

凝結・硬化過程に凍結を受けたコンクリートの強度増進停滞機構および被害範囲・深さ測定に関する研究

Research on Strength Enhancement Stagnation Mechanism and Damage Range and Depth Measurement of Concrete Frozen During the Setting and Hardening Process

山下 紘太朗*
Kotaro Yamashita

要旨

冬期のコンクリート工事において発生する初期欠陥として初期凍害がある。本研究では、初期凍害の強度増進停滞機構および被害後の対応について検討した。その結果、セメントペーストは凍結前後で水和反応性に変化が認められず、モルタルおよびコンクリートは凝結終結以降の凍結では水分供給によって強度回復することが確認された。ただし、コンクリートでは混和剤による連行空気が少ない場合は強度増進が停滞すること、凝結始発前後の凍結により骨材界面にひび割れが発生することが強度低下の要因の一つになることを示した。また、目視でひび割れや凍結痕がない場合でも強度低下が生じていることが確認されたことから、被害に対して適切に対応するために、初期凍害範囲・深さ測定方法について検討し、有効な手法を提案した。

キーワード：初期凍害 凝結時間 養生条件 凍結融解 強度増進 空気量

1. はじめに

寒中コンクリート工事でもっとも留意すべき点として、初期凍害の防止と強度増進の遅れへの対応が挙げられる。初期凍害とは、フレッシュ時から硬化初期にかけてコンクリート中の水分が凍結することにより、強度発現の停滞などを引き起こす被害のことである。寒中コンクリート施工指針・同解説¹⁾では、打込み後のコンクリートの圧縮強度が 5.0N/mm^2 となるまでコンクリートを凍結させないように初期養生を行うこと、適切な空気量の確保（目標空気量は $4.5\% \sim 5.5\%$ の範囲）などが規定されている。しかし、厳冬期には万全な凍結防止対策が施されるが、土間コンクリートや防水押えのコンクリート等では予期せぬ寒波や養生管理の不備などにより、部材表面を凍結させてしまうという不具合が少なからず発生しているのが現状である。

一般的に初期凍害を受けたコンクリートは、強度回復が見込めないとされている。この被害について、現在の初期凍害における強度低下機構では、若材齢時の結合力（強度）が不十分な段階で凍結を受けることで、氷の生成圧により生じる微細ひび割れを含む組織の緩みや組織の粗大化に起因していると考えられている。初期凍害による被害発生の判定は、初期材齢時に凍結を受けたコンクリートの融解後の再養生による強度回復の程度で評価される。凍結融解期間中の水和は著しく停滞するが融解後に組織の緻密化は進むため、コンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進停滞は、凍結による組織破壊の程度とその後の養生に

よる組織の緻密化のバランスが初期凍害による被害の大きさを左右するといえる。そのため、初期材齢時の凍結による強度回復程度と被害の対応を把握する必要がある。

実務における初期凍害後の対応では、凍結模様や黒ずみを確認された箇所の脆弱部において初期凍害による被害を受けた範囲を判断する。場合によってはコア抜きを実施して外観や強度等から被害範囲を特定し、ウォータージェットなどによって脆弱層を取り除き、コンクリートの打ち直しや補修が行われている。こうした被害範囲を特定するために、健全な部位についても多くのコア抜きを実施してい

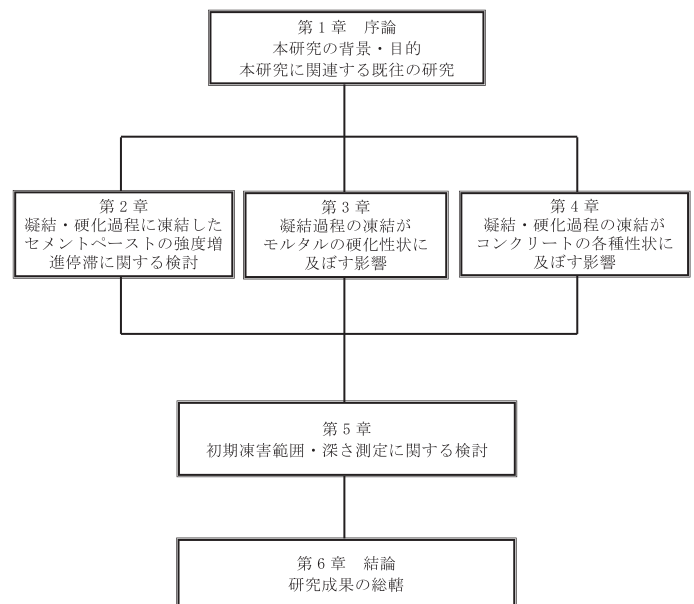


図1 本研究の構成

* 技術研究所 つくばテクノセンター

るケースもあり、こうした被害範囲を非破壊で判定する手法が必要である。また、平面的な被害範囲を特定した場合でも、被害深さを特定できず、打ち直しが行われることが多い。これは適切な対応ではあるものの初期凍害は一時的に寒気に晒された部材表層数センチにのみ被害が生じているケースがあると考えられ、被害範囲の特定と被害深さを微破壊または非破壊で簡便に測定する手法があれば、適切な対応が可能となる。

そこで本研究では、図 1 に示す本研究の構成の順にセメントペースト、モルタルおよびコンクリートを使用した実験を行い、凝結・硬化過程における凍結後の強度回復程度と被害との対応を把握し、強度増進停滞の要因を検討した。次にこれらの検討結果を踏まえ第 5 章では初期被害事例が多い土間および防水押え等を対象に適切な対応を可能とするため、実際の屋外環境で初期凍害を発生させ、新規および既存の測定方法の有効性、測定順序および測定材齢を検討し、初期凍害範囲・深さ測定手法を提案した。

2. 凝結・硬化過程に凍結したセメントペーストの強度増進停滞に関する検討

初期凍害に関する近年の研究では、凍結によるセメントペーストの被害程度および回復程度は、水セメント比と凍結融解後の養生条件の影響を大きく受ける可能性を報告している²⁾。また、貫入抵抗の増加に伴い回復比が上昇すると報告されている³⁾。

そこで第 2 章では、コンクリート中のマトリクスの検討を行うために、凝結過程の凍結によるセメントの反応性の変化を把握するとともに、凝結始発時、凝結終結時および硬化過程の凍結が強度増進に及ぼす影響を検討した。

2.1 実験概要

表 1 に養生および凍結融解条件を示す。シリーズ 1 では始発時の凍結が、セメントペーストの水和反応性および強度増進性状に与える影響の把握を行うための実験を行った。シリーズ 2 では、凝結終結以降の凍結が強度増進に及ぼす影響を確認した。シリーズ 3 では、骨材界面観察において確実に被害の有無を確認するために凝結過程に凍結を与えた。また、凍結前強度と養生後の圧縮強度比との関係を検討するために、硬化過程として、材齢 1、3、5、7 日に凍結を与えている。

セメントは、全てのシリーズで同一ロットの普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3250cm²/g）を使用した。練混ぜ水は上水道水を使用した。凍結融解条件は、試験体中心部まで確実に凍結融解を与えるために、

可変温湿度装置を使用し凍結過程は、-20℃・12 時間、融解過程は 5℃・12 時間を 1 サイクルとして、合計 3 サイクルとした。供試体は、打込み後から凍結開始材齢まで、20℃の恒温室で封かん養生を行った。凍結開始材齢を迎えた供試体には封かん状態で凍結融解作用を与え、その後、封かん養生の試験体は 20℃の恒温室に移動し、所定の材齢まで養生を行った。また、水中養生の試験体は速やかに脱型し、20℃恒温の水槽で所定の材齢まで養生を行った。

練混ぜには、強制練りミキサ（公称容量 60L、回転数 48rpm）を使用した。材料は、セメント全量の次に水全量の順で投入し 30 秒間練り混ぜ、かき落としを 1 分を行い、その後 2 分間練混ぜを行った。練上がり後はブリーディングが収まるまで容器に入れ、30 分間隔で練返しを行った。練返し以外の時間は水分が逸散しないように濡れた布をセメントペーストに触れないように覆い、練置きを行った。

供試体サイズはφ50mm×100mm とし、打込み方法は、円柱型枠を 2 層に分け、各層 12 回突き棒により突き、木槌で叩いた。その後、水分の逸散を防ぐために型枠上面をビニールシートで覆った。

凝結時間は、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて測定した。圧縮強度は、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に基づいて測定した。凍結開始材齢 6 時間の凍結融解後の打込み面は、初期凍害により表層が脆弱となり研磨ができないため、石膏でキャッピングを行った。

Ca(OH)₂含有量は TG-DTA により測定した。試料は、セメントペーストを 5mm 角に切断したものを使用した。前処理として、試料は水和を停止させるためにエタノール置換を行った。試料は、ボールミルを用いて 1 秒間に 45 回の振動を与え、10 分間継続し粉末状にした。熱分析測定における加熱の条件は、1 分間に 20℃上昇させ、1050℃

表 1 養生および凍結融解条件

シリーズ	記号	W/C (%)	凍結融解前養生条件		凍結融解条件		凍結融解後養生条件			
			時間(h)	温度	時間	条件	期間			
シリーズ 1	N	30, 35, 40, 50	凍結なし						20℃封かん 20℃水中	91d
			20℃封かん	3	-20℃ ↑↓ 5℃	72h				
	4									
	4.5									
	F	40	7.5							
50										
シリーズ 2	N	35	凍結なし						20℃封かん 20℃水中	91d
			20℃封かん	始発 45 分後	-20℃ ↑↓ 5℃	72h				
	終結時									
	終結 1h 後									
	Ffir45 Ffin Ffin1h Ffin3h	50	終結 3h 後							
シリーズ 3	N	35	凍結なし						20℃封かん 20℃水中	28d
			20℃封かん	6, 9, 12, 15, 18, 24, 72, 120, 168	-20℃ ↑↓ 5℃	72h				

に到達後 5 分間維持、その後冷却する条件で行った。本実験で算出する水和物は、水酸化カルシウム (CH) および炭酸カルシウム (CC) とした。CH の脱水の温度範囲は 400~550℃、CC の脱炭酸は 500~650℃とし、その減少量から、それぞれの生成割合を算出した。

細孔構造は、水銀圧入法によって測定した。試料は 5mm 角四方にカットしたものを使用し、TG-DTA の試料と同様に前処理を行った。

供試体断面観察は、試験体の打込み面と平行になる方向を中央で 2 等分にした面とし、研磨機を用いて表面を鏡面に近い状態まで研磨した。また、ひび割れ状況の観察を容易にするため、蛍光塗料を塗布して、紫外線ライトを照射し、マイクロスコープを用いて観察を行った。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 TG-DTA による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率測定結果

図 2 に、シリーズ 1 (始発時凍結) の材齢 4 週 (積算温度 840° D・D) における水セメント比と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の関係を示す。水セメント比が高くなるにつれて、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率も高くなることを確認できる。また、養生方法や凍結の有無において $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は変化がないことを確認した。以上の結果より、凍結の有無によって水和率は変化しないことから、凝結過程の凍結はセメントの反応性に影響を与えていないことが確認された。これは、既往の研究⁴⁾においても同様の結果であった。

2.2.2 硬化性状

図 3 にシリーズ 1~3 の凍結開始時間と圧縮強度比の関係を示す。凍結開始時間が 24 時間までは凍結なしに対する圧縮強度比が低い結果であるが、凍結開始時間が 24 時間以降では、凍結なしに対する圧縮強度比が 80%以上となることを確認された。

2.2.3 細孔構造の変化

図 4 に細孔構造の測定結果を示す。微分細孔量の結果より、W/C=35%と 50%において、凍結を与えていない N と凍結を与えている条件 F では細孔径のピークが変化していないことが確認できる。さらに累積細孔量の結果から、凍結開始時間が早いほど累積細孔量が大きくなる傾向にあることが確認された。

2.2.4 ひび割れ観察結果

写真 1 にシリーズ 1、2 の W/C=50%の供試体の断面写真を示す。凝結始発時と始発から 45 分以降に凍結したセメントペースト供試体の断面写真を比較すると、被害程度が大きく異なり、始発時には微細なひび割れが供試体全体に生じているのに対して、始発から 45 分以降では粗大なひび割れが数本生じていた。このことから、供試体

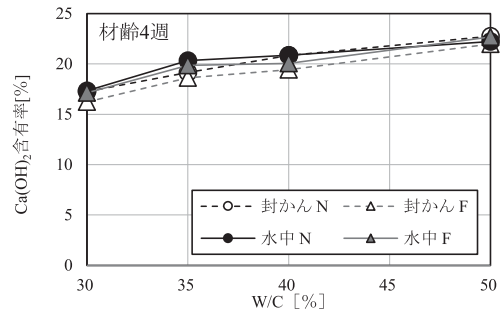


図 2 水セメントと $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の関係 (シリーズ 1)

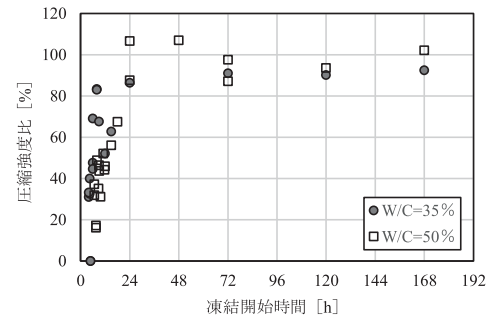


図 3 凍結開始時間と圧縮強度比の関係 (シリーズ 1~3)

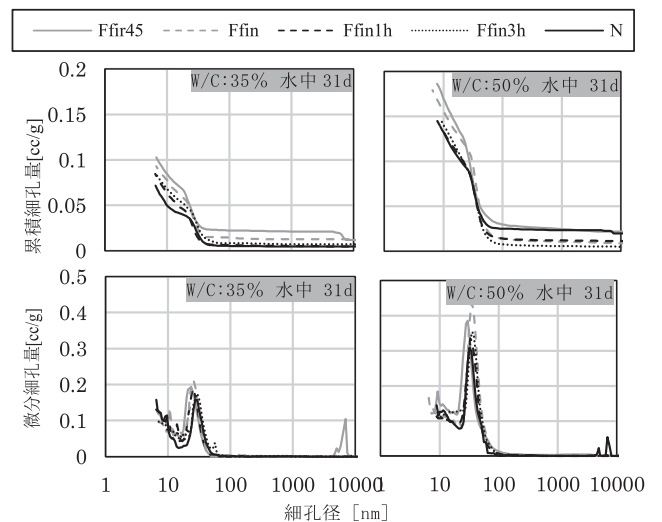


図 4 各水セメント比における細孔特性 (シリーズ 2)

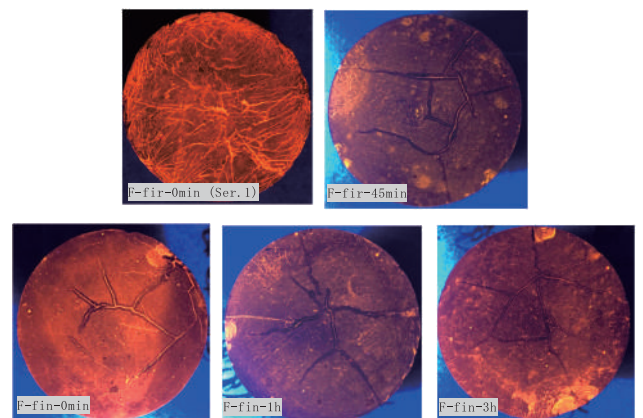


写真 1 W/C=50%の材齢 31 日まで水中養生を実施した供試体断面 (シリーズ 1、2)

の被害程度は、凝結始発前後で変化することが分かった。

シリーズ 1、2 では、材齢 4 週の圧縮強度比が 90%以下となり、全て初期凍害を受ける結果となった。凝結終結時から 3 時間においてもひび割れが確認されたが、時間が経過するにつれてひび割れ幅は小さくなっている。終結後 3 時間では、累積細孔量は小さくなっており、水和の進行に伴い組織が緻密化し、ひび割れ幅が微細になったと考える。

2.3 まとめ

凝結始発時および終結時の凍結によるセメント自体の水和反応性に変化は認められないが凍結によってひび割れが発生し、凍結なしに対する強度比は低い結果であった。凝結終結後 1 時間および 3 時間に凍結を受けたセメントペーストの強度増進は、水セメント比が低く水中養生を行ったものでは、凍結なしに対する強度比 60~70%程度まで強度増進の改善がみられた。硬化過程（材齢 1 日以降）に凍結を受けたセメントペーストでは、凍結前強度の増加にともない凍結なしに対する強度比 90%程度まで回復する結果であった。

3. 凝結過程の凍結がモルタルの硬化性状に及ぼす影響

前章の結果から、凍結によるセメントマトリクスの被害程度と湿潤養生による強度の回復程度は、凝結終結前後の凍結が大きく影響しており、コンクリートについても同様に凝結終結前後の凍結がその後の強度増進に大きく影響する可能性があると考えられた。そこで、コンクリートでの検証に先立ち、モルタルを使用して凝結過程の凍結に着目し、水セメント比、凍結融解後の養生条件および凍結融解回数が強度増進に及ぼす影響を検証し、モルタルの強度回復条件を確認することとした。

3.1 実験概要

表 2 に要因と水準を示す。W/C は 45、55、65%の 3 水準とした。凍結融解は-20℃・12 時間の凍結と、5℃・12 時間の融解を 1、3、6 サイクルの 3 水準について実施した。凍結開始材齢は 3h、6h、8h、12h、18h、24h、凍結なし (N) について実施した。凍結開始までは 20℃封かんで前養生を行った。養生方法は封かんと水中について実施した。養生温度は 10℃、20℃、30℃の 3 水準とした。表 3 に使用材料を示す。表 4 に調合を示す。W/C は 45%、55%、65%の 3 水準とし、C : S = 1 : 3 の non-AE モルタルとした。供試体は φ 50mm × 100mm とした。

表2 要因と水準

W/C (%)	凍結開始材齢 (h) ^{※1}	回復養生方法	回復養生温度 (℃) ^{※2}	凍結融解サイクル ^{※3}
45 55 65	3	封かん 水中	10 20 30	(-20℃・12h⇔5℃・12h) × 1
	6			(-20℃・12h⇔5℃・12h) × 3
	8			(-20℃・12h⇔5℃・12h) × 3
	12			(-20℃・12h⇔5℃・12h) × 6
	24			
	凍結なし (N)			

※1 : W/C=55%、水中養生について凍結開始材齢 3、12、18h を実施

※2 : W/C=55%について養生温度 10、30℃を実施

※3 : W/C=55%、水中養生について凍結融解回数1、6サイクルを実施

表3 使用材料

項目	記号	種類
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 : 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	掛川産山砂、表乾密度 : 2.57g/cm ³ 、吸水率 : 2.31% F.M. : 2.81

表4 調合

W/C (%)	S/C	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	フロー (mm)	空気量 (%)
45	3	233	517	1551	150	2.0
55		270	492	1475	184	2.0
65		305	469	1406	219	2.0

表5 測定項目および試験方法

対象	測定項目	試験方法
フレッシュモルタル	フロー	JIS R 5201
	空気量	JIS A 1128
	凝結時間	JIS A 1147
硬化モルタル	圧縮強度	JIS A 1108
	空隙量 ^{※1}	アルキメデス法
	細孔量 ^{※2}	水銀圧入法

※1 : 凍結融解サイクル 1、6cy、10℃封かん、30℃封かん養生以外にて測定

※2 : 凍結開始材齢 6、8、24h、20℃水中養生における凍結融解 3 サイクル後および材齢 31d にて測定

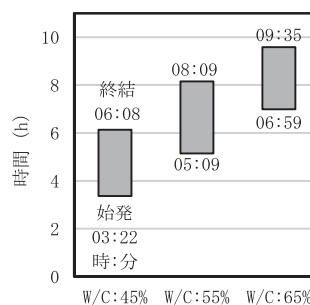


図5 凝結時間試験

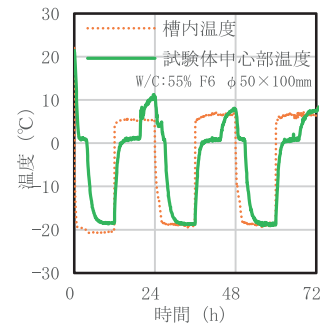


図6 温度測定結果

表 5 に測定項目および試験方法を示す。空気量はモルタル用エアメータを用いて測定した。アルキメデス法および水銀圧入法の試料は φ 50mm × 100mm の供試体から採取した 5mm × 5mm × 5mm の試料を用いた。圧縮強度試験は φ 50mm × 100mm の供試体にて実施した。なお、初期凍害による劣化の判定は、材齢 28 日における凍結作用を受けない供試体に対する凍結作用を受けた供試体の圧縮強度比が

90%以下の場合とした⁵⁾⁶⁾。表面観察、引っかき試験の型枠は、縦 160mm×横 220mm×高さ 40mm のポリスチレン製の容器を使用した。表面観察は、凍結開始材齢 1、3、5、6、7、8、9、10、12 時間において-20℃を 24 時間実施し、供試体を取り出したのちに 20℃60%RH の試験室において表面観察を行った。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 温度測定結果および凝結時間試験結果

図 5 に凝結時間試験の結果を示す。凍結開始時間が 6 時間は W/C=45%の終結時間と、凍結開始時間が 8 時間は W/C=55%の終結時間に近い条件となった。図 6 に凍結融解時の温度測定結果を示す。供試体 (φ 50mm×100mm) の中心温度は W/C=55%、F6 (凍結開始材齢が 6 時間の条件) における中心温度を示し、凍結時の中心温度は約-20℃まで低下していることを確認した。融解時において中心温度が 5℃以上となっているが、これは、始発直後に凍結を受けているものの、融解時のわずかな時間に水和反応が再開している可能性が考えられる。

3.2.2 強度増進性状および全空隙率の変化

図 7 に、W/C=45%における強度増進性状および全空隙率の変化を示す。破線は N の 20℃水中養生、材齢 28 日に対する圧縮強度比 90%を示す。図 7~9 の凡例は W/C - 凍結開始材齢 - 回復養生温度・方法を示す。水中養生は水または W、封かん養生は封または S と表記している。凍結開始材齢 6 時間においても、基準とする凍結なしと同等まで強度回復した。凍結開始材齢 8h、24h の水中養生では凍結なし以上の高い強度を示している。これは、終結後に凍結融解を受けているものの、凍結融解過程が低温養生として働き、長期的に強度増進したことによるものと考えられる。

図 8 に、W/C=55%における強度増進性状および全空隙率の変化を示す。封かん養生の条件は、既往の研究と同様に強度比が低下する結果であった³⁾⁷⁾⁸⁾。終結前に凍結融解を受けた条件である凍結開始材齢 6h の圧縮強度増進は停滞する結果となった。凍結開始材齢 8h および 24h の水中養生では強度増進の停滞はみられない。

図 9 に W/C=65%における強度増進性状および全空隙率の変化を示す。終結前に凍結融解を受けた条件である凍結開始材齢 6h および 8h の圧縮強度増進は停滞する結果となった。全空隙率はすべての条件において、圧縮強度の増進に伴い空隙率が低下する傾向を示した。以上の結果から、凝結終結以降の凍結であれば、水分供給を行うことで、凍結なしと同等の圧縮強度および全空隙率となる傾向であることが確認された。

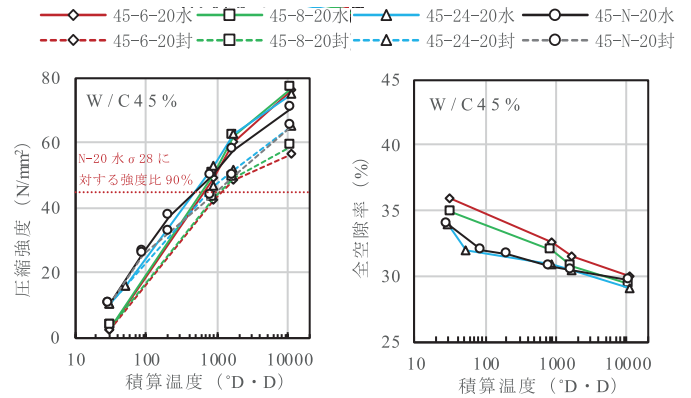


図 7 強度増進性状および全空隙率の変化 (W/C45%)

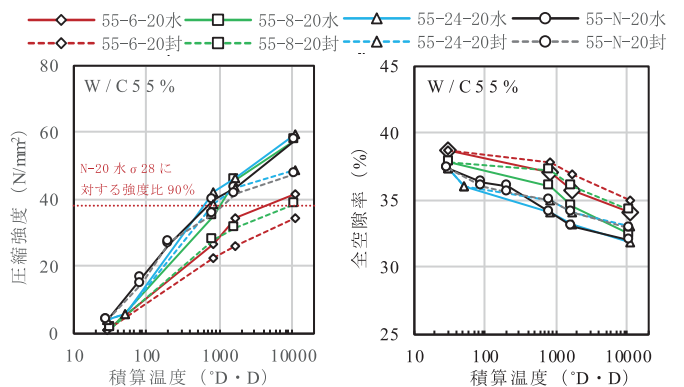


図 8 強度増進性状および全空隙率の変化 (W/C55%)

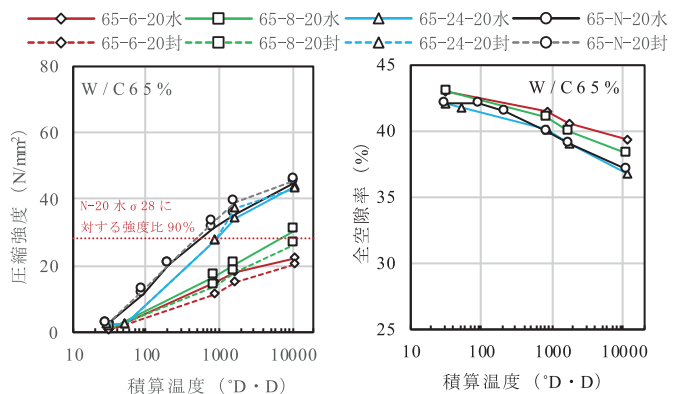


図 9 強度増進性状および全空隙率の変化 (W/C65%)

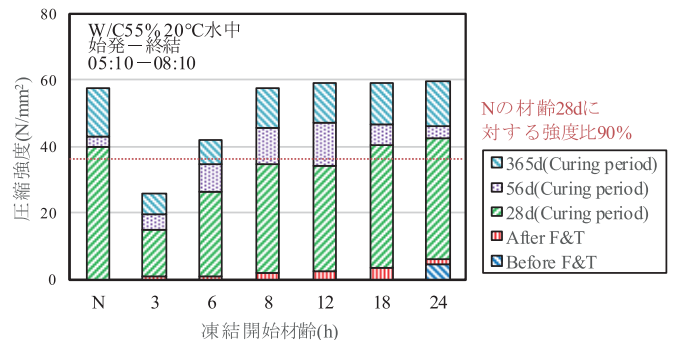


図 10 凍結開始材齢と圧縮強度の関係 (W/C55%)

3.2.3 各種要因が圧縮強度および空隙率に及ぼす影響

図 10 に、W/C=55%、20℃水中養生における凍結開始材齢と圧縮強度の関係を示す。凝結終結時に凍結融解を受けた条件となる凍結開始材齢 8 h は材齢 31 日の時点では凍結なしに対する圧縮強度比で 90%以下であるが、材齢 59 日において圧縮強度は凍結なし以上となった。すなわち、凍結開始材齢が終結以降であれば、水中養生を行うことで凍結なしと同等以上に強度回復する結果となった。

図 11 に凍結開始材齢が全空隙率の変化に及ぼす影響を示す。図 10 において圧縮強度が低い凍結開始 3 および 6 時間は、長期間の水中養生を行ったとしても全空隙率が凍結なしより大きい結果となった。したがって、凍結開始時間 3 および 6 時間は組織が緻密化しておらず、圧縮強度が低い結果になったと考えられる。

図 12 に水中養生における養生温度が圧縮強度に及ぼす影響を示す。養生温度 10℃、30℃は同様の強度増進性状となっており、養生温度が 10℃においても長期間水中養生を行うことで、強度回復する傾向にあることを確認した。

図 13 に封かん養生における養生温度と圧縮強度の関係を示す。封かん養生では水中養生と比較して強度が低く、回復養生は水分の供給が有効であるといえる。

図 14 に水中養生における養生温度が全空隙率に及ぼす影響を示す。養生温度に関わらず、水中養生することで空隙率が小さくなる傾向を示した。

図 15 に凍結融解回数と圧縮強度の関係を示す。凍結融解回数は 1 回と 6 回では同様の強度増進性状を示し、凍結融解回数の影響は小さい結果となった。したがって、初期材齢時に一度でも凍結を受けると強度低下が生じるものと考えられる。

3.2.4 空隙構造の変化

図 16 に、W/C=45%、55%、65%の凍結融解後、材齢 31 日および材齢 1 年の空隙径分布を示す。いずれの水セメント比および凍結開始材齢においても凍結融解後から材齢 31 日、1 年まで養生することで、細孔径分布のピークが細孔径の小さい側へ推移している。初期材齢時に凍結融解を受けた場合、水セメント比が大きいほどペーストの細孔径分布は、初期の凍結融解の影響が大きく、1000nm を超えるサイズの細孔が増加する⁷⁾と報告されている。凍結融解 3 サイクル後の累積細孔量は、水セメント比が大きいほど 1000nm を超える細孔量が多い結果であった。

3.2.5 表面性状への影響

写真 2 に表面観察結果を示す。記号 F の後ろの数字は凍結開始材齢を示し、F1 であれば凍結開始材齢 1 時間の条件である。すべて刷毛で表面の脆弱層を取り除いた状況の写真である。始発時間は 5 時間 10 分、終結時間は 8 時

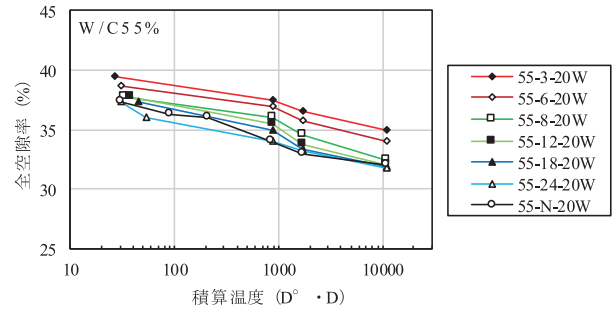


図 11 凍結開始材齢が全空隙率の変化に及ぼす影響

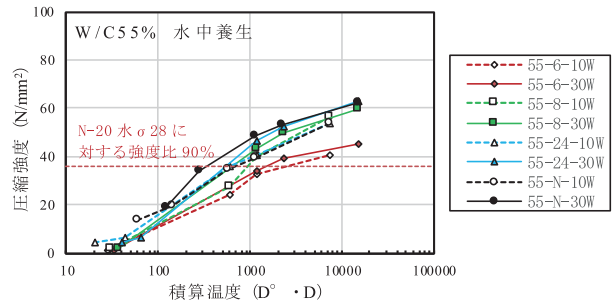


図 12 養生温度が圧縮強度に及ぼす影響 (水中養生)

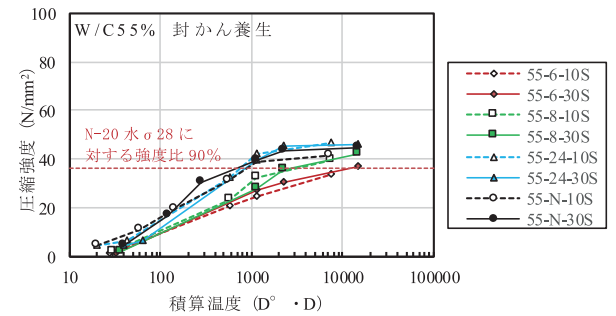


図 13 養生温度が圧縮強度に及ぼす影響 (封かん養生)

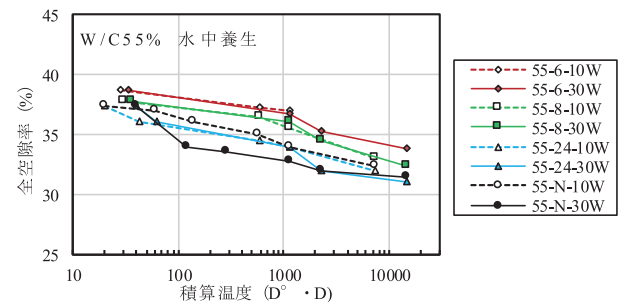


図 14 養生温度が全空隙率に及ぼす影響 (水中養生)

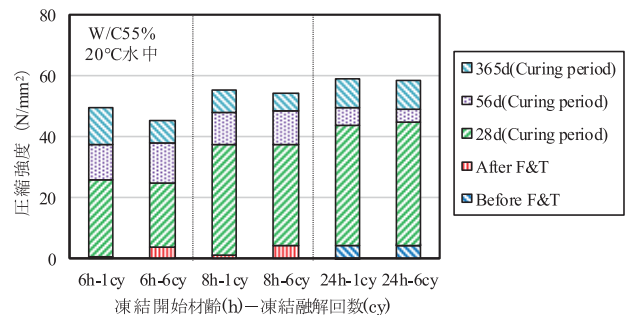


図 15 凍結融解回数と圧縮強度の関係 (W/C55%)

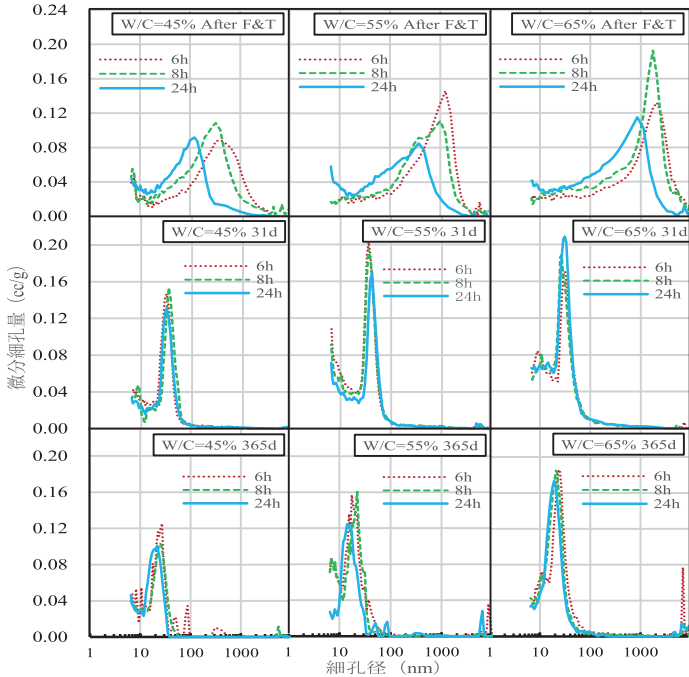


図 16 細孔径と微分細孔量 (20℃水中養生)

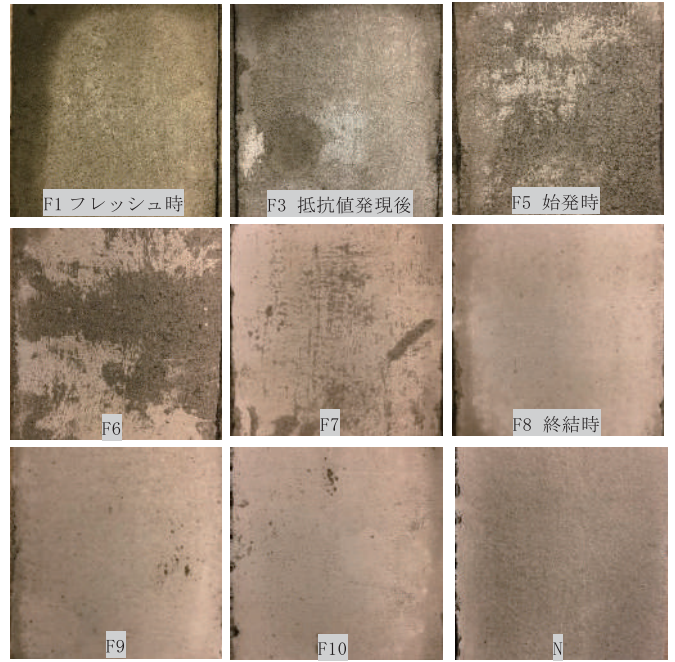


写真 2 表面観察結果

間 10 分であった。F1、F3、F5 は、刷毛で表面を掃くだけで削れるほどの脆弱層を形成していた。F6、F7 は表面を刷毛で掃くとわずかに削れる程度の脆弱層を形成していた。終結時に該当する F8 以降は表面観察の範囲では脆弱層を形成していない結果であった。

3.3 まとめ

モルタルを使用して、凝結過程の凍結に着目し、水セメント比、凍結融解後の養生条件および凍結融解回数が強度増進に及ぼす影響を検証し、モルタルの強度回復条件と表面に凍結模様や黒ずみ（脆弱層）が発生する条件を確認した。その結果、凝結終結以降の凍結では水分供給により、圧縮強度および全空隙率は凍結なし同等まで回復し、凝結終結前の凍結では、モルタル表面に凍結模様や黒ずみ（脆弱層）が発生することが分かった。

4. 凝結・硬化過程の凍結がコンクリートの各種性状に及ぼす影響

前章で、凝結終結以降の凍結であれば水分供給により、圧縮強度および全空隙率は凍結なしと同等まで回復することが確認された。コンクリートにおいても凝結終結時の凍結後の水分供給が強度増進性状に及ぼす影響を確認するため、各種コンクリートで終結時に凍結した場合の強度増進性状について検証した。また、コンクリート供試体とモルタル供試体を用いて、凝結・硬化過程の凍結が骨材界面と

マトリクスに及ぼす影響の観察と、その断面状態に対する圧縮強度比の対応を検討し、強度増進停滞機構について検討した。

4.1 実験概要

表 6 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドを使用し、水は上水道水を使用した。混和剤については、AE 剤、AE 減水剤（標準形）、AE 減水剤（遅延形）、高性能 AE 減水剤（標準形）、高性能 AE 減水剤（遅延形）、および高性能減水剤を使用した。

表 7 にコンクリートの調合を示す。シリーズ 1 では、単位セメント量は 300kg/m³ および 350kg/m³ の 2 水準とした。目標スランブは 8cm および 18cm の 2 水準とした。単位水量は、練上がり時のスランブが目標スランブの ±1.0cm となる量とした。混和剤の使用量はいずれも、製造会社の推奨する量とした。シリーズ 2 では、W/C=35%、

表 6 使用材料

項目	Ser.	概要
セメント (C)	1, 2	普通ポルトランドセメント、密度 : 3.16g/cm ³
水 (W)	1, 2	上水道水
細骨材 (S)	1	茨城県神栖市産陸砂、表乾密度 : 2.59g/cm ³ 、吸水率 : 1.20%、F. M. : 2.30
	2	登別産陸砂、表乾密度 : 2.68g/cm ³ 、吸水率 : 2.17%、F. M. : 2.30
粗骨材 (G)	1	東京都青梅市産砕石、表乾密度 : 2.65g/cm ³ 、実積率 : 60.1%、最大寸法 : 20mm
混和剤 (Ad)	1	AE 剤 AE 減水剤（標準形 I 種、遅延形） 高性能 AE 減水剤（標準形 I 種、遅延形） 高性能減水剤
	2	高性能 AE 減水剤（標準形 I 種）

50%の2水準とし、単位水量と単位粗骨材量を一定とした。シリーズ1、2ともに、20℃の試験室内で強制二軸練りミキサを用い、すべての材料をミキサに投入した後、90秒練り混ぜた。

表8に凍結融解および養生条件を示す。記号Nは凍結なし、Ffinは凝結終結時凍結を示す。F6hは材齢6時間で凍結を開始したことを示し、No.5、6、9で実施した。S7d→Wは、材齢7日まで封かん養生を行い、その後水中養生であることを示し、水中養生の開始時期の影響について確認するために、No.5において実施した。本実験では、凍結開始時までには20℃封かん養生とし、-20℃・12時間の凍結と、5℃・12時間の融解を1サイクルとして計3サイクルの凍結融解を与えた。

供試体寸法はφ100mm×200mmとした。圧縮強度は、JIS A 1108に準拠し、測定材齢は材齢7日、28日、91日とした。静弾性係数の測定は、材齢28日の圧縮強度試験時に実施した。

塩分浸透深さは、高性能AE減水剤(標準形)を使用している調合ケースのNo.6において実施した。試験は、供試体φ100mm×200mmを用い、温度20℃、相対湿度60%の条件で4週間空中養生し、塩水噴霧2時間(35±1℃)、乾燥4時間(20~30%RH)、湿潤2時間(95%RH以上)を1サイクルとして、JIS K 5600-7-9(サイクル腐食試験方法)サイクルAに準拠して5±1%の濃度の塩水を噴霧した。塩分浸透深さの測定は沖縄における5年間暴露に相当する225サイクル終了時に実施した。塩分浸透深さの測定方法は、硝酸銀溶液噴霧法¹⁰⁾とした。試験体を縦方向に割裂し、割断面に0.1mol/L硝酸銀水溶液を噴霧して塩化物イオンを着色させ、コンクリート表面から白色に呈色した境界までの距離を各10か所測定し、その平均値を試験結果とした。

促進中性化試験は、供試体100mm×100mm×400mmを用い、JIS A 1153(コンクリートの促進中性化試験方法)に準拠し、No.6のN、Ffin、F6hを対象に実施した。中性化深さは、JIS A 1152(コンクリートの中性化深さの測定方法)に準じて測定した。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 凝結終結時に凍結した各種コンクリートの強度増進性状 シリーズ1

図17に凝結時間試験結果を示す。図中には、凍結開始のタイミングを示した。凍結開始時間は全ての条件で凝結終結時とした。No.5、No.6、No.9は、材齢6時間で凍結を開始しており、No.6、No.9では凝結始発前に凍結を与える条件となった。

表7 コンクリートの調合

Ser. No.	混和剤	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					フレッシュ		
				W	C	S	G	Ad	S1 (cm)	Air (%)	温度 (°C)
1	Plain	61.0	47	183	300	860	1011	-	8.5	1.1	19.5
	AE剤	56.7	45	170	300	804	1024	7	9.0	4.6	20.5
	AE減水剤(標準形)	51.7	45	155	300	821	1047	15	7.5	4.0	20.5
	AE減水剤(遅延形)	51.7	45	155	300	821	1047	15	7.5	3.9	20.0
	Plain	58.0	47	203	350	817	960	-	18.5	1.0	20.0
	高性能AE減水剤(標準形)	46.6	47	163	350	829	974	20	19.0	3.5	20.0
	高性能AE減水剤(遅延形)	46.6	47	163	350	829	974	20	18.5	4.3	20.0
	Plain	53.7	46	188	350	817	1000	-	8.5	1.6	20.0
	高性能減水剤	45.7	45	160	350	832	1060	15	7.0	1.7	20.0
2	高性能AE減水剤(標準形)	35.0	42.0	210	599	375	609	4.5	65.0	2.6	19.0
	-	50.0	36.3	210	419	476	609	-	19.0	0.7	17.0

表8 凍結融解および養生条件

Ser.	記号	S1 (cm)	凍結融解条件			養生条件	試験材齢(d)
			開始時間	温度(°C)	サイクル数		
1	N Ffin F6h	8 18	凍結なし			20℃水中	7 28 91
			終結時	-20℃12h ‡ 5℃12h	3		
	Ffin-S7d→W F6h-S7d→W	18	終結時			-20℃12h ‡ 5℃12h	3
			6h				
2	N F3h~F72h	18	凍結なし			20℃水中	28
			3h~72h	-20℃12h ‡ 5℃12h	3		

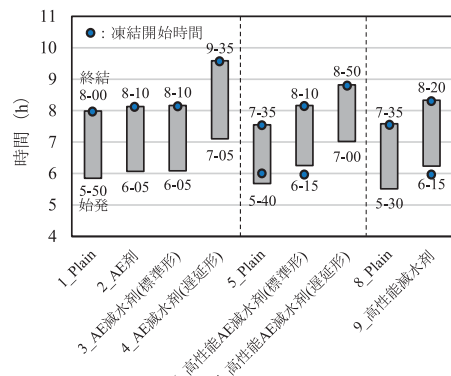


図17 凝結時間試験結果

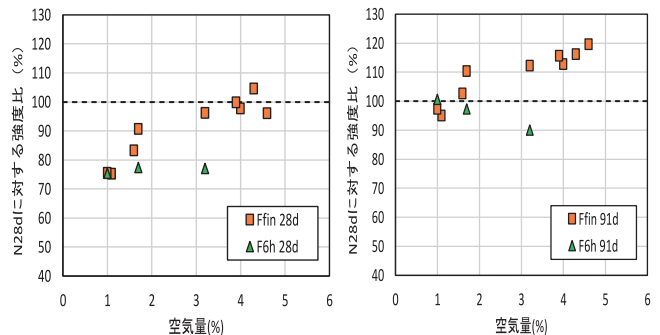


図18 空気量と圧縮強度比の関係(材齢28日)

図18に空気量とN28dに対する強度比の関係を示す。空気量を4.5%程度確保したFfinは、強度比90%以上であった。一方、空気量1.0%程度のFfinは、強度比が75

～90%程度と小さかった。材齢 91 日では空気量が大きいほど N28 d に対する強度比が高くなる傾向であり、凝結終結時に凍結を受けたコンクリートの強度増進に対しても、連行空気が有効に働く結果であった。

図 19 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。全ての静弾性係数が、推定式 (JASS 5 (解 3.1 式)) で計算される値の 80%以上を満足する結果であった。終結時に凍結を受けその後凍結なし同等まで圧縮強度が回復した条件においても、静弾性係数には影響はない結果であった。

図 20 に圧縮強度と中性化速度係数の関係を示す。F6h は中性化速度係数が大きく、既往の研究⁸⁾同様に、強度低下が生じたものは中性化速度係数が大きい結果となった。Ffin は、圧縮強度と中性化速度係数ともに N と同等の結果となった。既往の研究では、初期凍害の兆候を示さないにもかかわらず、中性化抵抗性が低い結果になったものも報告されており¹¹⁾、より多くの実験データによって、初期材齢時の凍結がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について検討する必要がある。

図 21 に圧縮強度と塩分浸透深さの関係を示す。F6h は、塩分浸透深さが大きい傾向にあるが、圧縮強度の増加に伴い、塩分浸透深さが小さくなっている。Ffin は、圧縮強度増進に伴い、凍結なしと同等の塩分浸透深さとなっている。図 22 に圧縮強度と全空隙率の関係を示す。F6h は、全空隙率が大きい傾向にあるが、圧縮強度の増加に伴い、全空隙率が小さくなっている。Ffin は、圧縮強度増進に伴い、凍結なしと同等の全空隙率となっている。本実験の

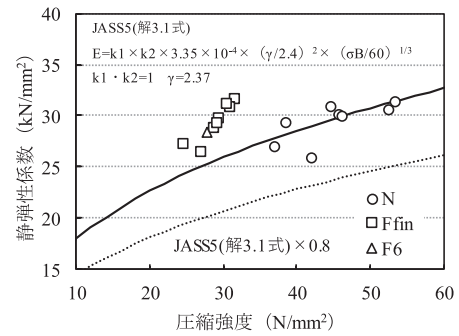


図 19 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 28 日)

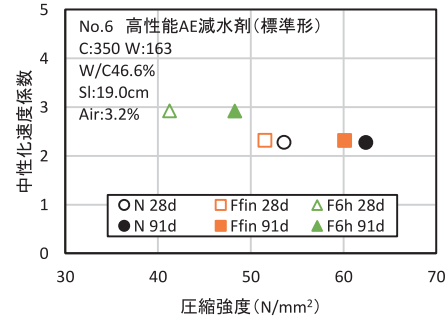


図 20 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (No. 6)

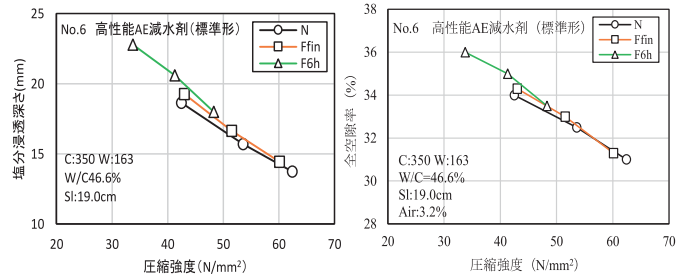


図 21 塩分浸透深さ (No. 6)

図 22 全空隙率 (No. 6)

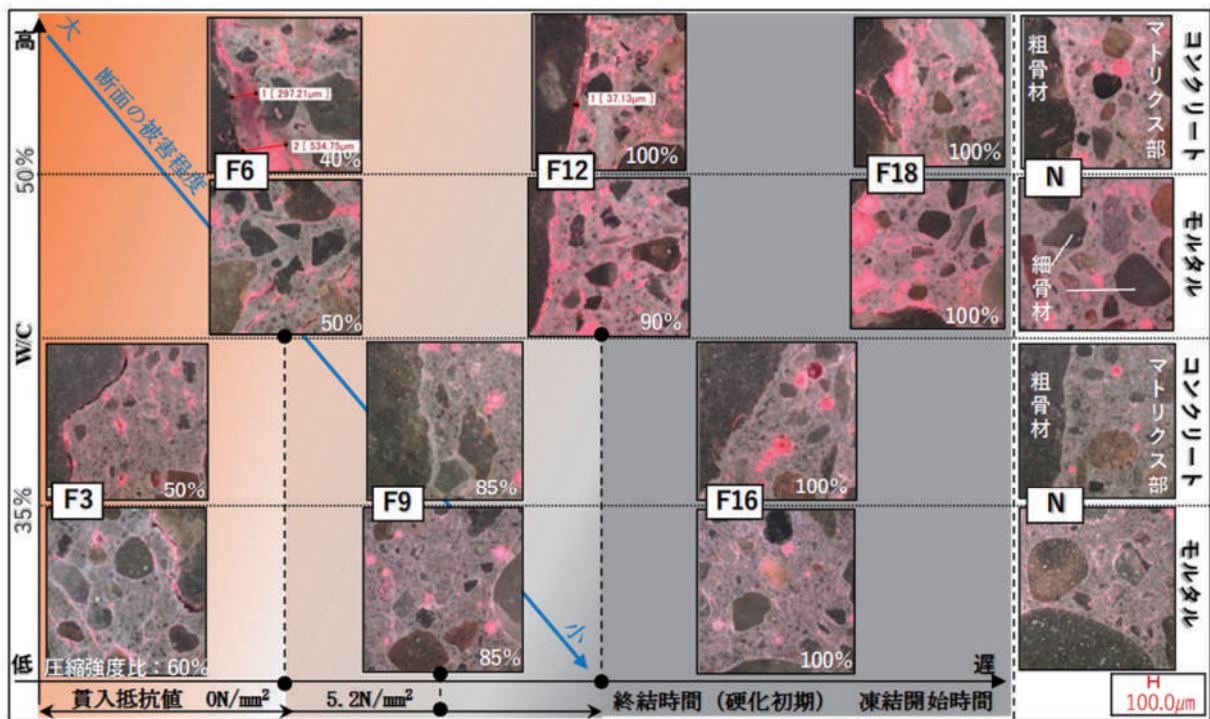


図 23 マイクロスコープによるコンクリート・モルタルの断面観察

範囲では、凝結終結時凍結の後に、凍結なしと同等の圧縮強度となった場合には、中性化抵抗性および塩分浸透抵抗性には大きな違いは認められなかった。

4.2.2 モルタルおよびコンクリートの骨材界面観察と強度比の対応の検討 シリーズ2

図 23 にマイクロスコープによるコンクリート・モルタルの断面観察を示す。W/C=50%において、F6 のコンクリートでは粗骨材の界面に剥離が大きく生じている。W/C=35%の F3 においても剥離が生じている。つまり凝結始発前に凍結を受けた場合、マトリクスには多数のひび割れが生じ、骨材界面には表面吸着水が存在しているために、剥離が大きく生じたものと考えられる。断面の被害程度は、水セメント比が低く、凍結開始材齢が遅いほど小さくなった。断面の被害程度と圧縮強度比について見てみると、F12 では粗骨材の界面に微細なひび割れが生じているものの圧縮強度比は低下していない。一方、F9 では骨材界面にひび割れは確認できないが、圧縮強度比は低下している。したがって、目視においてひび割れを確認できない場合でも、強度低下している場合がある。そのため、施工現場での初期凍害診断として目視のみでは不十分だと考える。

4.3 まとめ

混和剤による連行空気がないものは、凝結終結時の凍結により強度増進が停滞する結果であった。また、凝結始発前後の凍結を受けた場合には骨材界面にひび割れが生じており、強度低下の要因の一つであることを示した。また、凝結・硬化過程に凍結を受けたコンクリートの強度増進性状を確認した結果、空気量 4.5%程度確保されたコンクリートであれば、凝結終結以降に凍結を受けた場合でも、その後水中養生を行うことで、凍結なしと同等まで強度回復すること、終結以降の凍結であれば凍結模様が現れないことが確認された。

5. 初期凍害範囲・深さ測定に関する検討

実際の施工現場では初期凍害による凍結被害を受けた場合の凝結・硬化性状は不明である。そのため、凍結被害が確認できれば、被害範囲と深さの特定が必要である。そこで、初期凍害事例が多い土間および防水押え等を対象とし、初期凍害範囲・深さ測定として有効になりうる測定方法について新規および既存の測定方法を選定することとした。試験体は実際の屋外環境で初期凍害を発生させ、各種測定方法の有効性、測定順序および測定材齢を検討し、初期凍害範囲・深さ測定手法を提案する。

表9 実験条件

試験体記号	W/C (%)	環境	養生方法	養生期間 (日)
I-W	55	屋内 (20℃RH60%)	湿潤養生シート	7 28 91
I-A			養生なし	
O-W		屋外 (つくば冬期)	湿潤養生シート	
O-A			養生なし	
Ffin-W		終結時 -20℃12h→屋外	湿潤養生シート	
Ffin-A			養生なし	

表10 使用材料

項目	記号	種類
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度：3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S1	茨城県神栖市産陸砂 表乾密度：2.59g/cm ³ 吸水率：1.20% F.M.：2.30
	S2	栃木県佐野市産砕砂 表乾密度：2.63g/cm ³ 吸水率：1.23% F.M.：3.30
粗骨材	G	茨城県土浦市産砕石 表乾密度：2.68g/cm ³ 実積率：60%
混和剤	Ad	AE減水剤（標準形I種）

表11 調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュ		
		W	C	S1	S2	G	Ad	S1 (cm)	Air (%)	温度 (℃)
57.0	47.0	177	311	578	253	965	3.11	18.0	4.5	10

表12 測定項目および試験方法

対象	測定項目	試験方法
初期凍害範囲測定	表面強度（引っかけ傷幅）	日本建築工学会式引っかけ試験器
	表面強度（反発度）	JIS A 1155
初期凍害深さ測定	削孔時消費電力	コアドリル削孔
	孔壁観察	工業用内視鏡φ6.9mm
	濡れ色境界	コア → デジタルカメラ
	超音波伝播速度	透過法（コア試験体）
	蛍光粉末によるひび割れ観察	コア試験体
	空隙構造	水銀圧入法

5.1 実験概要

表 9 に実験条件を示す。環境は 20℃60%RH の屋内、冬期における上屋を設けた屋外と終結時に-20℃で凍結後屋外の 3 水準とした。凍結は可変湿度装置で-20℃を 12 時間の凍結を与え、その後、屋外に静置の条件とした。養生条件については、気中養生および材齢 1 日以降に湿潤養生シートによる湿潤養生を行う 2 水準とし、養生期間は 7、28、91 日とした。湿潤養生シートは、コンクリートの鉛直面にも貼りつけて使用可能であるものを使用した。

表 10 に使用材料、表 11 に調合を示す。コンクリートは、24-18-20-N の実機練りコンクリートを使用した。荷卸し時のコンクリート温度は 10℃、材齢 1 日までの最低気温は-6℃であった。試験体は屋外環境において初期凍害を発生させ、リバウンドハンマーによる測定を行うことから、300mm×300mm×100mm とした。なお、各種試験は試験体外周部 50mm を除いて行うこととした。コンクリート

の打込みは 2 層打ちとし、締固めは棒状パイプレータを使用した。屋外環境の試験体については打込みについても屋外で実施した。表 12 に測定項目と試験方法を示す。

5.2 実験結果および考察

5.2.1 初期凍害範囲測定手法の検討

図 24 に反発度試験結果を示す。屋外の条件 (0) は、明らかに反発度比が低い結果になった。図 25 に引っかかり試験結果を示す。屋外の条件 (0) は引っかかり傷幅が大きい結果となった。屋外で試験体表面に凍結模様が発生し、初期凍害を受けた O-W は、湿潤養生後も傷幅が大きい結果となった。終結時凍結後に水分供給を行った Ffin-W は、凍結なし (I-W) と同等の傷幅となった。

本実験は、外気温は氷点下になったものの、コンクリート温度は深さ 10mm において 3℃以上確保しており、深さ方向の被害はなく、表面のみ被害を受けたケースである。反発度は、表面のみの被害に対しても材齢 7 日以降で低い結果を示しており、被害範囲の調査に有効である。引っかかり試験についても、被害を受けた条件では引っかかり傷幅が大きい結果となり、表面のみの被害を受けている範囲の特定に有効な試験であると考えられる。

5.2.2 初期凍害深さ測定手法の検討

図 26 にドリル負荷設定 12A におけるコア径 $\phi 59\text{mm}$ 、 $\phi 21\text{mm}$ の削孔時消費電力変化を示す。屋外で凍結模様が発生し、その後も屋外気中養生とした O-A は 0~30mm において消費電力が低く推移しており、コアドリルによる削孔時消費電力変化は、被害深さの推定と深さ方向の健全性確認に有効と考える。測定時期は、コア採取に際し、健全部のコンクリートが十分に硬化して、粗骨材とモルタルとの付着が採取作業によって害を受けなくなった時期に行うこととする。一般に材齢 14 日以降とするか、圧縮強度 $15\text{N}/\text{mm}^2$ 以上に達した後とするのが良い (JIS A 1107 (コンクリートからのコア採取方法及び圧縮強度試験方法)) とされており、これに準じた。判断基準は健全部と被害部で消費電力と削孔深さの関係において、健全部より消費電力が低く推移している深さまでは、被害の可能性はある。写真 3 に、工業用内視鏡によるひび割れ観察結果を示す。削孔径は $\phi 11\text{mm}$ である。写真に見える白い棒は撮影箇所をの深さを把握するための小型スケール ($\phi 2\text{mm}$) である。O-A 深さ 0mm~30mm の範囲において、超低粘度蛍光エポキシの発光が確認された。ボンドシリンダーによって注入される超低粘度エポキシの適用ひび割れ幅は 0.2mm 以上とされており、深さ 30mm 以深には、0.2mm 程度のひび割れは発生していないと考えられる。超低粘度蛍光エポキシを使用した、工業用内視鏡とブラックライト併用によるひび割

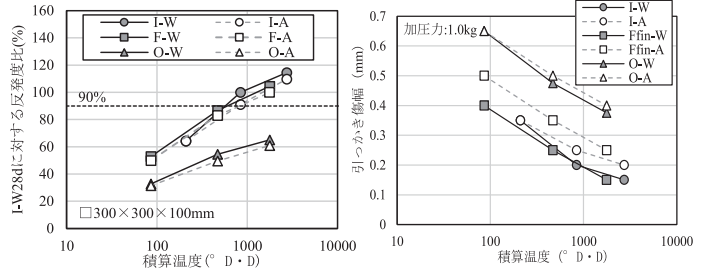


図 24 反発度試験結果

図 25 引っかかり試験結果

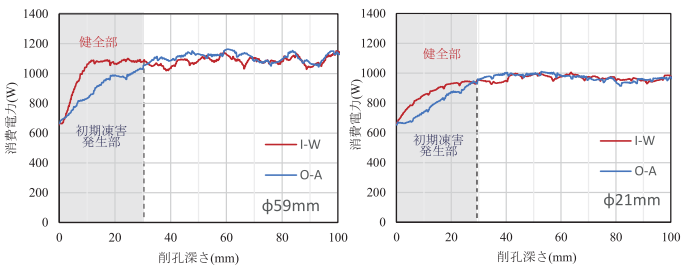


図 26 削孔深さと消費電力の関係

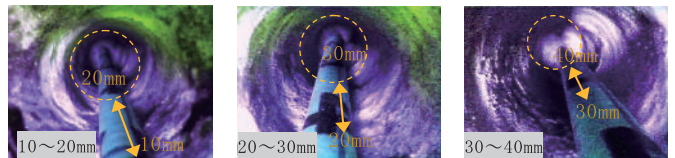


写真 3 工業用内視鏡によるひび割れ観察結果

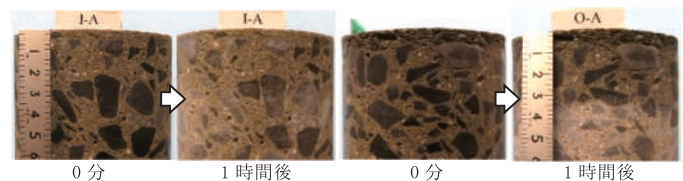


写真 4 濡れ色の経時変化観察結果

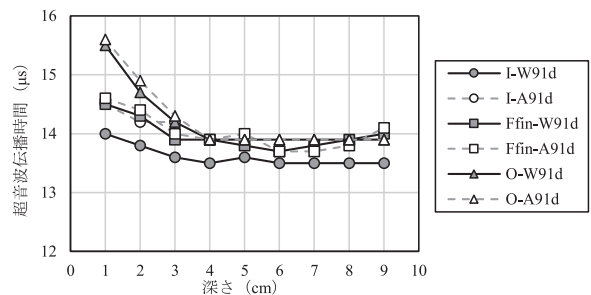


図 27 超音波伝播時間と測定位置の関係

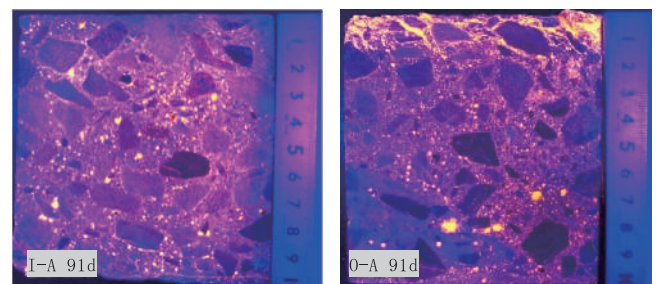


写真 5 蛍光粉末によるひび割れ観察結果

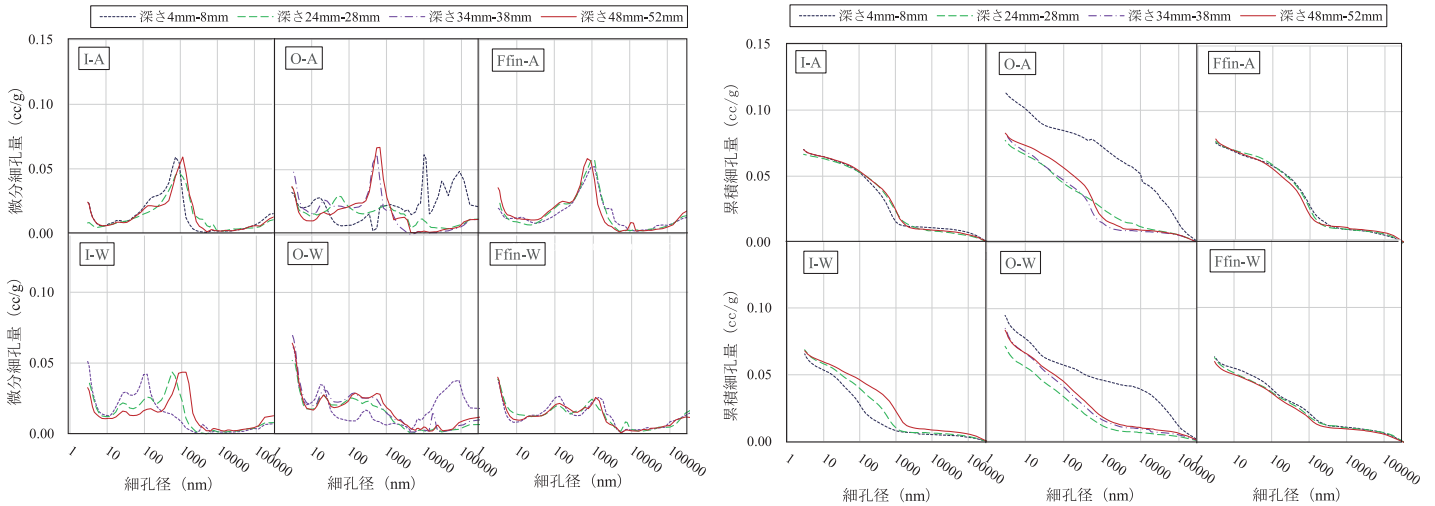


図 28 細孔構造測定結果

れ観察であるため、有効性は内視鏡の解像度、焦点距離に依存するが、微破壊で深さ方向の被害の可視化が可能となると考えられる。

測定時期は、振動ドリルの消費電力変化測定で削孔した孔を使用して実施するため材齢 14 日以降または健全部の圧縮強度 15N/mm² 以上に達した後とする。

写真 4 に、コア試験体採取後含水させ表面水を拭い、濡れ色の経時変化観察を行った結果を示す。O-A において濡れ色が残る結果であった。経時 60 分で濡れ色の残存部が明確になった。O-A は経時 60 分で上部約 30mm の範囲において濡れ色が残存した。

図 27 に、超音波伝播速度（透過法）測定結果を示す。O-A、O-W の上部約 30mm の範囲において、超音波伝播時間が大きい結果となった。それより深い範囲では、凍結なし同等の値で推移した。本試験に用いた試験体は、コアドリルによる削孔時消費電力変化測定時に採取したコアと同一で、濡れ色残存深さを測定した後に、試験体が乾いた状態で、超音波伝播速度を測定するため、同一の試験体で複数の試験を実施することができる。測定材齢は、コア採取以降となるため、材齢 14 日以降または圧縮強度 15N/mm² 以上に達した後とする。

写真 5 にコア試験体（φ100mm）の蛍光粉末によるひび割れ観察結果を示す。屋外で表面に凍結模様が発生した O-A において、表層から 20mm～30mm の範囲にひび割れが発生していることが確認でき、このひび割れが削孔時の消費電力が低く推移した範囲とおおよそ一致する結果となった。

図 28 に細孔径と累積細孔量の関係を示す。O-W、O-A において深さ 4mm-8mm の累積細孔量が大きいですが、34mm 以深の累積細孔量は被害を受けていない深さ 48mm-52mm と同

程度となった。初期凍害被害を受けていた O-A、O-W は粗大な径に細孔量が大きくなっている。深さは 4mm-8mm の結果では細孔の粗大化が確認でき、34mm 以深では空隙構造の粗大化は確認されず、濡れ色残存深さと細孔が粗大化している深さは一致する結果であった。

5.3 初期凍害範囲・深さ測定手法の提案

5.3.1 対象部位および前提条件

初期凍害は、適切な施工計画に基づいて実施されている場合は発生しない。そのため、寒冷地では基本的に適切な施工計画と初期養生が実施されており、初期凍害は発生していない。しかし、比較的温暖な地域における予期せぬ寒波によって初期凍害が発生する可能性がある。このため、被害範囲は限定的であり、表層部においてのみ発生している事例が多い。今回、初期凍害範囲・深さ測定手法の対象部位は、被害事例が多い土間コンクリートおよび屋上の防水押えコンクリート等を対象とした。前提条件は、被害部位と同一条件（使用したコンクリート、打込み日、部位、環境温度）となる健全部の測定実施とする。また、被害深さ測定によって深さ方向に被害が確認された場合は監理者との協議のうえ全面打ち直しまたは、被害部分の除去、補修・打直しとなると考えられる。これまで実験結果によって、凝結終結後の凍結であれば水分供給を行うことで、空気量を 4.5%程度確保されている場合、凍結なし同等まで強度回復する傾向があることを供試体レベルで確認した。しかし、実現場では被害箇所凍結時の凝結性状を把握することは難しいことから、強度回復に期待するのではなく、図 29 に示す流れにしたがって、強度増進停滞や組織の緩みが発生している範囲および深さを特定した上で、補修または打直しをすることになると考える。

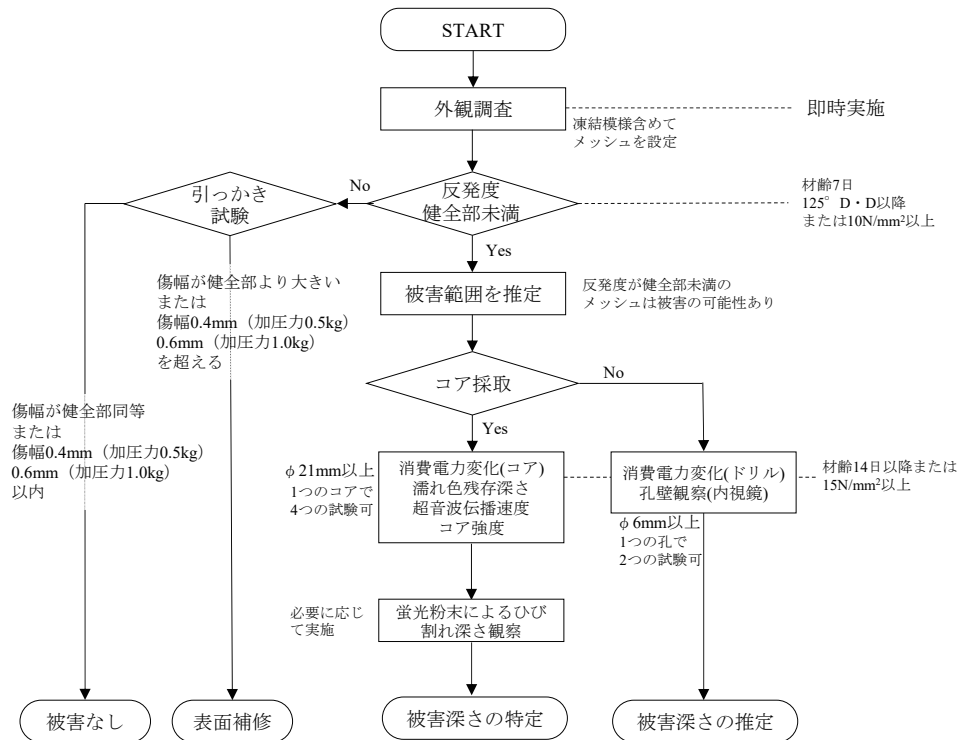


図 29 初期凍害範囲・深さ測定フロー (案)

5.3.2 初期凍害範囲・深さ調査の流れ

図 29 に初期凍害範囲・深さの測定フロー (案) を示す。本フロー (案) による場合、最初から破壊試験であるコア採取を行うのではなく、破壊試験に先立ち非破壊試験による調査を実施する。非破壊試験の情報を得て、被害深さを測定する際に微破壊試験を実施する。これまで、初期凍害の調査では凍害損傷の程度にかかわらず全範囲のコア採取や、はつりによる破壊調査が実施される場合があったが、破壊による損傷リスクを低減するとともに、調査コストの縮減が期待される。

第一段階として、目視で凍結痕が見られる場合は、確実に初期凍害を受けており、その後、水分供給を行っても強度回復は見込めない。凍結痕がなくとも、凍結痕の周辺は反発度による非破壊試験を行い、被害範囲を推定する。次に凍結痕および周囲を含めてメッシュ設定し、健全部と反発度を比較する。反発度は材齢 7 日 (積算温度 $125^{\circ} \text{D} \cdot \text{D}$) 以降かつ $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であれば、健全部に対する反発度比によって被害範囲の推定が可能と考える。反発度が健全部同等であったとしても、表面のみに、スケーリングのような被害が発生している可能性があるため、引っかき傷幅を測定する。引っかき傷幅は反発度と同様、材齢 7 日 (積算温度 $125^{\circ} \text{D} \cdot \text{D}$) 以降であれば、健全部と比較が可能となる。傷幅が健全部同等であれば被害なしと判断する。傷

幅が健全部より大きい場合は、かぶり、所要の出来形に影響のない範囲で、高圧洗浄、カップ掛けや研磨によって表面の脆弱部を取り除き、湿潤養生を継続または、必要に応じて表面補修等の対応になると考える。

反発度が健全部より低い範囲は深さ方向に初期凍害が発生している可能性が大きい。非破壊による被害深さ推定はコンクリート温度の深さ方向の測定によるものであるが、事前に熱電対等の準備が必要であり、測定位置は限定的であることから現実的ではない。そのため、深さ方向の被害程度の特定には設定した各メッシュに対して微破壊試験を実施する。測定は、健全部の測定を行ったうえで、被害の大きい範囲から順次測定する。

小径コアドリルによる被害深さ測定には、コア径 21mm 以上とし、コア削孔時の消費電力変化を測定し、採取したコアの濡れ色残存深さ、超音波伝播速度を測定し、最大値を被害深さ推定値とし、被害推定深さで深の圧縮強度の確認によって被害深さを特定する。上記 4 つの測定は、同一のコア試験体で実施することができる。必要に応じて別のコアを用いて蛍光塗料によるひび割れ発生深さを測定する。

振動ドリルによる測定は、圧縮強度試験を実施しないため、被害深さを広範囲にわたって推定する際や、深さ方向に被害が発生していないことを確認する場合に使用して、

被害深さを推定する。ドリルビットはφ6mm以上とし、削孔時の消費電力と削孔深さの関係について健全部と比較し、被害範囲を推定する。削孔によって生じた孔を活用し、工業用内視鏡によるひび割れ観察を実施し、それぞれの結果の最大値を被害深さの推定値とする。

5.4 まとめ

初期凍害事例が多い土間および防水押え等を対象とし、初期凍害範囲・深さ測定として有効になりうる測定方法について新規および既存の測定方法を選定した。試験体は実際の屋外環境で初期凍害を発生させ、各種測定方法の有効性、測定順序および測定材齢を検討し、初期凍害範囲・深さ測定手法の提案を行った。

6. 総括

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) セメントペーストは凍結前後で水和反応性に变化が認められず、モルタルおよびコンクリートは凝結終結以降の凍結では水分供給によって強度回復することが確認された。ただし、コンクリートでは混和剤による連行空気が少ない場合は強度増進が停滞した。
- (2) 凝結始発前後の凍結では骨材界面にひび割れが発生し強度低下の要因の一つであることを確認した。また、目視でひび割れや凍結痕が認められない場合でも強度低下が発生していることが確認された。
- (3) 実際の屋外環境で初期凍害を発生させた試験体を用いて、新規および既存の測定方法の有効性、測定順序および測定材齢を検討し、初期凍害範囲・深さ測定手法の提案を行った。

謝辞

本報告は、筆者が株式会社鴻池組において行った2017年から2021年までの研究を基に、2018年より室蘭工業大学大学院工学研究科博士後期課程工学専攻において、室蘭工業大学大学院教授濱幸雄先生のご指導の下で取りまとめた研究成果の概要報告である。

博士論文をまとめるにあたり、ご指導とご鞭撻を賜りました皆様に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2010
- 2) 古館茉由子，島影亮司，山下紘太郎，濱幸雄：コンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進停滞機構に関する研究，コンクリート構造物の補修補強，アップグレード論文報告集，Vol. 18，pp. 443-448，2018. 10
- 3) 谷口円，小池晶子，西祐宜：初期凍害を受けたモルタルの内部損傷観察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 223-224，2016. 08
- 4) 島影亮司：コンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進停滞機構に関する研究，室蘭工業大学大学院修士論文，2017
- 5) 浜幸雄，鎌田英治：無塩化・アルカリ型防凍性混和剤による初期凍害の防止効果，コンクリート工学論文集，Vol. 7，No. 1，pp. 113-122，1996. 1
- 6) 洪悦郎，鎌田英治，長島弘：寒中コンクリート，技術書院，p86，2000. 06
- 7) 小池晶子，谷口円，西祐宜，光石尚道：初期凍害がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 397-398，2014. 09
- 8) 前田哲宏，畑中重光，三島直生，犬飼利嗣：真空脱水処理を行ったコンクリートの初期凍害抑制効果について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 1，pp. 383-388，2003. 07
- 9) Richartz W. F. W. Locher：Zement-Kalk-Gips，Vol. 18，p. 449，1974
- 10) 青木優介，嶋野慶次，三好佑果，鈴木正志：硝酸銀溶液噴霧法による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，pp. 759-764，2008
- 11) 国崎翠，濱幸雄，崔亨吉，本間有也：初期凍害がコンクリートの凍結融解抵抗性および中性化抵抗性に及ぼす影響，日本建築学会北海道支部研究報告集(88)，pp. 9-12，2015. 6