

論文 コンクリートの材料分離低減によるかぶり部の耐凍害性改善に関する研究

齋藤 憲寿^{*1}・小野寺 紀裕^{*2}・加賀谷 誠^{*3}

要旨: かぶりコンクリートの耐凍害性は構造物の耐久性を左右するため、施工に伴う品質変動がこれに及ぼす影響を解明する必要がある。本研究は、細骨材率を増加させたコンクリートを配筋条件の異なる鉄筋間隙を通過させ、十分に締め固めた時のかぶり部の耐凍害性をコア供試体の圧縮強度に基づいて検討した。その結果、細骨材率を増加することによってスランプは減少するが振動締め時間は減少し、粗骨材とモルタルの材料分離やかぶり部のブリーディング量が低減すること、凍結融解試験終了後の圧縮強度比が増加することを示し、かぶり部の耐凍害性が改善されることを示した。

キーワード: 鉄筋間隙通過性, 材料分離, ブリーディング量, コア供試体の圧縮強度, 耐凍害性, 振動締め

1. はじめに

かぶりコンクリートの品質は外的要因から鉄筋を保護するために重要であり、コンクリート構造物の耐久性を左右するものである。そのため、振動締め作業など施工時に発生するコンクリートの品質変動を明らかにして硬化後のかぶりコンクリートの品質を確保する必要がある。しかし、かぶりコンクリートの耐凍害性について検討した研究成果^{1)~3)}は比較的少なく、材料分離とかぶり部の耐凍害性の関係に関する知見が十分とは言い難い。

本研究では、細骨材率を増加させたコンクリートについて配筋条件の異なる鉄筋間隙を通過させ、十分に締め固めた時の締め固め時間とモルタルと粗骨材の材料分離程度を測定した。そして、硬化後、かぶり部より採取したコア供試体の凍結融解試験を行い、コア供試体の圧縮強度に基づいてかぶりコンクリートの耐凍害性を検討した。さらに、ブリーディング試験を行い、鉄筋間隙を通過したかぶりコンクリートの耐凍害性低下の原因について検討を加えた。

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 2.57g/cm³, 吸水率 3.24%, 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。単位水量および単位セメント量を一定にし、細骨材率を増加させた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。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に、振動締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、配筋条件を変えて振動締め試験を行った。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し、これらの条件を用いて振動締めによりコンクリートを A 室から B 室へ流動させた。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算定した高さとなるまで締め固めを行い、それまでに経過した時間を振動締め時間として計測した。ここで、充てん高さと充てん装置の底面積および配合上の単位容積質量の積は投入するコンクリートの質量と考えられることから、試験前に投入するコンクリートの質量を計量し、これを底面積と配合上の単位容積質量で除して充てん高さを算定した。そして、振動締め時間から単位容積累積加速度(以下 AU とする)を既往の研究⁴⁾に示した式(1)によって求め、鉄筋間隙通過抵抗性(以下 Sr とする)を式(2)で評価した。

締め固め判定は、透明アクリル板を通して目視により行った。計測後に充てん高さを測定し、充てん率を算出したところ、100%程度となることから目視判定において十分な締め固めが得られたと判断した。また、締め固め後に A, B 室それぞれから採取した同容積の試料について 5mm ふり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 Sg とする)を式(3)で評価した。

*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

*3 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

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE (kg/m ³)
			W	C	S	G	
20	55	41.3	180	327	696	1034	0.196
		45.3			769	962	
		49.3			832	892	

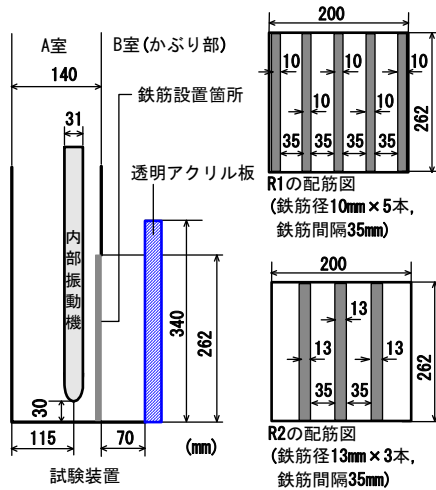


図-1 試験装置および配筋配置の概略

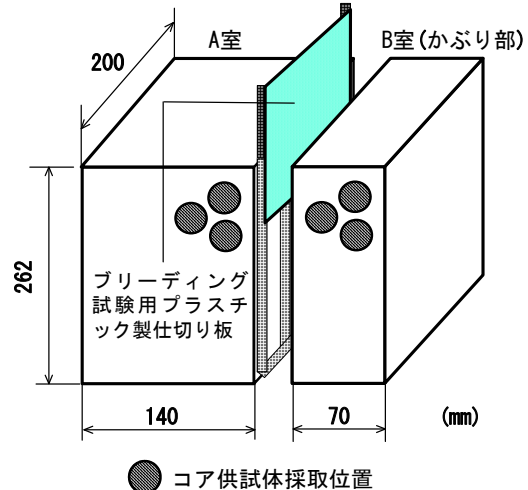


図-2 コア供試体の採取位置

$$AU = 6t - 11 \quad (1)$$

AU : 単位容積累積加速度(m/s²)
t : 振動締め時間(s)

$$Sr = \frac{AU1 - AU3}{AU1} \times 100 \quad (2)$$

Sr : 鉄筋間隙通過抵抗性(%)
AU1 : 配筋条件 R1 における
単位容積累積加速度
AU3 : 配筋条件 R3 における
単位容積累積加速度

$$Sg = \frac{(G/C)_A - (G/C)_B}{(G/C)_0} \times 100 \quad (3)$$

Sg : 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。締め後、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(図-2)、せき板との間をコーキングした。配筋条件を厳しい場合のR1として2.2節と同様に締めを行い、A室およびB室のブリーディング水を採取した。また、規格試験であるJIS A 1123に準じた方法についてもブリーディング量を求めた。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⁵⁾、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ことによる。

2.4 コンクリート供試体の製造方法とコア供試体採取方法

ボックス形充てん装置の内側寸法と等しい木製型枠を作製し、間隙通過試験を行った。温度20±3℃、湿度60±20%の室内にて5日間型枠養生後、脱型を行い、材齢13日まで実験室内に放置した。材齢13日で供試体側面のA室およびB室の上部(図-2)から直径25mm、高さ200mmのコア供試体を採取した。そして、コンクリートカッターを用いて長さ200mmのコア供試体の左端部、中央部、右端部からそれぞれ高さ50mmのコア供試体を採取した。

標準円柱供試体(直径100mm、高さ200mm)と角柱供試体(100×100×400mm)は製造後、28日間水中養生した。

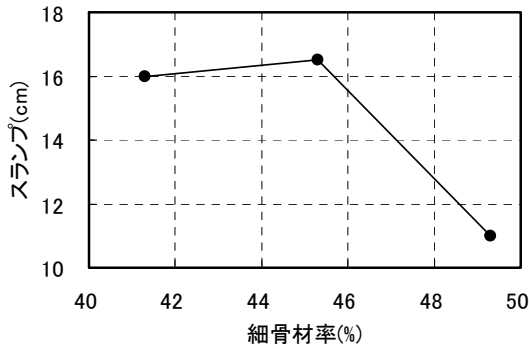


図-3 細骨材率とスランプの関係

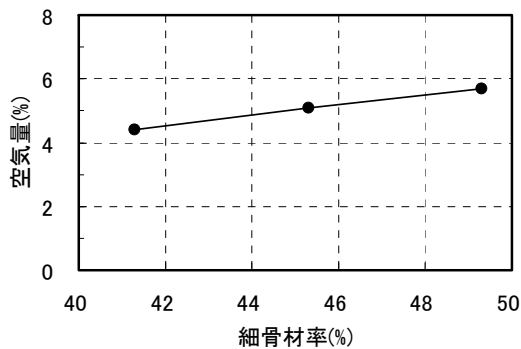


図-4 細骨材率と空気量の関係

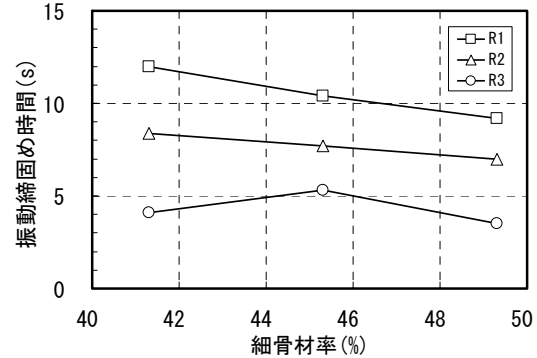


図-5 細骨材率と振動締め時間の関係

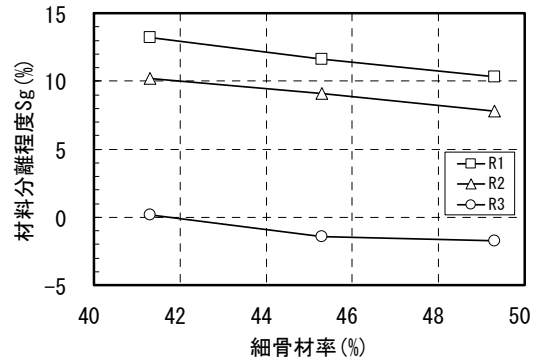


図-6 細骨材率と材料分離程度の関係

そして、角柱供試体の側面部の面積を4等分し、その中心部から直径25mm、高さ50mmのコア供試体を4本採取して圧縮強度試験に用いた。

2.5 圧縮強度および凍結融解試験方法

圧縮強度試験をJIS A 1108に準じて行った。コア供試体の強度試験を凍結融解試験150サイクル終了後と凍結融解試験前である材齢14日に行い、両者の比を圧縮強度比として算出した。一般にコンクリートの耐凍害性の指標として相対動弾性係数を用いるが、かぶりコンクリートでの測定が不可能であった。そこで、凍結融解作用による微細ひび割れの増加がコンクリートの圧縮強度の低下につながると判断し、本研究ではコア供試体の圧縮強度比を耐凍害性の指標とした。材齢14日でコア供試体をスリーブ内に設置し、水を供給した状態でJIS A 1148 A法に準じて凍結融解試験を行った。コア供試体の凍結融解サイクル数は試験中にコンクリート組織が崩壊することを考慮して150サイクルまでとし、角柱供試体では300サイクルまで行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性能試験結果

図-3および4にコンクリートの細骨材率とスランプおよび空気量の関係を示す。水セメント比を55%の一定とした場合、スランプは $s/a=45.3\%$ の16.5cmをピークに、細骨材率の増加に伴って減少する傾向を示した。空気量は細骨

材率の増加に伴って増加する傾向にあり、 $s/a=41.3\%$ と $s/a=49.3\%$ の空気量の差は1.3%となった。スランプの減少は細骨材率を増加させることで細骨材の微粒分が増加し、コンクリートの粘性が高くなったことで流動性が低下したことに起因すると考えられる。空気量の増加は、一般に認められているように細骨材率の増加に伴う空気連行能力が大きい0.15~0.6mm粒子の増加によるもの⁹⁾と考えられる。

図-5および6にボックス形充てん装置を用いた間隙通過試験において、配筋条件を変化させた場合の細骨材率と十分締め固まるまでの振動締め時間および材料分離程度 S_g の関係を示す。ここで、振動締め時間とは、コンクリートとせき板との接触面に現れるセメントペーストの線が算定した充てん高さに到達するまでの振動時間である。図-5より細骨材率を増加させることによって振動締め時間が短く、配筋条件が厳しいほどこれが顕著であり、特にR1について $s/a=41.3\%$ と 49.3% を比較すると、3.2秒短縮していることがわかる。一般に配筋条件が厳しい場合、スランプを増加させて対処するが、細骨材率の増加によりスランプが減少しても振動締め時間が短くなる傾向が認められた。フレッシュコンクリートが鉄筋間隙を通過する容易さは、スランプ試験の結果に対応しない場合があると思われる。また、振動締めによりコンクリートをかぶり部へ充てんする際、配筋条件がR3からR1へ厳しくなる

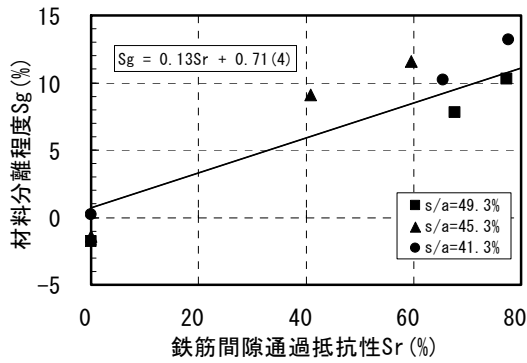


図-7 鉄筋間隙通過抵抗性 Sr と材料分離程度 Sg の関係

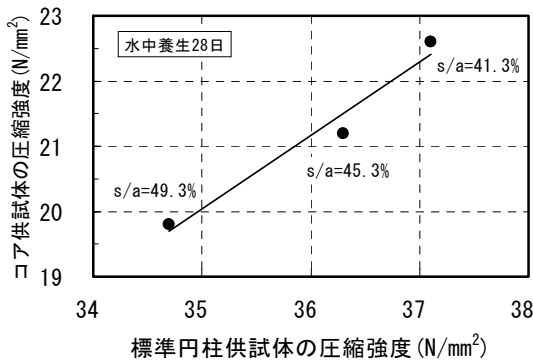


図-8 標準円柱供試体とコア供試体の圧縮強度の関係

ほど振動締め時間が長くなるのは、鉄筋によって流動障害が発生することによると考えられる。

図-6より細骨材率が増加すると材料分離程度 Sg は振動締め時間と同様に減少する傾向を示す。これは、細骨材率が小さい場合、鉄筋間隙を通過する際に粗骨材粒子の閉塞が発生し、B室(かぶり部)には単位粗骨材量が少なく、単位水量が多くいコンクリートが充てんされている¹⁾こと、細骨材率の増加によりコンクリートの粘性が増加するとともに、単位粗骨材量が減少することで鉄筋間隙を通過しやすくなったことによると考えられる。以上の結果から、細骨材率を増加することによりコンクリートが鉄筋間隙を通過して十分締め固まるまでの振動締め時間および材料分離程度(粗骨材とモルタルの分離程度)が低減できることが明らかとなった。ここで、材料分離程度とは、A室からB室へコンクリートが変形・流動するのに伴う粗骨材の分離程度を評価しており、この値が大きいほど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、かぶりコンクリートでモルタルが多いことを示す指標である。また、既往の研究⁴⁾によると、振動締め時間が短くなるほど十分な締め固めに要するエネルギーが減少することから、細骨材率の増加は締め固め性能の向上に寄与するものと考えられる。

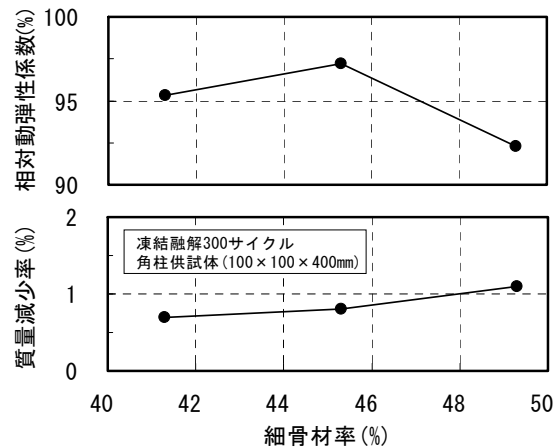


図-9 細骨材率と凍結融解試験終了時の相対動弾性係数および質量減少率の関係

図-7に鉄筋間隙通過抵抗性 Sr と材料分離程度 Sg の関係を示す。鉄筋間隙通過抵抗性は鉄筋間隙を通過させるために必要な相対的エネルギーの割合を示しており、振動締め時間により 2.2 節で示した(1)および(2)式から求めた。また、既往の研究⁴⁾により得られた両者の実験式を図-7の式(4)で示した。図より細骨材率の違いに関わらず鉄筋間隙通過抵抗性が大きいほど材料分離程度が大きくなり、実験式付近にプロットされることがわかる。以上の結果から、鉄筋間隙を通過したコンクリートの振動締めに要する時間を計測することによってこれによって生ずる粗骨材とモルタルの材料分離程度をおよそ予測できることが検証された。

3.2 圧縮強度および凍結融解試験結果

図-8に細骨材率を増加させたコンクリートの水中養生28日における標準円柱供試体と角柱供試体(100×100×400mm)から採取したコア供試体の圧縮強度の関係を示す。なお、本研究では小径コア供試体を4本、標準円柱供試体を3本の平均として圧縮強度を算出した。図より両供試体ともに細骨材率が増加すると圧縮強度が減少することがわかる。これは、細骨材率の増加に伴って空気量が増加したことによると考えられる。また、両供試体の圧縮強度の間には直線関係が認められることから、コア供試体の圧縮強度を測定することによりコンクリートの品質を相対的に評価することが可能であると考えられる。

図-9にJIS A 1148 A法により凍結融解試験を行った角柱供試体の細骨材率と相対動弾性係数および質量減少率の関係を示す。図より細骨材率を増加させても大きな変化は見られず、凍結融解試験300サイクル後の相対動弾性係数は92~97%、質量減少率は0.7~1.1%であり耐凍害性を有していると判断される。

3.3 かぶりコンクリートの耐凍害性の検討

図-10に凍結融解試験0サイクルのコンクリートの細骨

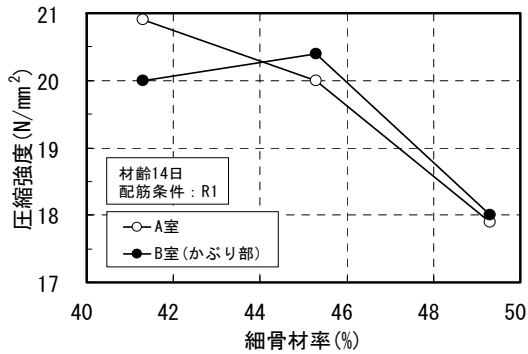


図-10 細骨材率と凍結融解試験0サイクルの圧縮強度の関係

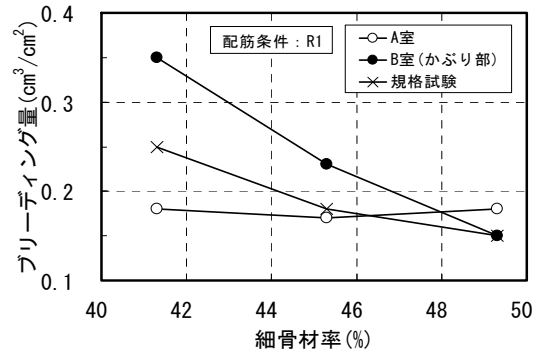


図-12 細骨材率とかぶりコンクリートのブリーディング量の関係

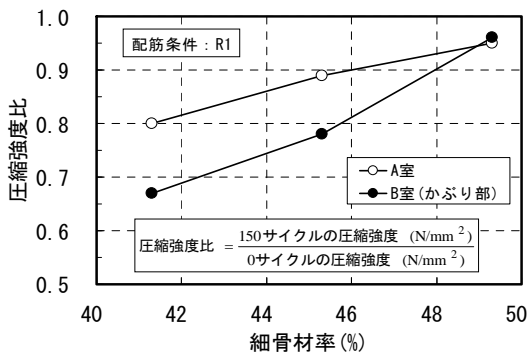


図-11 細骨材率と凍結融解試験終了後のかぶりコンクリートの圧縮強度比の関係

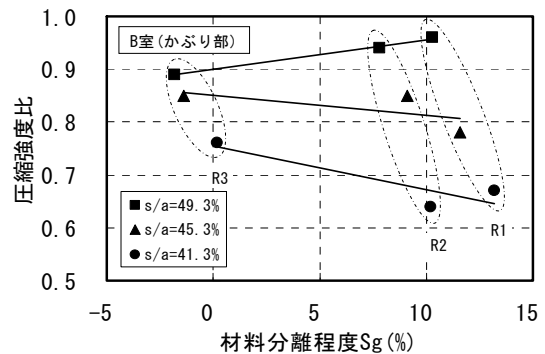


図-13 材料分離程度と凍結融解試験終了後のかぶりコンクリートの圧縮強度比の関係

材率とA室およびB室から採取したコア供試体の圧縮強度の関係は配筋条件 R1 の場合について示す。図より圧縮強度は細骨材率が増加するほど減少しており、図-8と同様の結果となった。また、s/a=41.3%のB室の強度はA室と比べて0.9N/mm²小さくなった。これは、材料分離程度が大きい場合、B室(かぶり部)には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ているため¹⁾、硬化後には空隙が多く存在することによると考えられる。

図-11にコンクリートの細骨材率とA室およびB室から採取したコア供試体の凍結融解試験150サイクル終了後の圧縮強度比の関係を示す。圧縮強度比とは、凍結融解試験150サイクルの圧縮強度を凍結融解試験0サイクルの圧縮強度で除したものであり、耐凍害性を示す一指標と考えた。図より細骨材率が小さいとA室に比べてB室の圧縮強度比は小さくその差が大きい。細骨材率が増加すると強度比は増加してA室とB室との差が小さくなる傾向を示した。そして細骨材率が49.3%では、A室とB室の強度比は同程度で0.95となった。このことは、配筋条件が厳しい場合、細骨材率の小さいコンクリートを用いるとかぶりコンクリートの耐凍害性が低下する可能性を示しており、細骨材率を増加することによってスランプは小さくなるが、その低下を抑制できることを示していると考えられる。

また、鉄筋間隙を通過した細骨材率の異なるかぶりコンクリートによるコア供試体の凍結融解試験結果と図-9のJIS規格に準じて行った角柱供試体の凍結融解試験結果は異なる傾向を示していることがわかった。これは、JIS規格に準じた凍結融解試験で相対動弾性係数の低下の小さいコンクリートを用いたとしても、コア供試体は表面がセメントペーストで覆われていないために凍結融解作用を大きく受けたと考えられる。しかし、鉄筋間隙を通過した際に粗骨材とモルタルの材料分離が発生するとかぶり部の耐凍害性が低下する可能性があることを示しており、鉄筋間隙を通過した締固め性能の試験がコンクリート構造物の耐凍害性を評価する上で重要となることが明らかとなった。

鉄筋間隙を通過したかぶりコンクリートの耐凍害性低下の原因を考察するため、ブリーディング試験を実施した。図-12にボックス形充てん装置を用いたA室およびB室でのブリーディング試験とJIS A 1123に準じたブリーディング試験の結果から細骨材率とブリーディング量の関係を示す。図より細骨材率41.3%のコンクリートが鉄筋間隙を通過することによってA室は規格試験よりも少なく、B室は規格試験よりも多くなる傾向を示し、A室とB室の差はおおよそ2倍となった。しかし、細骨材率を増加すること

によって B 室のブリーディング量は減少し、49.3%では A 室や規格試験結果と同程度となった。既往の研究⁷⁾によるとブリーディング量とコンクリートの透気性に相関が認められていることから、B 室(かぶり部)においてブリーディング量の多くなる細骨材率の小さいコンクリートでは、透気性が増加し、これが凍結融解試験後の圧縮強度比の低下をもたらしたと考えられる。図-11 および 12 の結果はかぶりコンクリートにおける耐凍害性とブリーディング量の関連性を明確に示しており、高耐久性のかぶりコンクリートを得るためには鉄筋間隙通過後のブリーディング量の限界値を今後さらに検討する必要がある。

図-13 に材料分離程度 S_g と凍結融解試験 150 サイクルを終了したかぶりコンクリートコアの圧縮強度比の関係を示す。図より細骨材率が小さい場合、材料分離程度の増加に伴って圧縮強度比の低下が認められる。また、配筋条件が厳しくなるほど細骨材率の違いによる圧縮強度比の差が顕著となった。これは、配筋条件が厳しい場合、材料分離程度が同じであっても細骨材率の大小によってかぶり部でのブリーディング量が大きく異なることと関連すると思われる。したがって、配筋条件が厳しい場合、細骨材率を増加することによってかぶりコンクリートの耐凍害性を改善できるものと思われる。

4. 結論

細骨材率を増加させたコンクリートについて配筋条件の異なる鉄筋間隙を A 室から B 室(かぶり部)に通過させ、十分に締め固めた時の締固め性能とかぶり部の耐凍害性について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 細骨材率を増加させることによってコンクリートのスランプは減少し、空気量は増加した。また、鉄筋間隙を通過して十分締め固めるための振動締固め時間や材料分離程度は低減した。
- (2) 28 日間標準養生を行った円柱供試体と角柱供試体から採取したコア供試体の圧縮強度には直線関係が認められ、細骨材率の増加により強度は低下した。直線関係が存在することから、かぶり部から採取したコア供試体の圧縮強度を測定することによりコンクリートの品質を相対的に評価することが可能であると考えられる。

- (3) 細骨材率の小さいコンクリートが配筋条件の厳しい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は A 室より多くなる傾向を示した。
- (4) 凍結融解試験で相対動弾性係数の低下の小さいコンクリートを用いても、配筋条件の厳しい鉄筋間隙を通過して十分締め固めた際にかぶり部でブリーディング量が多くなると、凍結融解作用によってかぶりコンクリートが劣化する場合がある。
- (5) 細骨材率を増加させることによって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が生じて、かぶりコンクリートのブリーディング量が少なく、かつ凍結融解試験終了後の圧縮強度比が低下しないことから、耐凍害性を改善させることが可能であると思われる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 陳曉煒, 加賀谷誠, 小沼寛享: 普通コンクリートの振動締固め性能の測定に基づくかぶり部の耐凍害性能, 第 63 回土木学会年次学術講演概要集(DVD-ROM), V-292, 2008
- 3) 小野寺紀裕, 齋藤憲寿, 加賀谷誠: 細骨材率の異なるかぶりコンクリートの小径コアを用いた凍結融解抵抗性の評価に関する基礎研究, 日本素材物性学会平成 22 年度年会講演要旨集, pp64-67, 2010
- 4) 加賀谷誠, 大野誠彦: ボックス形充てん装置を用いた振動加速度計測による普通コンクリートの締固め性能評価, 土木学会論文集, No.788/V-67, pp.1-11, 2005
- 5) 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
- 6) Concrete Containing Air Entraining Agents—Symposium, ACI, June, 1944
- 7) 松崎晋一郎, 吉田亮, 岸利治, 魚本健人: 単位水量を変えた角柱供試体における高さ方向の透気性変化に関する一考察, 第 36 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集(CD-ROM), V-35, 2009