引張強度を示す。

表-1 試験一覧表

No	試験方法	試験環境	本数
a	静的圧縮試験	気中	12
b	静的割裂試験	"	12
c	動的割裂試験	"	44
d	"	水中	38

表-3 試験体の静的引張強度

経過日数	引張強度(kgf/cm ²)
79	29.1
124	29.6
245	32.0

表-2 示方配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブの範囲(cm)	空気量 の範囲(%)	水気量 の範囲(%)	水/C 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (m ³ 当り)					
						水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	AE減水剤 (cc)	AE剤 (cc)
10	8±2.5	5±1	62.5	49.0	168	259	896	937	673	1.07	

3. 2 試験方法

図-4 に気中および水中における疲労試験の状況を示す。両者ともJIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に準じて試験を行った。荷重振幅は下限引張応力を 1.3kgf/cm^2 （荷重に換算して 0.4tf ）とし、上限引張応力を静的引張強度（荷重に換算して 9.13tf ）の45～76％に設定した。また、周波数は $0.3\sim 15\text{Hz}$ とした。上限の周波数は、試験機の性能、下限の周波数は実験期間をも考慮して設定した。気中での試験については、試験体側面の引張方向に長さ50mmひずみゲージを貼付し、所定の回数で発生ひずみ量を計測した。水中での試験については、水槽内に試験体をセットとし試験体全体が水没状態になるようにおいた。ただし、この場合にはひずみの計測は行わない。なお、100万回繰返し载荷を行っても破壊にいたらなかった場合には、その時点で载荷を中止した。

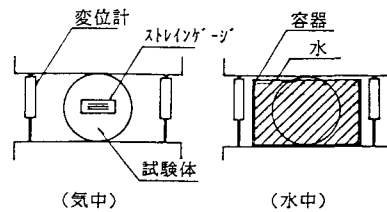


図-4 試験の状況

4. 試験結果

図-5 に気中および水中における引張疲労試験結果⁵⁾を示す。この結果は、周波数が $1\sim 4\text{Hz}$ の疲労の試験で得られた結果である。縦軸は応力振幅と静的引張強度との比である。図中に示した線は、それぞれ気中および水中における引張疲労寿命曲線で、実線は最小二乗法でもとめたもの、破線は信頼区間95％を示している。気中と水中とにおける疲労特性は顕著に異なり、水中では疲労寿命がかなり短くなった。今回得られた疲労試験結果と既往の試験結果^{1)~3)}との比較を図-6に示す。今回の水中における試験結果は、他のいずれの疲労寿命曲線よりも下側に位置し、疲労寿命が短くなった。同様に、コンクリート標準示方書⁶⁾に示されている水中の場合の疲労の検討式は、疲労寿命を長く算定する可能性があることがわかった。試験結果を最小二乗法で整理して得られた疲労寿命曲線の関係は次式のとおりとなった。

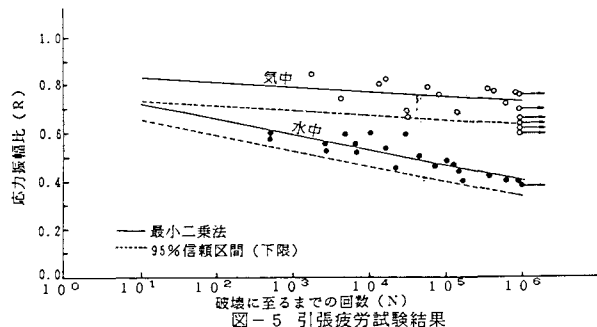


図-5 引張疲労試験結果

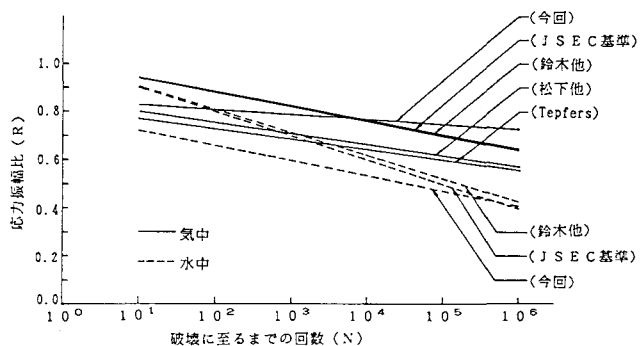


図-6 各提案式との比較

気中： $R = -0.020 \cdot \log N + 0.848 \cdots (1)$

水中： $R = -0.062 \cdot \log N + 0.782 \cdots (2)$

ここで、

R : 応力振幅比 (σ_{ct}/f_t)
 σ_{ct} : 引張応力振幅
 f_t : 静的引張強度
 N : 引張破壊時の繰返し回数

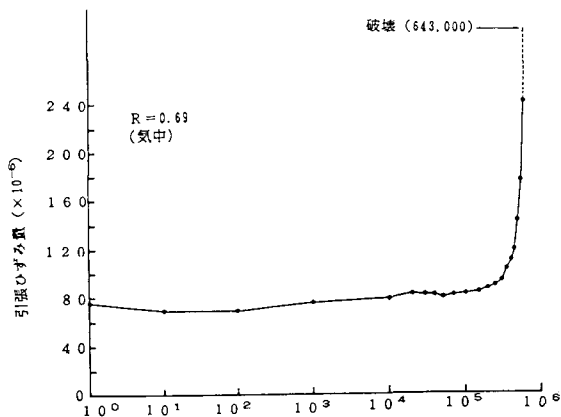


図-7 引張ひずみの変化

図-7 に気中での疲労試験における引張ひずみと繰返し回数との関係の一例を示す。ひずみはある繰返し回数を超えると急激に増加した。この場合の載荷回数は、疲労破壊に至った載荷回数の約25%であった。したがって、引張応力による疲労損傷は、比較的早期から始まり、徐々に蓄積されていたことを示す。

図-8 に周波数と疲労振幅比の繰返し回数との関係を示す。周波数が15Hzの時は、気中、水中ともに 10^6 回の載荷でも疲労破壊は生じなかった。このように高い周波数では、疲労強度が大きいことが分る。一方周波数が低い(0.3Hz)では、試験体の数が少ないが、通常行われている周波数領域(1~4Hz)と比較しても疲労強度がほぼ同じか若干小さいことが分る。図-9 は、図-5 に示す図中に0.3Hzの周波数での実験結果を加えたものである。0.3Hzでの各試験体の疲労寿命は式(1)式(2)での信頼区間95%より上側に位置されている。

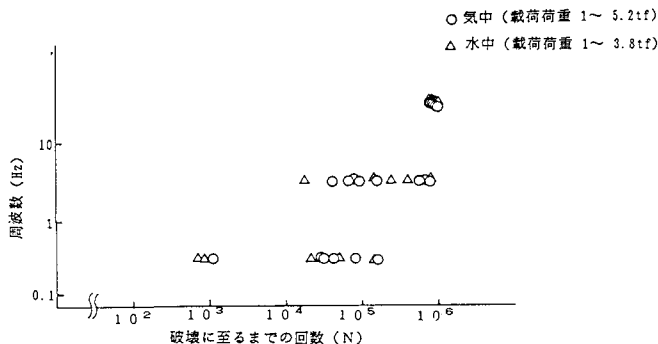


図-8 周波数と破壊に至るまでの回数

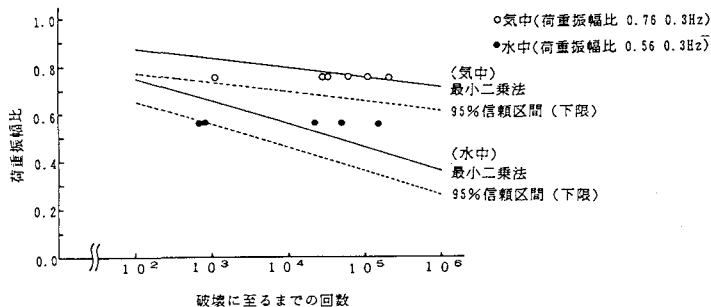


図-9 周波数と破壊に至るまでの回数

5. 引張疲労の検討例

5. 1 計算条件

二重円筒ケーソンに作用する外力は主に土圧、静水圧及び波圧である。引き波により作用する波圧時および押し波により作用する波圧時に、円筒の円周方向に大きな軸引張力が発生する⁷⁾。今回の疲労の検討は、図-10に示す円筒モデルを用いて、表-4に示す2ケースについて実施した。図-10は内側の円筒壁での荷重状況を示しており、内側から中詰土による土圧、外側から波浪による波圧が作用する。この内モデル1は、波浪状況の比較的穏やかな海域に設置されている小規模の円筒ケーソンを、モデル2は外海に面した波浪状況の厳しい海域に設置される大型円筒ケーソンを想定している。

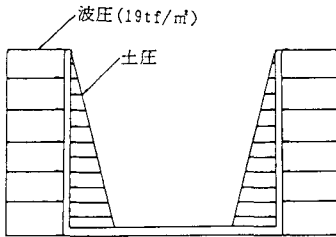


図-10 円筒壁に作用する荷重

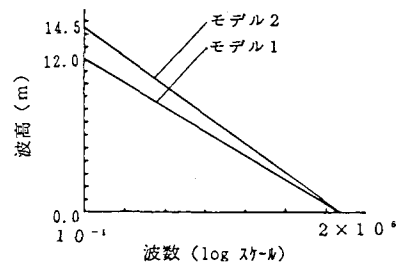


図-11 1年あたりの波数

疲労寿命の算定は、構造物を構成する各材料に対してマイナー則を用いて行う。その際使用期間中に作用する波浪の波高と波数との関係が必要である。この関係については、波高と波数の常用対数との関係がほぼ直線であることがこれまでの観測結果⁸⁾から知られている。今回の検討では、表-4に示した最高波高を用いて図-11に示す波高と波数との関係を用いる。通常の海洋構造物では、50年程度を一応の使用期間と考えているので、今回の検討も50年を対象として行う。つまり、図-11に示す関係で波数を50倍して用いる。厳密ではないが、50年確率波では1.2倍ほど波高が高くなってくる。また、疲労限界状態設計法での波力の荷重係数は1.0、材料係数は1.3に設定した。

5. 2 検討結果

水中疲労試験より求められた疲労寿命曲線から、マイナー則を用いて検討を行った。計算では図-11に示す関係より波高1m毎の波力と波数を計算する。波高から波力への算定は、水理実験より得られた式⁴⁾を用いた。各波高毎の円筒壁に作用する波力より引張応力度の振幅を計算し、この応力振幅での波数と疲労破壊に至るまでの繰返し回数の比を各波高毎の損傷度とした。この際10⁶回以上で疲労破壊しない応力振幅比以下では損傷度を0と今回設定した。計算結果より波浪条件の厳しくないモデル1の場合では、疲労損傷度はほとんど0であり、疲労破壊発生の可能性は低いと考えられる。一方、波浪条件の厳しいモデル2の場合では、今回求めた疲労試験での信頼区間95%の疲労寿命曲線を用いた際には、疲労損傷数0.7となった。また衝撃的な波圧がもし同一の応力振幅で作用したと仮定すると図-8に示すような疲労破壊は生じないという結果になる。

表-4 モデルの概要

	モデル1	モデル2
外 径 (m)	15.0	20.0
高 さ (m)	12.0	14.5
厚 さ (m)	0.8	0.8
波 高 (m)	12.0	14.5
引張強度 (kgf/cm ²)	24.6	24.6

6. 結論

本研究の範囲でえられた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 気中及び水中でのコンクリート試験体の引張疲労試験の結果、水中での疲労強度は気中における疲労強度の約6割であった。また今回得られた疲労強度曲線は、他の式よりも設計に関して危険側にでていた。
- (2) 周波数が15Hzと高くなると疲労強度が、周波数1～4Hzで得られたものより強くなる。一方0.3Hzと低くなると疲労強度は若干低下する。このことから同じ応力振幅に対して、衝撃波圧が支配的な波浪条件下では疲労強度についてさほど心配はないが、重複波が支配的な波浪条件下では注意が必要である。
- (3) 今回得られた水中での疲労寿命の算定式を用いて、50年の波浪条件下で円筒壁を対象にマイナー則を用いて疲労寿命の算定を行った結果、波浪条件下の穏やかな所では水中、気中ともに疲労についてはほとんど問題がないことがわかった。しかし、外海に面した波浪条件の厳しい所では、引張状態での疲労破壊に対する安全性の照査を慎重に行う必要があることがわかった。

7. あとがき

現在疲労試験を継続して実施しており、今後更に実験データが集積された段階で再度検討を行なっていきたい。

参考文献

- 1) 松下博通、近田孝夫：割裂試験方法によるコンクリートの引張疲労強度に関する研究、セメント技術年報35、セメント協会、pp. 393～396(1981)
- 2) 鈴木 崇、尾崎 昶、志村政雄：大気中および水中におけるコンクリート、モルタル、ペーストの引張疲労、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、V-39、pp. 77～78(1984)
- 3) Tepfers R: Tensile Fatigue Strength of Plain Concrete, ACI Journal, pp. 919～933 (1979)
- 4) 谷本勝利、他 5名：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その4）二重円筒ケーソンの水理特性と試設計、港研資料NO. 600, 21P (1987)
- 5) 清宮 理、横田 弘、白崎正浩：水中におけるコンクリートの引張疲労試験、第44回セメント技術大会、pp. 423～434(1990)
- 6) 土木学会、コンクリート標準示方書（設計編）(1986)
- 7) 清宮 理、白崎正浩：二方向から面内引張力を受けるコンクリート板の力学特性、港研資料 NO. 632, 40P(1988)
- 8) 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、pp. 1～55(1982)

(1990年10月12日受付)