



私の研究

水分と低温とコンクリート ～強度は環境によって変化する！～

子田 康弘 (こだ やすひろ)

日本大学工学部土木工学科
准教授



1. はじめに

鉄筋コンクリートでできた柱や梁（部材）が繰り返し力を受ける（疲労）とき、部材の丈夫さは部材を構成する鉄筋とコンクリートの疲労に対する強度の大きさの影響（耐疲労性）を受けます。このうち、コンクリートの耐疲労性は、コンクリート中の水の量（含水状態）により大きく異なり、特に水中において圧縮力が作用する下での耐疲労性は空気中で乾燥した状態よりも低下し¹⁾、この疲労強度の低下割合は20%ほど小さくなる²⁾ことが実験的に明らかにされています。また、コンクリートの静的（ゆっくりと破壊するまで荷重を増加させること）な圧縮強度は、環境温度の影響を受け、氷点下では温度低下や含水量の増加に応じて強度が増加する³⁾とされています。

しかし、0℃よりも低い低温の環境下において含水状態がコンクリート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ります。当研究室では、世界的にも珍しい任意の環境温度下で静的および疲労の荷重が可能な環境温度制御式万能荷重試験装置を保有しています⁴⁾。そこでこの荷重試験装置を使用し、環境温度とコンクリート中の含水状態に着目した円柱供試体による静的圧縮強度試験と高サイクル疲労試験を実施し、コンクリートの耐疲労性を実験的に検討した研究について述べます。

2. 実験の概要

表-1に、研究を進めるための実験条件を示します。荷重試験方法は、静的荷重（S）と疲労荷重（F）の2条件です。環境温度は実験室内の常温（N）環境と環境試験装置内を-20℃とした低温（L）環境の2条件としました。また、コンクリート中の含水状態は、自然な乾燥状態（気乾状態）の含水率を変え、含水率を約50%とした乾燥状態Ⅰ（d1）と、約75%とした乾燥状態Ⅱ（d2）、およびコンクリート中が水で満たされた状態（飽水状態）（s）の3条件としました。よって、実験条件は、これらを組み合わせた合計12条件になります。

供試体の形状は、図-1に示す直径75mm×高さ150mmの円柱です。供試体の作り方は、コンクリートを鋼製型枠に2層に分けて詰め、各層6回ずつ突き棒で突いた後に木槌で叩き、最後に金ごてを用い上面仕上げを行いました。供試体の脱型と養生は、打込み後、湿布養生を行い、24時間後に脱型し、材齢7日まで水中養生としました。その後は、材齢28日まで試験室内に静置しました。製造したコンクリート毎に材齢28日の圧縮強度試験を行い、圧縮強度を確認することで、製造したコンクリート間のばらつきがないかの管理を行いました。

コンクリート中の含水率の調整は、材齢28日から実験条件毎に順次実施したものです。具体的な

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℃)	乾燥状態 I d1 (50%)	乾燥状態 II d2 (75%)	飽水状態 s (100%)
S-N-d1	○		○		○		
S-N-d2	○		○			○	
S-N-s	○		○				○
S-L-d1	○			○	○		
S-L-d2	○			○		○	
S-L-s	○			○			○
F-N-d1		○	○		○		
F-N-d2		○	○			○	
F-N-s		○	○				○
F-L-d1		○		○	○		
F-L-d2		○		○		○	
F-L-s		○		○			○

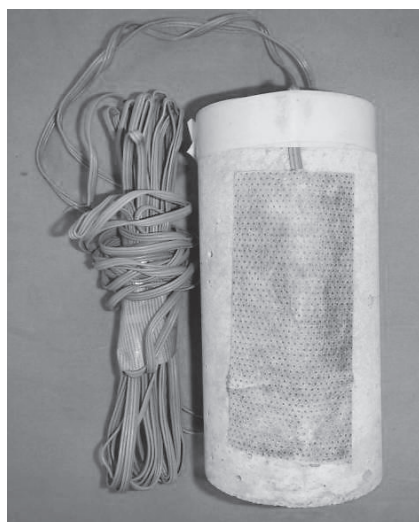


図-1 実験に用いた円柱供試体

方法は、実験条件を割り振った供試体の質量管理とコンクリート水分計（高周波容量式）を用いた水分量測定管理という2種類の管理によって、含水率を推定しました。ここでいう含水率とは、供試体が飽水状態にあるときの水分量に対する実験直前の水分量の割合です。質量管理は、乾燥状態 I（d1）の供試体の場合、脱型から試験開始時まで実験室内に静置する（21日間以上）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できます。次に、乾燥状態 II（d2）と飽水状態（s）の供試体に関しては、まず、事前に载荷試験用供試体と同じ形状で使用コンクリート（ $n = 3$ 本）の完全に乾燥した質

量（絶乾質量）の平均値を把握しました。そして、ひずみゲージを貼付した後に水中に浸漬させ、質量の増加が収束した状態になった段階で乾燥状態 II（d2）供試体を気中に移し、含水率75%となる水分逸散量を管理しました。飽水状態（s）は、質量の増加が収束した状態です。

目標含水率に達した後の処置は、载荷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、直ちに供試体の表面にロウを塗布しました。これより、長時間気中で疲労試験を行ったとしても载荷中の水分逸散はほぼ防げます。

载荷試験は、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ました。図-2は、試験装置の全景であり、表-2は、試験装置の仕様です。この装置は、環境温度が低温側で最大-30℃になり、この環境試験装置内に载荷試験装置を設置することで、载荷試験を実施すると同時に環境温度の制御が可能です。

そして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 $-20℃ \pm 2℃$ としました。また、低温（L）の载荷試験にあたっては、供試体を载荷前24時間程度、環境試験装置内で静置させコンクリート内部の水分が十分凍結するように留意しました。载荷は、同一製造日時の供試体で温度条件と含水率が同じ静的载荷（S）と疲労载荷（F）を1組として扱い、まず静的载荷（S）を実施して圧縮強度を調べます。

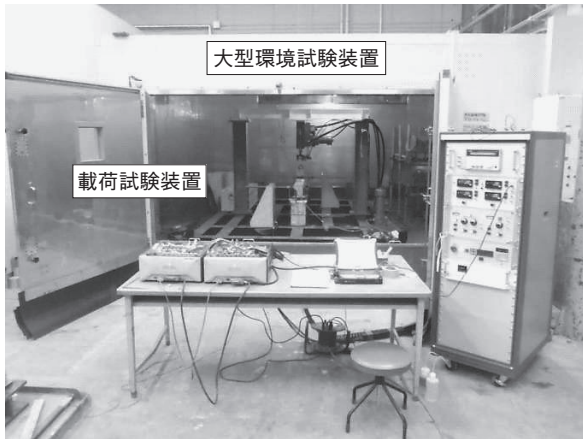


図-2 環境温度制御式万能载荷試験装置

表-2 本試験装置の仕様

大型環境試験装置	制御：定値・プログラム 温度範囲：-30℃～+80℃ 湿度範囲：40%～90% 有効寸法：W5000mm×D5200mm×H2958mm
載荷試験装置	静的载荷性能：200kN 疲労载荷性能：100kN 最大疲労载荷速度：5 Hz

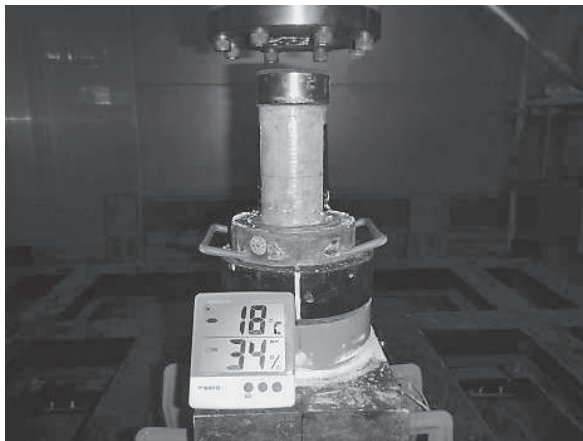


図-3 低温（L）における载荷試験状況

次に、疲労载荷（F）を行うという手順としました。なお、疲労試験における载荷速度は1 Hzです。

荷重設定は、静的载荷（S）による静的強度の70%を上限定力 S1とし、下限応力 S2は静的強度の10%とする疲労荷重としました。図-3は、低温（L）の载荷試験状況になります。

3. 常温と低温におけるコンクリート強度の変化

表-3は、静的载荷（S）による圧縮強度試験の結果として、圧縮強度（強さ）とヤング率（硬さ）、それぞれの結果およびその平均値と変動係数 CV（ばらつきの指標）になります。表より、変動係数 CV は、5%前後で供試体間のばらつきは小さいと判断できます。そこで、図-4に、実験条件による圧縮強度の比較を示します。図には試験した全供試体の数値を示します。図より、平均値で、常温（N）の場合は、d1が28.0MPaであり、d2が21.3MPa、sが23.0MPaと、含水率50%よりも75%と飽水状態という条件で見かけの強度が低くなるというコンクリートの特性が表れ

表-3 静的载荷試験（S）の結果

実験条件	n	圧縮強度 (MPa)	平均値 (MPa)	CV (%)	ヤング率 (GPa)	平均値 (GPa)	CV (%)
N-d1	1	28.6	28.0	3.9	27.1	28.4	7.8
	2	29.0			31.5		
	3	26.5			26.6		
N-d2	1	22.3	21.3	3.6	28.8	27.9	4.1
	2	20.5			26.3		
	3	21.0			28.6		
N-s	1	22.7	23.0	2.5	30.6	30.1	4.9
	2	23.8			28.1		
	3	22.5			31.6		
L-d1	1	27.3	27.3	—	31.6	31.6	—
L-d2	1	35.2	36.7	4.0	32.1	32.7	2.1
	2	38.2			33.4		
L-s	1	42.1	42.3	0.6	33.9	34.5	2.0
	2	42.2			34.0		
	3	42.7			35.4		

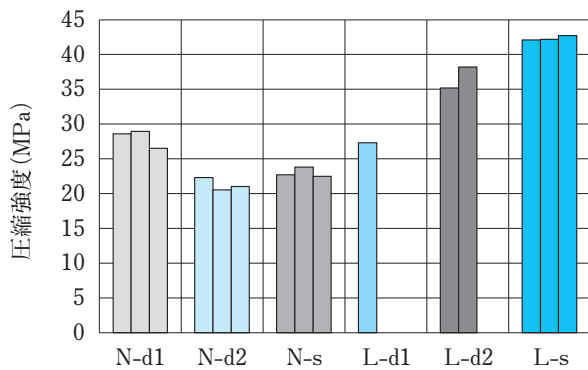


図-4 圧縮強度の比較

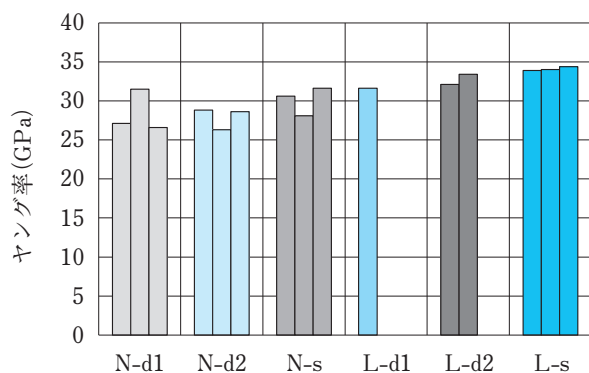


図-5 ヤング率の比較

ています。これに対して、低温（L）の場合は、d1が27.3MPaであり、N-d1と同程度ですが、d2は36.7MPa、sは42.3MPaと、N-d1に対してsが約1.5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という結果を示しております。図-5に、ヤング率を示します。図より、平均値で、常温（N）の場合は、d1が28.4GPa、d2が27.9GPa、sが30.1GPaと、ヤング率（硬さ）には明確な変化は認められません。低温（L）の場合は、d1が31.6GPa、d2が32.7GPa、sが34.5GPaと常温（N）よりも多少ヤング率が大きくなる傾向であり、N-d1に対してsは約1.2倍という結果でした。本実験の範囲内では、静的荷重（S）における低温環境と含水率の影響は、ヤング率よりも圧縮強度に表れました。この圧縮強度の増加は、コンクリート中の自由水が凍結することで細かな隙間が氷で充填され⁵⁾、液体よりも応力を負担し、また氷自体も膠着作用のような結合力を発揮した⁶⁾ためと考えています。

表-4に、疲労荷重（F）の結果として、疲労破壊時の繰返し荷重回数（疲労破壊回数）Nrを示します。また、図-6に、疲労破壊回数を示します。N-d1の疲労破壊回数の単純平均値を基準として比較すると、N-d1の約16,150回に対して、N-d2は17,300回～118,520回と明確に回数の違いが表れたとは言い難いですが、一方でN-sは100回～2,780回と明らかに疲労破壊回数が減少しており、sは水中疲労試験と同様に耐疲労性を低下させることがわかります。これに対して、L-d1は17,000回でN-d1と変わらないものの、L-d2は約2,700回とN-d1よりも回数が減少傾向に

表-4 疲労試験（F）の結果

実験条件	応力比 (%)	r	Nr	logN
N-d1	10~70	1	439	2.64
		2	14906	4.17
		3	33106	4.52
N-d2	10~70	1	10837	4.03
		2	17306	4.24
		3	29673	4.47
		4	118520	5.07
N-s	10~70	1	100	2.00
		2	391	2.59
		3	2781	3.44
L-d1	10~70	1	16998	4.23
L-d2		1	1714	3.23
		2	3692	3.57
L-s	10~70	1	4	0.60
		2	46	1.66
		3	100	2.00
		4	1393	3.14
		5	17210	4.24

r：同一条件における疲労破壊回数の順位

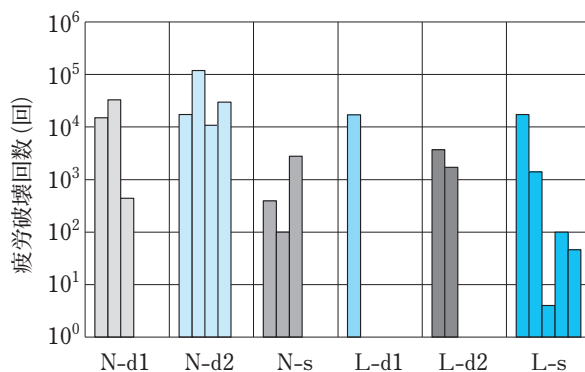


図-6 疲労破壊回数の比較

ありました。そして、L-sは、4回～17,210回と極端にばらつきましたが、平均値は3,750回であり、N-d1よりも明らかに繰返し荷重回数が減少しました。このように、静的荷重（S）におけるL-d2とL-sの圧縮強度は、常温（N）よりも増加しますが、疲労荷重（F）に関しては、低温（L）の場合、圧縮強度の傾向とは反対に、コンクリートの耐疲労性は低下する傾向を示しました。つまりは、氷点下を下回る環境下においては、疲労破壊に至るまでの疲労作用による損傷過程が常温のF-N-sや水中とは異なる可能性が示唆されました。

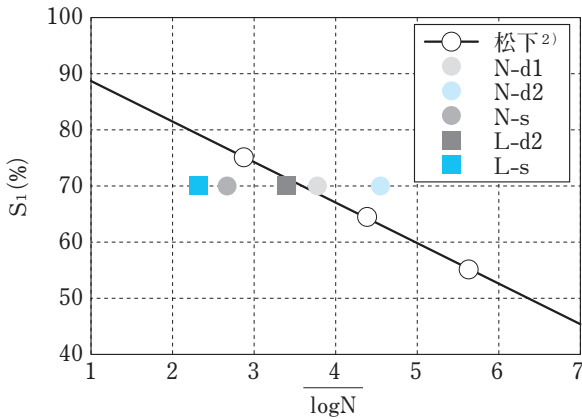


図-7 S₁-N関係

4. 環境作用が疲労破壊に及ぼす影響

図-7に、松下ら²⁾の水中疲労試験における本実験と同じ下限応力が10%の載荷応力(S)と疲労破壊回数(N)との関係(S-N関係)に各実験条件の平均疲労破壊回数をプロットとしたものを示します。この図より、気乾状態の供試体は、N-d2がS-N関係(直線)の右側に位置するものの、N-d1とL-d2は線上付近に位置しています。これが意味するものは、N-d2の平均疲労破壊回数を踏まえ、少なくともN-d1は常時水の作用を受ける状態よりは疲労破壊回数は多いと解釈されます。これに対して、飽水状態のN-sとL-sは、明らかにS-N関係の左側に位置します。これより、N-sのような水の供給がない気中であっても飽水状態はコンクリートの耐疲労性を低下させ、さらには、L-sのようにコンクリート間隙の自由水が凍結した状態も耐疲労性の低下に影響するということがわかりました。つまり、コンクリートの耐疲労性を低下させる要因には、コンクリートが完全に水に浸かる水中環境以外にも、気中における飽水状態や、飽水したコンクリートが凍結するような低温環境も含まれるといえます。

5. まとめ

本研究の範囲内より得られた知見をまとめます。

- (1) 静的圧縮強度は、含水率が大きくなるにつれて、常温は低下傾向を、低温は増加傾向を示し、常温の含水率50%のコンクリートに対して低温の飽水状態は、約1.5倍圧縮強度が増加しました。
- (2) 静的載荷によるヤング率は、低温において若

干増加し、低温の飽水状態は常温の気乾状態の約1.2倍程度でした。これより、水分と低温の影響(環境温度と含水率の変化)は、圧縮強度の方がその影響を受けやすいといえます。

- (3) コンクリートの耐疲労性は、常温と低温ともに飽水状態で耐疲労性の低下が示されました。
 - (4) 気中であっても飽水状態が保たれば、コンクリートの耐疲労性が低下する可能性があります。また、コンクリート中の飽水した水分の凍結も耐疲労性に影響することがわかりました。
- 今後は、本研究で得られたコンクリートの耐疲労性を踏まえ、鉄筋コンクリートの梁や版といった部材レベルにおいてその影響の程度を評価する予定です。

<参考文献>

- 1) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.205-210, 2000.
- 2) 松下博通: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文集, No.296, pp.87-95, 1980.
- 3) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.
- 4) 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部材の万能載荷試験方法の考案, 平成24年度土木学会東北支部技術研究発表会, V-22, 2013.
- 5) 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.
- 6) 三井健郎, 米澤敏男, 井上孝之: 超高強度コンクリートの極低温環境下での力学特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.175-180, 1997.

<プロフィール>

1973年新潟県生まれ。日本大学大学院を修了後、2年間ゼネコンに勤務した後、日本大学助手、同専任講師を経て現在に至る。