

論文 高振動数の繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートの付着疲労に関する実験的研究

飯塚 敬一*1・佐々木 建一*2・松原 勝己*3・久保田 克寿*2

要旨: 大型揚水発電所の発電機設備は、約 5000m³ のマッシブなコンクリートによって支持されており、コンクリートに埋設された鋼製ケーシングに作用する 8MPa に及ぶ高水圧は、ケーシングを支持する鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）構造物に対しても大きな引張応力を作用させる。また、ポンプ水車で発生する翼列干渉などに起因する水圧脈動は、当該 RC 構造物に高い振動数の繰返し荷重を与える。そこで本研究では、高水圧による引張応力と水圧脈動による繰返し荷重が同時に作用する RC 構造物の挙動を把握するため、繰返し荷重による鉄筋とコンクリートの付着疲労性状を一軸引張疲労試験の結果に基づいて検討した。

キーワード: 付着疲労, 高振動数, ひずみ振幅, 揚水発電所

1. はじめに

近年建設される大型揚水発電所においては、経済性を高める目的からポンプ水車の高性能化が進み、高落差化、高速化、大容量化の傾向が著しい。このような揚水発電所では、発電機やポンプ水車などの主要機器がマッシブな RC 構造物で支持される形式であることが一般的であり、特に大規模な発電所では、支持コンクリートの体積は 5000m³ に及ぶ。

図-1 の概要図に示すように、ポンプ水車のケーシングは RC 構造物内に埋設されるが、高落差化に伴って内部に作用する水圧は非常に高圧なものとなり、最新の超高落差機では 8MPa に達している。その結果、ケーシングを覆う支持コンクリートにもケーシング周方向にコンクリートの引張強度を超える応力が作用していると推定される。また、ポンプ水車内部には翼列干渉（ガイドベーンと呼ばれる静止翼列とその内側で回転するランナとの干渉）やキャビテーションといった水理現象によって強い水圧脈動が発生し、数十 Hz 以上の高振動数でケーシングが膨張収縮を繰返すことにより、周辺支持コンクリートに繰返し応力が発生することが現地の測定結果などから明らかとなっている。

従来、支持コンクリートの設計は、発電機自重やポンプ水車に作用する水圧などの外力の他、施工時や運転時の温度荷重を考慮して弾性解析に基づいた許容応力度法によって行われており、発生する引張応力はすべて鉄筋が負担する設計となっている。また、水圧脈動による疲労に対しても、鉄筋の許容応力度を低減させることで対処しているため、基本的にはコンクリートのひび割れは許容する設計である。したがって、先述のように高水圧による引張応力と水圧脈動による繰返し応力が同時

に作用するような条件下においては、コンクリートにひび割れが発生する可能性も高く、さらには疲労による鉄筋とコンクリートの付着性能の低下やひび割れの進展が生じ、構造物の耐荷性能や防振性能、あるいは耐久性の問題が顕在化することが懸念される。

鉄筋とコンクリートの付着疲労に関する過去の研究としては、中須らの実験¹⁾などが参考となるが、一般的な土木構造物で考えられる数 Hz の繰返し荷重を想定したものが多く、ここで対象とするような高振動数領域の研究は限られている。そこで本研究では、引張応力を受ける RC 構造物の付着疲労性状を把握することを目的として、RC 一軸試験体に高振動数までの繰返し荷重を作用させる引張疲労試験を行い、その結果に基づいて付着応力の疲労による低下を定量的に評価することを試みた。

2. 実験概要

実験は、ケーシング廻りの RC 構造物の応力状態を簡便的に模擬するため、断面中央に鉄筋を配した角柱 RC

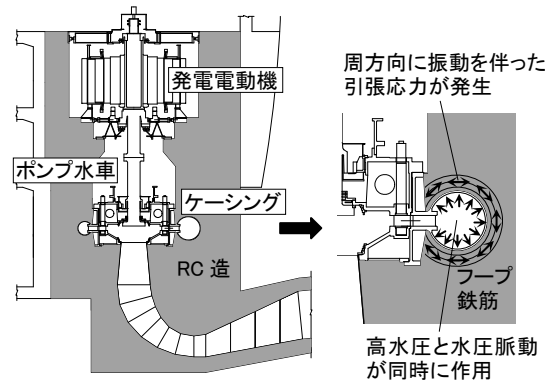


図-1 揚水発電所概要図（縦断図）

*1 東電設計(株) 土木本部耐震技術部 (正会員)

*2 東京電力(株) 建設部土木・建築技術センター地下構造物技術グループ

*3 元東電設計(株) 土木本部耐震技術部 (現日中コンサルタント(株) 耐震解析部) 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合と材料試験結果

粗骨材最大寸法[mm]	スランプ [cm]	W/C [%]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	単位量 [kg/m ³]					圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
					W	C	S	G	減水剤		
20	18	73	4.5	44	194	266	776	992	2.66	28	2.6

試験体を用いた一軸引張疲労試験とした。また、実機の配筋状態や荷重状態を調査し、鉄筋比や繰返し载荷の振動数を実験パラメータとした。

2.1 使用材料

表-1 にコンクリートの配合、ならびに試験時のコンクリート強度を示す。コンクリートには、普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を用いた。目標圧縮強度は、材令 28 日強度で 24 N/mm² としたのに対して、試験開始時の圧縮強度は 28N/mm²、引張強度は 2.6N/mm² であった。疲労試験では、材料の強度と併せて乾湿状態が疲労強度に大きな影響を及ぼすため、材料強度や乾湿状態のばらつきを小さくする工夫が必要となる。揚水発電所の支持コンクリートは非常にマッシュであるため、実機のコンクリート内部の状態を再現するには、水分が逸散しない状態で管理する方法が適切であると考え、温度 20±2℃の管理条件で試験開始まで封緘養生として試験に供することとした。また、水セメント比は 73%と大きい、細骨材に砕砂を用いたことなどによりワーカビリティは良好であり、ブリーディングも小さく抑えることができた。なお、コンクリートの打ち込みは、試験体を水平に行っている。

使用した鉄筋は呼び名 D16 の異形鉄筋であり、力学的性質は表-2 に示すとおりである。

2.2 試験体

角柱 RC 試験体の概要を図-2 に示す。試験体は軸方向の長さをできるだけ大きくすることによってひび割れの分散性が考慮され、より平均的な付着性状が得られる。したがって、载荷装置に設置できる最大寸法として、RC 部分の長さを 800mm、両端の鉄筋部分の長さをそれぞれ 95mm とし、全体の長さを 990mm とした。また、実機の支持コンクリートの鉄筋比がおおよそ 0.6%~3.5% の範囲であることを考慮し、試験体の軸方向鉄筋比 p_t を 1.0%と 3.0%とした。試験体には呼び名 D16 の異形鉄筋を用いるため、試験体断面寸法は、 p_t が 1.0%、3.0%についてそれぞれ 140mm×140mm、80mm×80mm となる。

2.3 载荷・計測方法

载荷は最大加振力±100 kN の高サイクル疲労試験機によって行った。载荷方法は、図-3 を参照して以下の手順に従う。図の縦軸は作用荷重、横軸の変位は試験体の伸び量である。

STEP1：初期クラックが発生するまで静的に荷重を増加させた後、荷重が安定する A 点まで载荷を続け、そこで一旦除荷し残留変位を確認する。

表-2 鉄筋の力学的性質

呼び名	公称断面積 [mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]	降伏応力 [N/mm ²]
D16	198.6	1.85×10 ⁵	395

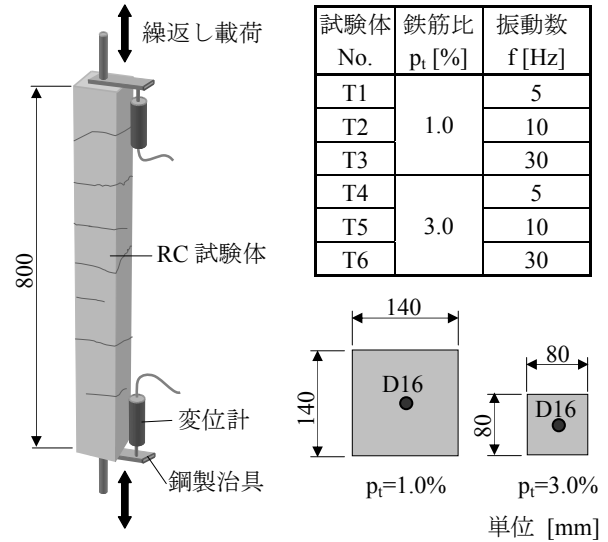


図-2 試験体の概要と検討ケース

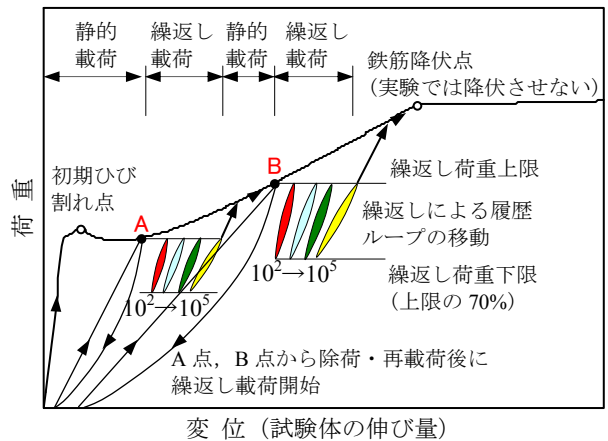


図-3 载荷手順

STEP2：再载荷後 A 点の荷重を上限、その 70%の荷重を下限として繰返し载荷を行う。このときの载荷振動数 f は 5Hz, 10Hz, 30Hz とし、繰返し回数 $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ 回ごとに試験体の伸び量を測定する。

STEP3： 10^5 回の载荷が終了した点から除荷・再载荷を行い、RC の荷重-変位関係の包絡線に達したことを勾配の変化で確認した後、任意の B 点まで荷重を増加させる。

STEP4：B 点の荷重を上限、その 70%の荷重を下限として再び繰返し载荷を行い、STEP2 と同様の測定を行う。

繰返し荷重は 10^5 回までの荷重を 1 セットとし、鉄筋比 p_t が 1% の T1~T3 では 2 セット、3% の T4~T6 では 3 セット行うものとした。これは、低鉄筋比の試験体ではひび割れの分散性が悪く、ひずみの局所化による鉄筋降伏が生じやすいことに配慮したためである。また、繰返し荷重の下限を上限の 70% としたのは、実機の水圧脈動による鉄筋ひずみ変動の実測値において、下限のひずみ、すなわち推定される下限の応力が、上限の 70% 程度であることに基づいている。

本実験において、鉄筋とコンクリートの繰返し荷重による付着性状の変化は、試験体に作用させる荷重と伸び量の関係に基づいて評価する。試験体の伸び量を測定する場合、両端の鉄筋固定部のすべりや鉄筋のみの部分の伸び量を測定した変位量から除去する必要がある。そこで、図-2 に示すように両端の鉄筋の最も RC 部分に近い位置に変位測定用の鋼製治具（厚板）を取り付け、その区間の伸び量を測定することによって、これらの影響を除去した。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ分布

図-4 に試験終了時の試験体のひび割れ分布の展開図を示す。ここでは、鉄筋比 p_t が 1.0% と 3.0% の例として試験体 T1 と T5 について示した。

図では静的荷重と繰返し荷重によって発生したひび割れを分けて示しており、繰返し荷重中にもひび割れの進展や新たなひび割れの発生が見られたことが分かる。最終的には、 p_t が 1.0% の試験体 T1, T2, T3 にはいずれも 2 本の横ひび割れが生じ、 p_t が 3.0% の試験体 T4, T5, T6 には 6~7 本の横ひび割れが生じた。このように、高鉄筋比の試験体ではひび割れの分散性が良く、低鉄筋比の試験体ではひび割れ本数が少なくひび割れ幅が大きくなる傾向が見られた。また、ひび割れは軸方向に均等に分布しており、鉄筋とコンクリートの付着は良好であったと考えられる。なお、荷重振動数の違いによるひび

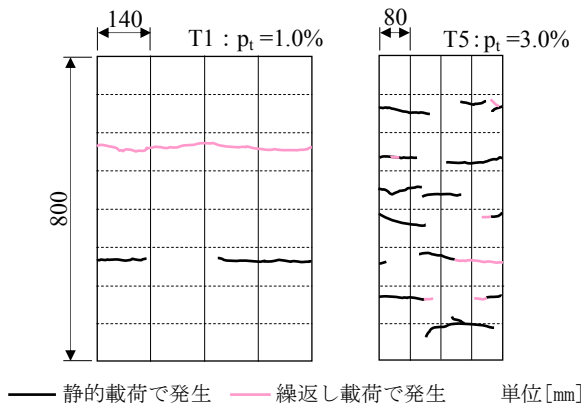


図-4 ひび割れ分布図

割れ性状の違いは見られなかった。

3.2 荷重-変位関係

実験結果で得られた各試験体の荷重 P と変位 δ の関係（以下、 $P-\delta$ 関係と称す）を図-5 に示す。図で縦軸は作用荷重 P 、横軸の変位 δ は試験体の伸び量である。 $P-\delta$ 関係には、静的荷重および除荷の経路と繰返し回数 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 回の履歴ループを示した。ただし、試験体 T3 では荷重振動数 f が 30Hz と高速であり、 10^2 回の測定がうまく行われなかったため表示していない。同様に f が 5Hz の試験体 T4 の 2 セット目でも 10^2 回の履歴ループを表示していない。

各試験体の $P-\delta$ 関係を比較すると、いずれの試験体においても、繰返し荷重が一定の条件で、繰返し回数に伴って履歴ループが右に移動していく、すなわち変位が徐々に大きくなる傾向が確認できた。これは、繰返し荷重による疲労によって鉄筋とコンクリートの付着性能が低下し、コンクリートが荷重を負担しなくなる結果、次第に鉄筋のみの剛性に近づき、試験体の伸び量が増加したためと考えられる。ただし、鉄筋比 p_t が 3.0% の試験体の方が 1.0% の試験体よりもコンクリート断面積が小さいため、 $P-\delta$ 関係に占めるコンクリート負担荷重が小さく、繰返し荷重に伴う履歴ループの移動量は小さい。なお、試験体 T1 の繰返し荷重 1 セット目の 10^4 回~ 10^5 回の区間、試験体 T3 の 1 セット目の 10^2 回~ 10^3 回の区間、試験体 T5 の 1 セット目の 10^3 回~ 10^4 回の区間では、荷重中に新たなひび割れが発生したことにより、荷重ループの移動量が大きい。また、静的荷重あるいは繰返し荷重の過程で新たなひび割れが発生したり、付着性能が低下することにより、除荷時には僅かずつ残留変位が大きくなっていることが分かる。

3.3 コンクリートの応力-ひずみ関係

次に、図-5 に示した $P-\delta$ 関係を基にコンクリートが負担する応力 σ_c と平均ひずみ ε_{ave} の関係（以下、 $\sigma_c-\varepsilon_{ave}$ 関係と称す）を算出した。図-6 に $\sigma_c-\varepsilon_{ave}$ 関係を示す。横軸に示す平均ひずみとは、試験体の伸び量を元の試験体長さで除して算出したものである。ただし、繰返し荷重中にひび割れが発生したことによって急激に増加したひずみについては、その増加分を全体のひずみ量から差し引いて補正を行っている。また、縦軸に示すコンクリートの負担応力 σ_c は、図-5 の $P-\delta$ 関係から鉄筋の負担荷重を引いて求まる荷重値をコンクリートの断面積（全断面積-鉄筋断面積）で除して算出したものであり、鉄筋とコンクリートの付着応力もこれに含まれる。なお、本実験の変位は極めて微小であり、荷重システムの初期的な不整の影響等によって、荷重初期の変位が正確に測定できていないため、鉄筋荷重を差し引く際は、ひび割れ荷重までの区間を RC 部材の弾性剛性

に基づく直線で置き換えている。また、荷重過程でひび割れの発生などによって、明らかに測定システムにぶれが生じたと判断できる場合にも、その補正を行っている。

ここでは、実験結果のうち、繰返し荷重時の履歴の変化に着目し、繰返し回数 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 回の履歴ループを図に示している。また、同図には鉄筋とコンクリートの付着作用によって徐々に応力が低減する tension stiffening モデル²⁾を示し、実験結果の妥当性を確認した。tension stiffening モデルでは、ひび割れ発生によって軟化が始まる時のひずみを 300μ (実験では $200\sim 400\mu$ 程度)、各試験体のコンクリート引張強度をシリンダー引張強度の $60\%\sim 80\%$ として実験結果に一致させている。このように試験体の引張強度が材料試験値よりも小さくなるのは、純引張試験では試験体の初期的な欠陥や乾燥収縮による内部拘束の影響が比較的強く現れやすいためと考えられる。また、出雲ら³⁾によれば、解析モデルの引張強度をシリンダー強度の $55\%\sim 70\%$ とすることで解析結果と実験結果が一致することが報告されており、今回の実験結果は妥当な範囲にあると言える。

$\sigma_c - \varepsilon_{ave}$ 関係では、各履歴ループの最大応力を結ぶ直

線の傾きがいずれのひずみレベルにおいてもほぼ同じである。また、繰返し荷重の下限値を上限値の 70% としているため、図-5 の $P - \delta$ 関係では変位が大きくなるに従って荷重振幅が大きくなっているが、 $\sigma_c - \varepsilon_{ave}$ 関係では、ひずみが大きくなるほどコンクリート応力が小さくなり剛性も低下するという非線形性を示すため、必ずしもひずみの大きさに伴ってコンクリートの応力振幅 σ_r は大きくなっていない。さらに、 σ_r は繰返し荷重中も剛性の低下により小さく変化している。一般的に応力振幅は材料の疲労性状に大きな影響を与える要因であるが、本実験の範囲において、コンクリートの応力振幅 σ_r は $0.25\text{N/mm}^2 \sim 0.52\text{N/mm}^2$ であり、各試験体で推定される引張強度 f_t に対して $0.15 \sim 0.26$ と小さい範囲の違いであるため、付着の疲労に与える影響は小さいと判断した。したがって、ここでは繰返し荷重で得られた疲労性状に対して、応力振幅の影響を考慮しないものとした。ただし、荷重が大きくなるにしたがって、繰返し荷重のひずみ振幅は大きくなっている。

3.4 疲労による付着性能の低下

図-6 に示す $\sigma_c - \varepsilon_{ave}$ 関係では、繰返し荷重による付

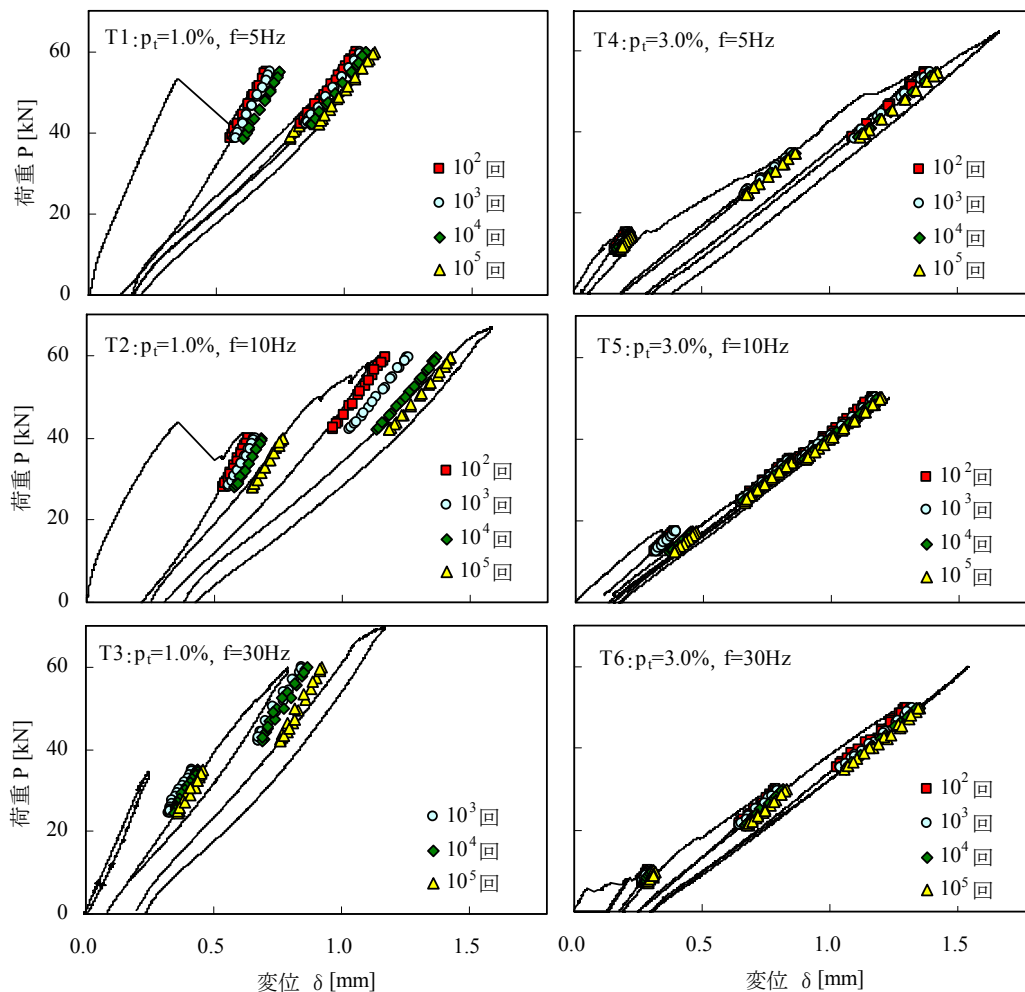


図-5 荷重-変位関係

着性能の低下によって、コンクリートが負担する応力が徐々に減少することを確認した。そこで、繰返し回数とコンクリート応力の低下の仕方との関係を定量的に評価することを試みた。

図-7は試験体 T5 を例として、繰返し回数とコンクリート応力の関係を示したものである。グラフの横軸には繰返し回数 N を対数で表示しており、縦軸にはコンクリート応力 σ_c を示している。この関係からは、繰返し回数を対数表示にした場合、コンクリート応力がほぼ線形で低下していくことが分かる。そこで、次にこの傾向を踏まえて、繰返し回数とコンクリート応力の残存率の関係を検討した。図-8は繰返し回数1回目の応力を基準として、各回数のコンクリート応力の残存率をグラフで表したものである。グラフの横軸には繰返し回数 N を対数で表示しており、縦軸にはコンクリート応力の残存率 R_{sc} を示している。

まず、実験パラメータとした鉄筋比と振動数がコンクリート応力の低下にどのような影響を与えるかを確認するため、パラメータごとにデータを分類し、それぞれに対して最小二乗法を用いて近似直線を求めた。鉄筋比

p_t の影響を見ると、 $p_t=1.0\%$ に比較して $p_t=3.0\%$ のコンクリート応力がやや低下する結果となっているが、両者のデータはそれぞれ均一にばらついており、今回の実験の範囲では、鉄筋比の影響は小さいと判断できる。また、載荷振動数 f の影響を見ると、 $f=5\text{Hz}$ と $f=30\text{Hz}$ の結果はほぼ同等であり、 $f=10\text{Hz}$ の結果ではやや応力低下が大きい。しかし、載荷振動数 f とコンクリート応力の残存率 R_{sc} の間には明確な相関は認められず、これについてもばらつきの範囲であると考えられることができる。このように、鉄筋とコンクリートの付着の疲労性状は、鉄筋比や載荷振動数にはほとんど依存しないことが明らかとなった。したがって、ここでは実験パラメータごとの分類を行わず、全てのデータを用いて繰返し回数 $\log N$ とコンクリート応力の残存率 R_{sc} の関係を直線近似した。その結果、 $\log N$ と R_{sc} の関係は、式(1)のように表すことができる。

$$R_{sc} = 1 - 0.074 \log N \quad (1)$$

ここで、 R_{sc} : コンクリート応力の残存率

N : 繰返し回数

図-8には中須らの提案式¹⁾を併せて示したが、中須らの式では、コンクリート応力の低下に及ぼす繰返し回

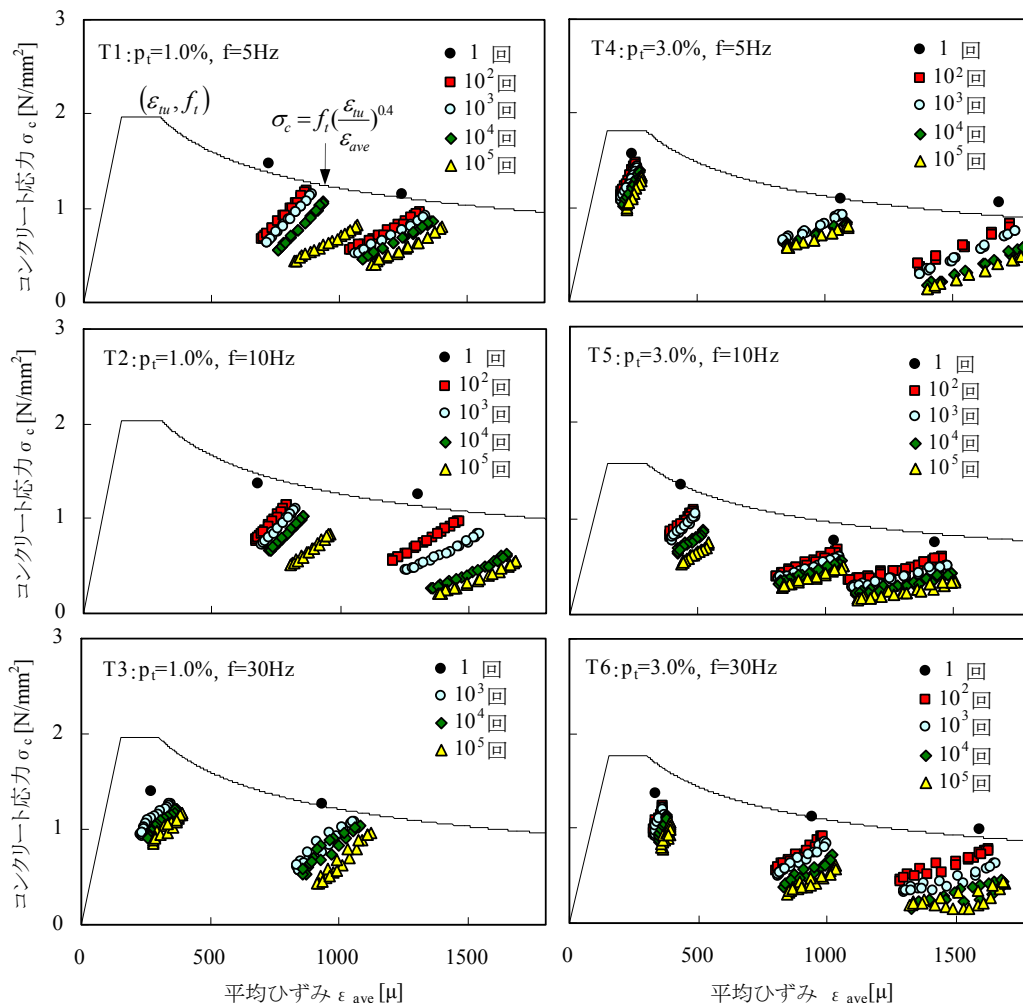


図-6 コンクリート応力-平均ひずみ関係

数の影響が式(1)よりも大きなものとなっており、今回の実験結果の下限の領域に近い。これは、本実験と載荷方法が異なることが主な要因であると思われる、中須らの実験では繰返し荷重を全振幅で与えているため、コンクリートの応力振幅、あるいはひずみ振幅の影響がより顕著に現れたものと考えられる。ひずみ振幅の影響については、本実験においても、振幅が大きい T2 の 2 セット目や T6 の 3 セット目の応力低下が大きく、振幅が小さい T3, T4 の 1 セット目では応力低下が小さい傾向である。

そこで、本実験の $\log N$ と R_{sc} の関係にひずみ振幅の影響を考慮してみる。図-9 は各繰返し載荷の初期 (10^2 回時) のひずみ振幅 ε_r と、 $\log N$ と R_{sc} の関係を表す近似直線の勾配の関係である。データのばらつきはやや大きいものの、ひずみ振幅が大きいほど負の勾配が大きくなる、すなわちコンクリート応力の低下が顕著になる傾向が現れており、両者の関係は同図に示すような直線で近似される。したがって、 $\log N$ と R_{sc} の関係は、ひずみ振幅 ε_r の影響を考慮して式(2)のように表すことができる。

$$R_{sc} = 1 - (0.00020\varepsilon_r + 0.034)\log N \quad (2)$$

ここで、 ε_r : 繰返し載荷のひずみ振幅 [μ]

図-9 においても、中須らのデータを参考値として示したが、報告¹⁾よりひずみ振幅を約 500μ と推定すると、概ね今回の結果と整合していることが分かる。ただし、今回の実験結果では、データのばらつきが比較的大きいため、式の適用にあたっては、データの上限と下限を考慮した検討を行うべきである。

4. まとめ

引張応力と高振動数の繰返し応力が同時に作用するケーシング周辺コンクリートの状態を模擬した一軸引張疲労試験の結果から、以下のような結論を得た。

- 1) 繰返し回数 $\log N$ に伴ってコンクリートが負担する応力がほぼ線形に低下する傾向を確認した。
- 2) 付着の疲労性状は、鉄筋比や載荷振動数にはほとんど依存しないことを明らかにした。
- 3) 繰返し回数 $\log N$ とコンクリート応力の残存率 R_{sc} の関係をひずみ振幅 ε_r の影響を考慮して定式化したことにより、初期応力とひずみ振幅の状態、そして繰返し回数分かれば、構造物の付着低下領域やひび割れ進展領域を推定できる可能性が見出せた。

以上の検討結果は、大型揚水発電所の支持コンクリートに対して、付着性能の低下やひび割れの進展による、将来的な耐荷性能や防振性能、あるいは耐久性の問題を検討するための手法として活用することが期待できる。

参考文献

- 1) 中須 誠, 岩立次郎: コンクリートと鉄筋の付着力

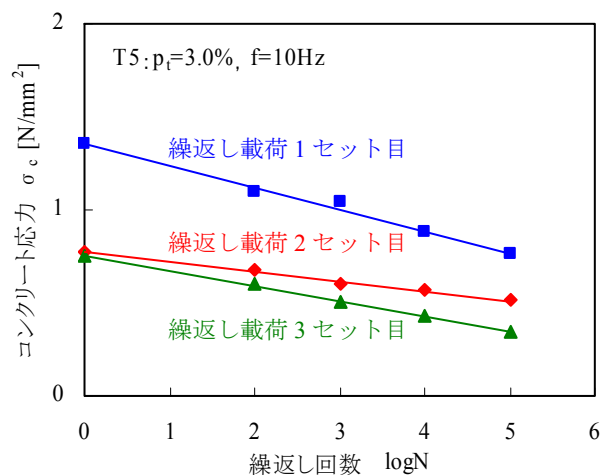


図-7 繰返し回数とコンクリート応力の関係

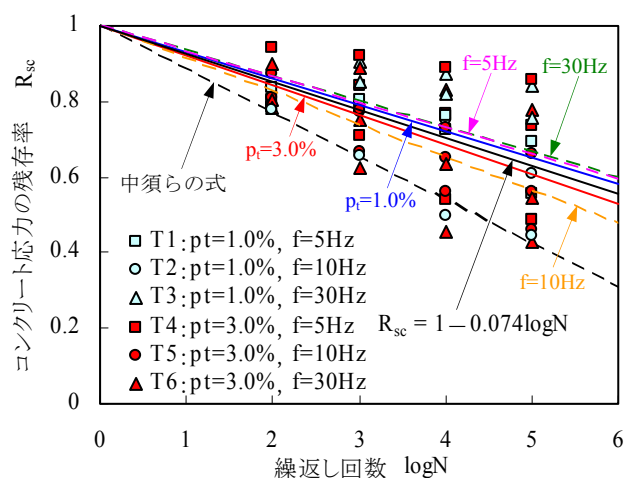


図-8 繰返し回数とコンクリート応力の残存率の関係

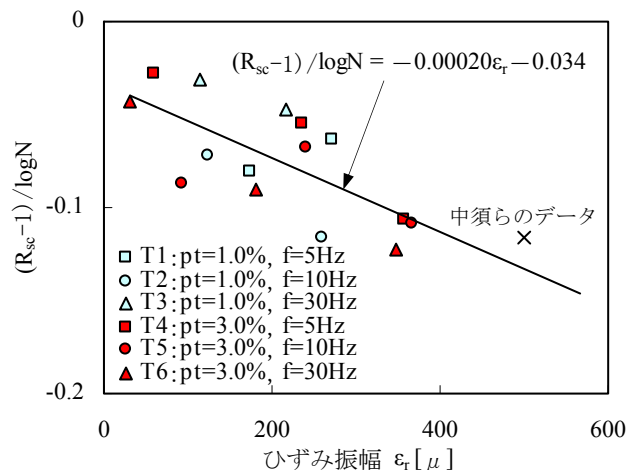


図-9 ひずみ振幅と $(R_{sc}-1)/\log N$ の関係

の疲労に関する研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.852-853, 1996.9

- 2) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
- 3) 出雲淳一, 申 鉉穆, 前川宏一, 岡村 甫: 正負繰返し面内応力下における RC 板要素の解析モデル, 土木学会論文集 第 408 号/V-11, pp.51-60, 1989.8