

論文 凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートのひび割れ密度の深さ方向分布

齋藤 憲寿^{*1}・加賀谷 誠^{*2}

要旨: かぶりコンクリートの品質は構造物の耐久性を左右するため重要であり、耐凍害性確保のためにはかぶり部の深さ方向の劣化程度を把握する必要がある。本研究は、凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートについてひび割れ密度の深さ方向分布を計測し、鉄筋間隙通過により発生する材料分離との関連性を検討したものである。その結果、凍結融解試験で適切な耐凍害性が認められたコンクリートでも配筋条件が厳しい鉄筋間隙を通過させて締固めた場合、材料分離が発生するとかぶりコンクリートの耐凍害性が損なわれる場合があること、かぶりコンクリートの耐凍害性をひび割れ密度で評価することによって凍害深さの一指標として活用できる可能性があることを示した。

キーワード: かぶりコンクリート, 凍害深さ, ひび割れ密度, 配筋量, 材料分離, 振動締固め

1. はじめに

コンクリート構造物において、かぶりコンクリートの品質は構造物の耐久性を左右するためこれを評価することは重要である。耐凍害性確保のために、凍結融解作用を受けたかぶり部の深さ方向の劣化程度を評価する必要があるが、深さ方向の定量的な評価は難しく、診断方法の確立が望まれている。また、施工中において配筋条件が異なる鉄筋間隙通過時に発生するコンクリートの材料分離と凍結融解作用を受けたかぶり部の劣化程度との関係について検討した研究成果が少ないため、データを蓄積する必要がある。

本研究は、コンクリート内部に発生する微細ひび割れに着目し、凍結融解作用を受けた角柱供試体から小径コアを採取することによってひび割れ密度の深さ方向分布を計測した。また、鉄筋間隙を通過させたコンクリート供試体を製造し、適切な耐凍害性が認められたコンクリートが鉄筋間隙通過により材料分離が発生した場合、凍結融解作用を受けたかぶり部の劣化が生じるか否か、ひび割れ密度の深さ方向分布との関連性に基いて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料は、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、細骨材として混合砂(表乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 3.45%, 粗粒率 2.74)、粗骨材として碎石(表乾密度 2.67g/cm³, 吸水率 1.09%, 粗粒率 6.60)、天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤である。表-1 にコンクリートの配合を示す。単位水量を一定にし、水セメント比 55% および 65% のコンクリートを容量 50 リットルの強制練りミキサを使用して 90 秒間練り混ぜを行った。そして、JIS A 1101 および JIS A 1128 に準じてスランプおよび空気量試験を行った後、フレッシ

ュコンクリートの性能試験として振動締固めによる間隙通過試験ならびにブリーディング試験を行った。

2.2 間隙通過試験と材料分離程度の測定

試験装置として高流動コンクリートの間隙通過試験に用いるボックス形充てん装置を使用し、かぶりを 70mm とした。用いた振動機はフレキシブル内部振動機(振動数 180Hz, 棒径 31mm)であり、配筋条件を変えて間隙通過試験を行った。図-1 に試験装置の概略を示す。充てん装置の配筋条件であるランク 3~1 (R3~R1) は、R3 は配筋が無い場合、R2 は通常の場合、R1 は厳しい場合に相当する。試験前に投入するコンクリートの質量を計量するため、B 室側から観察するあらかじめ定めた高さで充てん装置の底面積の積から求まる体積に配合上の単位容積質量を乗じて投入するコンクリートの質量を求めた。そして、コンクリートを A 室に投入し、これらの配筋条件を用いて振動締固めによりコンクリートを A 室から B 室へ流動させた。締固めにあたっては内部振動機を A 室の仕切りゲートの近傍に挿入し、B 室へ流動させたコンクリートの充てん高さがあらかじめ定めた高さとなるまで締固めを行った。また、それまでに経過した時間を振動締固め時間として計測した。

締固めの判定は透明アクリル板を通して目視により、B 室のコンクリートの高さがあらかじめ定めた高さ達した時点判定基準として行われた。締固め終了後、充てん高さを測定して充てん率(=締固められたコンクリートの単位容積質量/配合上の単位容積質量×100(%))を算出したところ、充てん率は 100% 程度となることから、目視判定において十分な締固めが得られたと判断される。締固め後には A, B 室それぞれから採取した同容積の試料について 5mm ふるいを用いて洗い分析試験を行い、材料分離程度(粗骨材とモルタルの分離程度、以下 S_g とする)を式(1)

*1 秋田大学大学院 工学資源学研究科技術部技術職員 (正会員)

*2 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE (kg/m ³)
					W	C	S	G	
20	8±1	6±1	55	45.3	172	313	785	977	0.188
			65	47.3	172	265	810	992	0.159

表-2 供試体の作製条件

配合名	W/C (%)	養生方法	供試体の形状
A55	55	気中養生14日	ボックス形供試体 角柱供試体
A65	65	気中養生14日	角柱供試体
W65	65	標準養生28日	角柱供試体

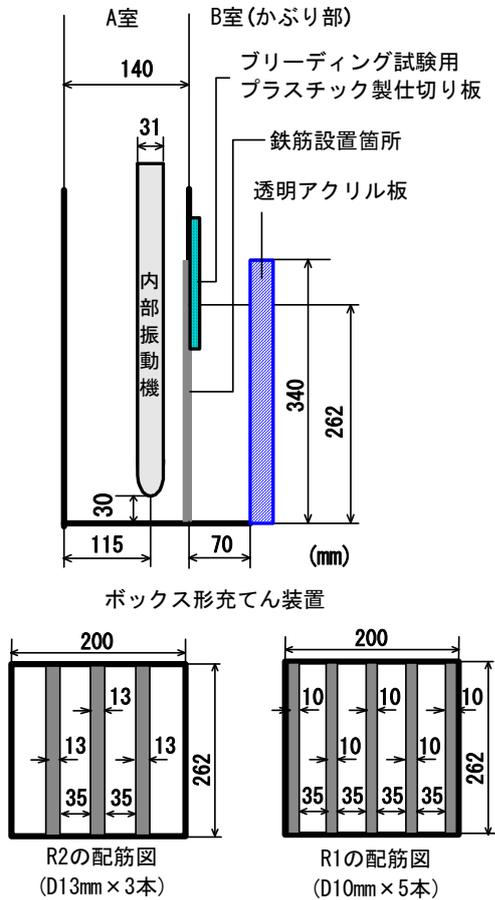


図-1 試験装置および配筋配置の概略

で評価した。これは配合上で求められる粗骨材とコンクリートの質量比を基準として、A室とB室から採取したコンクリートの粗骨材とコンクリートの質量比の差が百分率でどの程度あるか示したものである。材料分離程度が大きいほどA室側の鉄筋近傍に粗骨材が多く残留していることを示している。

$$S_g = \frac{(G/C)_A - (G/C)_B}{(G/C)_0} \times 100 \quad (1)$$

S_g : 材料分離程度(%)

(G/C)_A : A室の粗骨材表乾質量と
A室のコンクリートの質量比

(G/C)_B : B室の粗骨材表乾質量と
B室のコンクリートの質量比

(G/C)₀ : 配合の単位粗骨材量と
コンクリートの単位容積質量の比

2.3 ブリーディング試験方法

A室およびB室のブリーディング量の違いを測定するため、間隙通過試験に用いたボックス形充てん装置を用いてブリーディング試験を行った。A室およびB室のコンクリート上面のブリーディング水が締固め後に混ざらないようにあらかじめコンクリート上面から30mmの深さまで厚さ1mmのプラスチック製の仕切り板を鉄筋部分へ取り付け、せき板との間をコーキングした。配筋条件をR3~R1として2.2節と同様に締固めを行い、A室およびB室のブリーディング水を採取した。なお、このように仕切り板をA室とB室の境界に設置したのは、ブリーディング水の多くが型わくせき板とコンクリートの間から上昇するため、鉄筋間隙上部をプラスチック板で閉塞することによりA室およびB室上面に上昇したブリーディング水を分取しようと試みたものである。

2.4 供試体の作製

表-2に供試体の作製条件を示す。供試体は角柱供試体(100×100×400mm)およびボックス形充てん装置と内側寸法が等しい供試体(210×200×262mm, 以下、ボックス形供試体とする)を作製した。養生方法は温度20±3℃, 湿度60±20%の実験室内にて5日間型枠養生後、脱型を行い、材齢14日まで実験室内に放置した気中養生と標準養生の2パターンである。なお、角柱供試体は水セメント比の異なる2配合と2種類の養生方法を組み合わせた場合とし、ボックス形供試体は水セメント比55%の1配合として間隙通過試験と同様に締固めて気中養生を行った。

2.5 小径コアの採取とひび割れ密度の算出方法

角柱供試体は凍結融解0サイクルを含めた相対動弾性係数がおおよそ85, 75, 65%となる凍結融解サイクル終了後に側面中央部分から直径25mm, 長さ50mmの小径コアを等間隔に12本(ひび割れ観察用6本, 圧縮強度試験用6本)採取した。ボックス形供試体は凍結融解試験前にB室の透明アクリル板に接していた側面上部から水平に鉄筋間隙

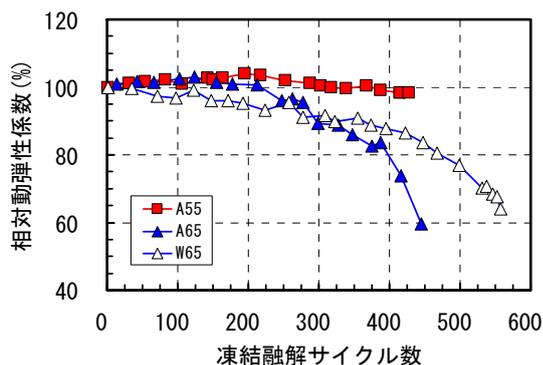


図-4 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

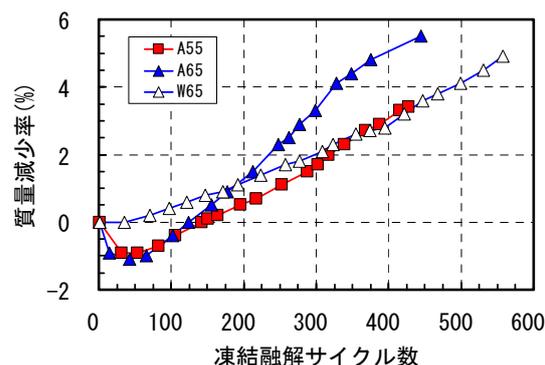


図-5 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

を通過し、A室へ向かって深さ方向に1段4本として3段から計12本（ひび割れ観察用6本、圧縮強度試験用6本）の小径コアを採取した。そして、コンクリートのひび割れ状況を簡易に測定するため、凍結融解試験終了後の小径コアの側面の幅10mm、長さ50mmを研磨して観察面を作製した。ひび割れの測定方法はASTM C457-71（リニアトラバース法）を参考に、測線上を横切るひび割れ本数をカウントし、ひび割れ密度を測線長1mmあたりのひび割れ本数として式(2)にて算出した。また、圧縮強度試験はJIS A 1108に準じて行い、凍結融解試験終了後に採取した小径コアの圧縮強度を凍結融解0サイクルの圧縮強度で除した圧縮強度比を求めた。

$$\text{ひび割れ密度 (本/mm)} = \frac{\text{ひび割れ総本数 (本)}}{\text{測線長 (mm)}} \quad (2)$$

2.6 凍結融解試験方法

気中養生は材齢14日、標準養生は材齢28日にJIS A 1148（A法）に準じて凍結融解試験を行った。角柱供試体は水セメント比65%のコンクリートについて、相対動弾性係数が60%となるまでの過程におけるひび割れ密度の増加傾向を知るため、300サイクル以後も相対動弾性係数が60%となるまで試験を継続した。ボックス形供試体は材齢13日に小径コアを採取し、材齢14日に小径コアをスリーブ内に設置して水を供給後、300サイクルまで試験を行った。

2.7 透気試験方法

本研究で用いた透気試験方法は笠井、湯浅ら²⁾によって改良が加えられたドリル削孔法とし、凍結融解サイクル終了後の角柱供試体の端部（100×100×100mm）を切断して透気試験用の供試体とした。供試体の側面中央部を削孔（直径6mm、長さ50mm）してドリル孔をシリコンで密封し、孔内を減圧した後、圧力が特定の間に戻るまでに要する時間を計測して簡易透気速度を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 凍結融解試験結果

図-4に凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。水セメント比が異なる場合ではW/C=65%のコンクリートの相対動弾性係数の低下が著しく、実際の構造物の場合に相当する5日間型枠養生を行った気中養生の場合では材齢14日で試験を開始したため、213サイクル以降急激に低下し、445サイクルでの相対動弾性係数が59.6%となった。28日間水中養生を行った標準養生の場合、材齢28日で試験を開始したため、相対動弾性係数の低下がこれより緩速となった。W/C=55%の気中養生ではその低下はわずかであった。

図-5に凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を示す。水セメント比が異なる場合ではW/C=55%よりもW/C=65%で質量減少率が増加し、スケーリングが多く見られた。また、養生条件が異なる場合、気中養生の養生期間中は乾燥状態（温度20±3℃、湿度60±20%）であるため、凍結融解試験開始直後は供試体の吸水によって質量減少率が低下傾向を示した。しかし、50サイクル以降は標準養生と比べて気中養生の質量減少率の増加が顕著であることから、乾燥開始材齢が早いほど凍結融解作用によるスケーリングが生じていることがわかる。そのため、適切な水セメント比の選定と初期の湿潤養生期間の確保が耐凍害性の向上に重要である。なお、いずれの配合、養生条件においても、300サイクル終了時の相対動弾性係数は90%以上、質量減少率は3%以下であって、適切な耐凍害性が認められたコンクリートであることがわかった。

3.2 小径コアのひび割れ密度の測定結果と凍結融解試験結果との対応関係

凍結融解作用による供試体内部方向への劣化程度を把握するため、凍結融解試験終了後に角柱供試体側面から小径コアを採取し、ひび割れ密度の測定を実施した。図-6に凍結融解サイクル数とコア全長に渡って計測したひび割れ密度の関係を示す。凍結融解0サイクルのひび割れ密度はいずれの水セメント比および養生条件においても0.009～0.012本/mmの範囲にあり、凍結融解サイクル数の増加に伴い養生条件や配合ごとにひび割れ密度の増加が

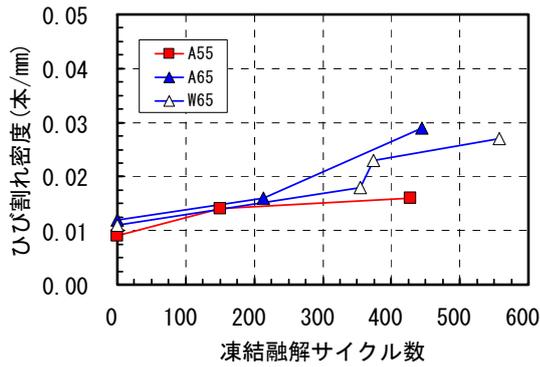


図-6 凍結融解サイクル数とひび割れ密度の関係

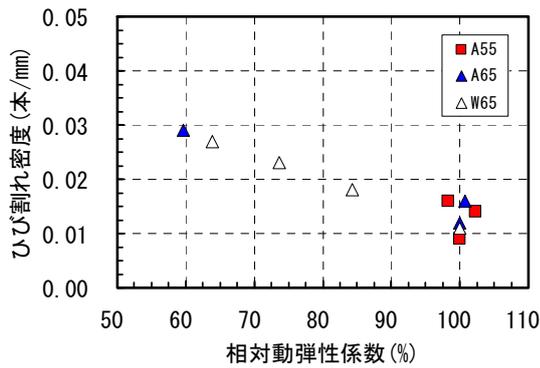


図-7 相対動弾性係数とひび割れ密度の関係

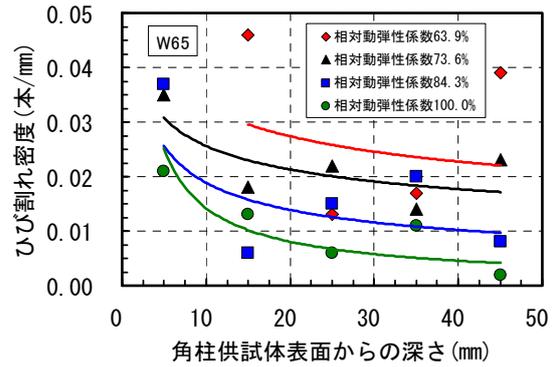


図-8 角柱供試体側面部分の表面からの深さとひび割れ密度の関係

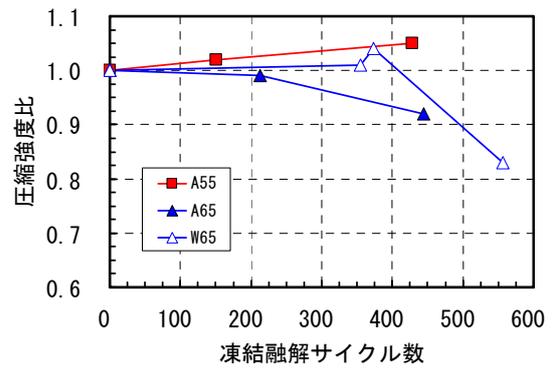


図-9 凍結融解サイクル数と小径コアの圧縮強度比の関係

顕著となった。また、水セメント比が異なる場合、気中養生では、200 サイクルあたりを過ぎてから $W/C=55\%$ よりも $W/C=65\%$ のひび割れ密度の増加が顕著となった。この傾向は、図-4 および図-5 に示した凍結融解試験結果と同様の傾向であるため、小径コアのひび割れ密度は、凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化程度を示す指標になり得ると思われる。

図-7 に凍結融解試験で得られた角柱供試体の相対動弾性係数と小径コアのひび割れ密度の関係を示す。相対動弾性係数の低下が顕著に認められなかった $W/C=55\%$ 、気中養生の場合を除けば、相対動弾性係数の低下に伴いひび割れ密度が増加している。この傾向は角柱供試体断面を測定した研究³⁾とほぼ一致している。相対動弾性係数の低下は、耐凍害性の低下を示しており、たとえば、相対動弾性係数の下限値を 60% とすれば対応するひび割れ密度はおよそ 0.025 本/mm となるが、耐凍害性評価のための限界値については、さらにデータを蓄積して求める必要がある。

図-8 に標準養生を行った $W/C=65\%$ のコンクリートの角柱供試体から採取した小径コアで測定した角柱供試体側面部分の表面からの深さとひび割れ密度の関係を示す。ここでは深さ方向のひび割れ密度を求めるため、角柱供試体側面部分の表面から深さ 10mm 毎に小径コアのひび割れ密度を測定し、その値を深さ方向のひび割れ密度分布として示した。図中に示された 1 個のデータは、6 本のコアの

測定値の平均であり、曲線は最小二乗法により求めた。凍結融解サイクル数が増加するとセメントモルタル部分のひび割れ本数の明らかな増加が認められたが、コアの径が小さいため測定区間の粗骨材の存在により測定値の変動が大きくなった。しかし、小径コアのひび割れ密度は表層部に近いほど大きく、内部に進むにつれて一定の値に漸近する傾向にあり、凍結融解サイクル数が増加して相対動弾性係数が低下するほどひび割れ密度が全体的に増加する傾向が認められた。したがって、算定されたひび割れ密度の値は最大で 0.04 本/mm と小さいが、劣化程度を示す指標になり得ると思われる。

図-9 に凍結融解サイクル数と小径コアの圧縮強度比の関係を示す。水セメント比が異なる場合、 $W/C=55\%$ では凍結融解サイクル数が進んでも圧縮強度比の低下は見られなかったが、 $W/C=65\%$ では 213 および 380 サイクル以降に低下している。また、養生条件が異なる場合では標準養生と比較して気中養生の圧縮強度比の低下が早く、図-6 に示した凍結融解サイクル数と小径コアのひび割れ密度の関係と同じ傾向となった。このことから、小径コアで測定したひび割れ密度は、耐凍害性を評価する指標となる可能性が認められた。

近年、コンクリートの表層組織の緻密性を簡易に評価するため透気性⁴⁾に関する研究が行われている。本研究では凍結融解作用を受けたコンクリートのひび割れ密度と比

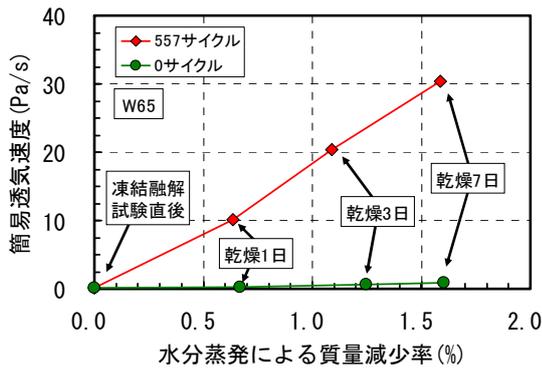


図-10 供試体の水分蒸発による質量減少率と簡易透気試験の関係

較するため、ドリル削孔法による簡易透気速度の検討を試みた。図-10に一例として凍結融解0サイクルおよび557サイクル後の供試体の水分蒸発による質量減少率と簡易透気速度の関係を示す。凍結融解試験を行っていない0サイクルでは水分蒸発による簡易透気速度の変化はほとんど見られなかった。しかし、凍結融解557サイクル後のコンクリートの簡易透気速度は直線的に増加し、凍結融解試験直後と乾燥7日後では試験値の違いが非常に大きくなることわかる。これは、試験直後では凍結融解作用により発生した多数のひび割れに満たされていた水が通気を妨げたことが原因と考えられ、透気性は劣化したコンクリートの乾燥の程度に大きく影響を受けることがわかった。したがって、コンクリートの乾燥の影響を受けずに内部の劣化状況を測定できるひび割れ密度の方が劣化程度の評価に効果的であると考えられる。

3.3 間隙通過試験による材料分離程度と凍結融解作用を受けたかぶり部のひび割れ密度分布

図-11にボックス形充てん装置を用いたフレッシュコンクリートの間隙通過試験において、配筋条件を変化させた場合の振動締め時間および粗骨材とモルタルの材料分離程度の関係を示す。フレッシュコンクリートが振動締め時に鉄筋間隙を通過する時、配筋が密な程振動締め時間および粗骨材とモルタルの材料分離程度が増加することがわかる。これは配筋量が増加すると鉄筋の間隔が狭くなるため、コンクリート中に発生するせん断力が増加し、粗骨材粒子がA室鉄筋近傍で閉塞して流動障害を起こしたと考えられる。

鉄筋間隙を通過して締めめたかぶりコンクリートのブリーディング量を求めるため、A室およびB室の境界を表面から深さ30mmまでプラスチック板で遮ったボックス形充てん装置を用いてブリーディング試験を実施した。図-12に配筋条件とB室とA室のブリーディング量の差の関係を示す。図よりR3は無筋であるためブリーディング量の差は無いが、鉄筋間隙を通過することによってB室(かぶり部)ではA室よりもブリーディング量が多くなってお

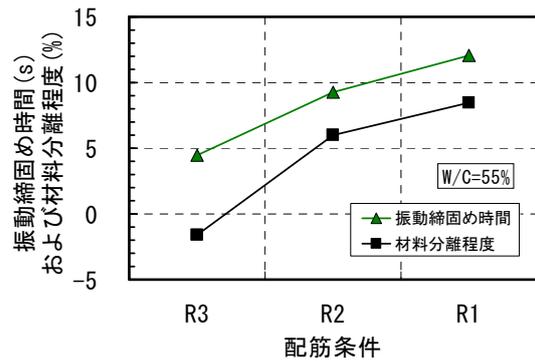


図-11 配筋条件と振動締め時間および材料分離程度の関係

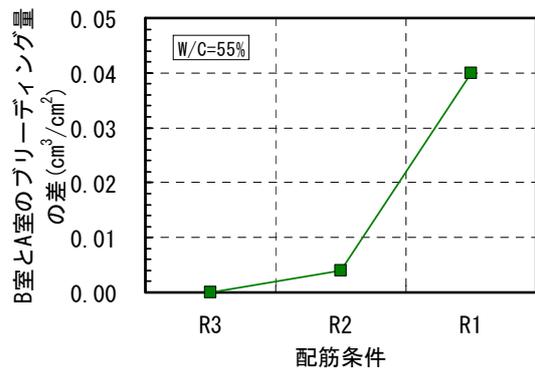


図-12 配筋条件とB室とA室のブリーディング量の差の関係

り、配筋条件が厳しくなる程これが顕著となった。これは鉄筋間隙通過時にせん断力がフレッシュコンクリートに作用し、A室鉄筋近傍での粗骨材粒子の閉塞によってB室(かぶり部)に単位粗骨材量が少なく、単位水量が多いコンクリートが充てんされる⁵⁾ことが原因と考えられ、図-11に示した粗骨材とモルタルの材料分離程度の変化傾向と関連している。

鉄筋間隙を通過して締めめたかぶりコンクリートが凍結融解作用を受けた場合のかぶり表面から深さ方向のひび割れ密度分布を求めるため、材齢13日で小径コアを採取し、凍結融解試験を行ってひび割れ密度を測定した。なお、試験に用いた小径コアは側面のペーストが切除されているため、通常よりも厳しい条件下での凍結融解試験結果である。図-13に配筋条件R1のかぶり部表面からの深さと凍結融解0, 150, 300サイクルのひび割れ密度の関係を示す。凍結融解0サイクルの場合、深さ方向によらずひび割れ密度はほぼ一定の値を示すが、凍結融解サイクル数が150および300サイクルと増加するとB室(かぶり部)のひび割れ密度が増加しており、特に表層部分の増加が顕著となった。また、鉄筋位置より内部に進むにつれて一定の値に漸近しており、A室ではサイクル数による変化が小さくなった。図-14に凍結融解300サイクル終了時の配筋条件R3~R1のかぶり部表面からの深さと採取した小径コアのひ

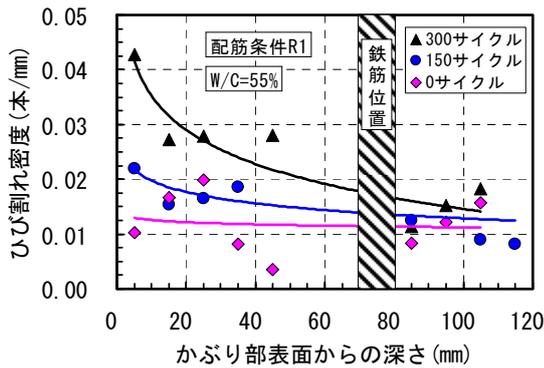


図-13 かぶり部表面からの深さと凍結融解0, 150, 300サイクルのひび割れ密度の関係

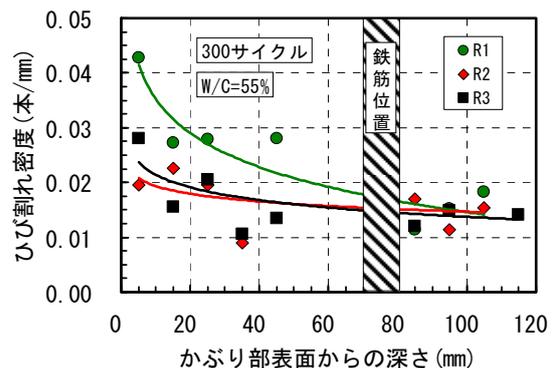


図-14 凍結融解300サイクル後の配筋条件R3~R1のかぶり部表面からの深さとひび割れ密度の関係

ひび割れ密度の関係を示す。B室（かぶり部）においてひび割れ密度は鉄筋位置より内部のA室と比較して増加傾向を示しており、B室（かぶり部）の平均的なひび割れ密度はR3=0.018本/mm, R2=0.021本/mm, R1=0.025本/mmと配筋条件が厳しいほどより顕著となることからわかる。また、配筋条件によらずかぶり表面から深さ方向の鉄筋位置より内部ではひび割れ密度が一定の値に漸近している。したがって、R3~R1で示される配筋条件が厳しくなるほど鉄筋間隙を通過した適切な耐凍害性を有するコンクリートが凍結融解作用を受けた場合、かぶりコンクリートのひび割れ密度は、凍結融解サイクル数が進むほど、かぶり部の表層部分ほど増加し、それが弱点となる場合があることがわかった。この傾向は、鉄筋間隙を通過したコンクリートの粗骨材とモルタルの材料分離程度やブリーディング量の変化傾向と対応しており、ひび割れ密度のかぶり表面からの深さ方向分布は、図-7に示した相対動弾性係数とひび割れ密度の関係を併せて考えると凍害深さの指標となる可能性があると思われる。

4. 結論

凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートについて、ひび割れ密度の深さ方向分布と鉄筋間隙通過による材料分離との関連性を検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 凍結融解試験終了後の角柱供試体側面から採取した小径コアのひび割れ密度は表層部ほど大きく、内部に進むにつれて減少して一定の値に漸近する傾向にあった。また、凍結融解サイクル数が増加して相対動弾性係数や圧縮強度比が低下するほどひび割れ密度が増加する傾向が認められた。したがって、ひび割れ密度は耐凍害性を評価する指標となる可能性があるかと判断された。
- (2) 配筋条件が厳しい鉄筋間隙を通過した適切な耐凍害性を有するコンクリートのかぶり部から採取した小径コアの凍結融解試験を行った結果、かぶりコンクリ

ートのひび割れ密度は、凍結融解サイクル数が進むほど、かぶり部の表層部分ほど増加し、それが弱点となり得ることが認められた。これは、鉄筋間隙を通過することによってB室（かぶり部）のブリーディング量がA室よりも多く発生し、配筋条件が厳しくなるほどこれが顕著となることと関連があると考えられる。

- (3) かぶりコンクリートのひび割れ密度は鉄筋間隙を通過したコンクリートの粗骨材とモルタルの材料分離程度やB室（かぶり部）とA室のブリーディング量の差の変化傾向と対応しており、相対動弾性係数とひび割れ密度の関係を併せて考えると、ひび割れ密度のかぶり表面からの深さ方向分布は凍害深さの指標となる可能性があると思われる。

参考文献

- 1) 辻正哲, 坂井秀紀: ブリーディングの発生機構に関する基礎的研究, セメント技術年報, Vol.37, pp.229-232, 1983
- 2) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 簡易な試験による構造体コンクリートの品質評価の試み, セメント・コンクリート, No.559, pp.20-28, 1993
- 3) 松村宇, 桂修, 吉野利幸: 凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.563, pp.9-13, 2003
- 4) 家辺麻里子, 秋山仁志, 蔵重勲, 岸利治: 表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱供試体の表層品質詳細把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.659-664, 2011
- 5) 小沼寛享, 大野誠彦, 城門義嗣, 加賀谷誠: 普通コンクリートの締固め性能とかぶり部の凍結融解抵抗性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.891-896, 2007