

論文 コンクリートの凍害に及ぼす凍結最低温度の影響に関する実験

漆崎 要*1・桂 修*2・鎌田 英治*3

要旨：凍結最低温度がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、水セメント比および空気量を変えた耐凍害性の異なる長期材齢のコンクリートを用いて、凍結最低温度の水準を変化させた促進凍結融解試験（急速水中凍結水中融解法）を行った。

凍結最低温度と耐久性指数の関係をロジット変換値により検討した結果、内部劣化に対する凍結最低温度の影響は、水セメント比および空気量によって異なること、また、内部劣化が生じていないコンクリートのスケーリングでは、凍結最低温度の影響が水セメント比によって異なり、気泡組織の相違による差はみられないことが明らかとなった。

キーワード：コンクリート、凍害、凍結融解試験、凍結最低温度、耐久性指数

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性は、ASTM C 666に基づく促進凍結融解試験により評価されることが多い。しかし、この試験法は、限定された条件下における凍結融解抵抗性の良否を相対的に評価するものであり、温度条件や含水条件が多様に変化する実環境下のコンクリート構造物の凍害との関係は明らかではない。

田畑¹⁾は、コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究を行い、凍結最低温度、温度勾配および最低温度の保持時間といった凍結時の温度条件の中で、耐凍害性には凍結最低温度の影響が最も大きいことを示した。しかし、凍結最低温度とコンクリートの耐凍害性との詳細な関係は示していない。

本研究は、コンクリートの耐凍害性に及ぼす凍結最低温度の影響を明らかにすることを目的とし、水セメント比および空気量を変えた耐凍害性の異なるコンクリートを用いて、凍結最低温度の影響を水セメント比および気泡組織との関係で検討したものである。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

実験には、細孔構造および気泡組織を広範囲に変化させる目的で、水セメント比4水準、目標空気量3水準の12調合のコンクリートを用いた。

測定項目は、ASTM C 666 A法に準じて凍結最低温度のみを変化させた促進凍結融解試験およびASTM C 457のリニアトラバース法による硬化コンクリートの気泡組織とした。

凍結融解試験における凍結最低温度の水準の決定方法は以下の通りである。まず、ASTM C 666 A法の試験条件である凍結最低温度 -18°C 、および -21°C で全ての調合についての試験を行い、凍結最低温度 -18°C において耐久性指数80以下のものについてはより温度の高い範囲に、 -21°C において耐久性指数60以上のものについてはより温度の低い範囲に、その他のものについては両方の温度範囲に凍結最低温度を 3°C ずらした条件に設定し、最終的に $-30^{\circ}\text{C}\sim-9^{\circ}\text{C}$ (3°C 間隔)の範囲で5水準の凍結最低温度に対する凍結融解試験結果が得られるようにした。

*1 北海道大学大学院 工学研究科 大学院生（正会員）

*2 北海道立寒地住宅都市研究所 工修（正会員）

*3 北海道大学大学院 工学研究科 教授・工博（正会員）

2.2 実験方法

(1) 調合および使用材料

水セメント比は、セメント水比ではほぼ等間隔となる60, 50, 43, 38%の4水準、目標空気量は、2.0, 3.5, 5.0%の3水準とし、目標スランプを18cmとした試し練りにより調合を決定した。実験に用いたコンクリートの調合およびリニアトラバース法により測定した硬化コンクリートの気泡組織を表-1に示す。

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は鶴川産陸砂(表乾比重:2.64, 吸水率:1.96%), 粗骨材は常盤産砕石(表乾比重:2.67, 吸水率:2.02%)を用いた。

混和剤は、水セメント比38%の調合にはアルキルスルホン酸系高性能AE減水剤, 他の調合にはAE減水剤標準型を使用し、それぞれ専用のAE助剤で連行空気量を調整した。

(2) 試験体

凍結融解試験用供試体は7.5×7.5×40cm, 気泡組織測定用供試体は10×10×20cmの梁型とし、凍結融解試験は、同一調合2本の供試体を用いて実験を行った。

全ての試験体の養生は、試験期間中の水との進行に伴う組織変化の影響を避けるため、材齢2日で脱型し、材齢3ヶ月まで20℃水中養生とし

た。なお、材齢3ヶ月以降は4℃低温水槽中で保管し、凍結最低温度の水準を変えた凍結融解試験を順次行った。

(3) 凍結融解試験

凍結融解試験はASTM C 666 A法(急速水中凍結水中融解法)に準じた試験槽2台を用いて行った。試験条件として凍結過程2.5時間, 融解過程1.5時間を固定し、凍結最低温度を調合ごとに5水準とし、最高温度を5℃とした凍結融解を300サイクルまで行った。測定項目は、質量, 長さおよび動弾性係数とし、30サイクルごとに測定を行った。また、動弾性係数の低下から300サイクルの耐久性指数を算定した。なお、温度管理には、中心部に熱電対を埋設した温度測定用試験体を用いた。

(4) 気泡組織の測定

硬化コンクリートの気泡組織は、材齢4週以降の10×10cmの2断面を用いて、ASTM C 457(リニアトラバース法)により測定し、空気量および気泡間隔係数を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 凍結最低温度と耐久性指数の関係

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-1に、この関係から得られる各試験体の凍

表-1 調合および硬化コンクリートの気泡組織

記号	調合									気泡組織			
	水セメント比 (%)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積(ℓ/m ³)			重量(kg/m ³)			空気量 (%)		気泡間隔係数
					セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	圧力法	リニアトラバース法	
60C2	60	2.0	47.5	179	94	336	371	298	887	990	2.9	2.3	0.345
60C3		3.5	45.8	174	92	314	371	290	828	990	4.1	2.9	0.245
60C5		5.0	46.8	176	93	326	371	293	859	990	6.0	5.0	0.236
50C2	50	2.0	45.8	181	115	314	371	362	828	990	2.5	1.5	0.329
50C3		3.5	45.0	178	113	304	371	356	802	990	3.6	2.5	0.278
50C5		5.0	44.1	176	111	292	371	352	771	990	4.2	3.4	0.224
43C2	43	2.0	43.7	185	136	288	371	430	761	990	3.3	2.5	0.279
43C3		3.5	42.6	184	135	275	371	428	726	990	4.9	3.8	0.257
43C5		5.0	41.5	182	134	263	371	423	695	990	5.6	4.6	0.190
38C2	38	2.0	46.6	156	130	323	371	411	854	990	2.9	2.3	0.370
38C3		3.5	44.3	155	129	295	371	408	780	990	4.6	3.3	0.189
38C5		5.0	45.6	155	129	310	371	408	819	990	6.1	4.6	0.139

結最低温度ごとの耐久性指数を表-2に示す。水セメント比60%および50%では、凍結最低温度の水準による劣化の違いが明瞭に示されており、特に、空気量の少ないものでは、凍結最低温度が低い場合に大きな劣化がみられる。一方、水セメント比43%および38%の場合は、空気量に関わらず、凍結融解300サイクルまでの繰り返しにおいて凍害劣化をほとんど受けなかった。しかし、凍結最低温度が低いほど劣化が大きい傾向は示されている。

凍害の内部劣化の指標として通常用いられる耐久性指数は、0~100の範囲に限定された値を

表-2 コンクリートの耐久性指数

記号	凍結最低温度(°C)							
	-30	-27	-24	-21	-18	-15	-12	-9
60C2				31	55	79	83	89
60C3	76	84	81	89	88			
60C5	82	88	86	90	92			
50C2			44	64	71	78	89	
50C3	44	72	83	85	90			
50C5	87	83	85	95	97			
43C2	90	89	89	96	93			
43C3	90	90	90	96	96			
43C5	90	88	91	97	97			
38C2	83	84	91	98	100			
38C3	92	92	99	101	99			
38C5	91	90	94	100	101			

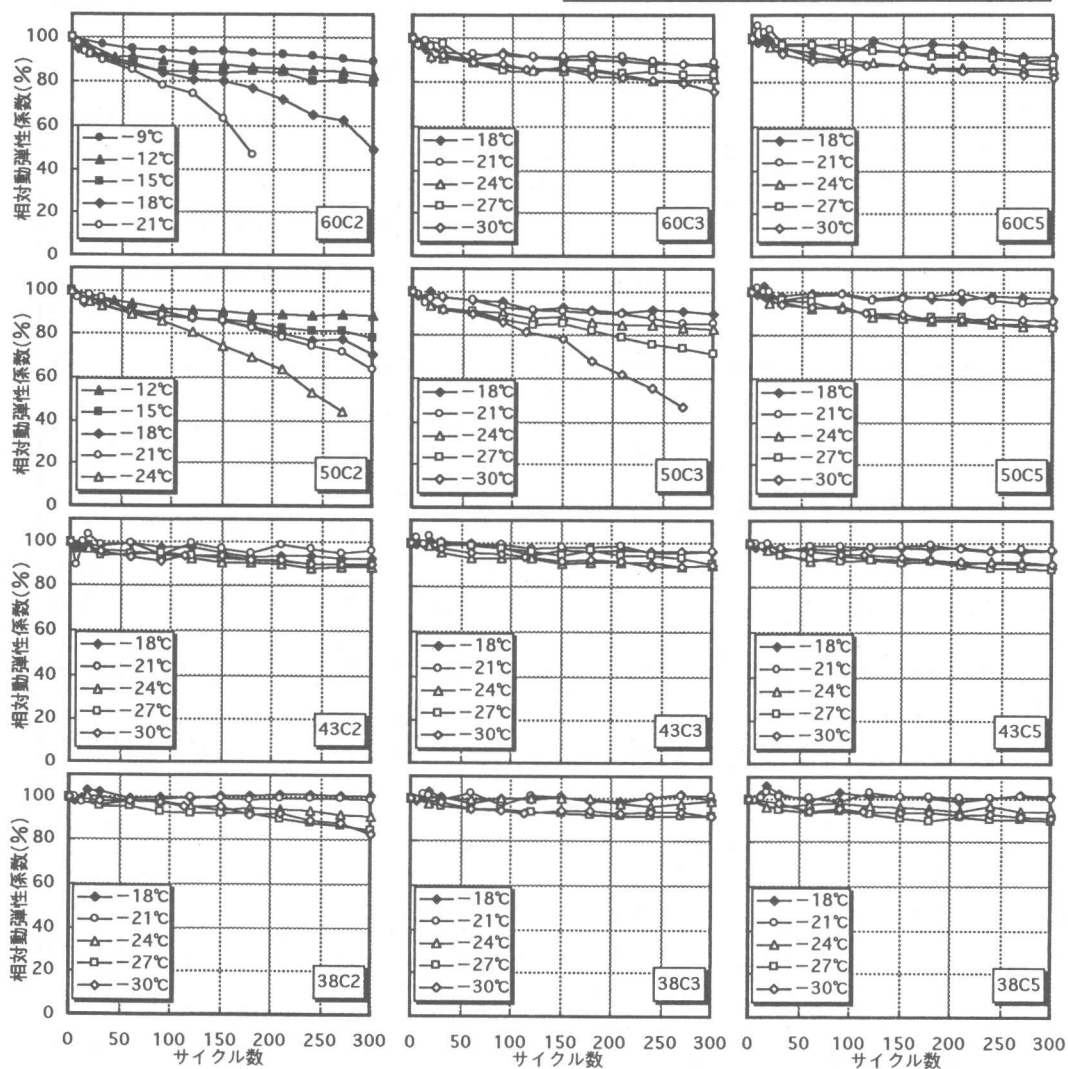
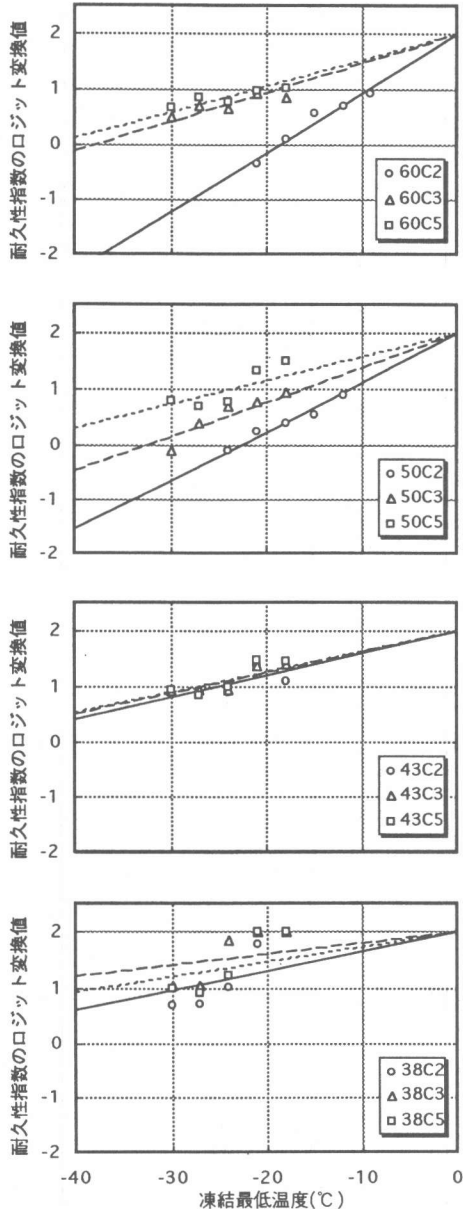


図-1 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係(凡例は凍結最低温度)

持ち、単純計量値ではない。ここで、凍結最低温度と耐久性指数の関係を検討するための指標として、次式により求めた耐久性指数のロジット(オメガ)変換値を用いた。

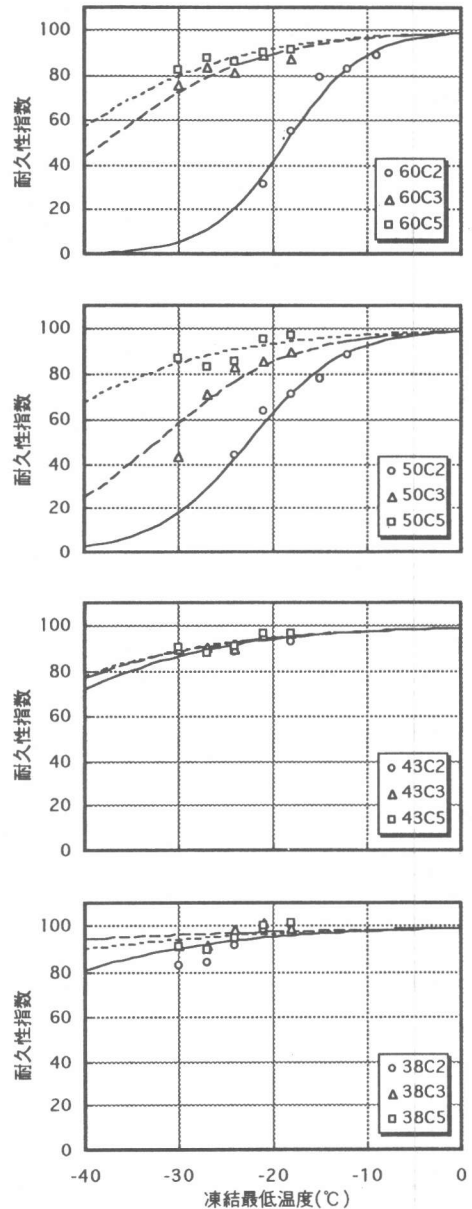
$$DFL = \log_{10}(DF / (100 - DF)) \quad (1)$$

ここに DFL：耐久性指数のロジット変換値
DF：耐久性指数



図一 凍結最低温度と耐久性指数のロジット変換値の関係

凍結最低温度と耐久性指数のロジット変換値の関係を図一に示す。凍結最低温度の低下に伴い、耐久性指数のロジット変換値は各試験体ごとにほぼ直線的に減少する。ここで、水分が凍結しない温度範囲ではコンクリートの凍害は起こらないことから、最低温度0℃での耐久性指数を99とし、各試験体ごとに実験結果(5点)を用いて



図二 凍結最低温度と耐久性指数の関係

最小二乗法により近似直線を求めた。得られた近似直線を図-2に併せて示す。実験値と近似直線に多少のばらつきはあるが、凍結最低温度と耐久性指数のロジット変換値の関係は、各試験体ごとにほぼ直線で近似される。

凍結最低温度と耐久性指数の関係、および前述の近似直線を次式により逆変換して求めた近似曲線を図-3に示す。

$$DF = 100 \cdot 10^{DFL} / (1 + 10^{DFL}) \quad (2)$$

水セメント比60%および50%では、耐久性指数と凍結最低温度の関係が気泡組織によって大きく異なり、耐凍害性に劣るものほど耐久性指数に対する凍結最低温度の影響が大きい。特に、空気量の少ないものでは、ASTM C 666 A法の試験条件である凍結最低温度-18℃付近で耐久性指数が大きく変化した。一方、水セメント比43%および38%では、凍結最低温度の影響は空気

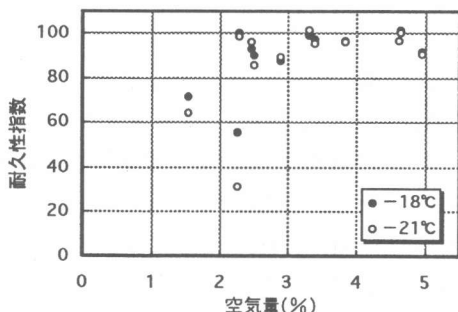


図-4 空気量と耐久性指数の関係
(凡例は凍結最低温度)

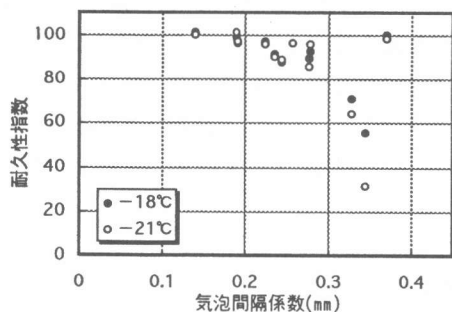


図-5 気泡間隔係数と耐久性指数の関係
(凡例は凍結最低温度)

量に関わらず小さい。

全ての調査について凍結融解試験結果が得られている凍結最低温度-18℃および-21℃の場合の、リニアトラバース法による空気量と耐久性指数の関係を図-4に、気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-5に示す。水セメント比および凍結最低温度に関わらず、空気量では3%以上、気泡間隔係数では0.3mm以下の耐凍害性に有効とされている気泡組織を持つコンクリートの耐久性指数は、80以上であった。

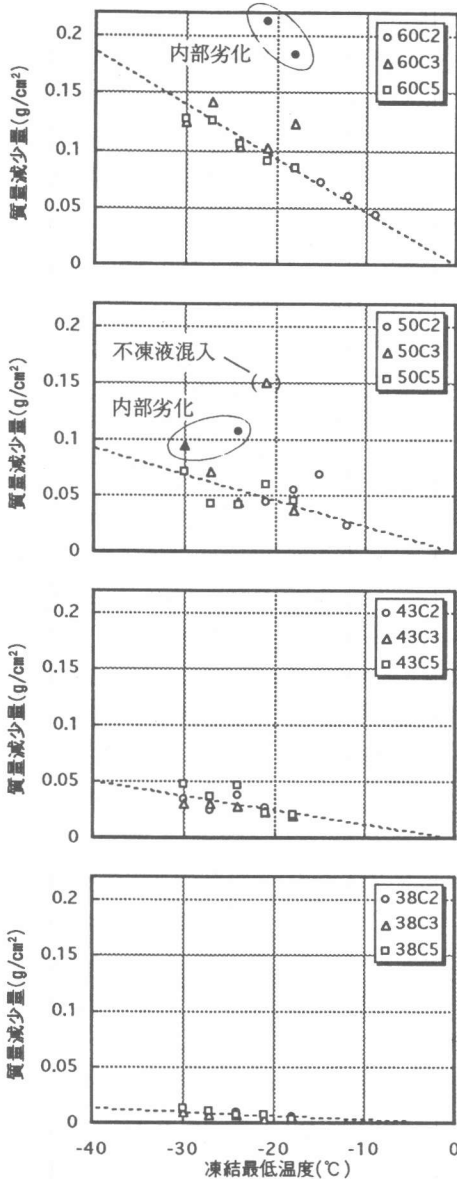
4.2 凍結最低温度と質量減少量の関係

コンクリートのスケーリング(表面層の剥離)は、試験体の質量変化により評価される。測定開始時から、全ての供試体について結果が得られている凍結融解210サイクル時まで減少した質量を、試験体の表面積で除し、単位表面積当たりの質量減少量を求めた。凍結最低温度と質量減少量の関係を図-6に示す。

スケーリングの検討に際し、相対動弾性係数が80%以上の供試体は、組織の崩壊につながる内部劣化が起きずに表面層の剥離のみが生じているものとし、80%以下の供試体では内部劣化に伴う組織の崩壊が生じ、スケーリングの指標である質量減少量の増加にこの影響が含まれるものと解釈した。

図-6において黒塗りで示した内部劣化の生じている供試体と、試験中に不凍液が混入した結果スケーリングが大きくなった供試体を除くと、凍結最低温度が低いほど供試体の質量減少量が大きく、その関係はほぼ直線的であった。また、水セメント比の大きいものほど質量減少の割合が大きく、各水セメント比において空気量による違いは認められなかった。

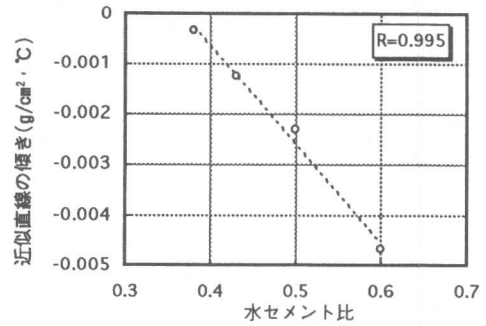
凍結最低温度0℃で質量減少量が0g/cm²となるものとし、測定結果を用いて各水セメント比ごとに求めた近似直線を図-6中に破線で示す。水セメント比が大きいほど近似直線の勾配が大きくなる傾向が認められ、スケーリングに対する凍結最低温度の影響は、水セメント比により



図一六 凍結最低温度と210サイクル時の質量減少量の関係
(黒塗りは相対動弾性係数80%以下)

異なる。

水セメント比と近似直線の傾きの関係を図一七に示す。両者の関係はほぼ線形であり、凍結最低温度の低下に伴う質量減少量の増加割合(近似直線の傾き)は、水セメント比に比例しており、水セメント比が大きいほど凍結最低温度の影響が



図一七 水セメント比と近似直線の傾きの関係

大きい。

5. 結論

凍結最低温度の水準を変化させた促進凍結融解試験を行い、凍害の劣化程度に及ぼす凍結最低温度の影響を検討した。結果は以下に要約される。

(1) 耐久性指数のロジット変換値と凍結最低温度の関係は、水セメント比および気泡組織が同一のコンクリートでは直線関係にあり、最低温度0℃で耐久性指数が99となる直線で比較的良く近似される。この関係による検討の結果、コンクリートの耐凍害性に及ぼす凍結最低温度の影響は、水セメント比および気泡組織により異なり、いわゆる耐凍害性の良いコンクリートでは、凍結最低温度の影響が小さいことが明らかとなった。

(2) コンクリートのスケーリングの指標となる質量減少量と凍結最低温度の関係は、内部劣化が生じているものを除いて、最低温度0℃において質量減少量が0g/cm²となる直線で近似される。この検討の結果、水セメント比が大きいほど、質量減少量に及ぼす凍結最低温度の影響が大きく、気泡組織の相違による差は認められなかった。

参考文献

- 1) 田畑 雅幸：コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究，北海道大学博士論文，1986