

論文 RC はりの耐疲労性に及ぼす環境温度および含水状態の影響

皆川 翔平*1・子田 康弘*2・岩城 一郎*3

要旨: 種々の環境要因が RC はりの耐疲労性に及ぼす影響のなかで、低温環境下や含水状態が RC はりの耐疲労性に及ぼす影響を評価した研究例は極めて少ない現状にある。本研究では、環境温度とコンクリートの含水状態に着目した RC はりの高サイクル疲労試験を実施し、耐疲労性を実験的に検討した。その結果、常温環境は飽水状態の RC はりで耐疲労性が低下したが、低温環境では常温の気乾状態の RC はりと耐疲労性に大差はなかった。しかし、供試体の疲労破壊形態は、常温環境では主鉄筋の疲労破断であったのに対して、低温環境では上縁コンクリートの圧壊となり、RC はりが凍結することによって破壊モードが変化することを示した。

キーワード: RC はり、耐疲労性、低温環境、含水状態

1. はじめに

RC はりの耐疲労性に関しては、これまで多くの研究機関で実験的にも解析的にも研究が行われ、現象の解明が進められてきた¹⁾。その中には、河川構造物や海洋構造物に着目した水中疲労試験もある。この RC はりによる水中疲労試験より、水中圧縮疲労試験の結果^{2),3)}同様、空気中よりも水中において耐疲労性が低下する^{3),4)}ことが明らかになっている。一方で、実構造物に着目した場合、東北地方のような積雪寒冷地域においては、コンクリートの含水状態により氷点下において内在水分が凍結する可能性が考えられるため、常時疲労作用を受ける部材の耐疲労性を評価するにあたっては、環境温度の影響も検討されるべきと考えられる。しかし、低温環境下において含水状態が RC はりの耐疲労性に及ぼす影響を体系的に評価した研究例は極めて少ない現状にある。当研究室では、任意の温度条件下で静的および疲労の载荷が可能な環境温度制御式万能载荷試験装置⁵⁾を保有しており(図-1 参照)、円柱供試体を用いた低温環境下における気乾状態および含水状態のコンクリートの圧縮疲労試験を行った⁶⁾。その結果、低温環境下において含水率が比較的高い状態におけるコンクリートは、耐疲労性が低下するという傾向を示した。つまり、コンクリートの耐疲労性は、環境温度と含水状態の影響を受けることが確認された。そこで本研究では、環境温度とコンクリート中の含水状態に着目した RC はり供試体による静的载荷試験と高サイクル疲労試験を実施し、RC はりの耐疲労性を実験的に検討した。この実験では、含水状態の影響評価にあたり、既往の研究で行われている水中疲労試験^{2),3),4),7)}に依らず、気中において含水状態を制御し、所定の含水量以上の水の侵入を絶ち载荷試験を実施したことも特徴である。

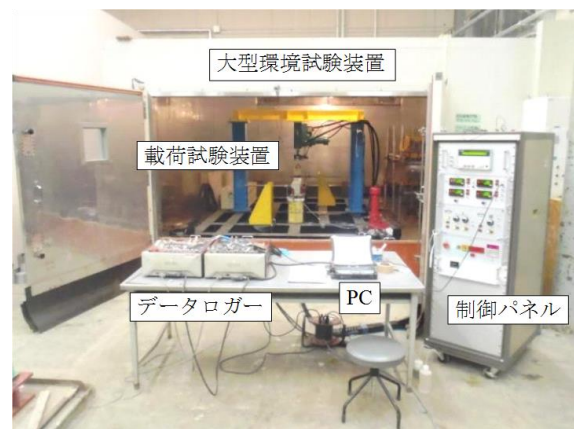


図-1 環境温度制御式万能载荷試験装置

表-1 実験条件

実験条件	载荷試験方法		温度条件		含水状態	
	静的 载荷 S	疲労 载荷 F	常温 N	低温 L (-20℃)	気乾 d	飽水 s
S-N-d	○		○		○	
S-N-s	○		○			○
S-L-s	○			○		○
F-N-d		○	○		○	
F-N-s		○	○			○
F-L-s		○		○		○

2. 実験概要

2.1 実験条件

表-1 に実験条件を示す。载荷試験方法は、静的载荷(S)と疲労载荷(F)の2条件、環境温度を実験室内の常温(N)環境と環境温度試験装置内を-20℃とした低温(L)環境の2条件、およびコンクリート中の含水状態を、含水率を約50%とした気乾(d)状態と飽水(s)状態の2条件とする。これらを組み合わせた合計6条件を設定した。なお、低

*1 日本大学 工学研究科 博士前期課程 (学生会員)

*2 日本大学 工学部土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
								AE減水剤	AE剤
20	69.0	4.5	48.0	170	246	899	1000	3.696	0.004

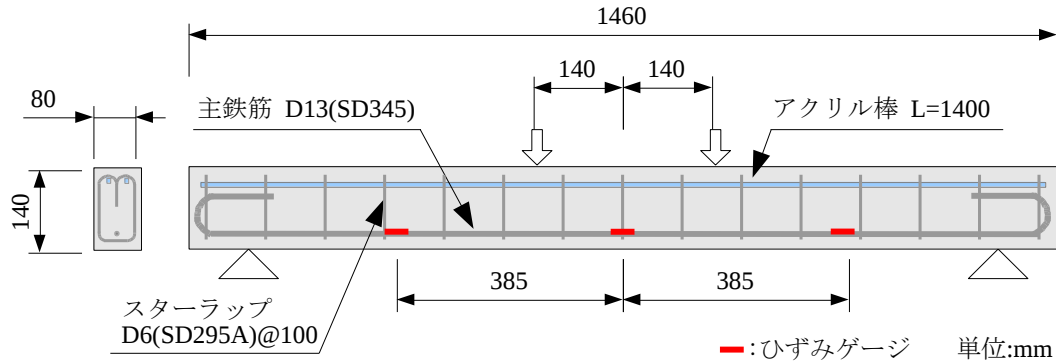


図-2 RC はり供試体の概要

温(L)の-20℃は、本試験装置の最低温度より設定した。

2.2 供試体概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³、比表面積 3310cm²/g)である。骨材は、細骨材には砕砂(表乾密度 2.65g/cm³、吸水率 1.56%)、粗骨材には碎石(最大寸法 20mm、表乾密度 2.72g/cm³、吸水率 0.67%)を使用した。また、混和剤には、リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体の AE 減水剤とアルキルエーテル系の AE 剤を用いた。表-2 にコンクリートの配合を示す。

(2) 供試体形状

図-2 に、実験に使用した RC はり供試体の概要を示す。この供試体は、「続・材料劣化を生じたコンクリート構造物の構造的な性能」⁸⁾における「ベンチマークテスト」(以下、BMT)で使用された RC はり供試体と同じ仕様である。この RC はり供試体は、様々な材料劣化が RC 部材の構造的な性能に及ぼす影響を評価するために考案された供試体であり、共通試験用に位置付けられているため、これを採用した。供試体寸法は、長さが 1460mm、幅が 80mm、高さが 140mm であり、主鉄筋には D13(SD345)を使用しており、有効高さは 113.5mm である。また、破壊モードを曲げ破壊に制御するため、スターラップとして D6 (SD295A)を 100mm 間隔で配置している。供試体の作製にあたっては、主鉄筋のかぶり(20mm)をスペーサーにより確保し、コンクリートを型枠に 2 層に分けて打込み、各層バイブレーターを用い締固め、金ごてを用いて上面仕上げを行った。供試体の脱型と養生は、打込み後湿布養生を行い、24 時間経過した後脱型し、材齢 7 日まで現場水中養生を行った。その後は荷重試験まで実験室内に

静置した。供試体は、実験に必要な供試体数量を数回に分けて製造した。製造バッチ毎に圧縮強度試験を行い、圧縮強度を確認することで、バッチ間の強度管理を行った。

2.3 RC はりの水分調整方法

供試体の含水管理については、気乾(d)状態の供試体の場合、試験開始時まで実験室内に静置することで含水率が約 50%になり、当実験室内におけるコンクリートの気乾状態と解釈された。飽水(s)状態は、予め供試体を水中浸漬し水の侵入による質量の増加が収束した状態とした。飽水(s)状態に達した後の処置は、常温(N)、低温(L)ともに荷重試験中のコンクリート中の水分の逸散を防止するために、直ちに表面にロウを塗布した。なお、ロウの塗布による水分の逸散防止効果は、同配合のコンクリートの円柱供試体を用い、質量管理のもと水分逸散率を評価した結果、質量変化が極めて小さいことを事前に確認しており、荷重中の水分逸散は防止していると判断している。なお、常温(N)の荷重中は供試体表面を常に観察し、ロウのひび割れや剥離が発見されればロウを上塗りした。

2.4 荷重試験方法

荷重試験は、常温(N)は実験室内、低温(L)は大型環境試験装置内にて実施した。なお、低温における温度管理は、環境試験装置の設定温度-20℃に対して供試体付近で-20℃±2℃とした。また、低温(L)の荷重試験にあたっては、供試体を荷重前 24 時間程度、環境試験装置内で静置し、供試体内部まで十分に凍結させた後に実験を行った。荷重試験方法は、スパン長を 1260mm、等曲げ区間 280mm とする対称 2 点曲げ荷重方式とした。荷重手順は、温度条件と含水状態が同じ静的荷重(S)および疲労荷重(F)を 1 組として扱い、まず静的荷重(S)を実施し曲げ耐力を測

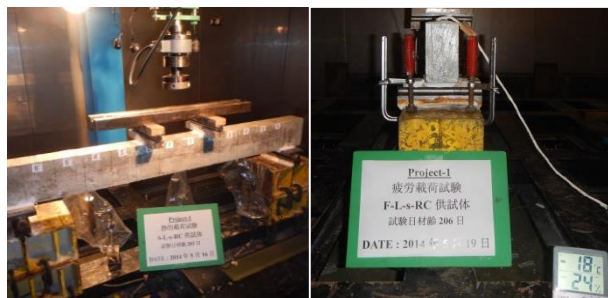


図-3 低温(L)における荷重試験状況

定した後、疲労荷重(F)を行う手順とした。疲労試験における荷重設定は、静的荷重(S)で得られた主鉄筋降伏時の荷重荷重の 70%を上限荷重、10%を下限荷重とした。荷重速度は 5Hz であり、荷重波形として正弦波を与えた。計測項目は、ロードセルによって計測した荷重、はりの中央変位、主鉄筋のひずみとし、荷重試験中は供試体のひび割れ観察を実施し、疲労試験では疲労破壊までの繰り返し荷重回数を記録した。なお、主鉄筋のひずみゲージの貼付間隔は、供試体中央と中央より 385mm の位置(図-2 参照)である。図-3 には、低温(L)の荷重試験状況を示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度試験の結果

図-4 に、各温度条件と含水状態における圧縮強度試験結果を示す。なお、荷重試験の開始材齢は、115 日である。図より、圧縮強度は平均値で、常温(N)の場合、N-d が 33.4MPa であり、N-s が 25.3MPa と気乾(d)状態よりも飽水(s)状態の方が圧縮強度は低くなるというコンクリートの特性⁹⁾が表れていた。これに対して低温(L)の場合は、L-d が 32.6MPa であり N-d と同程度であるが、L-s は 47.5MPa と N-d に対して L-s が約 1.4 倍の圧縮強度と、低温で含水率が高いと圧縮強度が高くなる結果を示し、当研究室の既往の結果⁶⁾と同様であった。図-5 に、ヤング率を示す。図より、平均値は、常温(N)では、N-d が 28.6GPa、N-s が 30.2GPa と同程度であったが、低温(L)の場合は、L-d が 28.0GPa、L-s が 38.5GPa と、L-s は N-d に対して約 1.3 倍という結果であった。このように、低温(L)では、コンクリートの間隙中の水分が凍結し、空隙が強度を持つ固体になることで¹⁰⁾物性値が変化すると考えられる。本実験の範囲内では、圧縮強度試験における環境温度と含水状態の影響は、常温(N)では圧縮強度、低温(L)では圧縮強度およびヤング率に表れた。

3.2 静的荷重試験の結果

(1) 荷重-変位関係(S)

図-6 に、静的荷重(S)の荷重-変位関係を示す。図中には、BMT における健全な RC はりの実験結果を比較のた

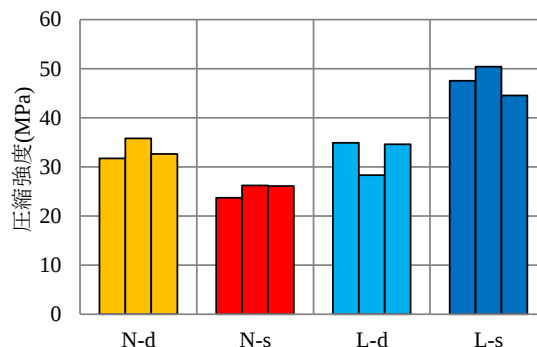


図-4 圧縮強度の比較

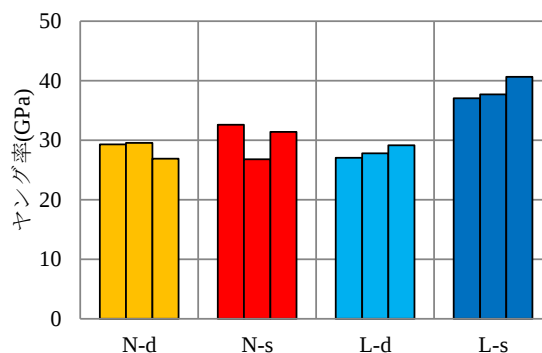


図-5 ヤング率の比較

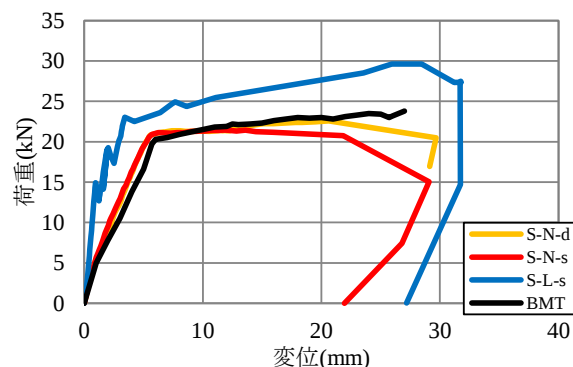


図-6 荷重-変位関係(S)

表-3 静的荷重試験(S)の結果

実験条件	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時中央変位 (mm)	破壊形態
S-N-d	20.1	22.6	20.62	上縁圧壊
S-N-s	20.9	21.4	13.60	上縁圧壊
S-L-s	23.0	29.6	28.46	載荷点圧壊

め示した。また、表-3 には、各実験条件における静的荷重(S)の結果として、主鉄筋の降伏荷重、最大荷重、最大荷重時の中央変位、および破壊形態を示した。図より、常温(N)では、S-N-d が荷重 20.1kN、変位 5.25mm、S-N-s が荷重 20.9kN、変位 5.69mm のとき主鉄筋が降伏し、その後は変位が増加しつつ上縁コンクリートの圧壊で終局状態に至るとい曲げ破壊を呈した。最大荷重および最大荷重時の変位は、S-N-d が荷重 22.6kN で変位 20.62mm であり、S-N-s が荷重 21.4kN で変位 13.60mm となり、S-N-d に比べ S-N-s は最大荷重時の変位が多少小さい結

果を示した。また、BMTと比較すると、主鉄筋降伏荷重と主鉄筋降伏までの曲げ剛性、そして曲げ耐力は同等であり、常温(N)においては荷重-変位関係に含水状態の影響は明確には示されなかった。これに対して、低温(L)の場合は、主鉄筋の降伏が荷重 23.0kN、変位 3.41mm のとき生じ、その後も変位の増加とともに荷重も増加した。最大荷重および最大荷重時の変位は荷重 29.6kN、変位 28.46mm であり、両者とも明らかに常温(N)よりも増加した。さらに、S-L-s は、S-N-d、S-N-s よりも、主鉄筋降伏までの曲げ剛性が大きいという結果であった。このように、飽水(s)状態のコンクリートが凍結したことによる圧縮強度およびヤング率の増加(図-4と図-5)に加え、引張強度の増加¹⁰⁾が S-L-s の荷重-変位関係に影響した可能性が推察された。

(2) 供試体の曲げ破壊状況

図-7 に、荷重試験終了後の曲げ破壊状況を示す。図より、S-N-d の曲げひび割れ発生状況は、荷重と変位の増加に伴い、支点間においてひび割れが分散するという典型的な曲げ破壊形態であった。これに対し、S-N-s は、S-N-d と比較すると、ひび割れは曲げ区間のみに発生し、ひび割れの本数も減少するという結果を示した。S-L-s についても S-N-s と同様に曲げ区間において数本のひび割れしか発生しておらず、終局時は荷重点直下で圧壊するという破壊を示した。S-N-s におけるひび割れ分散性の低下は、S-N-d と曲げ剛性はほぼ等しいことから、飽水(s)状態であるため曲げひび割れ面における水分によって表面エネルギーが減少し、ひび割れの進展が促進⁷⁾されることで曲げ区間のみひび割れが発達したものと推察された。これに対して、S-L-s の場合は、曲げ剛性の増加と、凍結によって引張強度も増加したことで曲げひび割れが発生しにくい状態にあり、ひび割れが生じやすい曲げ区間付近のみにひび割れが集中したものと考えられた。

3.3 疲労試験の結果

(1) 破壊回数の比較

表-4 に、疲労荷重(F)の結果として疲労破壊に至った回数および疲労破壊形態を示した。図-8 に、疲労破壊回数の比較を示す。図より、各供試体の疲労破壊に至った回数は、F-N-d が約 120 万回であったのに対し、F-N-s は約 45 万回という結果であった。このことから、水中疲労試験の結果^{3),4)}と同じく、常温(N)の気中で飽水(s)状態を保つような状況も耐疲労性を低下させる要因になると考えられた。これに対して F-L-s は、100 万回であり、F-N-d と比較すると、飽水(s)状態で間隙中の水分が凍結したことによるコンクリートの特性は現れず、疲労破壊回数には明確な違いは認められなかった。円柱供試体を用いた圧縮疲労試験⁶⁾では、低温(L)環境の飽水(s)状態は、

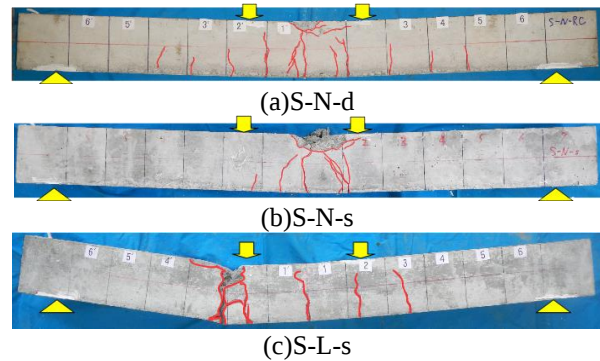


図-7 供試体の曲げ破壊状況(S)

表-4 疲労荷重試験(F)の結果

実験条件	応力比 (%)	繰返し回数 N	破壊状況
F-N-d	10~70	1,202,923	主鉄筋破断
F-N-s		452,802	主鉄筋破断
F-L-s		1,000,000	上縁圧壊

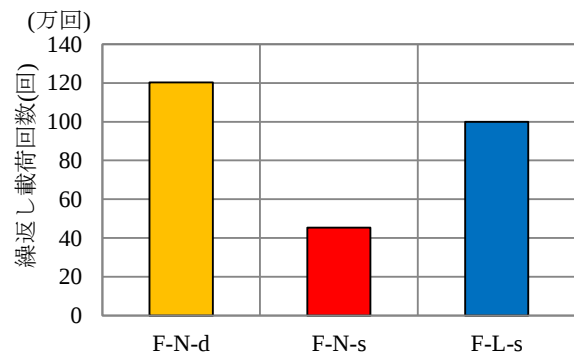


図-8 疲労破壊回数の比較

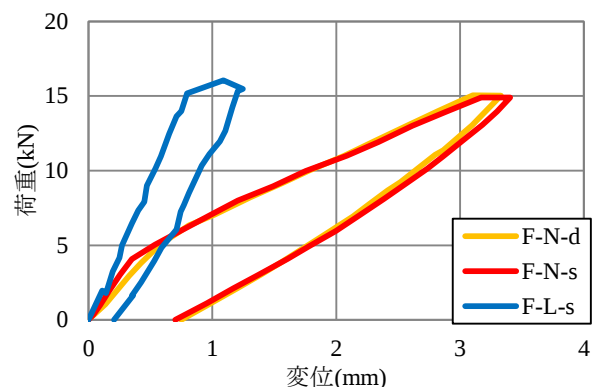


図-9 荷重-変位関係(F)

耐疲労性を低下させる結果を得ている。すなわち、低温(L)で飽水(s)状態の RC は、静的な曲げ耐力は常温(N)よりも増加するが、疲労作用下においては圧縮領域のコンクリートの耐疲労性の低下により、F-N-d よりも耐疲労性は向上しないと考えられた。

(2) 繰返し荷重 1 回目の荷重-変位関係(F)

図-9 に、繰返し荷重 1 回目における荷重-変位関係(F)を示す。各供試体の荷重初期における荷重増加時の荷重-変位関係は、静的荷重試験(S)と同様の推移であることが

確認された。また、除荷時の残留変位は、常温(N)の方が低温(L)よりも大きい傾向であった。

(3) 活荷重たわみ-繰返し载荷回数

図-10 に、疲労载荷(F)における活荷重たわみと繰返し载荷回数の関係を示す。図より、まず、F-N-d は、繰返し载荷回数が増加しても、活荷重たわみは载荷初期から破壊直前まではほぼ変化がなく、破壊直前に急増するという結果であった。次に、F-N-s は、F-N-d よりも活荷重たわみが大きく、若干ではあるが载荷回数の増加とともに、活荷重たわみが増加し、疲労破壊に至った。F-N-d と F-N-s の活荷重たわみの違いは、気中よりも水中の方が活荷重たわみ量は大きいという報告⁴⁾があることから、含水状態の違いが影響していると考えられた。これに対して F-L-s は、常温(N)に比べ载荷初期の活荷重たわみが小さく、その後载荷回数が増加するにつれて活荷重たわみが緩やかに増加し、疲労破壊直前には急増するという結果を示した。ひび割れの観察結果と照らし合わせると、常温(N)は繰返し载荷回数 1 回目において曲げひび割れの発生位置と本数がほぼ定まり、それらが徐々に上縁側に進展して疲労破壊に至るのに対して、F-L-s は繰返し载荷回数 1 回目にひび割れは発生しておらず、繰返し载荷回数の増加に伴いひび割れの本数が増加したことから、このような活荷重たわみの推移を示したと考えられた。

(4) 供試体の疲労破壊状況

図-11 に、疲労载荷(F)における供試体の疲労破壊状況を示す。各供試体の疲労破壊に至った際の破壊形態は、常温(N)の場合、F-N-d、F-N-s とともに主鉄筋の疲労破断によるものであった。また、F-N-d と F-N-s の曲げひび割れの発生状況を比較すると、F-N-s の曲げひび割れの本数は、F-N-d よりも少ない。このことから、RC はりの疲労载荷(F)においても静的载荷(S)と同様に、コンクリート中の水分による表面エネルギーの減少が曲げ区間で生じたひび割れを発達させたと考えられた。このひび割れ分散性の低下は、ひび割れを横切る鉄筋の引張応力を増加させ、結果的に鉄筋の疲労破断に至る疲労破壊回数を低下させたと考えられた。これに対して低温(L)の場合は、常温(N)とは異なり、鉄筋は破断せず上縁コンクリートの圧壊で疲労破壊に至るという異なった破壊モードの変化が確認された。3.3(1)で述べたように、低温(L)環境においては、飽水(s)状態のコンクリートの耐疲労性が低下する。これが部材レベルにおいては、圧縮応力作用域のコンクリートの耐疲労性の低下につながり、本実験では上縁コンクリートの圧壊という破壊モードの変化が生じたと考えられた。

本実験における RC はりの耐疲労性は、環境温度と含水状態の影響を受け、常温環境では飽水状態にある場合ひび割れの分散性が低下し、鉄筋の疲労破断までの载荷

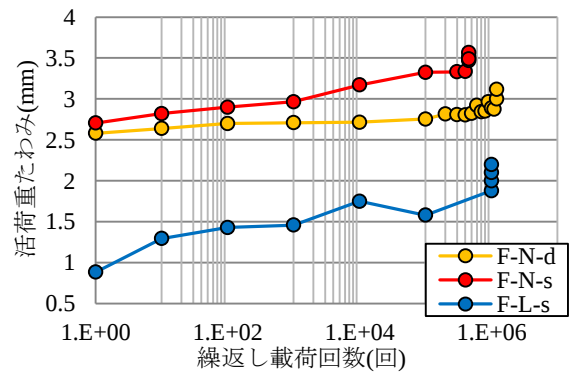


図-10 活荷重たわみ-繰返し载荷回数

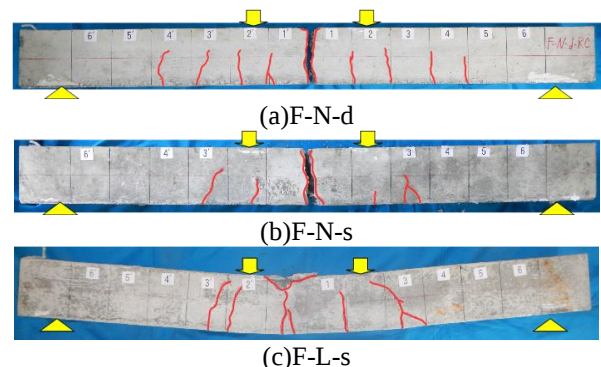


図-11 供試体の疲労破壊状況 (F)

回数が少なくなる。これに対して低温環境下は、飽水状態の RC はりが凍結することで圧縮側コンクリートの疲労破壊という常温環境下とは異なる破壊形態により疲労破壊に至るということが明らかになった。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 円柱供試体を用いた圧縮強度試験の結果、気乾状態に比べ飽水状態にあるコンクリートは、常温では圧縮強度が低下し、低温では圧縮強度とヤング率の両方が増加した。
- (2) RC はりの静的载荷試験の結果、常温環境で飽水状態にある場合、最大荷重時の変位が小さくなり、ひび割れ分散性が低下した。一方、低温環境で飽水状態にある場合は、凍結の影響で曲げ剛性と、最大荷重および最大荷重時の変位が増加した。このように、環境温度や含水状態によって、常温における気乾状態の RC はりとは異なる挙動が生じる可能性が示された。
- (3) RC はりの疲労試験の結果、常温環境で飽水状態の場合、耐疲労性の低下が示された。このことから、飽水状態は、水中疲労試験の結果と同様に、RC はりの耐疲労性の低下要因になりうると考えられた。供試体の破壊形態は、常温環境下における供試体は主鉄筋の疲労破断であったのに対して、低温環境で凍結した供試体は上縁コンクリートの圧壊に破壊

モードが変化した。これより、環境温度と含水状態により RC はりの疲労破壊形態は異なる可能性が示された。

今後は、1 条件当たりの供試体数を増やし、部材レベルにおけるこの種の影響の再現性を確認するとともに、版状の部材においても評価する予定である。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 26420465 の助成を受けたものです。また、供試体の作製および载荷試験は、平成 25 年度日本大学工学部コンクリート工学研究室卒業研究生 横山友康氏(現福島県庁)の助力を得ました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば西脇敬一，大屋戸理明，長谷川雅志，永岡高：鉄筋が腐食した RC 梁の疲労性状，コンクリート工学論文集，Vol.24，No.1，pp.783-788，2002
- 2) 藤本将行，佐藤靖彦，角田興史雄：水中におけるコンクリートの圧縮疲労性状に関する一考察，コンクリート工学論文集，Vol.22，No.3，pp.205-210，2000
- 3) 六車熙，張耀凱，安井雅明：水中でのコンクリート系部材の低サイクル疲労，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.4，pp.473-476，1982
- 4) 西林新蔵，井上正一，大谷公行：水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.633-638，1987
- 5) 皆川翔平，宮田祥平，子田康弘，岩城一郎：任意の温度条件下における RC 部材の万能载荷試験方法の考案，平成 24 年度土木学会東北支部技術研究発表会，V-22，2013
- 6) 横山友康，皆川翔平，子田康弘，岩城一郎：環境温度と含水状態がコンクリートの耐疲労性に及ぼす影響，平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会，V-32，2014
- 7) 松下博通，尾上幸造：セメント硬化体内部空隙中の液体の表面張力が圧縮強度に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，第 17 巻第 1 号，2006.1
- 8) 土木学会：続・材料劣化を生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 85.2009.5
- 9) 岡島達雄，一瀬賢一：コンクリートの強度および弾性定数の含水率依存性，セメント技術年報，36，pp.211-213，1982
- 10) 後藤幸正，三浦尚：極低温下における鉄筋コンクリート部材の性質に関する研究，土木学会論文集，No.285，pp.121-134，1979