

論文 疲労荷重と凍結融解作用の組合せによるコンクリートの劣化についての基礎実験

今野 克幸^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}

要旨：本研究では、疲労荷重がコンクリートの耐凍害性に与える影響について検討するために、疲労荷重と凍結融解作用の組合せ方を変化させた実験を行った。すなわち、初期状態を軽微な乾燥状態としたコンクリートを対象とした、疲労と凍結融解を交互に作用させた複合劣化試験を行い、それら作用の順序や回数がコンクリートの相対動弾性係数と静弾性係数の推移及び残存強度に及ぼす影響を検討した。

キーワード：疲労，凍結融解，乾燥，強度，弾性係数

1. はじめに

コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を試験する方法として JIS A 1148-2001 の促進凍結融解試験がある。この方法では、コンクリート構造物が供用されている実際の環境条件においては、コンクリートを劣化させる様々な外的要因を直接的に考慮できない。

複合劣化には種々の組み合わせがあるが、土木構造物には、疲労荷重と凍結融解が複合的に作用していることが多い。本研究の目的は、疲労荷重がコンクリートの耐凍害性に与える影響について検討することであり、そのための基礎的な実験として疲労荷重と凍結融解作用の履歴の組合せによりコンクリートの劣化の程度が変化するか調査するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

供試体を作製する際に用いたコンクリートの

配合は表-1 に示すとおりで、水セメント比 50% の AE コンクリートである。コンクリートに使用した細骨材は表乾密度 2.72g/cm^3 、吸水率 1.86% の沙流川産川砂、粗骨材は表乾密度 2.75g/cm^3 、吸水率 1.25% の新日高町静内御園産砂利である。また、セメントには普通セメントを用いた。

2.2 実験供試体及び実験方法

同一バッチのコンクリートから、試験 1 と試験 2 (図-1 参照) 及び曲げ強度試験用の $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の無筋角柱供試体を 3 体ずつと圧縮強度試験用の $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体 6 体を作製した。試験 1 は凍結融解の工程を先行させたもの、試験 2 は疲労荷重を先行させたもので、実験工程については 2.2(1) と 2.2(2) に詳述する。なお、疲労荷重は曲げの繰返し載荷とした。試験 1 の供試体シリーズを FT50、試験 2 の供試体シリーズを FF50 と呼ぶこととし、それぞれのシリーズについて供試体を 3 体ずつ用意したのでそれらを区別する場合は、例えば FT50-1 のようにシリ

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
25	15.0	5.5	50.0	38.0	166	332	702	1158	0.133

*1 北海道工業大学 工学部社会基盤工学科助教授 博士（工学）（正会員）

*2 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻助教授 博士（工学）（正会員）

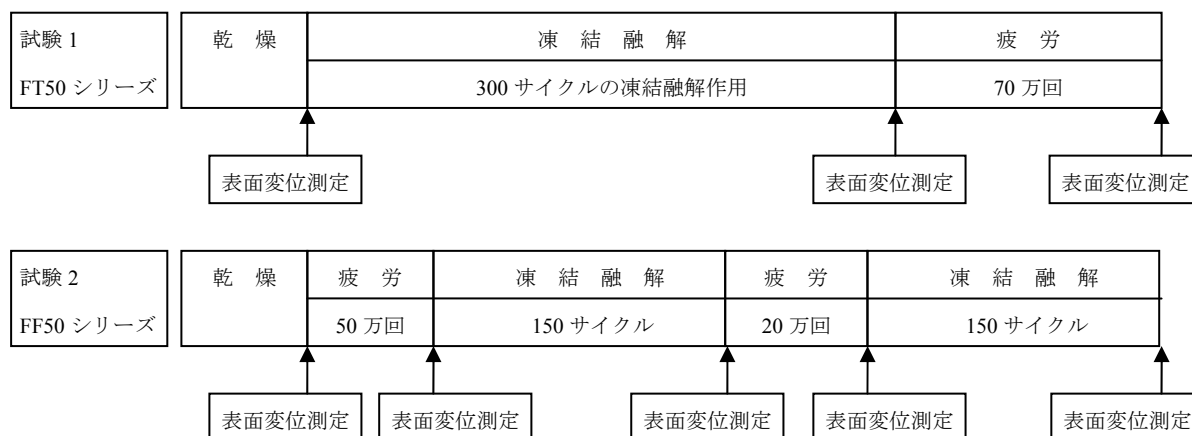


図-1 実験工程の概略

表-2 強度試験結果

圧縮強度(N/mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)
乾燥終了時	凍結・疲労終了時	
38.7	44.2	4.48

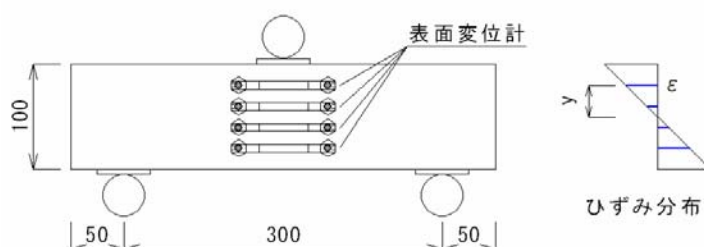


図-2 表面変位の測定

ーズ名の後に供試体番号を付ける。

また、既往の研究で乾燥がコンクリートの耐凍害性に影響を及ぼすことが示されており^{1),2),3)}、本研究においても文献2で言われているように実環境に対応した乾燥条件とし試験を行うこととした。文献1によると、放出水量が約4～6vol%という比較的軽微な乾燥は実際の環境条件において生じるものであり、この程度の乾燥はコンクリート供試体内部の崩壊に対して有利に作用し、表面剥離に対しては不利に作用するとある。よって、本実験では、材令28日が経過した後、35～40℃の乾燥機内で約1週間かけて放出水量が約4～6vol%となるように供試体を乾燥させてから、その後の試験に用いた。

(1) 試験1の実験工程

試験1の各供試体の放出水量は、図-1に示す乾燥工程によって供試体FT50-1, FT50-2, FT50-3の順に4.8 vol%, 4.8 vol%, 4.6 vol%となった。乾燥の後、凍結融解の工程として、JISの水

中凍結融解試験法に準じて300サイクルの凍結融解を行った。その後の疲労荷重の工程として、繰返し荷重は、スパン300mmの中央一点集中荷重の条件で、上限応力と下限応力をそれぞれ曲げ強度の70%と15%として周波数4Hzの正弦波で作用させた。繰返し荷重回数は70万回で、これは土木学会コンクリート標準示方書の式を用い計算によって求めた疲労寿命100万回に対して70%の回数に当たる(2.3参照)。なお、繰返し荷重を行う際は、打設面が側面となるようにして、且つ荷重面は常に同じ面とした。

(2) 試験2の実験工程

試験2は図-1に示す乾燥工程によって各供試体の放出水量を約5vol%としたが、繰返し荷重の工程で供試体の質量が僅かに増加したため、凍結融解の工程の直前に再び乾燥させ放出水量を調整した。その結果、各供試体の放出水量は供試体FF50-1, FF50-2, FF50-3の順に4.6 vol%, 4.6 vol%, 4.5 vol%であった。乾燥の後、疲労荷

表-3 試験 1 における相対動弾性係数と静弾性係数

供試体名	相対動弾性係数(%)			静弾性係数(GPa)		
	FT50-1	FT50-2	FT50-3	FT50-1	FT50-2	FT50-3
乾燥終了時	100	100	100	28.0 (100)	24.3 (100)	27.2 (100)
凍結融解 300 サイクル後	88	113	109	29.3 (105)	28.8 (118)	30.4 (112)
疲労 70 万回後	87	109	98	15.6 (56)	27.2 (112)	19.1 (70)

表-4 試験 2 における相対動弾性係数と静弾性係数

供試体名	相対動弾性係数(%)			静弾性係数(GPa)		
	FF50-1	FF50-2	FF50-3	FF50-1	FF50-2	FF50-3
乾燥終了時	100	100	100	32.7 (100)	28.6 (100)	29.1 (100)
疲労 50 万回後	96	98	97	22.2 (68)	17.1 (60)	30.7 (106)
凍結融解 150 サイクル後	112	106	94	25.1 (77)	無し	18.2 (63)
疲労計 70 万回後	96	104	無し	29.8 (91)	20.7 (72)	無し
凍結融解計 300 サイクル後	101	102	無し	19.7 (60)	20.9 (73)	無し

重の工程として、上限応力と下限応力がそれぞれ曲げ強度の 70%と 15%として、周波数 4Hz の正弦波で 50 万回の繰返し载荷を行った。その後、凍結融解の工程として、JIS の水中凍結融解試験法に準じて 150 サイクルの凍結融解を行った。さらにその後、同様の条件で 20 万回の繰返し载荷と 150 サイクルの凍結融解を行った。

2.3 測定項目

(1) 曲げ強度と圧縮強度

試験 1 の凍結融解の工程及び試験 2 の疲労荷重の工程の開始前に、圧縮強度試験（表-2 の乾燥終了後）と曲げ強度試験を行った。2.2 で述べた繰返し载荷の上限応力と下限応力の値は曲げ強度試験の結果より得られた曲げ強度の値に対して定めた。また、試験 1 と試験 2 の全工程終了後においても圧縮強度試験を行った（表-2 の凍結・疲労終了時）。なお、圧縮強度は、試験 1 と試験 2 の全ての工程を終えるまで室温 20℃相対湿度 60%の雰囲気中で養生しておいた円柱供試体 3 体の圧縮強度試験の平均値である。

(2) 静弾性係数

本研究では曲げ载荷を行う、通常のはり理論に基づき静弾性係数の推定を行った。図-1 の表

面変位測定と記された時点で供試体の側面に図-2 に示すように原則として 20mm 間隔で検長 70mm の表面変位計を貼り付け、曲げ強度の 1/4 ～1/3 相当、すなわち弾性体と見なすことのできる荷重の範囲で供試体側面の表面変位を測定した。そして、測定した変位を検長で除すことによりひずみに変換し、ひずみ分布を求めた。求めたひずみ分布から全断面有効と仮定して中立軸位置と静弾性係数を求めた。

(3) 相対動弾性係数と質量変化率

凍結融解の工程において一次共鳴振動数と質量を測定し、相対動弾性係数と質量変化率を求めた。また、供試体全体の劣化の程度を推定するために、図-1 の表面変位測定時にも相対動弾性係数を求めた。

3. 実験結果

3.1 試験 1 の実験結果

相対動弾性係数と静弾性係数の値を表-3 に示す。なお、静弾性係数について、乾燥終了時を 100 とした相対値を () 内に示す。乾燥終了時の圧縮強度（表-2 参照）に対する静弾性係数の値は、コンクリート標準示方書⁴⁾に示されている

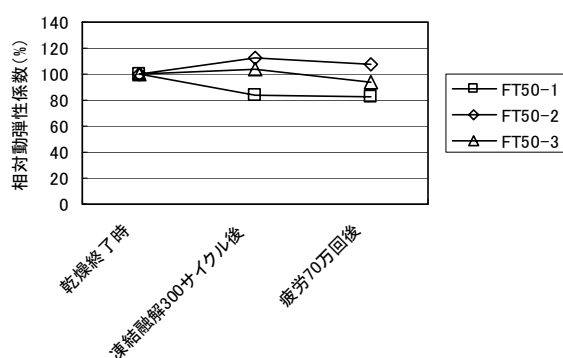


図-3 試験 1 の相対動弾性係数の推移

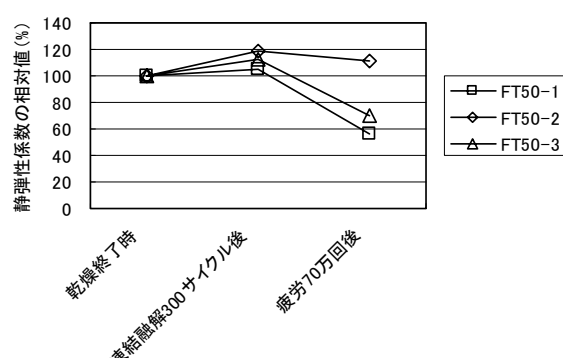


図-4 試験 1 の静弾性係数の推移

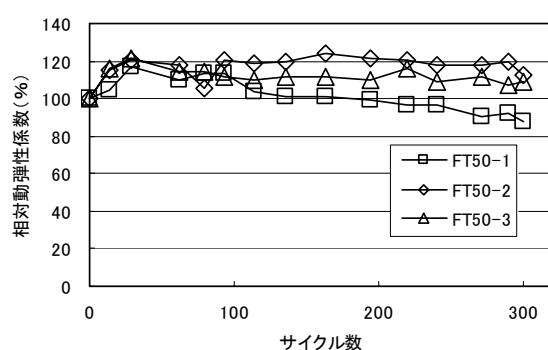


図-5 試験 1 の相対動弾性係数

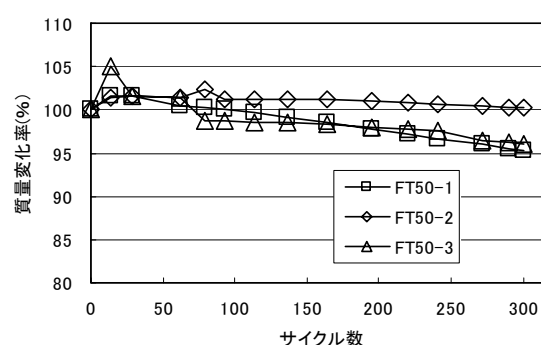


図-6 試験 1 の質量変化率

普通コンクリートの同程度の圧縮強度に対するヤング係数に近い値となった。相対動弾性係数を図-3 に、静弾性係数を乾燥終了時の値を 100 として表したものを静弾性係数の相対値として図-4 に示す。供試体 FT50-2, FT50-3 は凍結融解 300 サイクルの工程後において相対動弾性係数は 100%以上の値を維持し、疲労荷重 70 万回の工程後に低下した。供試体 FT50-1 は凍結融解 300 サイクルの工程の後に相対動弾性係数は 80%近くまで低下し、疲労荷重 70 万回の工程によって僅かに低下した。静弾性係数については、供試体 FT50-1 と FT50-3 が凍結融解の工程の後で値が上昇し、疲労荷重の工程の後で値が大きく低下したが、供試体 FT50-2 は疲労荷重の工程において静弾性係数の低下は小さかった。

図-5 と図-6 は、それぞれ試験 1 の凍結融解 300 サイクルの工程における相対動弾性係数と質量の変化を示したものである。供試体 FT50-2 はスケーリングの程度が小さかったが、供試体

FT50-1, FT50-3 はスケーリングにより 5%程度の質量の減少があった。相対動弾性係数については、供試体 FT50-1 は 88%まで低下したが供試体 FT50-2, FT50-3 は 300 サイクル終了時まで 110%程度という高い値を維持した。既往の研究^{1), 2)}で示されているように、軽微な乾燥条件がコンクリート内部の劣化に対して有利に作用した可能性がある。

3.2 試験 2 の実験結果

相対動弾性係数と静弾性係数の値を表-4 に示す。なお、静弾性係数について、乾燥終了時を 100 とした相対値を () 内に示す。試験 2 についても、乾燥終了後の静弾性係数と圧縮強度 (表-2 参照) の関係は、コンクリート標準示方書⁴⁾におけるものと近い結果となった。試験 2 についての相対動弾性係数と静弾性係数の推移を、それぞれ図-7 と図-8 に示す。なお、供試体 FF50-3 は 2 回目の疲労荷重の工程で破壊し、供試体 FF50-2 は 1 回目の凍結融解工程後における静弾

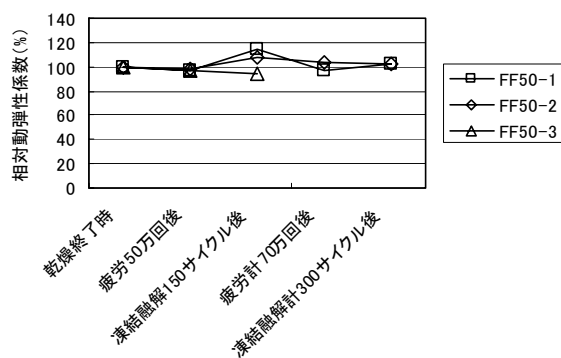


図-7 試験 2 の相対動弾性係数の推移

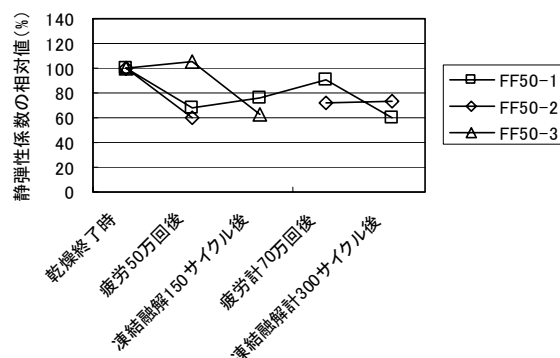


図-8 試験 2 の静弾性係数の推移

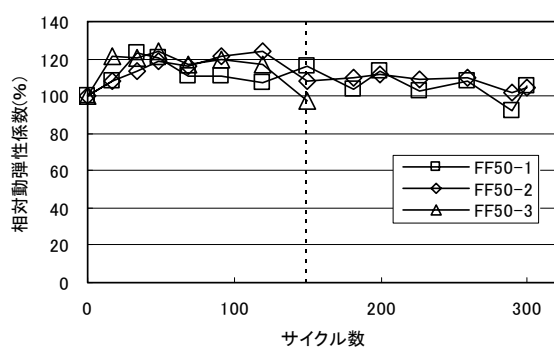


図-9 試験 2 の相対動弾性係数

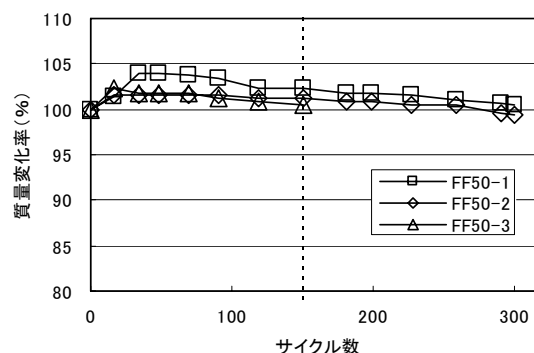


図-10 試験 2 の質量変化率

性係数のデータが得られなかったため、図中に幾つかデータが示されていない箇所がある。相対動弾性係数は、全ての供試体の値が 1 回目の疲労荷重の工程で低下し、供試体 FF50-3 を除いて 1 回目の凍結融解の工程で上昇した。さらに、2 回目の疲労荷重の工程で供試体 FF50-3 を除いて再び相対動弾性係数は低下し、その後の凍結融解の工程ではほとんど変化は無かった。静弾性係数は供試体によってばらつきがあるが、概ね相対動弾性係数と同様の傾向を示した。ただし、相対動弾性係数より変化の幅が大きい。

図-9 と図-10 は試験 2 の凍結融解の工程における相対動弾性係数と質量の変化を示したものである。試験 2 では 1 回目の凍結融解の工程と 2 回目の工程の間に疲労荷重の工程を挟んだので、図中で 150 サイクル時を点線で示した。凍結融解工程の初期の段階で相対動弾性係数が上昇し、150 サイクルまで試験 1 と同様に 110%程度の高い値を維持したが、その後の疲労荷重の

工程で低下して凍結融解 150 サイクル以降ではほとんど変化が見られなかった。

3.3 残存強度について

試験 1 と試験 2 に用いた角柱供試体の残存強度を測定するために、それぞれ図-1 の全工程を終了後、角柱の両端を 10cm ずつ切り落とすことで 10×10×20cm の角柱を取り出し圧縮試験を行った。その結果を表-5 に示す。表中の円柱換算値は角柱の圧縮強度を円柱の強度に換算したもので⁵⁾、圧縮強度（試験工程終了時）との比は表-2 に示した凍結・融解終了時の圧縮強度との比をとったものである。これによると、試験 1 の供試体の方が、残存強度が高い値となっているがその差は 5%弱である。ただし、角柱の圧縮強度試験の際、スケーリングによる断面欠損を正確に測ることは困難であったため、断面積として供試体作製時の値を用いた。図-6 と図-10 から試験 2 の供試体の方が、スケーリングによる断面欠損が小さく、それゆえ、実断面積を考

表-5 全工程終了後の圧縮強度

供試体名	試験 1				試験 2			
	FT50-1	FT50-2	FT50-3	平均値	FF50-1	FF50-2	FF50-3	平均値
角柱の圧縮強度(N/mm ²)	33.5	32.4	31.9	32.6	29.9	31.1	無し	30.5
円柱換算値 (N/mm ²)	28.6	27.6	27.2	27.8	25.4	26.5	無し	26.0
圧縮強度(試験工程終了時)との比	0.65	0.62	0.62	0.63	0.58	0.60	無し	0.59
圧縮強度(試験工程開始前)との比	0.74	0.71	0.70	0.72	0.66	0.69	無し	0.67

慮すると試験 1 と試験 2 の残存強度の差はより明確になる。

また、値にばらつきはあるが、表-3 と図-4 及び表-4 と図-8 より全工程終了後の静弾性係数の相対値の多くは 60～70%程度であった。強度についても静弾性係数の相対値の表し方と同様に、試験工程開始前の強度との比（表-5 参照）に着目すると、60～70%程度の値となった。

4. まとめ

本研究では、試験 1 として凍結融解の工程を先行させ、その後疲労荷重を与えた。そして、試験 2 では疲労荷重の工程を先行させ、且つ凍結融解の工程の間に再び疲労荷重の工程を入れた。この 2 つの実験より示された結果について以下にまとめる。

- 1) 試験 1, 試験 2 より、供試体を軽微な乾燥条件とした場合、凍結融解作用と疲労荷重を交互に与えると、凍結融解の工程の後では相対動弾性係数、静弾性係数はともに上昇し、疲労荷重の工程の後では低下する傾向が見られた。
- 2) 試験 2 より、凍結融解の工程の後、疲労荷重の工程を行うと相対動弾性係数は低下するが、その後の凍結融解の工程では相対動弾性係数はほとんど上昇しなかった。
- 3) 疲労と凍結融解を交互に複数回組合せた方が、残存強度が小さくなる傾向にあった。

- 4) 全工程終了時の静弾性係数の低下は、残存強度から推定した強度の低下と同程度であった。

今後も、疲労荷重の大きさや凍結融解作用との組み合わせ方を種々変えた実験を行い、多くのデータを蓄積した上で、コンクリートの耐凍害性に与える疲労荷重の影響をより明確にする予定である。

参考文献

- 1) 田畑雅幸, 鎌田英治, 宮崎重宗: コンクリートの耐凍害性におよぼす乾燥の影響, セメント技術年報, XXX II, pp.365-368, 1978
- 2) 浜幸雄, 千歩修, 友澤史紀: コンクリートの凍害劣化に及ぼす吸水・乾燥の影響の定量化, セメント・コンクリート, No.675, pp.40-45, 2003.5
- 3) 千歩修, 濱田英介, 友澤史紀: 乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.731-736, 2003
- 4) [2002 年制定] 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書構造性能照査編, 土木学会, 2002
- 5) 小林一輔: 最新コンクリート工学第 5 版, 森北出版株式会社, 2004