

耐寒促進剤を用いたコンクリートの圧縮強度と凍結融解抵抗性

寒地土木研究所 耐寒材料チーム

○ 長谷川 諒
野々村 佳哲
安中 新太郎

積雪寒冷地における冬期のコンクリート施工では、通常、雪寒仮囲いによる給熱養生を要する。これらに対し耐寒促進剤を使用すると、仮設工の簡略化や経済的かつ円滑な施工が可能となる。しかしながら現行の指針等においては、養生を終了してよい圧縮強度が、耐寒促進剤の有無で異なり、耐寒促進剤使用時に不利となっている。本研究ではこの点について、新たな試験を行うなどし、またさらに指標となる相対動弾性係数について、着目する初期材齢の範囲をより適切に評価できる関係式を導入し、養生を終了してよい圧縮強度を従来よりも低減可能とする知見を得た。

キーワード：耐寒促進剤、凍結融解、圧縮強度、初期凍害

1. はじめに

寒中コンクリートは、所定の圧縮強度が得られるまで養生上屋や仮囲いを設け、ジェットヒーターなどで給熱養生を行うことが一般的である。しかし仮囲いにより車線幅が減少する道路上の地覆工や、波浪により仮囲いの設置が制限される港湾構造物などでは、耐寒促進剤を用いることで、ブルーシートで覆う保温養生へ簡略化することができる¹⁾。

しかしながらコンクリート標準示方書²⁾では、寒中コンクリートは、養生終了時に必要とされる圧縮強度(表-1)が最大でも15 N/mm²であるのに対し、通年施工推進協議会が策定した「耐寒剤を用いる寒中コンクリート施工指針」(以下「耐寒剤指針」という)¹⁾では、耐寒促進剤を用いたコンクリートは断面の大きさによらず20 N/mm²(表-2)まで養生を継続する必要があるとされている。つまり耐寒促進剤を用いたコンクリートは用いないものより、養生を終了するまでに、より大きな圧縮強度が必要となっている。

この耐寒剤指針の20 N/mm²の根拠となったデータとして、試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係が示されている(図-1)。一般に耐久性指数60以上であれば、耐凍害性を有していると判断されるが、図-1を見ると12 N/mm²以上であれば耐久性指数60以上となっているものの、その推移が大きい割にデータ数が少ない。そのため、指針制定時には安全側の20 N/mm²と判断したと考えられる。

こうしたことから、本研究では養生終了可能な圧縮強度について、より明確な値を得るため、耐寒剤指針にお

表-1 厳しい気象作用を受けるコンクリートの養生終了時の所要圧縮強度の標準²⁾ (N/mm²)

構造物の露出状態	断面の大きさ		
	薄い場合	普通の場合	厚い場合
①連続して、あるいははしはば水で飽和される場合	15	12	10
②普通の露出状態にあり、①に属さない場合	5	5	5

表-2 コンクリートが凍結融解作用を受けてもよい圧縮強度¹⁾

構造物の露出状態	圧縮強度 (N/mm ²)
①連続して、あるいははしはば水で飽和される場合	20
②普通の露出状態にあり、①に属さない場合	5

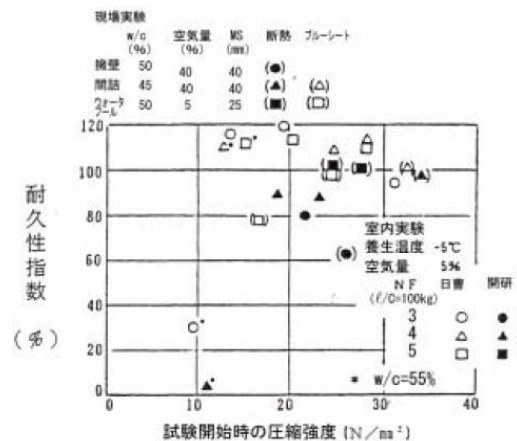


図-1 凍結融解試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係¹⁾ (根拠データ)

表-3 実験計画

セメント種類	普通セメント
水セメント比	45, 50, 55%
耐寒剤添加量	3 L/C=100kg
空気量	4.5±1.5%
養生方法	養生A~D
試験項目	・凍結融解試験 (JIS A 1148) ・圧縮強度試験 (JIS A 1108)

表-4 コンクリートの配合と初期性状

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				耐寒促進剤		Slump (cm)	Air (%)	養生
		W	C	S	G	種類	添加量 (L/C=100kg)			
45.0	45.0	160	356	792	995	a	3	8.5	4.2	B,C
45.0	45.0	160	356	792	995			8.5	5.1	A,D
50.0	45.9	160	320	822	995			9.5	5.1	B,C
50.0	45.9	160	320	822	995			9.5	4.8	A,D
55.0	46.6	160	291	845	995			8.0	4.9	B,C
55.0	46.6	160	291	845	995			8.0	4.6	A,D

いて根拠データの比較的少ない範囲に注視し、凍結融解試験開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係について実験の実施および既往のデータを含めた結果の分析を行った。

2. 凍結融解試験結果の補正について

データを分析するにあたり、対象とする圧縮強度20 N/mm²以下のコンクリートを用いた凍結融解試験では、試験中のセメントの水和反応による強度増進により、相対動弾性係数が100%を超えるとといった状況が発生する。そのため測定結果を何らかの方法で補正し相対動弾性係数と見なしうる指標を算出する必要がある。ここではまず対象を、本研究の主眼である圧縮強度20 N/mm²以下の範囲に絞り、データを補正する方法を具体的に示す。

またここで得られた補正方法は、以降で他のデータについても同様に用い、全体の評価を行っていく。

(1) 実験計画

表-3に実験計画を示す。実験では密度3.16g/cm³の普通ポルトランドセメントを用いた。水セメント比（以下、W/Cと記す）は45, 50, 55%の3水準とし、細骨材には表乾密度2.58g/cm³の陸砂を用い、粗骨材には表乾密度2.65g/cm³の砕石を用いた。耐寒促進剤の添加量は3 L/C=100kgとしてコンクリートを作製した。養生方法は後述の養生A~Dの養生を行った。試験は養生終了後直ちに凍結融解試験および圧縮強度試験を行った。

表-4に本研究で作製したコンクリートの配合と初期性状を示す。耐寒促進剤 a は指針に従い無塩・無アルカリ型の耐寒促進剤を用いている。

表-5に作製したコンクリートの養生方法を示す。養生Aでは5°C封かん養生で初期凍害を防止できるとされる圧縮強度3.5~5 N/mm²程度まで養生を行った。養生Bでは5 N/mm²に達した後、型枠のまま寒気を受けることを想定し、封かんのまま+2~-18°C/日の凍結融解サイクルを10回行った。養生Cでは養生Bを行った後、積算温度で105°D・D程度となるまで再度5°C封かん養生を行った（回復養生）。養生Dでは養生Cと比較検討を行うために、凍結融解作用を与えずに5°C一定で105°D・D（7日間）となるまで封かん養生を行った。

凍結融解試験（JIS A 1148 A法）では10×10×40cmの角柱

表-5 養生方法（養生A~D）

養生	方法
養生A	5°C一定で3.5~5N/mm ² 程度まで封かん養生
養生B	養生A + 2~-18°C/日の凍結融解サイクルを10回
養生C	養生B + 105° D・Dまで5°C封かん養生
養生D	打設後、5°C封かん養生7日間

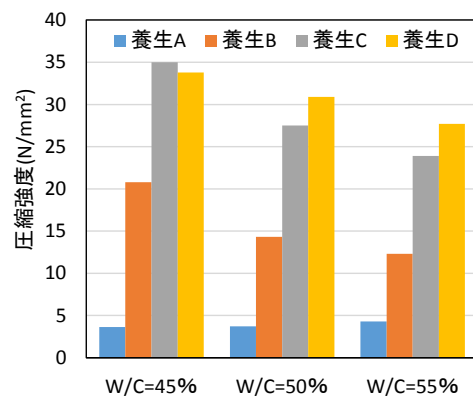


図-2 異なる養生条件を用いたコンクリートの圧縮強度（耐寒促進剤 3L/C=100kg）

供試体を用いて+5°C~-18°C/cycの凍結融解を300サイクルまで行い、一次共振振動数を測定し相対動弾性係数を算出した。耐久性指数は式(1)により算出した。

$$DF = \frac{P}{M_c} \times N \quad \text{式(1)}$$

ここに、DF：耐久性指数、P：Nサイクルのときの相対動弾性係数（%）、N：相対動弾性係数が60%になるサイクル数、または300サイクルのいずれか小さいもの、M_c：300サイクルとする。

圧縮強度試験（JIS A 1108）ではΦ10×20cmの円柱供試体を用いて圧縮強度の測定を行った。

(2) 実験結果および考察

a) 圧縮強度試験

図-2に耐寒促進剤を3 L/C=100kg 添加したコンクリートの各養生条件における圧縮強度を示す。養生Aでは養生日数を調整することで、当初の予定通り3.5~5.0 N/mm²程度となり、養生Bでは封かんのまま凍結融解作

用を受けたが未水和セメントが反応して養生Aの圧縮強度よりも約2~4倍の圧縮強度となった。養生Cおよび養生Dでは、養生過程が異なるものの積算温度が同程度なため、圧縮強度に大きな差はなかった。

b) 凍結融解試験

図-3に凍結融解試験結果を示す。凡例の標記は「W/C-耐寒促進剤添加量-養生方法」である。図-3(a)の相対動弾性係数では55-3-Aのみ210サイクルで相対動弾性係数が算出不能となったが、他の供試体では試験終了時に相対動弾性係数が100%を超える結果となった。通常のJIS試験では材齢28日の試験体を用いるため、試験中に強度増進はほとんど起こらず、相対動弾性係数は100%を超えることは無い。しかし、今回の実験では材齢初期に試験を行ったことで試験中にセメントの水和が進み動弾性係数が増加したと考えられる。

図-3(b)の質量減少率では55-3-Aだけではなく50-3-Aで質量減少率が3%を超えている。これは凍害劣化により途中で試験継続困難となった55-3-Aと同様に50-3-Aで劣化が生じているものと考えられる。また、その他の供試体では質量減少率は0~1%程度であった。

c) 凍結融解試験結果の補正

b)の凍結融解試験結果について、本来であれば相対動弾性係数は、100を超えることは無く算出結果をそのまま用いることは不適切である。また、50-3-Aや55-3-Aのように相対動弾性係数が増加後ピークを迎え、その後低下するという推移を経たものについても同様である。

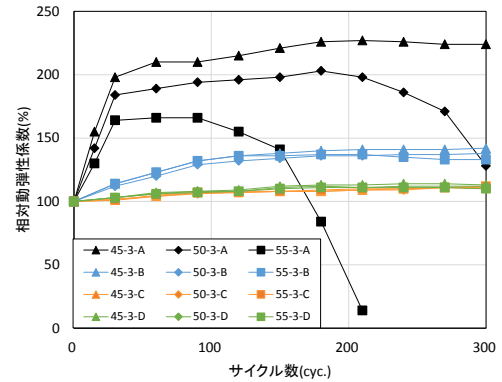
従って、これらのデータからコンクリートの耐凍害性を正しく判断するためには、適切な評価方法を用いる必要がある。そこで長合ら³⁾が提案した、強度増進に伴う動弾性係数の増加を表す式(2)を適用することとし、今回の実験結果から、あらためて動弾性係数を推定し相対動弾性係数を求めた。

$$E_d = \frac{M - M_0}{\frac{1}{a} + \frac{M - M_0}{b}} \quad \text{式(2)}$$

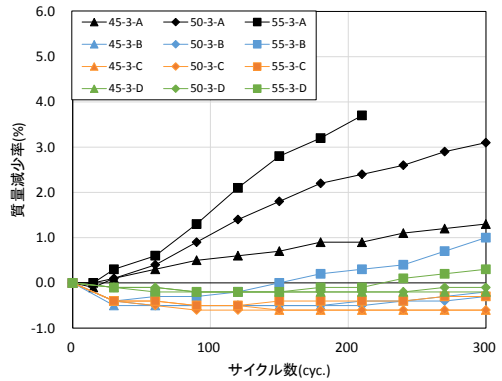
ここに、 E_d : たわみ動弾性係数 (kN/mm²)、 M_0 : $E_d \sim M$ 曲線がM軸と交わる点の値 (°D・D)、 M : 積算温度 (°D・D)、 a : 両者の関係の初期接線勾配、 b : E_d の収束値 (最大値) とする。

式(2)に含まれる未知定数 a および b は、凍結融解試験時の各供試体の動弾性係数がピークを迎えるまでの試験データとたわみ動弾性係数の推定式から求めた動弾性係数との差が最小となるように、非線形最小二乗法により求めている。

また、積算温度の計算には日本建築学会発刊の「寒中コンクリート施工指針・同解説」⁴⁾で提案している養生時に氷点下となる場合の積算温度式(式(3)、式(4))を用いて試験槽内の温度履歴を用いて算出した。



(a) 相対動弾性係数



(b) 質量減少率

図-3 凍結融解試験結果

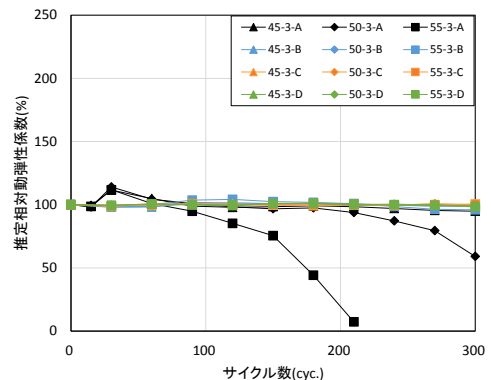


図-4 セメントの水和の進行を考慮した相対動弾性係数

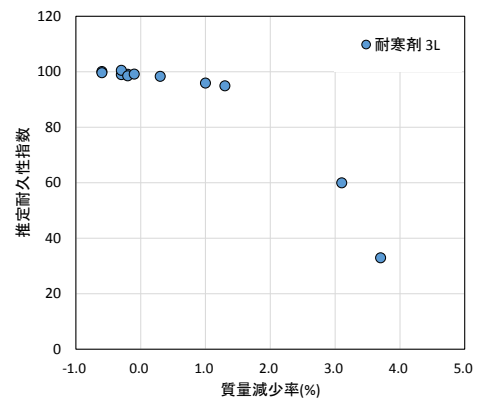


図-5 質量減少率と推定耐久性指数

表-6 耐寒促進寒剤を用いたコンクリートの養生を終了してよい圧縮強度の配合と初期性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				種類	耐寒促進剤 添加量 (L/C=100kg)	Slump (cm)	Air (%)	養生
		W	C	S	G					
45.0	45.0	160	356	792	995	a	3	8.5	4.2	B,C
45.0	45.0	160	356	792	995		3	8.5	5.1	A,D
50.0	45.9	160	320	822	995		3	9.5	5.1	B,C
50.0	45.9	160	320	822	995		3	9.5	4.8	A,D
55.0	46.6	160	291	845	995		3	8.0	4.9	B,C
55.0	46.6	160	291	845	995		3	8.0	4.6	A,D
45.0	45.0	150	333	812	1020		5	9.0	5.1	B
45.0	45.0	150	333	812	1020		5	9.0	5.3	A
50.0	45.8	150	300	839	1020		5	9.5	5.2	B
50.0	45.8	150	300	839	1020		5	9.0	5.3	A
55.0	46.6	154	280	856	1012	5	9.0	5.4	B	
55.0	46.6	154	280	856	1012	5	9.0	5.1	A	
45.0	48.0	165	367	833	924	b	3	6.8	4.7	F
45.0	48.0	165	367	833	924		5	6.4	5.9	F
50.0	46.0	165	330	809	977	c	3	6.3	4.5	E,F
50.0	46.0	165	330	809	977		5	6.7	4.7	E,F
55.0	48.0	165	300	855	953		3	7.5	4.7	E,F
55.0	48.0	165	300	855	953	5	6.5	4.3	E,F	
45.0	42.0	150	333	78	1077	d	4	6.2	8.6	G
45.0	42.0	150	333	78	1077		4	5.7	7.2	G
45.0	42.0	158	351	749	1043	f ※	3	8.5	4.9	I
45.0	42.0	158	338	754	1049		4	9.0	5.3	I
45.0	42.0	148	329	768	1069		5	7.0	5.2	H,I
50.0	43.0	158	316	780	1041		3	9.5	5.5	I
50.0	43.0	155	310	785	1049		3	9.5	7.4	I
50.0	43.0	152	304	791	1056		4	8.0	5.3	I
50.0	43.0	149	298	796	1063		4	8.5	7.0	I
50.0	43.0	148	296	798	1066		5	7.5	4.8	H,I
50.0	43.0	145	290	804	1073		5	8.5	7.4	I
55.0	44.0	158	287	808	1037		3	9.0	4.9	H,I
55.0	44.0	152	276	819	1051	4	7.5	5.4	H,I	
55.0	44.0	148	269	826	1060	5	7.0	4.8	H,I	

※耐寒促進剤fの配合は参考文献5)より参照

表-7 養生方法 (養生E~I)

$T \geq 0$ のとき

$$M = \sum (T + 10) \Delta t \quad \text{式(3)}$$

$T < 0$ のとき

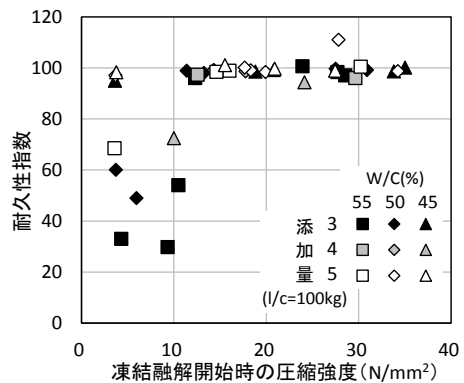
$$M = \sum 10 \times \exp(-0.60 \times (-T)^{0.74}) \Delta t \quad \text{式(4)}$$

ここに T : Δt のコンクリート温度 (°C)、 M : 積算温度 (°D・D)、 Δt : 温度測定間隔 (日) とする。

式(2)を用いて再計算を行った結果を図-4に示す。図-3において、試験開始から終了まで相対動弾性係数が増加していった多くの供試体では、再計算を行った図-4において推定相対動弾性係数はほぼ一定の100%前後となった。また、50-3-Aでは180サイクルから推定相対動弾性係数が低下し、試験終了時には相対動弾性係数60%と推定された。

図-5に質量減少率と推定耐久性指数の関係を示す。耐久性指数は図-4の結果を用いて算出した結果であるため、ここでは推定耐久性指数と表記している。この図を見ると質量減少率が3%を超えている供試体では質量減少率が1%程度の供試体よりも耐久性指数が低下傾向を示していることから、従来の手法で評価できなかった50-3-Aの凍結融解による劣化を考慮できたと考える。

養生	方法
養生E	5°C一定で48時間封かん養生
養生F	5°C一定で72時間封かん養生
養生G	5°C封かん24h → -10°C封かん27日 → 5°C水中6h
養生H	20°C一定で14日間養生
養生I	5°C一定で24h → 27日間-5°Cで養生



※耐久性指数は式(2)により補正をしたもの。

図-6 凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係

3. 養生終了時に必要となる圧縮強度の明確化

(1) 試験データ等の概要

養生を終了してもよい圧縮強度の明確化を目的に、本実験で作製した無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤を用

いたコンクリートの圧縮強度と耐久性指数の結果と、既往研究において同様の試験を行っている浜辺ら⁵⁾の結果を合わせて、凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係についてデータを整理し評価を行った。

表-6に用いたデータのコンクリートの配合等を示す。W/Cは45, 50, 55%の3水準、耐寒促進剤の添加量は3, 4, 5 L/C=100kgとした。養生は表-5に加え後述する養生E~Iの養生となっている。耐寒促進剤 a~f は無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤である。ここで、耐寒促進剤 f を用いた配合は、浜辺ら⁵⁾の文献から参照したデータに関するものである。

表-7に、表-6中の養生E~Iの養生方法を示す。養生Eでは5°Cで48時間封かん養生、養生Fでは72時間5°C封かん養生、養生Gでは5°C封かん養生を24時間行った後、-10°Cで27日間封かん養生を行い、コンクリートを融解させるために5°Cの水中へ6時間浸漬を、養生Hでは20°C一定で14日間養生、養生Iでは5°C一定で24時間前養生を行った後、-5°Cで27日間養生を行っている。

(2) データの評価

図-6に、対象とした供試体の凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係を示す。なお、耐久性指数は2. (2) c) の手順で試験結果を補正している。今回の実験等では、図-1における圧縮強度10~20 N/mm²の範囲についてのデータを多く収集することができた。その結果、圧縮強度が12 N/mm²以上であれば、耐寒促進剤を添加したコンクリートは、その添加量や水セメント比によらず凍結融解抵抗性を有していることを確認した。全ての条件において耐久性指数60を超える圧縮強度は12 N/mm²程度であるが、示方書の最大値である15 N/mm²を養生を終了してよい圧縮強度とすれば十分に安全側になると考えられる。

4. まとめ

本研究では次の各項の通り、耐寒促進剤を用いたコンクリートの圧縮強度20 N/mm²以下の評価方法を補正することにより、養生期間に係わる条件緩和の可能性を示す知見を得ることができた。

- 1) 材齢初期のコンクリートを用いた凍結融解試験では試験中にセメントの水和により強度が増加するため相対動弾性係数の測定結果をそのまま用いることは凍害劣化を正しく判断できない可能性がある。そのため、試験中の強度増進の補正を行い、初期材齢のコンクリートの劣化の有無を判断する方法が有効である。
- 2) 無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係から養生を終了してよい圧縮強度を従来の20 N/mm²から15 N/mm²へ低減することが可能と考える。

謝辞：本研究にあたり、BASFジャパン株式会社の池田氏、山宮氏ならびに株式会社フローリックの西氏、安田氏に多大なる助力を得た。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 通年施工推進協議会：耐寒促進剤を用いる寒中コンクリート施工指針（平成11年改訂）
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2007
- 3) 長合友造、山本泰彦：若材齢コンクリートの耐凍害性の評価法に関する基礎研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.71-80，1991.8
- 4) 建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説
- 5) 浜辺謙吉、上田実、阿合延明、山宮浩信：7.耐寒用特殊混和剤ノンフリーズの特性について，エヌエムビー研究所報，No.9，pp.68-91，1992.